

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗЬБЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА

О.В. Мальков

olma70@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведен расчет программируемого радиуса резьбовой фрезы, который можно использовать в программе ЧПУ для технологической подготовки операции резьбофрезерования без применения метода пробных проходов, что существенно сократит время подготовки операции и увеличит ресурс инструмента. На основе обзора литературы и анализа существующих подходов к расчету программируемого радиуса выявлено отсутствие зависимостей программируемого радиуса от параметров инструмента. Это позволит устанавливать значение программируемого радиуса на этапе проектирования инструмента. С учетом требуемой точности нарезаемой резьбы разработана система математических зависимостей, по которым можно рассчитать программируемый радиус при проектировании резьбовой фрезы, используемой для нарезания наружной (способом наружного или внутреннего (охватывающего) касания) и внутренней резьб

### Ключевые слова

*Программируемый радиус, резьба, резьбовая фреза, резьбофрезерование*

Поступила в редакцию 22.05.2017  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

**Введение.** Процесс резьбофрезерования в настоящее время получает все более широкое распространение среди способов обработки наружной и внутренней резьб [1]. Это связано с широким применением в основном производстве станков с ЧПУ, реализующих обработку по трем координатам с использованием винтовой интерполяции, и с рядом достоинств процесса резьбофрезерования: обработка правой и левой, однозаходной или многозаходной резьб разных диаметров и одного шага инструментом одного типоразмера в широком диапазоне материалов; образование мелкой стружки, легко удаляемой из зоны обработки; высокое качество обработанной поверхности резьбы; возможность легкого извлечения сломанного инструмента из отверстия [2].

Применяемые в России резьбовые фрезы в основном изготавливаются иностранными производителями. Проведенный литературный обзор показал отсутствие комплексных методик расчета и проектирования резьбовых фрез, позволяющих эффективно использовать инструмент на этапе технологической подготовки операции резьбофрезерования. При правильно спроектированном инструменте применение метода пробных проходов для технологической подготовки операции требует времени, которое увеличивается при необходимости

обработать одним инструментом ряд типоразмеров резьбы одного шага. Кроме того, при пробных проходах расходуется часть ресурса инструмента, особенно при обработке труднообрабатываемых материалов. Особенностью резьбофрезерования является радиальный отгиб инструмента, что также влияет на требуемую точность.

Цель работы — определение методического подхода к выбору значения программируемого радиуса резьбовых фрез и математических зависимостей для расчета на этапе проектирования, что позволяет сократить время на технологическую подготовку операции за счет исключения пробных проходов.

**Состояние вопроса.** Анализируя литературные источники, выявили, что производители резьбовых фрез указывают на цельной конструкции фрезы из твердого сплава значение программируемого радиуса  $R_{PRG}$  (принятое производителями обозначение) [3–6]. Например, резьбовая фреза CoroMill Plura компании Sandvik Coromant имеет индивидуальное значение параметра коррекции на радиус, указанное на хвостовике, которое показывает точное значение диаметра делительной окружности и коррекцию радиуса для обеспечения требуемой точности резьбы [3, 4]. На рис. 1 приведены примеры обозначений  $R_{PRG}$  на хвостовиках резьбовых фрез [4, 5].



Рис. 1. Пример обозначений программируемого радиуса  $R_{PRG}$  на хвостовиках резьбовых фрез, принятых фирмами Sandvik Coromant [4] (а) и Walter [5] (б)

Согласно данным работы [5], программируемый радиус является параметром, который рассчитывается на основании среднего диаметра резьбофрезы и обеспечивает точность обработки резьбы. Программируемый радиус можно найти на хвостовике резьбофрезы и использовать для описания параметров инструмента при настройке станка. При генерировании программы ЧПУ с помощью GPS (программа Walter GPS для программирования станков с ЧПУ) отображается поправочный коэффициент, который позволяет получить резьбу в середине ее поля допуска. Поправочный коэффициент следует вычесть из значения программируемого радиуса, затем ввести скорректированное значение радиуса в программу ЧПУ. В процессе обработки режущие кромки инструмента

изнашиваются, что является причиной получения тугой резьбы из-за отклонения инструмента. Износ можно компенсировать посредством уменьшения программируемого радиуса, при этом точность нарезаемой резьбы сохранится. Рекомендуемый шаг корректировки составляет 0,01 мм. В случае резьбофрезы малого диаметра частая корректировка радиуса невозможна, как для резьбофрезы большого диаметра, поскольку увеличиваются радиальные силы и вероятность поломки инструмента. Поэтому после переточки инструментов рекомендуется заменять их по достижении 80 % максимально возможной стойкости [5].

Значение  $R_{PRG}$  является начальным для новых фрез и связано с теоретической нулевой линией резьбы [6], т. е. при фрезеровании с указанным значением  $R_{PRG}$  обрабатываемая резьба никогда не выйдет за пределы допуска, обычно она получается несколько меньше. Для получения требуемого допуска необходимо ввести дополнительную коррекцию. Меньшее значение параметра  $R_{PRG}$  дает большее значение номинального диаметра резьбы [6].

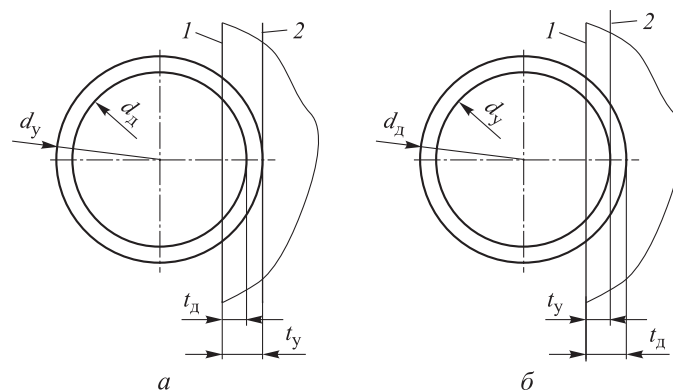
Согласно данным работы [7], для достижения точности резьбы в середине поля допуска  $6H$  радиус инструмента, измеренный по вершинам зубьев режущей части, должен быть уменьшен на значение компенсации на радиус фрезы ( $k = 0,01D$ ,  $k = 0,05P$  или коэффициент, соответствующий условиям обработки;  $D$  и  $P$  — номинальный диаметр и шаг резьбы). Программируемый радиус может быть рассчитан по формуле  $R_{PRG} = 0,5d_1 - k$  ( $d_1$  — диаметр режущей части инструмента). Здесь необходимо учесть возможное радиальное отклонение фрезы, которое зависит от ее вылета, предела прочности обрабатываемого материала и т. д.

Таким образом, проведенный литературный обзор показал, что существует следующий подход производителей резьбовых фрез к обеспечению точности резьбофрезерования на этапе проектирования инструмента. Резьбовые фрезы содержат в маркировке на хвостовике расчетное значение программируемого радиуса  $R_{PRG}$ , который следует вводить при подготовке программы ЧПУ, чтобы обеспечить обработку внутренней резьбы по нижнему пределу (или середине) поля допуска на средний диаметр резьбы. При этом следует ожидать изготовления резьбы, удовлетворяющей требованиям точности без использования пробных проходов.

**Расчет и выбор программируемого радиуса резьбовых фрез при обработке наружной и внутренней резьб.** В рамках договора о сотрудничестве кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана с учебным центром ООО «Сандвик» для проведения исследований был предоставлен ряд цельных концевых резьбовых фрез: R217.14C045100AC13N1630, R217.14C060125AK17N1630, R217.15C100200AK30N. Фрезы предназначены для изготовления внутренней метрической резьбы с точностью  $6H$ , поэтому дальнейшие расчеты выполнены для метрической резьбы с границей поля допуска  $H$ , совпадающей с номинальным профилем резьбы. Для других полей допусков следует учесть их отклонение от номинального профиля нарезаемой резьбы.

На рис. 2 приведена обобщенная схема определения глубины внедрения инструмента при различных значениях его радиуса. В случае если установленное

(расчетное) в программе ЧПУ значение диаметра инструмента больше его действительного (измеренного) значения ( $d_y > d_d$ , рис. 2, а), то при условии, что оси инструмента в обоих случаях совпадают, действительная глубина внедрения инструмента будет меньше установленной, т. е.  $t_y > t_d$ . Аналогично, если установленное значение диаметра инструмента меньше его действительного значения ( $d_y < d_d$ , рис. 2, б), то действительная глубина внедрения инструмента будет больше установленной ( $t_y < t_d$ ). Получается, что в первом случае инструмент не достигает номинальной обрабатываемой поверхности, а во втором — углубляется за пределы номинальной поверхности.



**Рис. 2.** Схема определения глубины внедрения инструмента при различных значениях его радиуса  $d_y > d_d$ , (а);  $d_y < d_d$  (б):

1 — поверхность заготовки; 2 — номинальная обрабатываемая поверхность

Предположим, что при обработке внутренней резьбы программируемый радиус  $R_{PRG}$  — это некоторый условный радиус резьбообразующей части фрезы, который определяет расстояние от оси инструмента до линии наружного диаметра внутренней резьбы при относительном расположении осей резьбы и инструмента на расстоянии расчетного значения эксцентриситета (рис. 3).

На рис. 3 приведена расчетная схема для определения программируемого радиуса  $R_{PRG}$  при обработке внутренней резьбы и приняты следующие обозначения:  $D$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  — наружный, внутренний и средний диаметры внутренней резьбы соответственно;  $TD_2$  — допуск среднего диаметра резьбы (поз. 1 — поле допуска);  $d_\phi = 2r_\phi$  — наружный диаметр резьбообразующей части инструмента;  $\beta$  — угол профиля зуба инструмента (поз. 3);  $e$  — эксцентриситет;  $\Delta r_{\max}$  — геометрическая погрешность профиля резьбы (поз. 2) [8–10];  $\Delta$  — перебеги вершины профиля зуба фрезы;  $a_\phi$ ,  $a_r$  — ширина вершины профиля зуба фрезы и ширина впадины резьбы;  $R_{PRG}$  — программируемый радиус фрезы.

Ранее установлено [8–10], что при резьбофрезеровании профиль зубьев фрезы не копирует профиль резьбы, что связано с кинематикой процесса резьбофрезерования и конструктивными особенностями инструмента. Собственный средний

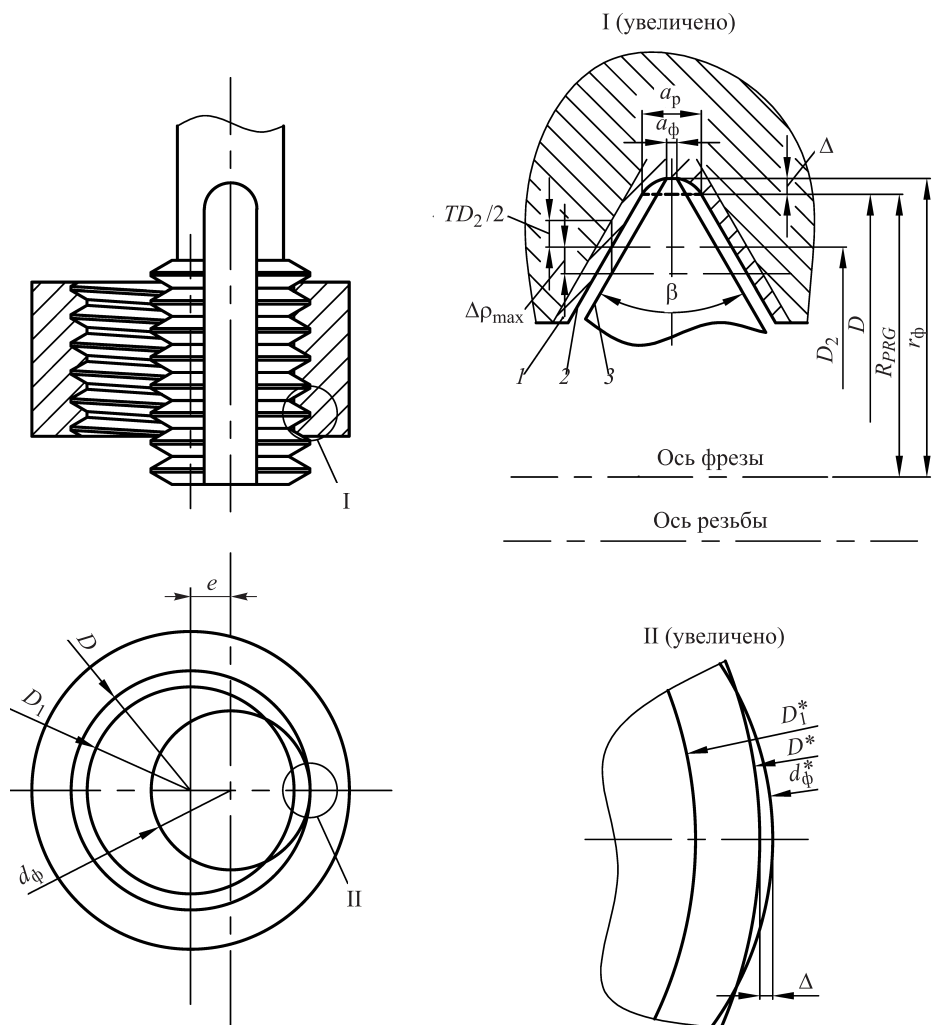


Рис. 3. Расчетная схема для определения программируемого радиуса резьбовой фрезы при обработке внутренней резьбы

диаметр резьбы получается больше расчетного на величину  $2\Delta\rho_{max}$ , а геометрическая погрешность профиля внутренней резьбы может быть рассчитана по формуле [9, 10]:

$$\Delta\rho = e \cos \eta + \sqrt{\left(\frac{d_{\phi}}{2}\right)^2 - e^2 \sin^2 \eta} - \frac{D}{2} + \frac{P\eta}{2\pi \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}, \quad (1)$$

где  $e = (D - d_{\phi})/2$  — эксцентриситет обработки, параметр  $\eta$  может быть получен из уравнения

$$-e \sin \eta - \frac{e^2 \sin \eta \cos \eta}{\sqrt{\left(\frac{d_{\phi}}{2}\right)^2 - e^2 \sin^2 \eta}} + \frac{P}{2\pi \operatorname{tg}(\beta/2)} = 0. \quad (2)$$

При подстановке параметра  $\eta$  из (2) в (1) найдем максимальное значение геометрической погрешности профиля получаемой внутренней резьбы  $\Delta\rho_{\max}$ .

Предположим, что действительный радиус инструмента больше, чем радиус инструмента, задаваемый в программе ЧПУ, т. е.  $r_{\phi} > R_{PRG}$ . В этом случае, согласно схеме (см. рис. 2), программа ЧПУ будет настроена на обработку инструментом резьбы по номинальному профилю, в то время как инструмент с действительным радиусом  $r_{\phi}$  будет обрабатывать более глубокий профиль резьбы с таким расчетом, чтобы, учитывая расположение впадины резьбы за пределами номинального профиля резьбы и геометрическую погрешность  $\Delta\rho_{\max}$ , получить боковые стороны профиля резьбы, совпадающие с ее номинальным профилем. Рассчитаем программируемый радиус в соответствии с представленным предположением и сравним со значениями на серийно выпускаемых инструментах для подтверждения расчетной зависимости.

Согласно схеме (см. рис. 3), получим

$$R_{PRG} = \frac{d_{\phi}}{2} - \Delta; \quad (3)$$

$$a_p = a_{\phi} + 2\operatorname{tg}(\beta/2)(\Delta\rho_{\max} + \Delta). \quad (4)$$

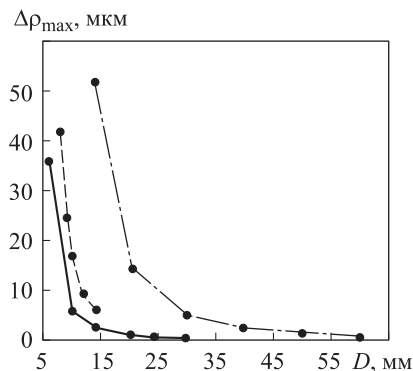
Выражая из (4) параметр  $\Delta$ , подставляя в (3) и учитывая необходимость попадания в поле допуска на средний диаметр, получаем

$$R_{PRG} = \frac{d_{\phi}}{2} - \frac{a_p - a_{\phi}}{2\operatorname{tg}(\beta/2)} + \Delta\rho_{\max} - k \frac{TD_2}{2}, \quad (5)$$

где  $k$  — коэффициент, указывающий долю допуска на средний диаметр резьбы,  $k = 0-1$ .

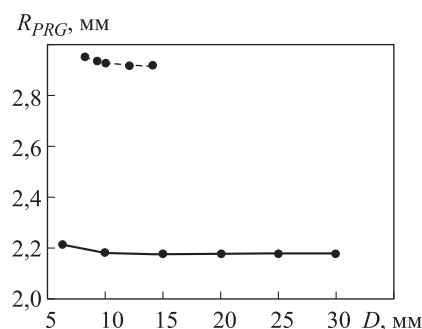
Расчет значений программируемого радиуса приведен в таблице. При расчете использовались измеренные значения действительного диаметра резьбообразующей части фрезы, шага и ширины вершины резьбовых профилей ее зубьев. Проводилось по 10 измерений, средние значения измеренных параметров представлены в таблице (принято  $k = 0$ ).

На рис. 4 и 5 приведены графики зависимостей геометрической погрешности профиля получаемой внутренней резьбы  $\Delta\rho_{\max}$  и программируемого ра-



**Рис. 4.** Зависимость геометрической погрешности профиля  $\Delta\rho_{\max}$  от номинального диаметра внутренней резьбы  $D$ :  $M6 \times 1$ ,  $d_{\phi} = 4,5$  мм (сплошная);  $M8 \times 1,25$ ,  $d_{\phi} = 6$  мм (штриховая);  $M14 \times 2$ ,  $d_{\phi} = 10$  мм (штрихпунктирная) (см. таблицу)

**Рис. 5.** Зависимость программируемого радиуса от номинального диаметра внутренней резьбы  $D$ :  
 $M6 \times 1$ ,  $d_{\phi} = 4,5$  мм (сплошная);  
 $M8 \times 1,25$ ,  $d_{\phi} = 6$  мм (штриховая)  
(см. таблицу)



диуса  $R_{PRG}$  от номинального диаметра внутренней резьбы  $D$  при расчетных значениях параметров, согласно данным таблицы.

Из рис. 4 и 5 следует, что:

- геометрическая погрешность профиля резьбы  $\Delta r_{\max}$  увеличивается при увеличении соотношения  $d_{\phi} / D$  (не превышающего 0,74 для параметров, указанных в таблице);

- программируемый радиус вначале монотонно убывает с увеличением диаметра резьбы, далее стабилизируется на постоянном уровне, что связано с характером изменения  $\Delta r_{\max}$ ;

- изменение  $\Delta r_{\max}$  при обработке ряда типоразмеров диаметров резьбы одним инструментом предполагает изменение программируемого радиуса  $R_{PRG}$  в выбранном диапазоне диаметров резьбы, не превышающего 1,58 % для параметров, указанных в таблице, что позволяет оценить значение программируемого радиуса в принятом диапазоне диаметров резьбы как постоянное;

- проведенные расчеты программируемого радиуса подтвердили предположение о правильности его назначения на основании сходимости значений, указанных на реальных фрезе и полученных в результате расчетов с точностью не более 0,25...0,53 % (значения погрешности увеличиваются с увеличением диаметра резьбовой фрезы);

- необходимо обосновать расчетное значение программируемого радиуса при использовании резьбовой фрезы в принятом диапазоне диаметров нарезаемой резьбы.

Таким образом, согласно рис. 5, принимая программируемый радиус резьбовой фрезы максимальным на всем диапазоне диаметров обрабатываемой резьбы ( $R_{PRG\max}$ ), получаем, что согласно схеме (см. рис. 2, а), действительная глубина внедрения инструмента будет меньше установленной и профиль зуба фрезы не дойдет до номинального профиля резьбы, т. е. не срежет требуемый припуск. Принимая программируемый радиус резьбовой фрезы минимальным на всем диапазоне диаметров обрабатываемой резьбы ( $R_{PRG\min}$ ), получаем, что, согласно схеме на рис. 2, б, действительная глубина внедрения инструмента будет больше установленной и профиль зуба фрезы внедрится за пределы номинального профиля резьбы.

**Параметры для расчета программируемого радиуса**

Резьбовая фреза Sandvik Coromant R217.14C045100AC13N1630						
Исходные данные по каталогу: $d_\phi = 4,5$ мм, $P = 1$ мм, обработка внутренней резьбы от M6 $\times$ 1, $R_{prg} = 2,18$ мм (обозначение на хвостовике). Измерение параметров: $\bar{d}_\phi = 4,422$ мм, $\bar{P} = 1,0008$ мм, $\bar{a}_\phi = 0,0851$ мм						
$D$ , мм	6	10	4	20	24	30
$\Delta r_{max}$ мкм	35,8	6,0	2,5	1,1	0,7	0,4
$a_{pr}$ мм	P/8 = 0,125 (ГОСТ 9150-2002)					
$R_{prg}$ , мм	2,212	2,182	2,179	2,178	2,177	2,177
Резьбовая фреза Sandvik Coromant R217.14C060125AK17N1630						
Исходные данные по каталогу: $d_\phi = 6$ мм, $P = 1,25$ мм, обработка внутренней резьбы от M8 $\times$ 1,25, $R_{prg} = 2,92$ мм (обозначение на хвостовике).						
Измерение параметров: $\bar{d}_\phi = 5,885$ мм, $\bar{P} = 1,2511$ мм, $\bar{a}_\phi = 0,1066$ мм.						
$D$ , мм	8	9	10	12	14	-
$\Delta r_{max}$ мкм	41,6	25	17	9,5	6,2	-
$a_{pr}$ мм	P/8 = 0,156 (ГОСТ 9150-2002)					
$R_{prg}$ , мм	2,94	2,93	2,92	2,91	2,91	-
Резьбовая фреза Sandvik Coromant R217.15C100200AK30N						
Исходные данные по каталогу: $d_\phi = 10$ мм, $P = 2$ мм, обработка внутренней резьбы от M14 $\times$ 2, $R_{prg} = 4,9$ мм (обозначение на хвостовике).						
Измерение параметров: $\bar{d}_\phi = 9,867$ мм, $\bar{P} = 2,0014$ мм, $\bar{a}_\phi = 0,181$ мм.						
$D$ , мм	14	20	30	40	50	60
$\Delta r_{max}$ мкм	52,1	14,8	5,0	2,5	1,5	1,0
$a_{pr}$ мм	P/8 = 0,250 (ГОСТ 9150-2002)					
$R_{prg}$ , мм	4,926	4,889	4,878	4,876	4,875	4,874



Согласно значениям программируемого радиуса на фрезях Sandvik Coromant, их величина смещена от середины диапазона обрабатываемых диаметров резьбы в сторону меньших диаметров резьбы (см. таблицу). Это может быть связано с динамическими процессами, дополнительно увеличивающими обрабатываемый диаметр, а также, погрешностями инструмента — диаметра, шага, угла профиля, вершины зуба фрезы. Поэтому рассчитав программируемый радиус, следует экспериментально его проверить, чтобы установить значение для всей партии изготавливаемых резьбовых фрез. При расчете программируемого радиуса для степени точности ниже 6-й (5-й и ниже) не целесообразно округлять значение программируемого радиуса до десятых и сотых долей, поскольку округление может быть соизмеримо с полем допуска на средний диаметр резьбы. С этой же целью не стоит выбирать широкий диапазон диаметров резьбы, обрабатываемой инструментом одного типоразмера, из-за изменения значения программируемого радиуса в этом диапазоне. В противном случае возможно одной конструкции резьбовой фрезы присвоить два или несколько значений программируемого радиуса в различных диапазонах диаметров обрабатываемой резьбы.

При назначении программируемого радиуса в соответствии с вышесказанным можно предложить несколько методических подходов:

– для установленного диапазона диаметров нарезаемой резьбы инструментом одного типоразмера следует выбирать минимальное расчетное значение программируемого радиуса  $R_{PRGmin}$ , при этом (см. рис. 2) действительная глубина внедрения инструмента будет больше установленной и профиль зуба фрезы внедрится за пределы номинального профиля резьбы. В этом случае не нужно корректировать  $R_{PRG}$ , а все резьбы данного диапазона будут нарезаны в поле допуска на средний диаметр; при расчете необходимо проверить, чтобы  $\Delta r_{max}$  не превышало половины поля допуска на средний диаметр резьбы; этот подход можно применить для фрезерования резьбы выше 6-й степени точности;

– при фрезеровании точной резьбы (ниже 6-й степени точности) следует ограничить резьбовую фрезу одним типоразмером нарезаемой резьбы (минимально допустимым диаметром, исходя из условия получения годной резьбы [9–12]), а при необходимости обработки резьбы большего типоразмера корректировать программируемый радиус с учетом геометрической погрешности (1).

Исследования, проведенные для фрезерования внутренней резьбы, показали правомерность установления и расчета значения программируемого радиуса на основе сравнения с параметрами реальных фрез. Аналогично (5) установим зависимости для расчета программируемого радиуса резьбовых фрез для нарезания наружной резьбы с использованием фрезы наружного и внутреннего (охватывающей фрезы) касания.

Расчетная схема для определения программируемого радиуса резьбовой фрезы при обработке наружной резьбы приведена на рис. 6, на котором приняты следующие обозначения:  $d$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $Td_2$  — наружный, внутренний, средний диаметры и допуск среднего диаметра наружной резьбы соответственно. Как и при фрезеро-

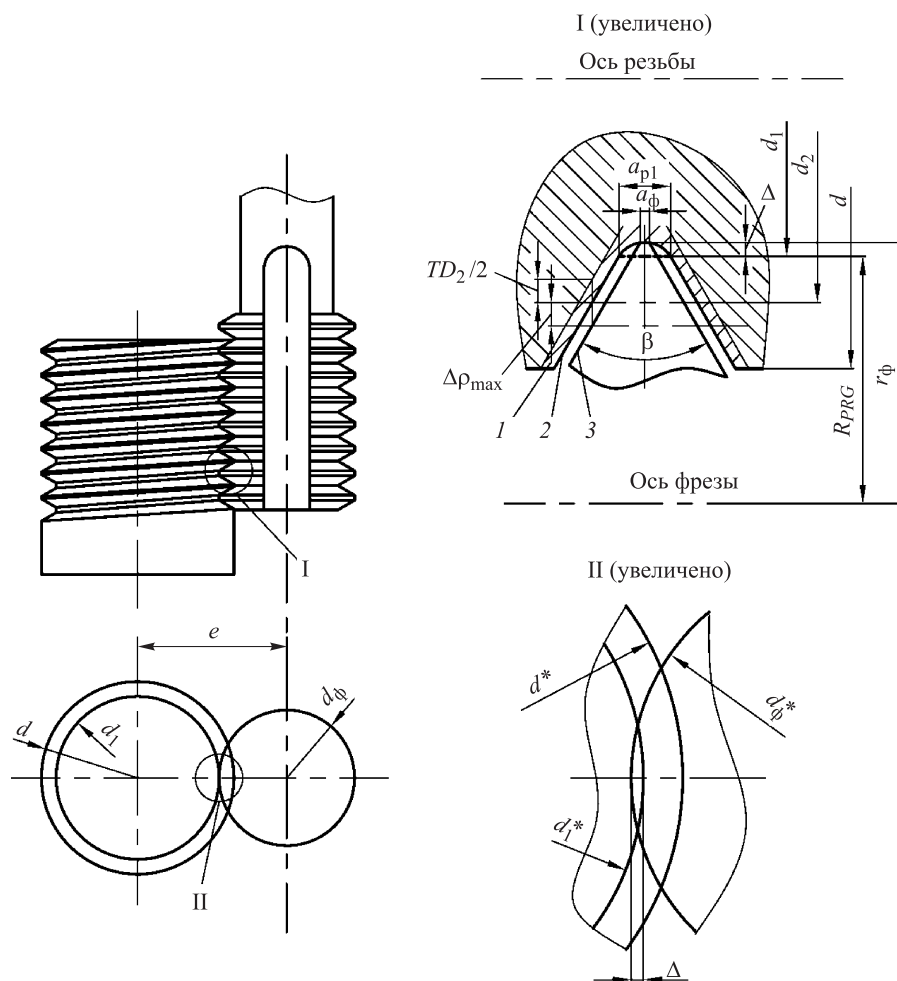


Рис. 6. Расчетная схема для определения программируемого радиуса резьбовой фрезы при обработке наружной резьбы

вании внутренней резьбы (см. рис. 3), профиль обработанной резьбы не совпадает с профилем зуба резцообразующей части фрезы, что связано с кинематикой процесса резкофрезерования и конструктивными особенностями инструмента, а собственный средний диаметр резьбы получается больше расчетного на  $2\Delta\rho_{max}$ , который может быть рассчитан по формуле [11]:

$$\Delta\rho = \frac{d}{2} - \frac{P}{2\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} \left(1 - \frac{\eta}{\pi}\right) + \sqrt{\left(\frac{d_{\phi}}{2}\right)^2 - e^2 \sin^2 \eta - e \cos \eta}, \quad (6)$$

где  $e = \frac{d}{2} - \frac{P}{2\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} + \frac{d_{\phi}}{2}$  — эксцентриситет обработки, а параметр  $\eta$  может быть

получен из уравнения

$$\frac{P}{2\pi \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \frac{e^2 \sin \eta \cos \eta}{\sqrt{\left(\frac{d_\phi}{2}\right)^2 - e^2 \sin^2 \eta}} + e \sin \eta = 0. \quad (7)$$

Аналогично приведенным ранее рассуждениям, согласно схеме, представленной на рис. 6, и с учетом необходимости попадания в поле допуска на средний диаметр резьбы, получим:

$$\begin{aligned} R_{PRG} &= \frac{d_\phi}{2} - \Delta; \\ a_{p1} &= a_\phi + 2 \operatorname{tg}(\beta/2)(\Delta\rho_{\max} + \Delta); \\ R_{PRG} &= \frac{d_\phi}{2} - \frac{a_{p1} - a_\phi}{2 \operatorname{tg}(\beta/2)} + \Delta\rho_{\max} - k \frac{Td_2}{2}, \end{aligned}$$

где  $a_{p1}$  — ширина впадины профиля наружной резьбы. В общем случае номинальный профиль имеет различные значения ширины вершины и впадины.

На рис. 7 приведена расчетная схема для определения программируемого радиуса резьбовой фрезы при обработке наружной резьбы охватывающей фрезой.

Для определения зависимости программируемого радиуса при охватывающем фрезеровании наружной резьбы найдем геометрическую погрешность профиля резьбы  $\Delta\rho_{\max}$ .

Расчетная схема для определения  $\Delta\rho_{\max}$  приведена на рис. 8, где профиль нарезаемой резьбы принят теоретически острым;  $\rho$  — полярная ось схемы;  $\rho_\phi$  — радиус-вектор профиля резьбы в произвольной точке;  $\phi$  — полярный угол между полярной осью и радиус-вектором  $\rho_\phi$ ;  $\rho_f$  — радиус-вектор резьбофрезы, приведенный к центру резьбы;  $\eta$  — угол между полярной осью и радиус-вектором  $\rho_f$ ;  $r_\phi$  — радиус инструмента,  $r_\phi = d_\phi/2$ ;  $r = d/2$  — наружный радиус резьбы;  $e$  — смещение центра инструмента относительно центра нарезаемой резьбы,  $e = d_\phi/2 + h - d/2$ .

Поскольку профиль резьбы образует в сечении архимедову спираль, следовательно,  $\rho_\phi = d/2 - h + A\phi$ .

Учитывая, что коэффициент  $A$  определяется из условия  $A\pi = h$ , угол  $\phi$  откладываем по ходу часовой стрелки в диапазоне  $0 \leq \phi \leq \pi$ , а высота теоретического профиля резьбы  $h = \frac{P}{2 \operatorname{tg}(\beta/2)}$  ( $\beta$  — угол профиля резьбы;  $P$  — шаг резьбы), получаем:

$$\rho_\phi = d/2 - \frac{P}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} \left(1 - \frac{\phi}{\pi}\right). \quad (8)$$

Оценим несовпадения сечений резьбофрезы и резьбы на схеме параметром

$$\Delta\rho = \rho_\phi - \rho_f. \quad (9)$$

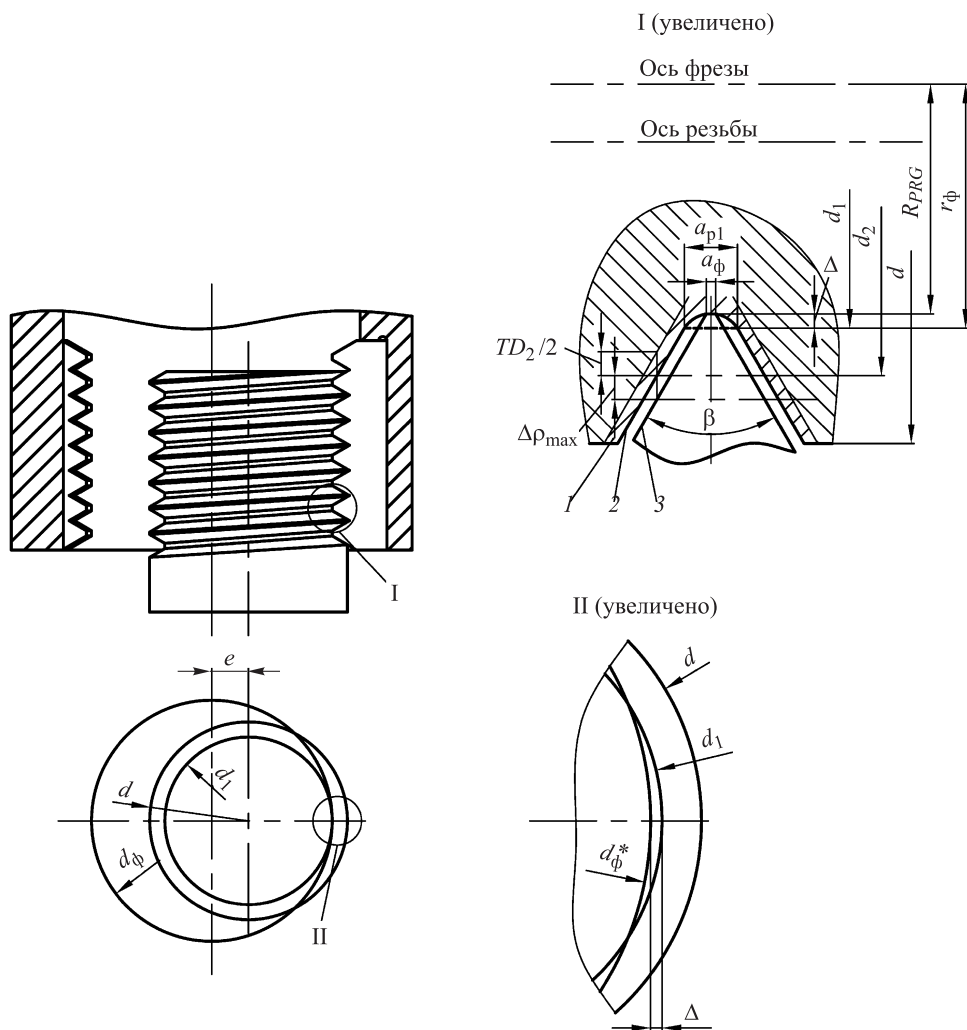


Рис. 7. Расчетная схема для определения программируемого радиуса резьбовой фрезы при обработке наружной резьбы охватывающей фрезой

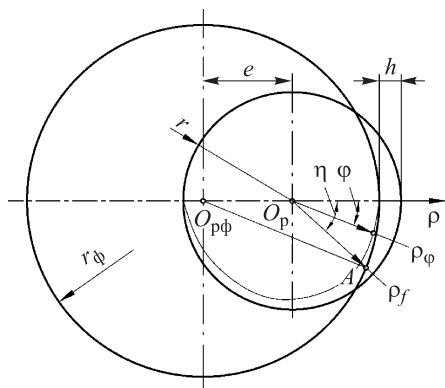


Рис. 8. Расчетная схема определения геометрической погрешности профиля наружной резьбы при охватывающем фрезеровании

Уравнение окружности инструмента в полярных координатах из центра резьбы запишем как

$$\rho_f^2 - 2\rho_f e \cos(\pi - \eta) + e^2 = \left(\frac{d_\Phi}{2}\right)^2. \quad (10)$$

Решив уравнение (10) и подобрав требуемый корень, получим

$$\rho_f = \sqrt{\left(\frac{d_\Phi}{2}\right)^2 - e^2 \sin^2 \eta} - e \cos \eta. \quad (11)$$

Рассмотрим взаимное расположение сечений резбобфрезы и резьбы в плоскости, расположенной под углом  $\varphi = \eta$  при  $0 < \varphi < \pi$ . Подставим в (9) выражения (8) и (11):

$$\Delta\rho = \frac{d}{2} - \frac{P}{2\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}\left(1 - \frac{\eta}{\pi}\right) + e \cos \eta - \sqrt{\left(\frac{d_\Phi}{2}\right)^2 - e^2 \sin^2 \eta}. \quad (12)$$

Исследуя функцию  $\Delta\rho = f(\eta)$ , получаем значение аргумента, при котором  $\Delta\rho$  максимально:

$$\frac{\partial(\Delta\rho)}{\partial\eta} = \frac{P}{2\pi\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - e \sin \eta + \frac{e^2 \sin \eta \cos \eta}{\sqrt{\left(\frac{d_\Phi}{2}\right)^2 - e^2 \sin^2(\eta)}} = 0.$$

Аналогично рассуждая, а также согласно схеме на рис. 7 и учитывая необходимость попадания в поле допуска на средний диаметр, получаем:

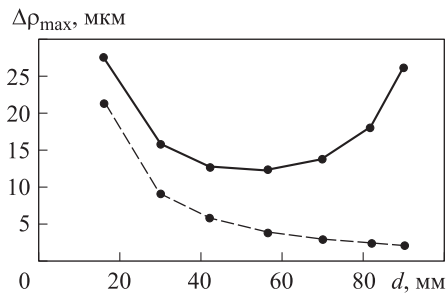
$$R_{PRG} = \frac{d_\Phi}{2} + \Delta;$$

$$a_{p1} = a_\Phi + 2\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)(\Delta\rho_{\max} + \Delta);$$

$$R_{PRG} = \frac{d_\Phi}{2} + \frac{a_{p1} - a_\Phi}{2\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} - \Delta\rho_{\max} + k \frac{Td_2}{2}.$$

На рис. 9 приведены сравнительные зависимости геометрической погрешности профиля наружной резьбы при фрезеровании по схемам, показанным на рис. 6 и 7. Для расчета программируемого радиуса при охватывающем фрезеровании можно также использовать зависимости, приведенные в литературе [12].

**Выводы.** 1. На основе расчетных схем фрезерования наружной и внутренней резьб предложены зависимости для расчета программируемого радиуса резьбовых фрез, что позволяет сократить время на технологическую подготовку операции фрезерования за счет исключения пробных проходов.



**Рис. 9.** Зависимость геометрической погрешности профиля наружной резьбы  $\Delta r_{max}$  от номинального диаметра  $d$  при охватывающем (сплошная) и наружном (штриховая) фрезеровании

2. Предложены методические подходы к выбору значений программируемого радиуса резьбовых фрез для обработки резьбы различных степеней точности.

3. Результаты работы могут быть использованы на этапе проектирования резьбовых фрез и при разработке программы для коррекции программируемого радиуса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мальков О.В. Анализ способов обработки резьбы фрезерованием // Наука и образование: научное издание. 2016. № 4. С. 1–33. DOI: 10.7463/0416.0838440
2. Мальков О.В. Основные направления исследования резьбофрезерования и проектирования резьбовых фрез // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-4-1487 URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/temp/1487.html>
3. CoroMill Plura // Sandvik Coromant: веб-сайт компании. URL: [http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/coromill\\_plura/](http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/coromill_plura/) (дата обращения: 23.05.2016).
4. Резьбонарезание. Точение и фрезерование резьбы. Техническое руководство // Sandvik Coromant: веб-сайт компании. URL: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/technical%20guides/ru-ru/C-2920-031.pdf> (дата обращения: 23.05.2016).
5. Threading with Walter Prototyp // Walter: веб-сайт компании. URL: <http://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/manuals/en-gb/handbook-prototyp-threading-2012-en.pdf> (дата обращения: 23.05.2016).
6. Твердосплавные резьбофрезы // Dormer Pramet: веб-сайт компании. URL: <http://www.dormerpramet.com/Downloads/TMC%20RU.pdf> (дата обращения: 29.11.2016).
7. Технология резьбообразования. Технология крепления // Emuge-Franken: веб-сайт компании. URL: <http://www.emuge-franken.ru/files/TECH140RU11.pdf> (дата обращения: 07.08.2015).
8. Левицкий М.Я. Резьбофрезерование. Киев: Машгиз. Украинское отд-ние, 1950. 192 с.
9. Мальков О.В., Литвиненко А.В. Выбор наружного диаметра резьбовой части сверло-резьбофрезы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1997. № 3. С. 78–84.
10. Древаль 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: 10.18698/0536-1044-2011-12-44-52

11. Мальков О.В. Разработка модели точности профиля наружной резьбы при резьбофрезеровании // СТИН. 2012. № 8. С. 27–32.

12. Мальков О.В., Головки И.М. Разработка и исследование модели точности профиля наружной резьбы при охватывающем резьбофрезеровании // Вестник машиностроения. 2012. № 2. С. 65–70.

**Мальков Олег Вячеславович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба сослаться на эту статью следующим образом:**

Мальков О.В. Обеспечение точности резьбы при фрезеровании на этапе проектирования инструмента // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 3. С. 75–90. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-3-75-90

**ENSURING THREAD PRECISION DURING MILLING  
AT THE TOOL DESIGN STAGE**

**O.V. Malkov**

olma70@mail.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

The article presents programmable radius calculations for a threading mill, which may be used in CNC programming for process design of a thread milling operation without using trial passes, which will significantly reduce design time and increase the lifespan of the tool. We reviewed previous publications and analysed existing approaches to calculating the programmable radius, which allowed us to determine that the programmable radius is not a function of tool parameters. This makes it possible to specify the programmable radius value at the tool design stage. Taking into account the thread precision required, we developed a system of mathematical dependencies that makes it possible to calculate the programmable radius while designing a thread mill for cutting external or internal threads

**Keywords**

*Programmable radius, thread, thread mill, thread milling*

Received 22.05.2017

© BMSTU, 2018

---

**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, pp. 1–33 (in Russ.).

DOI: 10.7463/0416.0838440

[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 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-4-1487

[3] CoroMill Plura. Sandvik Coromant: company website.

Available at: [http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/coromill\\_plura](http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/coromill_plura)

(accessed: 23.05.2016). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/temp/1487.html>

- [4] Rez'bonarezanie. Tochenie i frezerovanie rez'by. Tekhnicheskoe rukovodstvo [Threading. Thread turning and milling. Technical guide]. Sandvik Coromant: company website. Available at: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/technical%20guides/ru-ru/C-2920-031.pdf> (accessed: 23.05.2016).
- [5] Threading with Walter Prototyp. Walter: company website. Available at: <http://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/manuals/en-gb/handbook-prototyp-threading-2012-en.pdf> (accessed: 23.05.2016).
- [6] Tverdosplavnye rez'bofrezy [Hardmetal threading mill]. Dormer Pramet: company website. Available at: <http://www.dormerpramet.com/Downloads/TMC%20RU.pdf> (accessed: 29.11.2016).
- [7] Tekhnologiya rez'boobrazovaniya. Tekhnologiya krepleniya [Thread formation technology. Attaching technology]. Emuge-Franken: company website. Available at: <http://www.emuge-franken.ru/files/TECH140RU11.pdf> (accessed: 07.08.2015).
- [8] Levitskiy M.Ya. Rez'bofrezerovanie [Thread milling]. Kiev, Mashgiz. Ukrainское отделение Publ., 1950. 192 p.
- [9] Mal'kov O.V., Litvinenko A.V. Outside diameter selection for threaded part of drill thread milling cutter. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 1997, no. 3, pp. 78–84 (in Russ.).
- [10] Dreval' A.E., Mal'kov O.V., Litvinenko A.V. Accuracy of machining internal threads with a combined tool. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2011, no. 12, pp. 44–52 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2011-12-44-52
- [11] Mal'kov O.V. Precision of the external-thread profile in thread cutting. *Russian Engineering Research*, 2013, vol. 33, no. 3, pp. 172–175. DOI: 10.3103/S1068798X1303012X
- [12] Mal'kov O.V., Golovko I.M. Development and investigation of the external thread profile model accuracy at female milling. *Vestnik mashinostroeniya*, 2012, no. 2, pp. 65–70 (in Russ.).

**Malkov O.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Tooling Equipment and Technologies, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Malkov O.V. Ensuring Thread Precision During Milling at the Tool Design Stage. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 3, pp. 75–90 (in Russ.).  
DOI: 10.18698/0236-3941-2018-3-75-90