

УДК 621.91.01

DOI 10.18698/0536-1044-2017-9-54-64

Моделирование срезаемого слоя при резьбофрезеровании

О.В. Мальков, А.С. Карельский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Modelling the Cut Layer When Thread Milling

O.V. Malkov, A.S. Karelskiy

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

@ e-mail: olma70@mail.ru, sakarel@yandex.ru

i На основе геометрического моделирования процесса резьбофрезерования в программе Autodesk Inventor 2014 (в студенческой версии) получена форма срезаемого слоя при обработке однодисковым инструментом. Разработан алгоритм геометрического моделирования формы срезаемого слоя при фрезеровании внутренней резьбы по кинематической схеме с параллельными осями резьбы и инструмента. Выполнено исследование полученной формы срезаемого слоя, которое показало, что она содержит четыре характерных вида сечения на разных участках вдоль угла контакта. Установлено влияние конструктивных параметров резьбы и рабочего инструмента, а также подачи на зуб, на угол контакта фрезы с заготовкой и на максимальное значение площади сечения срезаемого слоя. Выведена зависимость площади сечения срезаемого слоя от указанных параметров. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для оценки силы, возникающей при резьбофрезеровании.

Ключевые слова: модель резьбофрезерования, обработка внутренней резьбы, сечение срезаемого слоя, угол контакта, моделирование процесса резьбофрезерования

i Using geometric modelling of the thread milling process in Autodesk Inventor 2014 (student version), the shape of the cut layer when machining with a single-disk tool is obtained. An algorithm is developed for geometrical modelling of the shape for the cut layer when milling internal threads using the kinematic scheme with parallel axes of the thread and the tool. An analysis of the obtained cut layer shape is performed. It is shown that the shape is characterized by four distinctive cross sections at different areas along the engagement angle. The influence of the thread and the tool design parameters and the feed per tooth on the engagement angle between the cutter and the workpiece, and on the maximum value of the cross-sectional area of the cut layer is established. The relationship between the cross-sectional area of the cut layer and the above-mentioned parameters is deduced. The results of the analysis can be used for estimating the force occurring when thread milling.

Keywords: thread milling model, machining of internal threads, cross section of the cut layer, engagement angle, thread milling simulation

Резьбовые соединения широко применяют в деталях авиационного, космического, транспортного и общего машиностроения. Среди всей гаммы обрабатываемых материалов особо следу-

ет выделить труднообрабатываемые сплавы на титановой и никелевой основе, которые существенно усложняют разрабатываемый технологический процесс изготовления деталей и накла-

дывают определенные ограничения на параметры технологического процесса и конструкции инструментов.

При нарезании резьбы в отверстиях заготовок из труднообрабатываемых материалов обычно используют комплект метчиков (преимущественно на слесарных операциях). В этом случае сложно достичь высокой производительности, стабильности и качества нарезаемой резьбы. При машинной обработке существует большая вероятность поломки метчика, что ведет к трудностям его извлечения с учетом того, что нарезание резьбы — конечная операция.

Хорошей альтернативой нарезанию резьбы метчиком служит резбозерование, которое является более гибким и универсальным, а иногда единственным или наиболее производительным способом обработки резьбового профиля. Однако, помимо значительных преимуществ, резбозерование имеет такую особенность, как ограничение по длине нарезаемой резьбы (обычно до двух диаметров), связанное с радиальным отгибом инструмента при обработке, что влечет возможность его поломки и снижение точности, а также необходимость применения станков, обеспечивающих одновременное перемещение инструмента по трем координатам.

С учетом достоинств и ограничения процесса, а также роста доли использования резбозерования при обработке резьбы в труднообрабатываемых материалах необходимо провести исследования по оценке прочности конструкций резьбовых фрез, оптимизации геометрических и конструктивных параметров резбозерующей части инструмента и определения зон его устойчивой работы, ограничивающих параметры режима обработки. Как и обычное фрезерование, резбозерование характеризуется прерывистостью процесса резания и мгновенно изменяющейся толщиной срезаемого слоя, что приводит к возникновению колебаний силы резания, неблагоприятно сказывается на обработанных поверхностях и снижает точность получаемой резьбы. В связи с этим необходимо исследовать геометрические параметры срезаемого слоя, непосредственно влияющие на силу резания при резбозеровании.

Анализ литературных источников [1–15] показал, что элементы сечения срезаемого слоя участвуют в расчете силы резания при фрезеровании и, в частности при резбозеровании. Для вычисления составляющих силы резания

при резбозеровании применяют теоретические [9], теоретико-эмпирические [1–6] и эмпирические [7, 10] зависимости. Теоретические зависимости являются громоздкими и сложными в расчетах, эмпирические, ограниченные условиями проведения эксперимента, как правило, выполняют мультипликативными. Теоретико-экспериментальные зависимости, получившие наибольшее распространение за рубежом [1–5], предполагают проведение небольшого числа уточняющих опытов для определения экспериментальных коэффициентов, используемых в зависимостях, которые связывают составляющие силы резания с параметрами или площадью сечения срезаемого слоя [1–6].

Цель работы — определение формы и параметров срезаемого слоя при резбозеровании путем геометрического моделирования в программном комплексе Autodesk Inventor 2014. Научной новизной и практической ценностью является разработанная модель определения максимальной площади сечения срезаемого слоя, позволяющая оценить силу резания

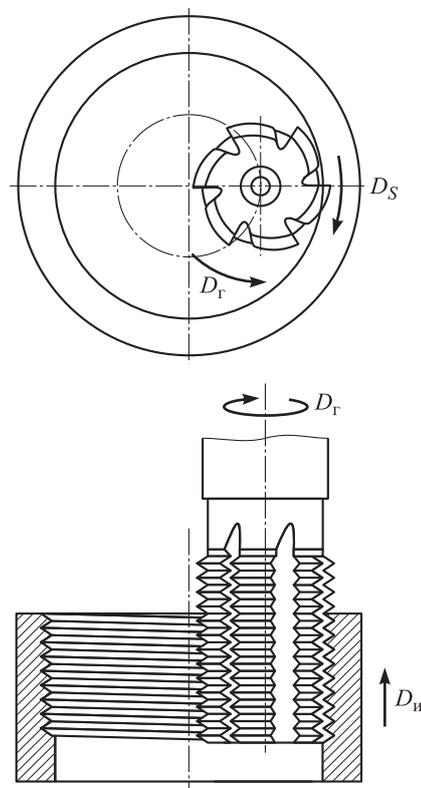


Рис. 1. Фрезерование внутренней резьбы гребенчатой фрезой:
 D_r — главное движение вращения; D_s — движение окружной подачи; D_n — дополнительное движение вдоль оси

при резьбофрезеровании и задать граничные условия при оценке прочности конструкции инструмента в программах САЕ.

В отличие от обработки наружной резьбы фрезерование внутренней резьбы протекает в более сложных условиях, что связано с большим углом контакта фрезы и заготовки и ухудшением отвода стружки и подвода смазочно-охлаждающей жидкости из-за совпадения кривизны инструментальной и обрабатываемой поверхностей. Поэтому будем моделировать срезаемый припуск при обработке внутренней резьбы по типовой кинематической схеме, представленной на рис. 1.

Обработка осуществляется при одновременном движении окружной подачи D_s и дополнительном движении вдоль оси нарезаемой резьбы D_n , которые кинематически связаны между собой для обеспечения шага резьбы и могут выполняться заготовкой или фрезой.

Проведенный обзор литературы позволил выявить зависимости, связывающие окружную силу резания при фрезеровании с параметрами и площадью сечения срезаемого слоя (табл. 1) [11–15].

Анализ зависимостей, приведенных в табл. 1, показал, что они учитывают приложенную к площади сечения срезаемого слоя удель-

Таблица 1

Расчетные зависимости силы резания при фрезеровании

Литературный источник	Зависимости	Параметры зависимостей
[11]	$F_{cmz} = Ak_c;$ $k_c = \frac{k_{c1.1}}{h_m^m}$	F_{cmz} — средняя сила резания на режущую кромку, Н; A — поперечное сечение стружки, мм ² ; k_c — удельная сила резания, Н/мм ² ; $k_{c1.1}$ — удельная сила резания при $A = 1$ мм ² ; h_m — средняя толщина срезаемого слоя, мм; m — увеличение удельной силы резания
[12]	$P' = pf;$ $p = \frac{A}{a_x^n}$	P' — окружная сила, действующая на один зуб, Н; p — удельная сила резания или сила, приходящаяся на единицу площади, Н/мм ² ; f — поперечное сечение среза, снимаемое зубом в данный момент, мм ² ; A — коэффициент, учитывающий условия работы и зависящий от свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров зуба фрезы и т. д.; a_x — текущая толщина среза, мм; n — показатель степени, характеризующий влияние a_x на p , $n < 1$
[13]	$P = pf;$ $p = Ca^{m_1}$	P — окружная сила, Н; p — удельная сила, Н/мм ² ; f — площадь поперечного сечения среза, соответствующего положению зуба, мм ² ; C — коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала, условий резания, геометрии и материала фрезы; a — толщина среза, мм; $m_1 \approx -0,3$ ($-0,2 \dots -0,4$) — величина, зависящая от обрабатываемого материала, затупления фрезы и смазочно-охлаждающего технологического средства
[14]	$p = \frac{P_z}{ab};$ $P_z = C_{pz} a^{y_p} b^{x_p};$ $x_p \approx 1;$ $p = \frac{C_{pz}}{a^{1-y_p}}$	p — удельная сила, кгс/мм ² ; P_z — окружная сила, кгс; a и b — толщина и ширина срезаемого слоя, мм; C_{pz} — коэффициент резания, зависящий от обрабатываемого материала; y_p, x_p — показатели степеней, зависящие от обрабатываемого материала
[15]	$P = pf_{cp}$	P — окружная сила, Н; p — удельная сила, Н/мм ² ; f_{cp} — среднее значение площади поперечного сечения срезаемого слоя, мм ²

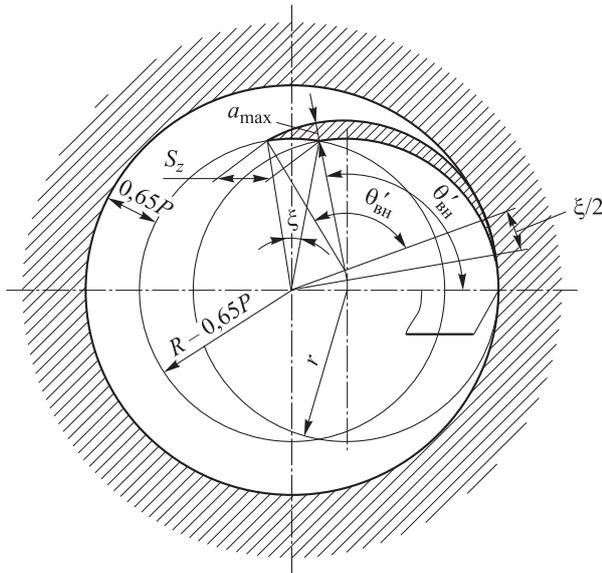


Рис. 2. Схема определения параметров срезаемого слоя:

R — номинальный радиус резьбы; r — радиус фрезы;
 P — шаг резьбы; ξ — угол смещения между двумя соседними положениями фрезы; S_z — подача на зуб;
 a_{max} — максимальная толщина срезаемого слоя;
 $\theta'_{вн}$ — угол контакта фрезы с заготовкой

ную силу резания, которая зависит от толщины срезаемого слоя и не зависит от его ширины. Влияние условий фрезерования, обрабатываемого и инструментального материалов учтено с помощью коэффициентов и показателей степеней, определенных экспериментально.

Логично предположить, что окружную силу при резбофрезеровании можно определить с использованием подобного подхода. Однако при резбофрезеровании сечение срезаемого слоя имеет более сложную конфигурацию [6, 7], поэтому проведем анализ формы и параметров сечения срезаемого слоя на основе моделирования этого процесса.

Выполнен обзор литературных источников, описывающих процесс резбофрезерования [8, 16]. На рис. 2 представлена типовая схема резбофрезерования, предложенная в работе [16], где срезаемый слой формируется пересечением двух последовательных положений фрезы.

Угол контакта фрезы с заготовкой вычисляется по формуле

$$\cos \theta'_{вн} = 1 - \frac{0,65P(2R - 0,65P)}{2r(R - r)}$$

Это выражение позволяет сделать вывод, что угол контакта не зависит от параметров режима обработки, в частности от подачи на зуб S_z и типа фрезерования (встречного или по-

путного), а зависит от геометрических параметров резьбы и фрезы.

В работе [7] показано, что угол контакта инструмента с заготовкой больше, чем таковой для представленной схемы (см. рис. 2). При моделировании установлено, что в рамках реализованного плана вычислительного эксперимента превышение расчетного значения угла контакта, согласно рис. 2, достигает 27 %. Объясняется это тем, что в работах [8, 16] не учтено смещение фрезы вдоль оси отверстия за один ее оборот, что также приводит к несимметричности срезаемого слоя и увеличению угла контакта.

На рис. 3 представлена схема моделирования резбофрезерования дисковой фрезой согласно кинематической схеме (см. рис. 1) и расчетной схеме, представленной на рис. 2, при выполнении следующих условий:

- инструмент заменен диском, диаметр которого равен диаметру резбообразующей части фрезы $D_d = (2/3)D$ (D — номинальный наружный диаметр внутренней резьбы) [17], и с углом профиля 60° (см. рис. 3). Считаем, что зуб резбообразующей части фрезы спрофилирован так, чтобы при обработке обеспечивать требуемый угол профиля метрической резьбы [18];
- срезаемый слой является результатом двух последовательных дискретных положений диска через один его оборот. Центр каждого положения смещается дискретно после каждого оборота диска;
- подача на зуб S_z фрезы для диска представляет собой подачу на один оборот и отсчитывается по внутреннему диаметру резьбы D_1 ;
- внутренний диаметр отверстия $D_1 = D - 1,082P$ (ГОСТ 24705–2004).

Положение диска через один оборот относительно предыдущего смещается по радиусу винтовой траектории $e = (D - D_d)/2$.

При проецировании на плоскость xu смещение соседних положений диска относительно центра отверстия O (рис. 3, б) происходит на угол

$$\xi = \frac{S_z}{\pi D_1} 2\pi = \frac{2S_z}{D_1}$$

Проецируя винтовое смещение двух соседних положений диска на ось z (рис. 3, з), получим $\Delta z = P\xi/360^\circ$.

Угол β отличен от 60° , так как в сечении $B - B$ относительно центра второго положения O_2 линии сечения, формируемые при первом по-

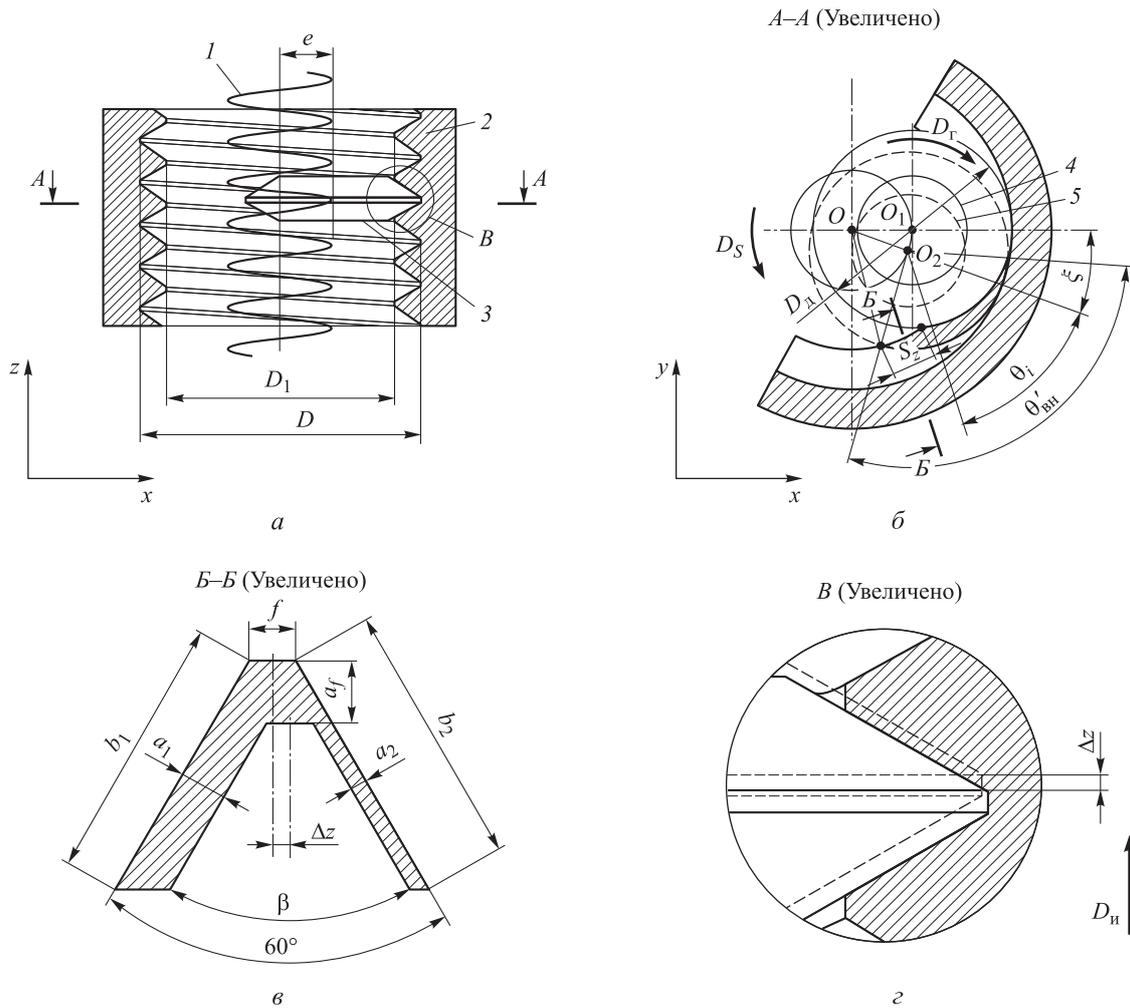


Рис. 3. Схема формирования срезаемого слоя:

a — модель резбобфрезерования (*1* — траектория оси диска; *2* — заготовка; *3* — диск); *б* — дискретное положение соседних положений диска (*4* — начальное положение; *5* — положение через один оборот; θ_i — текущее значение угла контакта); *в* — сечение срезаемого слоя; *г* — смещение диска вдоль оси *z*

ложении диска, являются криволинейными (рис. 3, в).

Предполагаемое сечение срезаемого слоя (см. рис. 3, в), имеющее несимметричную форму вследствие смещения диска на расстояние Δz , состоит из трех частей: верхней (фаски длиной f и толщиной a_f) и двух боковых со сторонами шириной b_1 , b_2 и толщиной a_1 , a_2 соответственно.

Параметризованная модель диска построена в САД-программе Autodesk Inventor 2014 (в студенческой версии) на основе последовательности операций, представленных в табл. 2.

На рис. 4 представлен результат моделирования срезаемого слоя с характерными формами его сечения на разных участках. Цифрами I, II, III и IV обозначены участки в пределах угла контакта срезаемого слоя с однотипной фор-

мой сечения. Сечения на рис. 4 увеличены для наглядного представления.

Сечение срезаемого слоя, имеющее форму «запятой» (рис. 4, а), — переменное по всему углу контакта $\theta'_{вн}$. Вершиной этого сечения является линия 1–2 длиной f . Сечение срезаемого слоя можно разделить на следующие угловые участки:

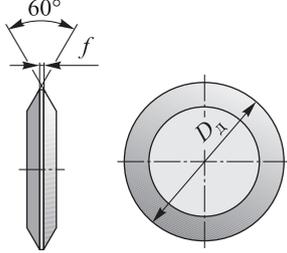
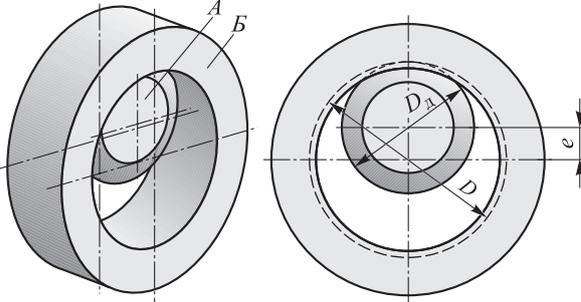
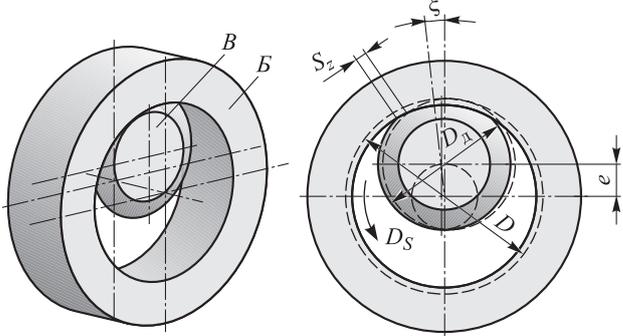
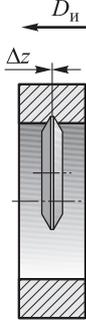
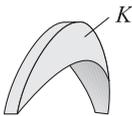
I — наименее протяженный длиной S_z с сечением, имеющим форму трапеции (рис. 4, б);

II — самый протяженный с сечением, представляющим собой разность двух трапеций с углами β (начального положения) и 60° (положения через один оборот) и похожим на букву «Л» (рис. 4, в);

III — элемент «хвостовой части» с сечением, также являющимся пересечением двух трапеций. Однако из-за роста высоты профиля от начального положения одна из сторон формы

Таблица 2

Последовательность операций построения модели

<p>1. Построение взаимного расположения диска и заготовки</p>	<p>1.1. Параметризованная модель диска</p> 	<p>1.2. Параметризованная модель резбифрезерования</p> 	
<p>2. Построение смещения диска</p>	<p>2.1. Смещение на угол ξ относительно оси отверстия</p> 	<p>2.2. Смещение вдоль оси z на расстояние Δz при повороте диска на угол ξ</p> 	
<p>3. Определение формы срезаемого слоя</p>	<p>3.1. $K = A \cap B$</p> 	<p>3.2. $M = B \cap C$</p> 	<p>3.3. $H = M \cap K$ (форма срезаемого слоя)</p> 

пропадает и остается сечение, напоминающее букву «Г» (рис. 4, з);

IV — завершающий элемент «хвостовой» части, сечение которого представляет собой трапецию (рис. 4, д) по той же причине, что и участок III, но с полностью удаленной фасочной частью.

Для дальнейшего построения зависимостей необходимо в каждом конкретном случае знать положение сечения максимальной площадью. Значения площадей сечений снимались с модели срезаемого слоя. На примере резьбы М30×3, диска диаметром $D_d = 20$ мм, фаски длиной $f = 0,1$ мм и подачи $S_z = 0,1$ мм/зуб построен график зависимости площади сечения срезаемого слоя от угла контакта с шагом 1° (рис. 5, а).

Угол контакта составил $68,5^\circ$, а сечение максимальной площадью расположено на расстоянии 35,3 % от вершины профиля (см. рис. 4, а, линия 1–2). Для подтверждения диапазона расположения максимального сечения построены еще четыре графика с шагом, равным 5° (рис. 5, б). Для представленных данных получено расположение сечения максимальной площадью на расстоянии 25...40 % от вершины сечения срезаемого слоя, что определяет диапазон, в котором следует в дальнейшем искать сечение максимальной площадью для сокращения времени на вычисления.

Для определения зависимостей угла контакта и площади сечения срезаемого слоя от параметров режима фрезерования и геометрических

параметров резьбы составлен план расчетного эксперимента. Варьировались пять параметров: подача $S_z = 0,05; 0,075; 0,1; 0,125; 0,15$ мм/зуб; номинальный диаметр резьбы $D = 42; 52; 62; 72; 82$ мм; диаметр диска $D_d = 15, 20, 25, 30, 35$ мм; шаг резьбы $P = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0$ мм; длина фаски вершины профиля диска $f = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ мм.

На рис. 6 показаны зависимости угла контакта и длины хвостовой части (см. рис. 4, а, участки III–IV) от параметров режима фрезерования, резьбы и диска при $D = 52$ мм; $S_z = 0,1$ мм; $D_d = 35$ мм; $P = 1,5$ мм; $f = 0,2$ мм.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 6, позволяет сделать следующие выводы:

- подача на зуб незначительно влияет на угол контакта и длину хвостовой части, что

соответствует схеме, приведенной на рис. 2, согласно которой $\theta'_{\text{вн}}$ не зависит от параметров режима обработки. Однако показанное на графике увеличение угла контакта с ростом S_z обусловлено смещением диска вдоль оси z на расстояние Δz ;

- диаметр и шаг резьбы оказывают существенное влияние на угол контакта, так как входят в формулу определения внутреннего диаметра отверстия D_1 , который в свою очередь отвечает за значения угла ξ и смещения Δz ;

- удлинение фаски f не влияет на угол контакта, так как является параметром профиля;

- существует такое значение диаметра диска, при котором угол контакта становится минимальным, а длина хвостовой части продолжает увеличиваться с ростом D_d .

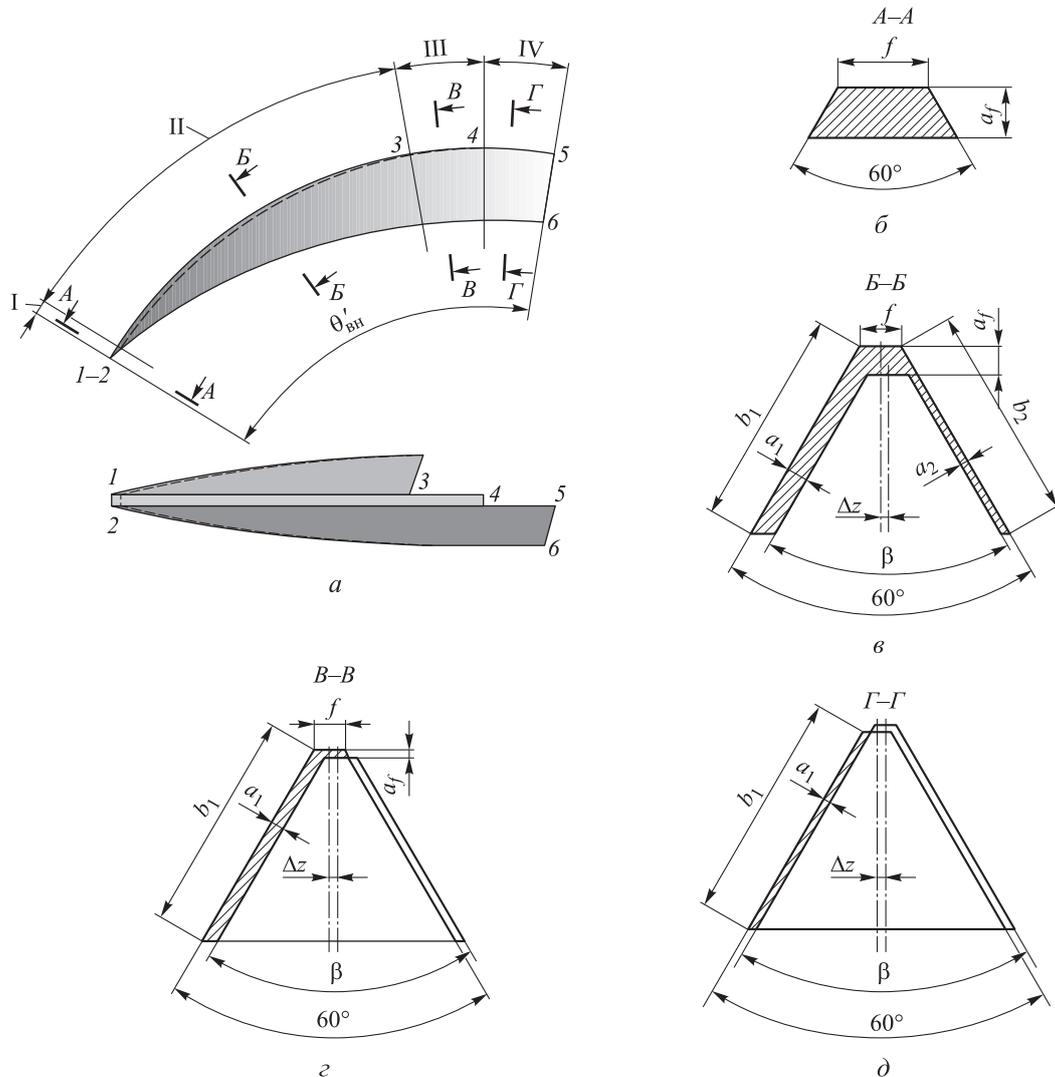


Рис. 4. Модель срезаемого слоя:

а — форма срезаемого слоя; б — сечение на участке I; в — сечение на участке II; г — сечение на участке III; д — сечение на участке IV

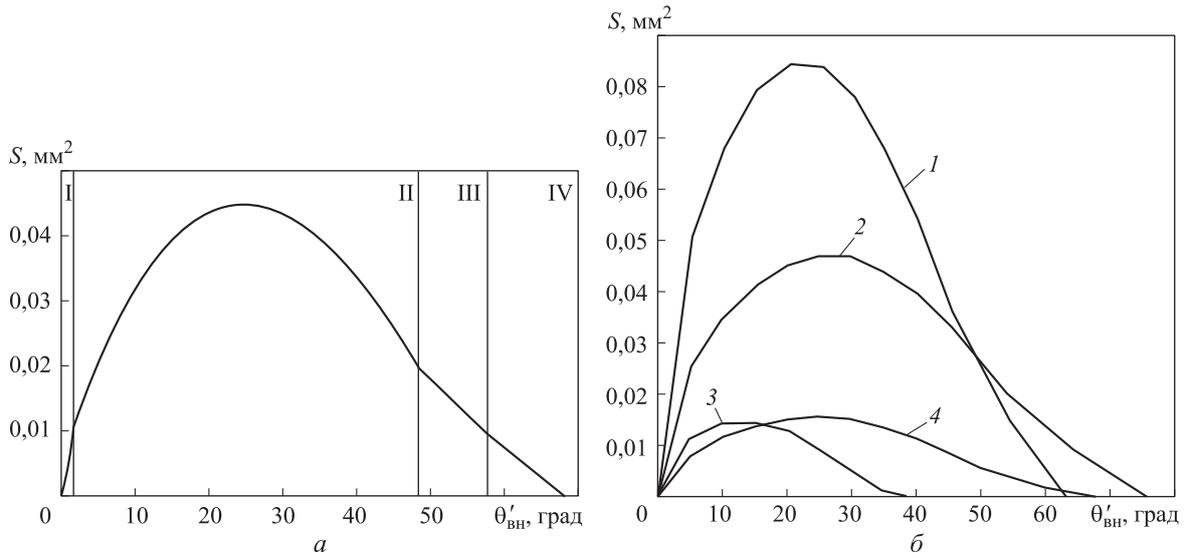


Рис. 5. Зависимости площади сечения S срезаемого слоя от угла контакта $\theta'_{вн}$ при шаге, равном 1° (а) и 5° (б), и подаче $S_z = 0,1$ мм/зуб:
 а — М30×3, $D_d = 20$ мм, $f = 0,1$ мм, I-IV (см. рис. 4, а); 1 — М60×5,5; $D_d = 40$ мм, $f = 0,6$ мм; 2 — М20×2,5; $D_d = 13,33$ мм; $f = 0,3$ мм; 3 — М30×1,5; $D_d = 20$ мм; $f = 0,2$ мм; 4 — М10×1, $D_d = 6,66$ мм, $f = 0,1$ мм

По данным плана эксперимента найдены значения максимальной площади сечения срезаемого слоя, подтвердившие свое расположение в диапазоне угла контакта 25...40 % от вершины сечения (см. рис. 4, а, линия 1-2).

В результате обработки данных расчетного эксперимента создана мультипликативная мо-

дель на основе частных степенных зависимостей, представленных на рис. 7 при $D = 52$ мм; $S_z = 0,1$ мм; $D_d = 35$ мм; $P = 1,5$ мм; $f = 0,2$ мм, которые были аппроксимированы с помощью программы Approks, разработанной на кафедре «Инструментальная техника и технологии» (МТ2).

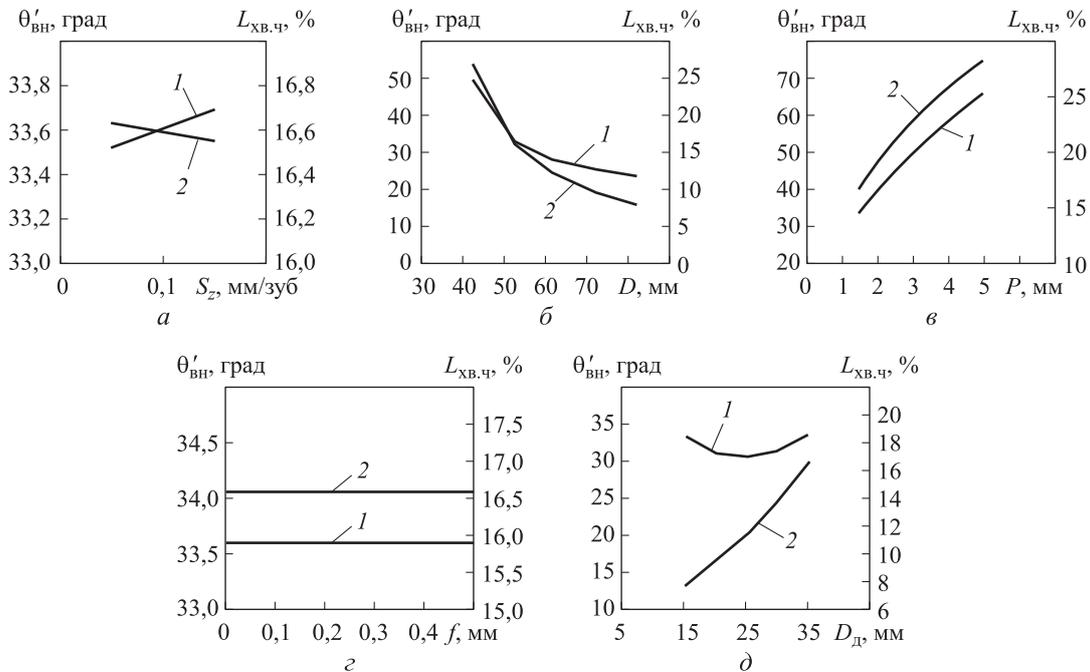


Рис. 6. Зависимости угла контакта $\theta'_{вн}$ (1) и длины хвостовой части $L_{хв.ч.}$ (2) от параметров режима фрезерования, резьбы и диска:
 а — подачи на зуб S_z ; б — номинального диаметра резьбы D ; в — шага резьбы P ; г — длины фаски f ; д — диаметра диска D_d

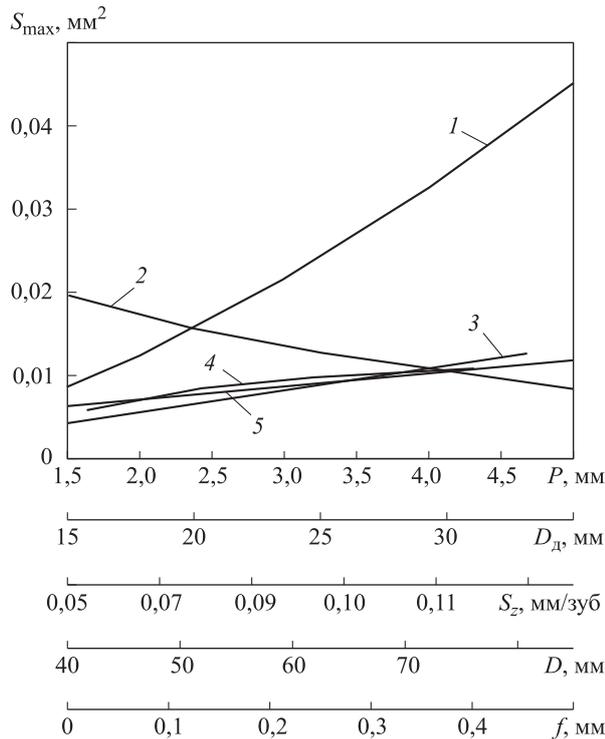


Рис. 7. Зависимость максимальной площади сечения S_{\max} срезаемого слоя от шага резьбы P (1), диаметра диска D_d (2), подачи на зуб S_z (3), номинального диаметра резьбы D (4) и длины фаски f (5):

$$1 - S_{\max} = 0,0048P^{1,38} \quad (\text{коэффициент корреляции } R = 0,9997);$$

$$2 - S_{\max} = 0,0361 \cdot 0,9597^{D_d} \quad (R = 0,9997);$$

$$3 - S_{\max} = 0,0856S_z \quad (R = 0,9998);$$

$$4 - S_{\max} = 0,0226e^{-53,53/D} \quad (R = 0,9839);$$

$$5 - S_{\max} = 0,0065 \cdot 3,5^f \quad (R = 0,9956)$$

Итоговая зависимость имеет вид

$$S_{\max} = 0,424S_z 0,96^{D_d} e^{-53,53/D} P^{1,38} 3,5^f.$$

Полученные частные и общая зависимости позволяют оценить влияние подачи на зуб, параметров резьбы и диска на максимальную площадь сечения срезаемого слоя при резьбофрезеровании.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 7, показал, что среди всех исследованных параметров (P , D_d , S_z , D , f) шаг получаемой резьбы P в наибольшей степени влияет на максимальную площадь. Однако при расчете площади сечения срезаемого слоя с помощью итоговой зависимости возможна погрешность до 5 %, что, вероятно, связано с погрешностью определения положения S_{\max} и взаимным влиянием уровней указанных параметров на результат. Для точного расчета рекомендуется теоретический расчет максимальной площади сечения и анализ модели срезаемого слоя.

Выводы

1. Разработан алгоритм геометрического моделирования формы срезаемого слоя при фрезеровании внутренней резьбы по кинематической схеме с параллельными осями резьбы и инструмента.

2. Исследование формы срезаемого слоя показало, что она содержит четыре характерных вида сечения на различных участках. На основе разработанной модели получены зависимости площади сечения срезаемого слоя от угла контакта фрезы с заготовкой, выявлены максимальные значения площади сечения.

3. Предложена зависимость для расчета максимального значения площади сечения срезаемого слоя при резьбофрезеровании с варьированием параметров резьбы, диска и подачи на зуб. Установлено, что максимальное значение площади сечения зависит от шага резьбы P больше, чем от других параметров. Далее по убыванию влияния на S_{\max} следуют диаметр диска D_d , подача S_z , номинальный диаметр резьбы D и длина фаски профиля зуба f .

Литература

- [1] Altintas Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000. 286 p.
- [2] Lacerda H.B., Lima V.T. Evaluation of cutting forces and prediction of chatter vibrations in milling. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2004, vol. 26, no. 1, pp. 74–81.
- [3] Araujo A.C., Silveira J.L., Kapoor S. Force prediction in thread milling. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2004, vol. 26, no. 1, pp. 82–88.
- [4] Lee S.W., Kasten A., Nestler A. Analytic mechanistic cutting force model for thread milling operations. *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO)*, 2013, pp. 546–551.

- [5] Araujo A.C., Silveira J.L.A. A model for micro thread milling operation (mtmo). *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering Forum (CSME FORUM)*, June 7–9, 2010, Victoria, British Columbia, Canada, pp. 1–8.
- [6] Мальков О.В., Головки И.М. Моделирование силы резания при резьбофрезеровании. *Будущее машиностроения России. Сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов*. Москва, 26–29 сентября 2012, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, с. 24–25.
- [7] Мальков О.В., Головки И.М. Экспериментальное определение модели силы при резьбофрезеровании. *Инновации в машиностроении. Сб. тр. Междунар. молодежной конф.*, Юрга, 27–29 августа 2012 г., Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2012, с. 73–77.
- [8] Косарев В.А. Исследование величин срезаемого слоя при планетарном внутреннем резьбофрезеровании. *Вестник МГТУ СТАНКИН*, 2012, № 1, с. 32–35.
- [9] Сайкин С.А. *Повышение эффективности фрезерования внутренней резьбы в деталях из труднообрабатываемых материалов*. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, РГТУ им. П.А. Соловьева, 2009. 246 с.
- [10] Дальский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., ред. *Справочник технолога-машиностроителя*. В 2 т. Т. 2. Москва, Машиностроение, 2001. 944 с.
- [11] ГАРАНТ *Справочник по обработке резанием*. Hoffmann Group. URL: https://www.hoffmann-group.com/medias/sys_master/root/h5f/h4d/8796234579998/GARANT-pdf-167-.pdf?attachment=true.
- [12] Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Жигалко Н.И. *Основы резания материалов и режущий инструмент*. Минск, Вышэйшая школа, 1981. 560 с.
- [13] Кишуров В.М., Криони Н.К., Постнов В.В., Черников П.П. *Резание материалов. Режущий инструмент*. Москва, Машиностроение, 2009. 492 с.
- [14] Бобров В.Ф. *Основы теории резания металлов*. Москва, Машиностроение, 1975. 344 с.
- [15] Филиппов Г.В. *Режущий инструмент*. Ленинград, Машиностроение, 1981. 392 с.
- [16] Этин А.О. *Кинематический анализ методов обработки металлов резанием*. Москва, Машиностроение, 1964. 326 с.
- [17] Якухин В.Г. *Оптимальная технология изготовления резьб*. Москва, Машиностроение, 1985. 184 с.
- [18] Мальков О.В. Профилирование зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 6. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/579350.html>.

References

- [1] Altintas Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000. 286 p.
- [2] Lacerda H.B., Lima V.T. Evaluation of cutting forces and prediction of chatter vibrations in milling. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2004, vol. 26, no. 1, pp. 74–81.
- [3] Araujo A.C., Silveira J.L., Kapoor S. Force prediction in thread milling. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2004, vol. 26, no. 1, pp. 82–88.
- [4] Lee S.W., Kasten A., Nestler A. Analytic mechanistic cutting force model for thread milling operations. *14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO)*, 2013, vol. 8, pp. 546–551.
- [5] Araujo A.C., Silveira J.L.A. Model for Micro Thread Milling Operation (MTMO). *Proc. of the Canadian Society for Mechanical Engineering Forum (CSME Forum'2010)*. June 7–9, 2010, Victoria, British Columbia, Canada, Universidad Federal do Rio de Janeiro, 2010, pp. 1–8.
- [6] Mal'kov O.V., Golovko I.M. Modelirovanie sily rezaniia pri rez'bofrezzerovanii [Modeling of cutting forces during thread milling]. *Budushchee mashinostroeniia Rossii: Sbornik trudov Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [The future engineering of Russia: Collection. Proceedings of Russian conference of young scientists and specialists, Moscow, 26–29 September 2012]. Moscow, Bauman Press, 2012, pp. 24–25.
- [7] Mal'kov O.V., Golovko I.M. Eksperimental'noe opredelenie modeli sily pri rez'bofrezzerovanii [Experimental determination of the model the forces during thread milling]. *Innovatsii v*

- mashinostroenii: sbornik trudov Mezhdunarodnoi molodezhnoi konferentsii, Iurga, 27–29 avgusta 2012*, [Innovations in mechanical engineering: proceedings of the International youth conference]. Tomsk, Tomskii politekhnicheskii universitet publ., 2012, pp. 73–77.
- [8] Kosarev V.A. Issledovanie velichin srezaemogo sloia pri planetarnom vnutrennem rez'bofrezеровании [Research of sizes of a cut off layer at planetary internal carving milling]. *Vestnik MGTU Stankin* [Vestnik MSTU STANKIN]. 2012, no. 1, pp. 32–35.
- [9] Saikin S.A. *Povyshenie effektivnosti frezerovaniia vnutrennei rez'by v detaliakh iz trudnoobrabatyvaemykh materialov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of milling internal threads in parts made of difficult to machine materials. Cand. tech. sci. diss.]. Rybinsk, 2009. 246 p.
- [10] *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia* [Reference technologist-mechanical engineer]. Ed. Dal'skii A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K. In 2 vol. Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie publ., 2001. 944 p.
- [11] *GARANT Spravochnik po obrabotke rezaniem* [GUARANTOR Reference machining]. Hoffmann Group. Available at: https://www.hoffmann-group.com/medias/sys_master/root/h5f/h4d/8796234579998/GARANT-pdf-167-.pdf?attachment=true.
- [12] Iashcheritsyn P.I., Eremenko M.L., Zhigalko N.I. *Osnovy rezaniia materialov i rezhushchii instrument* [The basics of cutting materials and cutting tools]. Minsk, Vysheishaia shkola publ., 1981. 560 p.
- [13] Kishurov V.M., Krioni N.K., Postnov V.V., Chernikov P.P. *Rezanie materialov. Rezhushchii instrument* [Cutting of materials. Cutting tool]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2009. 492 p.
- [14] Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniia metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1975. 344 p.
- [15] Filippov G.V. *Rezhushchii instrument* [Cutting tool]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1981. 392 p.
- [16] Etin A.O. *Kinematicheskii analiz metodov obrabotki metallov rezaniem* [The kinematic analysis methods of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1964. 326 p.
- [17] Iakukhin V.G. *Optimal'naia tekhnologiia izgotovleniia rez'b* [The optimal technology of making threads]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985. 184 p.
- [18] Mal'kov O.V. *Profilirovaniie zub'ev rez'bovykh frez s vintovymi struzhechnymi kanavkami* [Teeth profiling of thread milling cutters with helical flutes]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science&Education. Bauman MSTU]. 2013, no. 6. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/579350.html>.

Статья поступила в редакцию 23.05.2017

Информация об авторах

МАЛЬКОВ Олег Вячеславович (Москва) — 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: olma70@mail.ru).

КАРЕЛЬСКИЙ Александр Сергеевич (Москва) — инженер 2-й категории кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sakarel@yandex.ru).

Information about the authors

MALKOV Oleg Vyacheslavovich (Moscow) — 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: olma70@mail.ru).

KARELSKIY Aleksandr Sergeevich (Moscow) — Engineer of the 2nd Category, Department of Tools and Tooling Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sakarel@yandex.ru).