

УДК 621.9

Анализ способов обработки резьбы фрезерованием

Мальков О. В.^{1,*}

[*olma70@mail.ru](mailto:olma70@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проведенный анализ существующих способов фрезерования резьбы позволил рассмотреть их достоинства и недостатки, а также выявить классификационные признаки и разработать классификацию этих способов. Литературный обзор выявил патенты на конструкции резьбофрезерных инструментов и способы резьбофрезерования. Результаты работы могут быть полезны для технологов машиностроительных предприятий и специалистов в области резьбообработки для оценки возможности использования представленных способов в технологическом процессе.

Ключевые слова: резьбофрезерование, резьбовая фреза, резьба, способы обработки резьбы

Введение

В настоящее время для производства резьбовых соединений все чаще применяются резьбовые фрезы. Это, в первую очередь, связано с широким внедрением в промышленное производство станков с ЧПУ, позволяющих осуществить кинематическую схему резьбофрезерования.

Резьбовые фрезы обладают целым рядом преимуществ, основными из которых являются: обработка глухой или сквозной, однозаходной или многозаходной резьбы различного диаметра и одного шага одним типоразмером инструмента в материалах, как в состоянии поставки, так и в закаленном состоянии, образование мелкой сегментной стружки легко удаляемой из зоны обработки, высокое качество обработанной поверхности резьбы, возможность легкого извлечения сломанного инструмента из отверстия и ряд других преимуществ. В качестве недостатка можно указать, что из-за радиального отгиба инструмента возникает конусообразность резьбы, которая может повлиять на точность резьбы.

Однако, несмотря на существенные преимущества резьбовых фрез, применяются они на предприятиях в значительно меньшем объеме, чем метчики. Это можно объяснить тем, что обработка внутренней резьбы метчиками имеет более длительный опыт приме-

ния в технологии производства изделий, следовательно, эта операция имеет большее литературное, методическое и производственное обеспечение. Наладка операции нарезания резьбы метчиками считается отработанной, в то время как наладка операции резьбофрезерования по данным каталога не всегда приводит к положительным результатам, что существенно увеличивает время технологической подготовки производства. Об этом может свидетельствовать большое количество сообщений о проблемах при резьбофрезеровании, размещаемых на специализированных форумах. В основном это касается вопросов точности и качества нарезаемой резьбы. Кроме указанного выше, стоимость резьбовой фрезы изготовленной из твердого сплава больше стоимости метчика того же диаметра. По данным операторов и технологов, значительная часть резьбовых фрез ломается вне операции резания при отработке программы. Это свидетельствует о том, что для широкого внедрения в производство резьбофрезерования необходимо обеспечить весь комплекс мероприятий, начиная от разработки конструкций резьбовых фрез до исследования их эксплуатационных характеристик и параметров режима резьбофрезерования. Особенно актуально решение этих вопросов в настоящее время, когда перед разработчиками стоит задача обеспечения импортозамещения инструментальной техники и технологий.

Патентный обзор изобретений в области резьбофрезерования

Проведен патентный обзор способов обработки резьбы фрезерованием и конструкций инструментов для их реализации.

В таблице 1 представлены отечественные изобретения в области резьбофрезерования. Использованы авторские свидетельства и патенты на способы резьбофрезерования и конструкции применяемых резьбовых фрез и не указаны изобретения, которые касаются станков и приспособлений для резьбофрезерования. Курсивом указаны изобретения, которые относятся к фрезерованию резьбы винтовыми фрезами.

Первое авторское свидетельство на резьбовую фрезу по данным открытого реестра ФГБУ ФИПС зарегистрировано в 1940 году (АС №58710). Ранее было представлено описание изготовления резьбовых фрез (АС №44766). Патентный поиск не выявил более ранних конструкций отечественных резьбовых фрез, поэтому можно сделать вывод, что наличие более раннего изобретения на технологию изготовления связано с наличием еще более ранних зарубежных патентов на конструкции резьбовых фрез (начиная с начала 19 века). Анализ отечественных изобретений показал, что основы конструкций резьбовых фрез (в основном из быстрорежущей стали) заложены в 40-х...50-х годах, в то время как с 80-х годов и по настоящее время, в основном, патентуются цельные и сборные резьбовые фрезы (в том числе комбинированные), изготовленные из твердого сплава.

Таблица 1. Отечественные изобретения в области резбофрезерования.

№ п/ п	Номер свидетельства	Изобретение	Автор	Дата заявки	Дата публикации
1	АС №44766	Описание способа нарезания кольцевых резбовых фрез на затыловочном станке	В.М.Чеверда, Н.С.Иванский	11.08.1934	31.10.1935
2	АС №58710	Резбовая фреза	А.М.Котляр	15.02.1940	31.01.1941
3	АС №59130	<i>Способ нарезания резьбы червячной фрезой</i>	<i>Н.К.Клебанов</i>	<i>19.04.1939</i>	<i>28.02.1941</i>
4	АС №68404	Групповая резбовая фреза	Ю.Л.Фрумин	04.04.1945	31.05.1947
5	АС №75603	<i>Способ фрезерования резьбы на токар- ном станке при помощи винтовых фрез</i>	<i>И.К.Ушкало</i>	<i>11.06.1948</i>	<i>30.06.1949</i>
6	АС №77863	Цилиндрическая резбовая фреза	С.Л.Шиманович	11.10.1948	-
7	АС №132052	Резбовая гребенчатая фреза	А.Т.Яковлев	20.01.1960	1960
8	АС №134113	Способ нарезания резьбы на крупнога- баритных деталях на зубофрезерном станке	Е.И.Шишкин, И.С.Миценгендлер	26.04.1960	1960
9	АС №344946	Охватывающая гребенчатая резбовая фреза	В.И.Загурский	09.04.1954	14.07.1972
10	АС №380409	<i>Способ нарезания резьбы</i>	<i>В.В.Лоцманенко</i>	<i>16.07.1970</i>	<i>15.05.1973</i>
11	АС №395195	Обхватывающая гребенчатая резбовая фреза	С.С.Черников, Л.К.Мануйлов, Е.В.Шашков, А.О.Этин и др.	15.07.1970	28.08.1973
12	АС №1039658	Способ обработки резбовых деталей с упорными уступами или упорными тор- цами	А.Т.Яковлев, В.И.Бубенцов	23.04.1981	07.09.1983
13	АС №1174192	Резбовая гребенчатая фреза	Л.Г.Абуггов, А.Л.Абуггов	05.08.1983	23.08.1985
14	АС №1214350	<i>Способ нарезания внутренней резьбы</i>	<i>В.Н.Воронов, С.П.Баранов</i>	<i>15.09.1984</i>	<i>28.02.1986</i>
15	АС №1299706	<i>Способ фрезерования резьбы и устройст- во для его осуществления</i>	<i>В.Н.Воронов</i>	<i>03.07.1985</i>	<i>30.03.1987</i>
16	АС №1328093	<i>Способ формообразования резьбы</i>	<i>В.Н.Воронов</i>	<i>10.07.1985</i>	<i>07.08.1987</i>
17	АС №1389954	Способ нарезания резьбы фрезеровани- ем на станках с ЧПУ	В.Я.Нестеров, В.А.Демичев	30.09.1986	23.04.1988
18	АС №1618534	<i>Резбовая фреза</i>	<i>В.Н.Воронов, С.П.Баранов</i>	<i>17.02.1988</i>	<i>07.01.1991</i>
19	АС №1701450	Фасонная фреза	В.Б.Протасьев, Э.С.Спиридонов, С.И.Соловьев и др.	22.12.1988	30.12.1991
20	АС №1784420	Способ изготовления сборной резбона- резной гребенчатой фрезы	Л.Я.Ткаченко, А.И.Патрушев	12.05.1988	30.12.1992
21	АС №1815037	Резбонарезной инструмент	Е.Г.Кузовенко, А.Н.Юшкевич, Ю.А.Абрамов	11.09.1990	15.05.1993

№ п/ п	Номер свидетельства	Изобретение	Автор	Дата заявки	Дата публикации
22	Пат РФ 2210470	Способ нарезания резьбы	В.В.Лоцманенко, М.В.Лоцманенко	28.05.2001	20.08.2003
23	Пат РФ 2224625	Сборная резьбовая фреза	В.Г.Даниленко, В.П.Белоусов, Д.Н.Клауч и др.	05.02.2002	27.02.2004
24	Пат РФ 2268 117	Резьбофрезерно-накатная головка	Ю.С.Степанов, А.В.Киричек, А.Н.Афонин и др.	06.07.2004	20.01.2006
25	Пат РФ 2 300 449	Резцовая головка для фрезерования внутренней резьбы	В.А.Гречишников, В.А.Косарев, Д.В.Косарев	30.08.2005	10.06.2007
26	Пат РФ 2 412 028	Резцовая головка для фрезерования внутренней резьбы	В.А.Гречишников, В.А.Косарев, В.В.Серета, Д.В.Косарев	22.10.2009	20.02.2011
27	Пат РФ 2 414 998	Резцовая головка для фрезерования резьбы	А.Н.Прокофьев, Ю.А.Малахов, И.Ю.Цуканов	16.06.2009	27.03.2011
28	Пат РФ 2 438 834	Резцовая головка для обработки внут- ренних цилиндрических поверхностей	В.А.Гречишников, В.А.Косарев, А.А.Горовой, В.В.Серета	27.04.2010	10.01.2012
29	Пат РФ 2 453 406	Сборная резьбовая головка для плане- тарного формообразования внутренней резьбы	В.А.Гречишников, В.А.Косарев, В.Ф.Иванов	08.02.2011	20.06.2012
30	Пат РФ 2492975	Резцовая головка для фрезерования внутренней резьбы	В.А.Рогов, А.В.Рогова, Т.В.Никифорова	24.05.2012	20.09.2013

Обзор зарубежных электронных патентных ресурсов размещенных в открытом доступе (*Espacenet*, *USPTO*, *DEPATISnet*) показал, что к настоящему времени за пределами России зарегистрировано около 300 патентов, относящихся к области резьбофрезерования, включающих способы, станки, приспособления и конструкции резьбовых фрез, включая комбинированные инструменты на основе конструкции резьбовой фрезы [1]. Одна из первых конструкций станка для фрезерования резьбы представлена в патенте на изобретение № 655878, зарегистрированном в США *H.Liebert* (дата заявки 12.12.1899 г.).

Одной из первых конструкций резьбовых фрез появилась конструкция дисковой насадной фрезы, которая описана в патенте на изобретение № 703577, зарегистрированным в США *B.M.W.Hanson* (дата заявки 05.07.1901 г.). Позднее появилась групповая резьбовая фреза (патент США № 1140130, автор *C.A.Dies*, зарегистрирован 31.12.1912 г.). Обзор показал, что активное патентование за рубежом конструкций станков и инструментов для резьбофрезерования приходится на периоды 1910-1930 годы, а различных конструкций

резьбофрез - с 1990 года по настоящее время. Первый активный период связан со становлением процесса резьбофрезерования и разработкой его теоретических и практических основ, а второй - с широким внедрением станков с ЧПУ, позволяющих реализовать кинематику планетарного движения для обеспечения резьбофрезерования.

Ниже представлены способы фрезерования резьбы, которые нашли отражение в литературном обзоре. Для всех способов указаны авторские названия.

Способы фрезерования резьбы

1. Фрезерование резьбы концевой фрезой

Способ фрезерования резьбы концевой фрезой встречается в литературных источниках крайне редко [2,3]. На рисунке 1 представлена схема фрезерования трапецеидальной резьбы, при котором оси инструмента и нарезаемой резьбы перпендикулярны. Для реализации подобной схемы обработки требуется три одновременно действующих движения (движения D_r , D_{S1} , D_{S2}), из которых два движения взаимно связаны для осуществления движения вдоль винтовой линии резьбы (D_{S1} и D_{S2}). Такая схема может быть реализована, например, на токарно-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ *Mazak Integrex 200-IV*. При этом заготовка имеет вращательное движение подачи D_{S1} , а инструмент, закрепленный во фрезерной головке - главное движение вращения D_r и движение подачи D_{S2} .

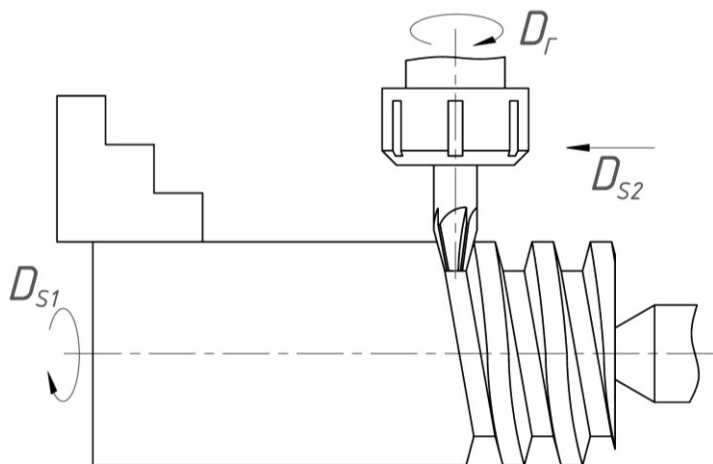


Рисунок 1. Фрезерование трапецеидальной резьбы концевой фрезой.

В качестве достоинства можно указать универсальность способа: одним инструментом можно обработать правую и левую, однозаходную и многозаходную резьбу различного шага на одном диаметре резьбы.

Фрезерование концевой фрезой или двумя концевыми фрезами, каждая из которых обрабатывает свою половину профиля, применяют для обработки наружных винтовых поверхностей глубоких ручьев, например валков диаметром свыше 300 мм для поперечно-винтовой прокатки [2].

Недостатками являются: низкая производительность; возможность обработки только наружной резьбы; наличие дефекта резьбы на торце детали (в начале обработки), связанного с отгибом стружки «нулевой» толщины до тех пор, пока фреза не врежется на полный профиль; обработка только трапецеидальной резьбы (сложность организации обработки метрической резьбы связана с маленькой глубиной фрезерования и организацией зубьев на инструменте); маленький диаметр инструмента может привести к вибрациям и неудовлетворительному качеству получаемой резьбы; фреза имеет определенное значение диаметра на торце, который формирует впадину резьбы, поэтому фреза может не подойти для обработки резьбы другого шага с отличной от предыдущей шириной впадины.

2. Фрезерование резьбы торцевой фрезой

Фрезерование наружной резьбы торцевой фрезой встречается в литературных источниках крайне редко [4,5]. Обработка производится торцевой фрезой с профилированными резцовыми вставками с режущей частью, изготовленной из твердого сплава. На рисунке 2 представлена схема с расположенными под углом осями фрезы и нарезаемой резьбы. При фрезеровании короткой резьбы ось фрезы может быть перпендикулярна оси нарезаемой резьбы. Для реализации подобной схемы обработки требуется три одновременно действующих движения, из которых два движения взаимно связаны для осуществления движения вдоль винтовой линии резьбы.

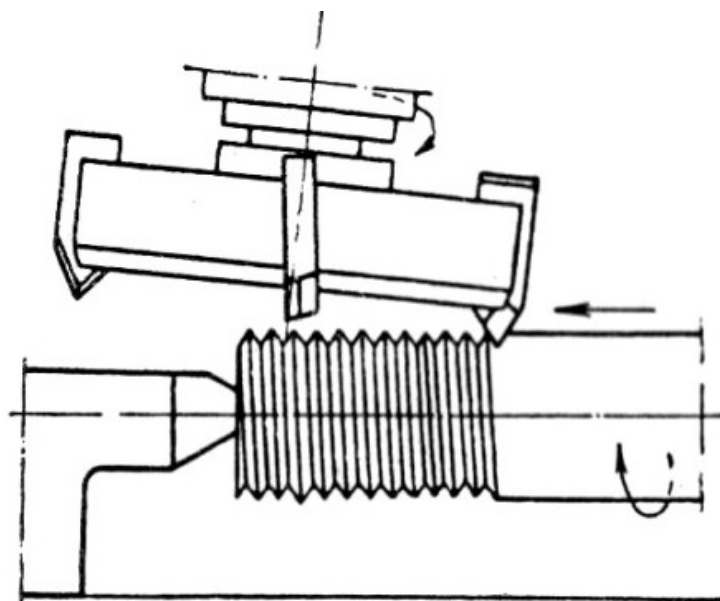


Рисунок 2. Фрезерование резьбы торцевой фрезой.

В качестве достоинства торцевого фрезерования резьбы можно указать универсальность способа: одним инструментом можно обработать правую и левую, однозаходную и многозаходную резьбу различного шага.

Недостатками являются: возможность обработки только наружной резьбы; необходимость профилирования резбовых вставок, связанная с геометрическими и конструк-

тивными параметрами фрезы, нарезаемой резьбы и угла их взаимного расположения; для повышения точности резьбы необходима фреза возможно большего диаметра, поскольку траектория зубьев пересекается с направлением витков резьбы.

3. Вихревое (скоростное) нарезание резьбы

Вихревое (скоростное) нарезание резьбы (рисунок 3) позволяет изготовить наружную или внутреннюю, правую или левую, однозаходную или многозаходную резьбу любого профиля.

На рисунке 3,а-в представлены схемы обработки наружной и внутренней резьбы вихревым способом, где D_0 , D_1 - номинальный и внутренний диаметры резьбы соответственно, φ - угол контакта, D - диаметр окружности, описываемой зубьями фрезерной головки. Нарезание наружной резьбы резцовыми головками ведут двумя способами: с внутренним касанием (рисунок 3,б - охватывающее фрезерование) и с внешним касанием (рисунок 3,а) [2,6,7,8].

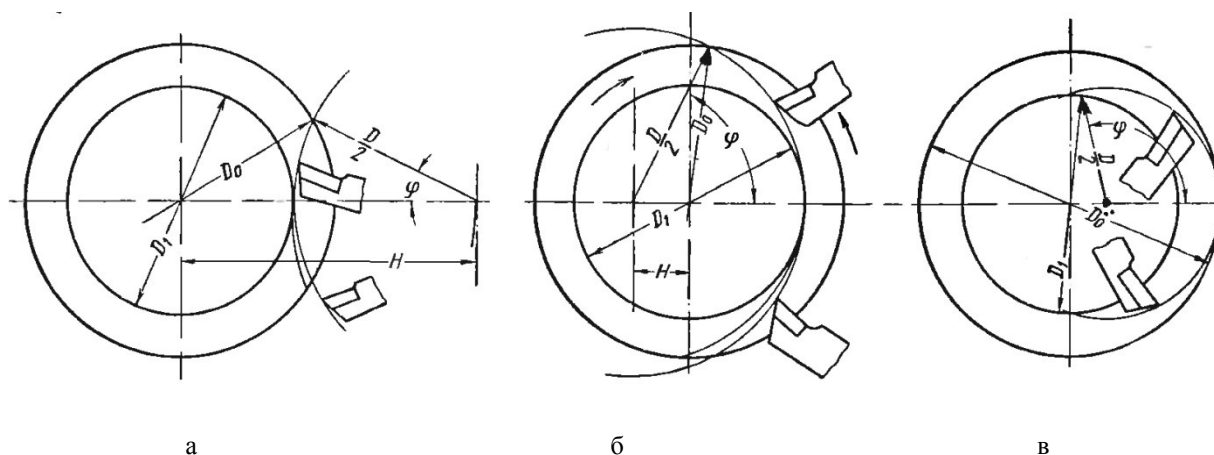


Рисунок 3. Вихревое нарезание резьбы. а - обработка наружной резьбы внешним касанием, б - обработка наружной резьбы внутренним касанием (охватывающее фрезерование), в - обработка внутренней резьбы внутренним касанием.

Вихревое нарезание резьбы (или вихревое нарезание резьбы) проводят с помощью специального приспособления, монтированного на суппорте токарного или резцовой фрезерного станка (рисунок 4) [22]. На шпинделе приспособления (поз.4) закреплена резцовая головка (поз.3) с резцами (поз.5) с рабочей частью, оснащенной твердым сплавом. Вращение резцовой головки производится от электродвигателя (поз.1) посредством клиноременной передачи (поз.2). Частота вращения шпинделя приспособления составляет $n = 1000...3000$ об/мин. Изменение частоты вращения обеспечивается шкивом со ступенями различного диаметра, установленным на электродвигателе приспособления. Деталь с нарезаемой резьбой закрепляется в патроне станка или устанавливается в центрах. Частота вращения детали существенно меньше частоты вращения приспособления.

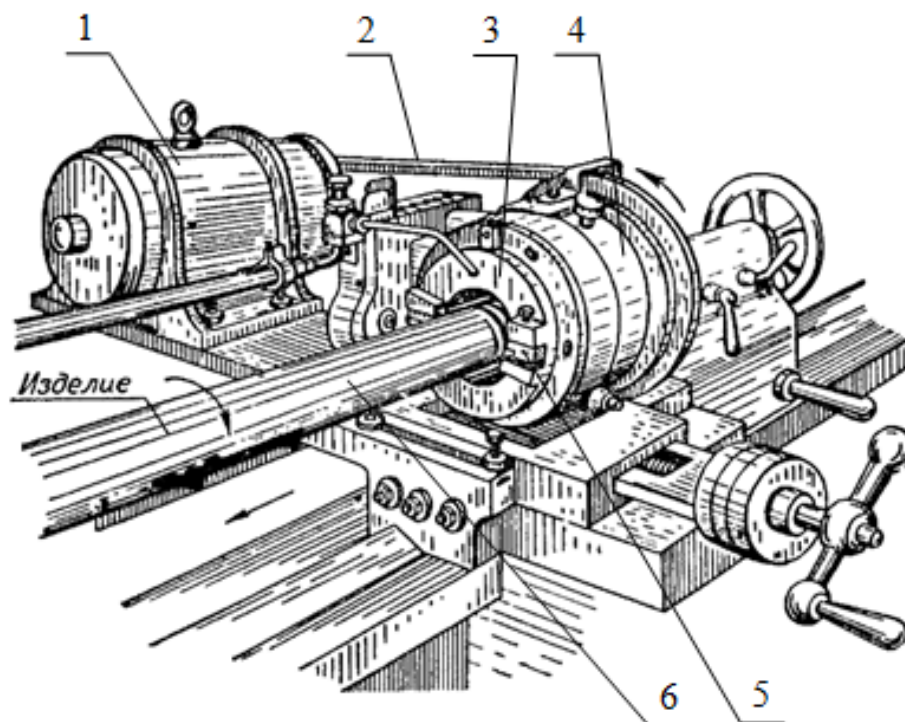


Рисунок 4. Общий вид приспособления для вихревого нарезания резьбы [9].

Вихревое нарезание резьбы является самым производительным способом для изготовления резьбы с большими шагом и длиной. Применение в вихревой головке резцов с рабочей частью из композита позволяет существенно повысить производительность обработки трапецеидальной резьбы по сравнению с твердосплавными резцами при сопоставимой точности и качестве обработки [20,21].

Вихревое нарезание внутренней резьбы имеет ряд отличий от обработки наружной резьбы [8]: при обработке внутренней резьбы инструмент ограничен в пространстве, поэтому в общем случае вихревая головка должна быть повернута в двух плоскостях для размещения инструмента и обеспечения требуемой точности резьбы; для обеспечения нарезания внутренней резьбы рекомендуется применять отдельную вихревую установку с регулировкой углов в двух плоскостях; поворот головки одновременно в двух плоскостях или просто в горизонтальной плоскости требует профилирования инструмента; угол контакта при обработке внутренней резьбы больше, чем при обработке наружной резьбы внешним касанием, поэтому применение числа зубьев более четырех приводит к одновременной работе нескольких зубьев, что приводит к вибрациям и насечкам на резьбе.

В настоящее время вихревое нарезание резьбы активно применяется как одна из технологических операций изготовления резьбы специального профиля на костных винтах, применяемых в травматологии и ортопедии при остеосинтезе, фиксации костных пластин на кость и укреплении штифтов (рисунок 6,а-в) [10...14]. Прутки для производства костного винта (диаметром, как правило, 4...12 мм) обычно изготавливают из титана или нержавеющей стали. Для вихревого нарезания резьбы (за рубежом процесс называют *Thread*

Whirling) используют автоматы продольного точения (например, *Star*, *Citizen*, *Tornos*, *Traub* и другие) с подающей цангой для обеспечения самоподачи прутка. В качестве инструмента для вихревого резбифрезерования используются вихревые головки аналогичные представленной на рисунке 6,а-в. При этом вихревая головка не является самостоятельным инструментом и используется в комплекте со специальным приводным блоком (изготовители приводных блоков *Madaula s.a*, *PCM*, *WTO* и другие), конструкция которого зависит от применяемого типа станка. Для примера, приводной блок *WTO*: позволяет устанавливать вихревые головки (расчетный номинальный диаметр обработки - 12 мм) с возможностью установки до 12 резбовых пластин, что существенно повышает производительность и снижает вибрацию при обработке; позволяет производить замену вихревой головки с задней стороны станка, обладает системой быстрой смены вихревой головки, что позволяет заменить резбовые пластины вне станка; обеспечивает диапазон регулировки поворота головки в пределах $0^{\circ}...20^{\circ}$; обеспечивает минимальное радиальное биение и повторяемость пластин (макс. $\pm 0,005$ мм); обеспечивается интерфейсом, позволяющим использовать приводной блок на всех имеющихся токарных автоматах продольного точения с ЧПУ [10].

Обработка выполняется при эксцентриковом вращении вихревой головки вокруг медленно вращающейся заготовки за один проход [11]. При этом происходит перемещение заготовки или головки в продольном направлении соответственно требуемому шагу резьбы на оборот заготовки (рисунок 6,в). Обработка производится близко к цанге, выступающей в качестве люнета, что повышает жесткость обработки. Вихревое нарезание резьбы позволяет работать на высоких скоростях, что снижает основное время обработки. При этом обеспечивается высокое качество обработанной поверхности и точность изготовления за счет использования большого количества режущих пластин (обычно до 8), высокой точности исполнения посадочных гнезд под пластины и хорошего стружкоотвода. Кинематика вихревого резбифрезерования обеспечивает повышенную стойкость инструмента (благоприятные условия работы: плавный вход-выход, обработка за один проход уменьшает время обработки, хороший стружкоотвод). При вихревом нарезании резьбы не требуются какие-либо специальные опорные приспособления и затраты на наладку, что уменьшает вспомогательное время.

Пример вихревого нарезания резьбы [13]: для обработки костного винта используется автомат продольного точения *Tsugami 14*, оснащенный системой *Sandvik Coromant* для вихревого нарезания резьбы *CoroMill 325*, специализированной головкой для вихревого резбонарезания и предпочтительно насосом для подачи СОЖ под высоким давлением с фильтром. Для закрепления требуется контршпindel. Объем партии винтов 500000 шт/год. Обработываемый материал - титановый сплав *Ti-6Al-4V ELI*; параметры резьбы: наружный диаметр - 3,5 мм, длина резбовой части винта - 25 мм, шаг - 1 мм, профиль - *HA4*; максимальная толщина стружки - 0,04 мм (максимальное значение подачи - 0,15 мм/зуб), скорость резания - 26 м/мин, число проходов - 1, основное время обработки - 0,6 мин.

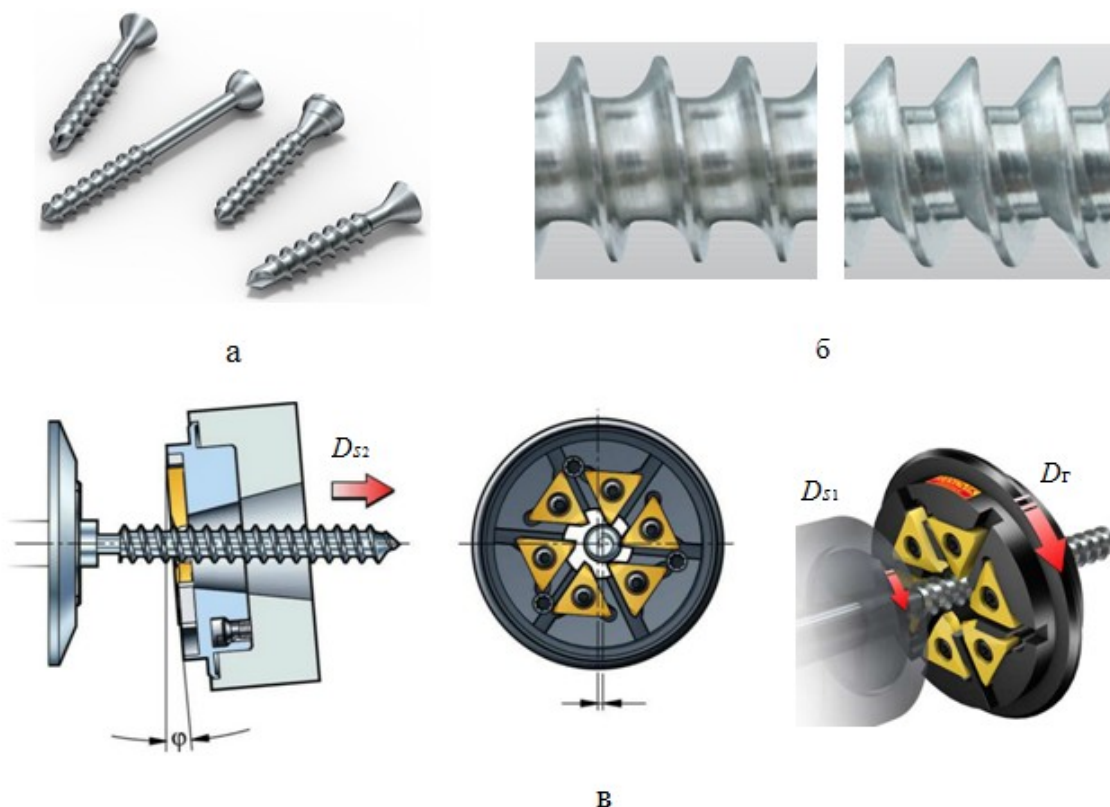


Рисунок 6. Вихревое нарезание резьбы на костных винтах. а - общий вид костных винтов, б - профиль нарезаемой резьбы на костных винтах, в - схема вихревого нарезания резьбы [12].

Стоит отметить, что в настоящее время границы между понятиями «вихревое нарезание резьбы» и «фрезерование резьбы» существенно сблизились. В 40-х...70-х годах основными отличительными особенностями вихревого нарезания резьбы являлись: обработка протяженной резьбы на токарном станке, использование вихревой головки с резцами, оснащенными рабочей частью из твердого сплава, повернутой относительно оси резьбы. В настоящее время подавляющее большинство фрез для обработки резьбы изготовлены из твердого сплава или оснащены пластинами из твердого сплава, а однодисковые фрезы могут быть ориентированы под углом к оси резьбы. По сути, головка со сменными пластинами для фрезерования резьбы на винтах (рисунок 6) есть резьбовая фреза, а процесс – фрезерование, реализованное на многошпиндельном автомате. А, например, вихревая обработка ходовых винтов или червяков является фрезерованием охватывающей фрезой, повернутой относительно оси нарезаемой резьбы.

4. Фрезерование резьбы методом огибания

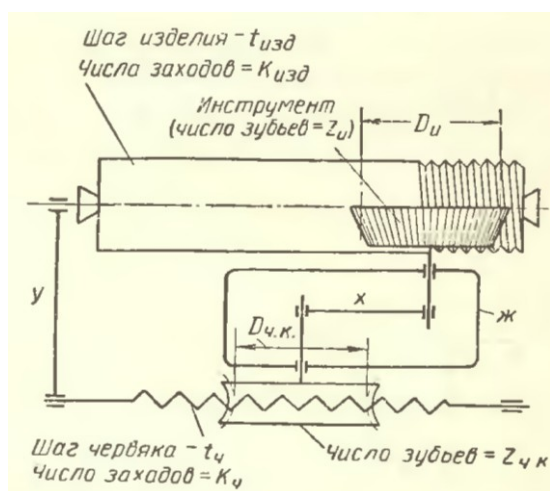
В Советском Союзе способ фрезерования резьбы при помощи червячных фрез был предложен Н.К.Клебановым в 1939 году (АС № 59130). Автор предложил способ, при котором заготовку и фрезу с параллельными осями вращают с разным числом оборотов и сообщают им осевое перемещение друг относительно друга для увеличения числа резов.

Рассмотрим вначале способ точения резьбы методом огибания. В США *James P. Johnson* предложил устройство для обработки винтовых поверхностей резьбы и червяка методом огибания (US 1406985 (1920 г.)). Патенты на изобретение оборудования, способа

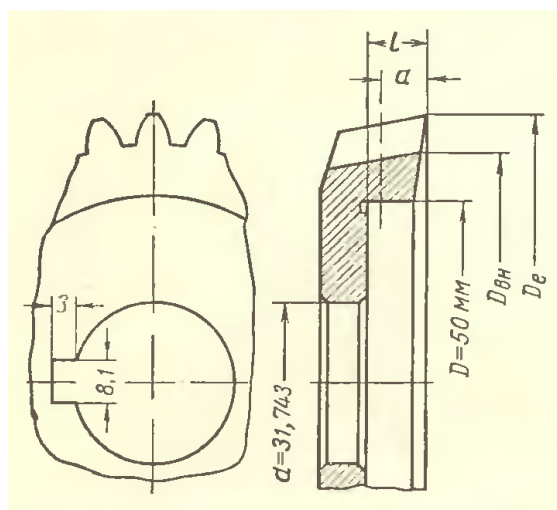
и инструмента, реализующих этот способ, получены также в США *E.W.Miller* (US 1461219 (1921 г.), US 1558704 (1923 г.), US 1681994 (1924 г.) и US 1833255 (1928 г.)) и *O.G.Simmons* (US 1551705 (1921 г.)). Авторами предложено обрабатывать не только резьбу на деталях, но и профиль режущих инструментов с винтовой производящей поверхностью (метчики, червячные фрезы и др.).

В Советском Союзе С.П. Корсаков предложил конструкцию станка для нарезания с одновременным затылованием червячных фрез долбяком методом обкатывания (АС №60899 (1939 г.)).

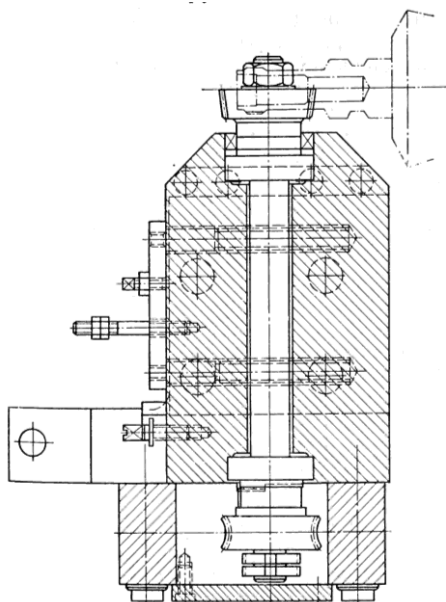
Способ точения методом огибания заключается в том, что режущий инструмент, по форме напоминающий долбяк, устанавливается на суппорт токарного станка и работает согласно схеме представленной на рисунке 7 а,б [4,6].



а



б



в

Рисунок 7. Схема обработки наружной резьбы по методу огибания. а - схема обработки, б - основные параметры инструмента, в - приспособление для обработки резьбы на многошпиндельном автомате.

Во время обработки изделие совершает вращательное движение, а инструмент - поступательное, вдоль оси изделия (за один оборот изделия инструмент перемещается на один шаг резьбы, при многозаходной резьбе учитывается число заходов) и вращательное - вокруг своей оси (за один оборот изделия инструмент поворачивается на угол, соответствующий одному зубу, умноженному на число заходов). Обработку можно производить одним или двумя инструментами. Инструмент обрабатывают на станке для изготовления долбяков.

Способ обработки по методу огибания может быть реализован также на многошпиндельных автоматах (рисунок 7,в) [15]. В литературе [15] указанный способ назван резьбофрезерованием.

Анализ свидетельств на изобретения (таблица 1) и литературных источников [5,16,17,18,19,23,24,25,26,27,28] показывает, что в Советском Союзе, а затем и в России развитию направления резьбофрезерования винтовыми фрезами уделяли внимание Клебанов Н.К., Ушкало И.К., Скухторов С.И., Хлунов В.Н., Лоцманенко В.В., Лоцманенко М.В., Глушко Е.В., Воронов В.Н., Ямников А.С., Кузнецов В.И., Лашнев С.И., Люкшин В.С., Баранов С.П., Серова Е.В., Солянкин Д.Ю., Этин А.О.

Анализ работ позволяет сделать вывод о том, что способ резьбофрезерования винтовыми фрезами можно разделить на два направления, которые авторы [23,24,25,17,18,19,26,27] считают принципиально различными: резьбофрезерование методом огибания, использующее попутную схему обработки [23,24,25] и фрезоточение, использующее встречную схему обработки [17,18,19,26,27].

4.1. Фрезерование методом огибания

Способ фрезерования резьбы методом огибания предложен Лоцманенко В.В. (АС 380409). Суть способа заключается в том, что фреза с обрабатываемой резьбой составляют винтовую пару оси которых расположены в одной плоскости, а точку касания центроид винтовой пары смещают относительно полюса зацепления фрезы и заготовки. На рисунке 8 а,б представлена схема нарезания наружной цилиндрической резьбы. Аналогично возможно изготовление конической и внутренней резьбы, однозаходной и многозаходной резьбы. На рисунке 8 приняты следующие обозначения: 1 – обрабатываемая резьба, 2 – червячная фреза, r_1, r_2 – радиусы центроид резьбы и фрезы соответственно.

Нарезание резьбы предлагаемым способом возможно только при попутном фрезеровании. Винтовые линии фрезы и резьбы должны быть противоположного направления. В точках резания винтовые линии фрезы и резьбы имеют общую касательную плоскость, поэтому применение этого способа не зависит от угла подъема винтовой линии резьбы.

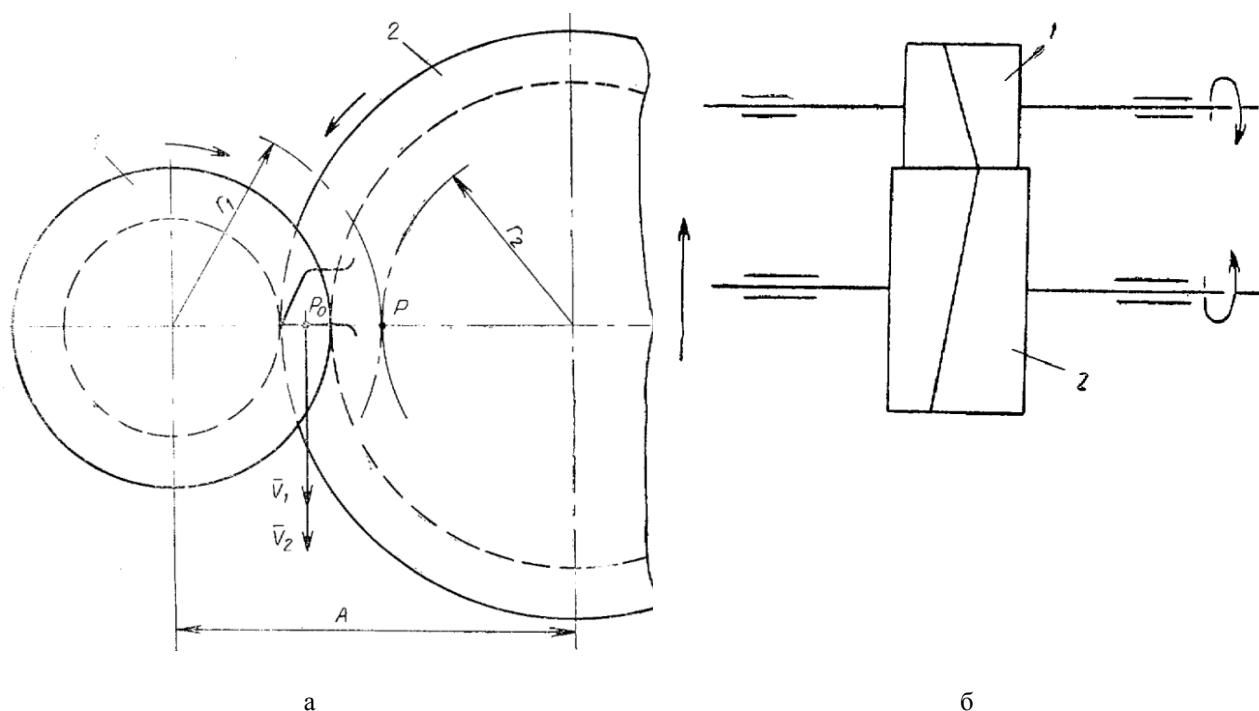


Рисунок 8. Способ фрезерования наружной резьбы методом огибания: а – схема зацепления фрезы и резьбы, б – кинематическая схема нарезания наружной резьбы.

Для создания в зоне резания относительной скорости скольжения поверхностей заготовки и фрезы точку касания центроид P смещают (точка P_0 на рисунке 8) за счет увеличения диаметра фрезы. Автором приняты следующие соотношения: передаточное отношение $i_{1,2} = r_1 / r_2$; межосевое расстояние $r_1 + r_2 = A$; скорость относительного скольжения $V_{21} = V_2 - V_1 \neq 0$ и должна быть $V_{21} > 0$. При значительном превышении диаметра резьбы диаметром фрезы возможно подрезание резьбы. Поскольку число зубьев фрезы является конечным, то поверхность резьбы получается граненной. Для уменьшения огранки требуется по возможности большее число зубьев. Предлагаемый способ требует профилирования зубьев фрезы, поскольку в осевом сечении профили резьбы и фрезы различаются.

Способ фрезерования резьбы огибанием может быть непосредственно реализован на резьбофрезерных полуавтоматах. При использовании токарного станка требуется дополнительная оснастка.

Развитие способа фрезерования резьбы методом огибания реализовано в патенте РФ 2210470 (авторы - Лоцманенко В.В., Лоцманенко М.В.). Для устранения зависимости длины нарезаемого участка от ширины червячной фрезы инструменту сообщают радиальную и осевую подачу, причем последняя кинематически жестко связана с частотой вращения червячной фрезы, а один оборот червячной фрезы соответствует ее осевому перемещению на величину хода винтовой линии нарезаемой резьбы.

Лоцманенко В.В. в соавторстве с Глушко Е.В. представили в своих работах [23,24,25] теоретические основы способа фрезерования резьбы методом огибания, разработали наладки на базе токарного оборудования, представили основные теоретические зависимости способа обработки.

На рисунке 9 представлен способ фрезерования наружной резьбы червячной фрезой по методу огибания [24]. Однозаходная червячная фреза (поз.2) закрепляется во фрезерной головке (поз.3), которая, в свою очередь, закрепляется в резцедержателе суппорта станка (поз.5). Фрезерная головка (поз.3) имеет два линейных перемещения (вдоль оси вращения детали и перпендикулярно ей) и одно угловое – вокруг вертикальной оси O вращения резцедержателя.

Заготовка (поз.1) для нарезания резьбы закрепляется в кулачковом патроне (поз.10) станка. При наладке фрезерной головки добиваются взаимного совмещения горизонтальных осевых плоскостей заготовки под резьбу и фрезы. При этом ось вращения фрезы должна быть параллельна оси вращения детали. В процессе резьбофрезерования червячной фрезе сообщают радиальную подачу по стрелке S_1 , если на детали нарезается короткая резьба, равная ширине фрезы; при нарезании «длинной» резьбы фрезерной головке дополнительно сообщается осевая подача $S_2 = Z_1 \times P_1$, где Z_1 – число заходов резьбы, а P_1 – шаг резьбы.

Заходность червячной фрезы $Z_2 = 1$ независимо от числа заходов нарезаемой резьбы Z_1 . Скорость резания при резьбофрезеровании определяется зависимостью:

$$V = (\pi \times n_1 / 60) \times [(d_{a2} - 2 \times H) \times Z_1 - d_{a1}], \quad (1)$$

где d_{a1}, d_{a2} – наибольшие размеры нарезаемой резьбы и червячной фрезы соответственно, H – высота витка резьбы. Согласно зависимости (1) можно определить частоту вращения заготовки с резьбой (n_1), задаваясь требуемой скоростью резания V .

Диаметры червячной фрезы и нарезаемой резьбы связаны соотношением: $d_{a2} \geq 2 \times d_{a1}$.

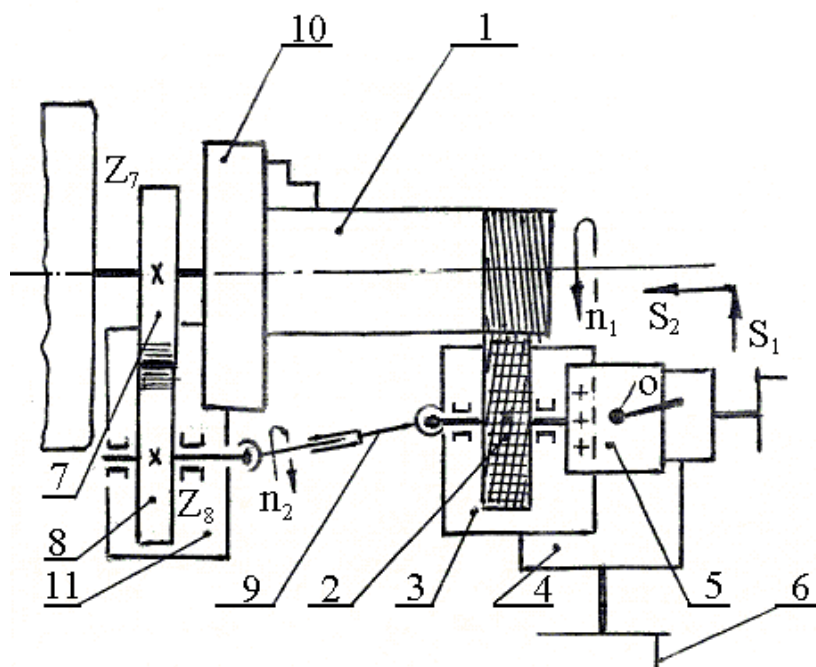


Рисунок 9. Схема фрезерования наружной резьбы (вид сверху): 1 – деталь с резьбовой поверхностью, 2 – червячная фреза, 3 – фрезерная головка, 4 – суппорт станка, 5 – резцедержатель, 6 – рукоятка поперечной подачи суппорта (резцедержателя), 7, 8 – гитара деления резьбы на заходы, 9 – карданный вал, 10 – патрон станка (для установки детали), 11 – кронштейн гитары деления.

Особенностью способа резьбофрезерования методом огибания является наличие на обработанной поверхности граней [24,25], которую авторы оценивают длиной и высотой стыка. Экспериментальные исследования по фрезерованию резьбы М64×2 фрезой диаметром $d_{a2} = 180$ мм с числом зубьев $n = 98$ показали, что, например, для однозаходной резьбы длина грани составляет 2,05 мм, а высота стыка – 0,08 мм.

Способ резьбофрезерования методом огибания внедрен на предприятии ОАО «Аскольд» в г. Арсеньеве.

4.2. Фрезоточение резьбы

Впервые схему фрезерования резьбы червячной фрезой с радиальной подачей опубликовали Скухторов С.И. и Хлунов В.Н. в 1941 году без ссылок на первоисточники [17,26]. В 1964 году Этин А.О. представила кинематический анализ этой схемы и сравнительный анализ эффективности различных способов нарезания резьбы, в результате сделав вывод о высокой производительности способа и низкой точности [5].

Развитие теоретических основ фрезоточения резьбы представлены в диссертации д.т.н. Воронова В.Н. «Теоретические основы технологии обработки резьбы винтовым инструментом с радиальной подачей» [17]. Далее работа над совершенствованием процесса продолжена в трудах Ямникова А.С., Лашнева С.И., Серовой Е.В., Солянкина Д.Ю. [18,19,26].

Сущность способа заключается в том, что обработку ведут винтовой фрезой с профилем и шагом нарезаемой резьбы по всей ее длине. При этом деталь и фреза вращаются с определенным соотношением угловых скоростей по схеме встречного фрезерования. Обработка ведется за счет радиальной подачи без осевой подачи на шаг нарезаемой резьбы.

В своих работах Воронов В.Н. выявил классификационные признаки и предложил классификацию, включающую 15 схем обработки резьбы винтовым инструментом с радиальной подачей. Анализируя процесс, автор пришел к выводу, что разрабатываемому способу присущи признаки точения и фрезерования, вследствие чего присвоил способу название «фрезоточение» [17,27]. На рисунке 10 представлена обобщенная схема обработки наружной резьбы внешним касанием. Автором также разработаны обобщенные схемы обработки наружной резьбы внутренним касанием (охватывающее фрезерование) и внутренней резьбы внутренним касанием.

Из схемы видно, что обработка резьбы фрезоточением использует метод встречного фрезерования (в отличие от способа п.п. 4.1) с передаточным отношением $k = \omega_d/\omega_n$ (целое число), где ω_d, ω_n – частота вращения детали и инструмента соответственно (на рисунке 10 движения обозначены как $\omega_{1д}$ и $\omega_{1н}$). В общем случае возможно одно поступательное движение инструмента $\omega_{2н}$ вместо двух круговых ($\omega_{1д}$ и $\omega_{1н}$). Радиальная подача инструмента обозначена движением S .

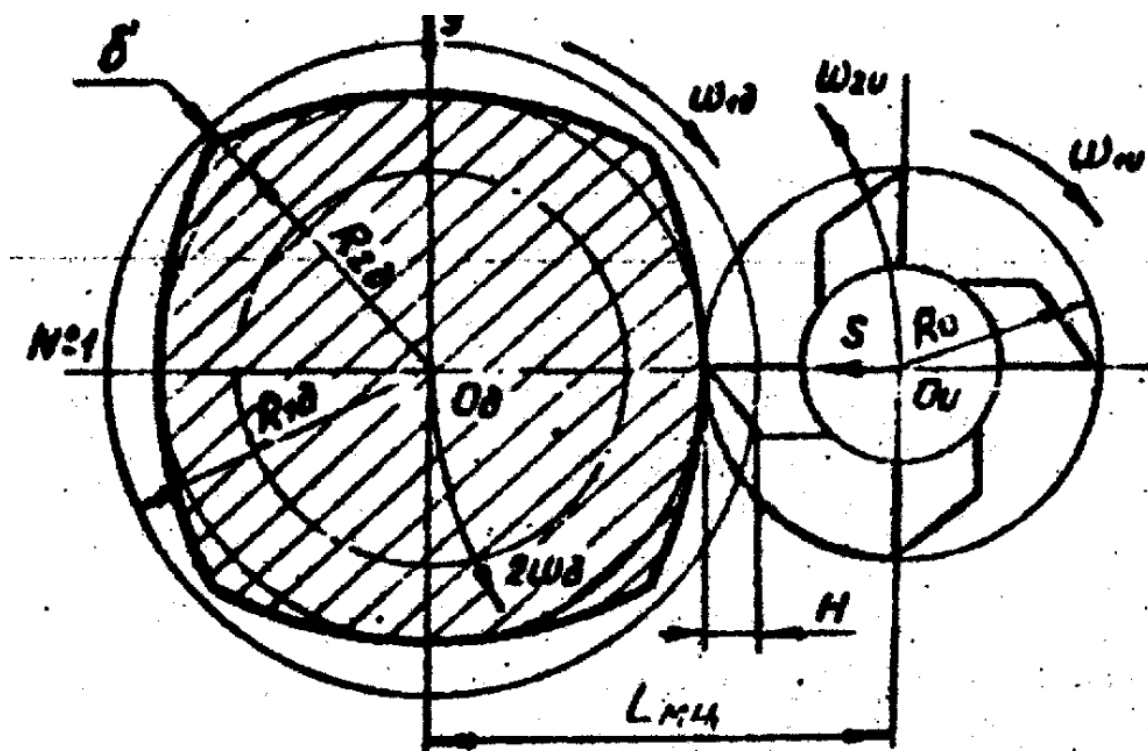


Рисунок 10. Обобщенная схема обработки наружной резьбы внешним касанием по способу фрезоточения.

Теоретически установлено и экспериментально подтверждено: резьбу можно нарезать без подачи "на шаг"; одной и той же винтовой фрезой можно обработать наружную и внутреннюю резьбу любого диаметра с любым количеством заходов; комбинированной винтовой фрезой можно обработать за один подход правую и левую резьбу одновременно; резьбу можно нарезать без вращения детали и инструмента за счет поступательного движения по контуру обрабатываемой поверхности. Для фрезоточения резьбы используют винтовые (червячные) фрезы, метчики, резьбонарезные головки с профилем и шагом нарезаемой резьбы [29].

При фрезоточении резьбы образуются погрешности: огранка, подрезание и искажение профиля резьбы.

Для повышения точности нарезаемой резьбы можно использовать схему фрезоточения со скрещивающимися осями резьбы и инструмента. Однако в этом случае к погрешностям, указанным выше, добавляется «корсетность», т.е. отклонение от правильной геометрической формы цилиндрической поверхности соответствующей наружному, среднему и внутреннему диаметру резьбы. Для снижения «корсетности» предложена конструкция инструмента с поворотными гребенками (АС №1618534 в таблице 1).

Наличие огранки (на рисунке 10 параметр δ) связано с тем, что каждая точка режущей кромки зуба фрезы движется по траектории, радиус которой отличается от радиуса окружности сечения номинальной поверхности детали. В результате этого профиль сече-

ния обработанной поверхности детали по внутреннему диаметру резьбы не является окружностью, а представляет собой многодуговой профиль. Величина огранки зависит от числа зубьев, радиусов траектории относительного движения, фрезы и резьбы. Предложена конструкция устройства для фрезерования резьбы, которое в конце обработки убирает оставшиеся неровности, характеризующиеся огранкой (АС №1299706 в таблице 1).

Несоответствие профиля инструмента и нарезаемой резьбы требует корректирования профиля зуба инструмента.

Сила резания и мощность при фрезоточении резьбы больше, чем при точении и фрезеровании одной и той же поверхности, а энергоемкость процесса - меньше [29].

Фрезоточение обеспечивает возможность получения резьбы в пределах 6-й степени точности. Шероховатость поверхности при фрезоточении находится в пределах $Ra2,5...Ra10$, а высота макронеровностей в пределах 10...50 мкм [17,27].

Автором [17,27] теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что стойкость инструмента при фрезоточении резьбы в 2...3 раза выше, чем при обработке по схеме многопроходного точения, а ресурс работы инструмента увеличивается в 180...260 раз по сравнению с точением и в 5...17 раз по сравнению с фрезерованием резьбы. В результате сравнительного анализа производительности основных способов обработки резьбы установлено, что производительность фрезоточения резьбы в 3...15 раз выше, чем при фрезеровании, в 4...20 раз выше, чем при точении, в 1,5...8,5 раз выше, чем при нарезании резьбонарезными головками, в 2...13 раз выше, чем при нарезании резьбы метчиками и плашками. Областью эффективного применения фрезоточения является обработка короткой резьбы с шагом менее 3 мм и диаметром более 20 мм.

Процесс реализован на модернизированном резьбофрезерном полуавтомате 5K63, токарно-револьверном станке с ЧПУ фирмы Traub, оснащенным специальным приспособлением, токарно-револьверных автоматах моделей 1Б140 и 1Б125 (оснащенных специальным приспособлением). При модернизации оборудования привод осевой подачи "на шаг" отключают и устанавливают кинематическую связь (или связь с ЧПУ) синхронного вращения детали и фрезы.

В диссертации Серовой Е.В. под руководством Лашнева С.И. [18], которая является продолжением работы Воронова В.Н., разработана геометрическая теория формирования резьбы инструментом с винтовой производящей поверхностью при синхронном вращении заготовки и инструмента, которая реализована в алгоритмах расчета параметров производящей поверхности, формируемой поверхности, поверхности резания, углов резания в рабочих положениях инструмента, срезаемых и остаточных слоев припуска. На рисунке 11 показана схема способа формообразования резьбы при синхронном вращении заготовки и винтового инструмента при их встречном движении.

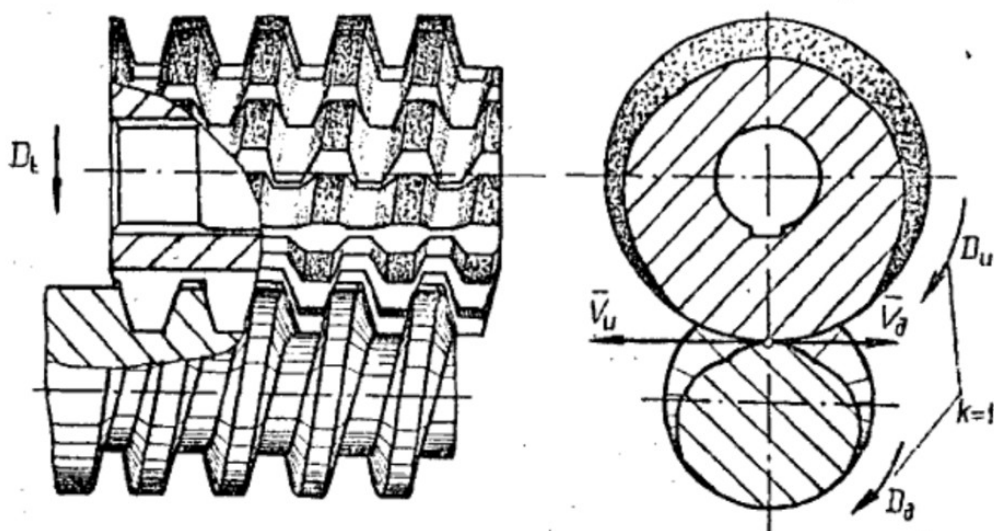


Рисунок 11. Способ формообразования резьбы при синхронном вращении заготовки и винтового инструмента [18]

При этом в работе доказывается теоретическая и практическая несостоятельность способа при попутном движении инструмента и заготовки, что нашло реализацию в работах [23,24,25] способа фрезерования огибанием представленного в п.п.4.1.

Дальнейшее развитие работы нашло отражение в диссертации Солянкина Д.Ю. под руководством Ямникова А.С. на примере фрезоточения разнонаправленных резьб радиаторных ниппелей [19,26]. Разработана имитационная модель процесса фрезоточения резьбы, установлена взаимосвязь параметров процесса и органических погрешностей формообразования резьбы, которые позволили найти рациональные сочетания параметров процесса и инструмента, а также технологические параметры процесса фрезоточения (стойкостные и силовые характеристики, рекомендации по компоновке оборудования, режимам и потребляемой мощности резания). Найдены области рационального применения фрезоточения для нарезания трубной резьбы по схеме наружного касания фрезы с заготовкой и по схеме охватывающего касания.

Результаты работы внедрены более чем на 10 предприятиях Коврова, Москвы, Тулы, Караганды.

4.3. Токарно-фрезерная обработка резьбы

Способ токарно-фрезерной обработки внутренней и наружной резьбы (*Thread-turn-milling* – авторское название) предложен компанией *INDEX-Werke GmbH & Co. KG Hahn & Tessky* [30,31] и защищен патентами (*US* № 4606683 (1986 г.), *DE* № 3402743 (1985 г.)).

Токарно-фрезерная обработка резьбы может применяться для отверстий диаметром более 12 мм и максимальным шагом резьбы 3 мм и является альтернативным способом резьбофрезерования, нарезанию резьбы резцом и вихревой обработке, является испытанным и надежным процессом, например, при массовом производстве самостопорящихся гаек.

На рисунке 12 представлены схемы токарно-фрезерной обработки внутренней резьбы [31].

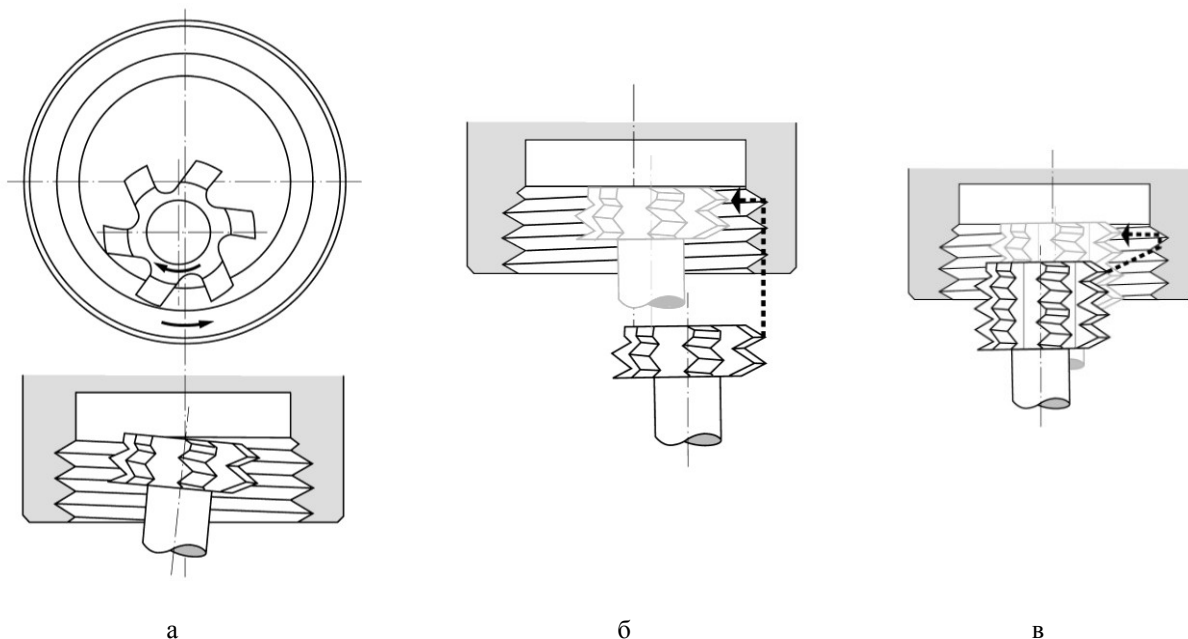


Рисунок 12. Схемы токарно-фрезерной обработки внутренней резьбы: а - с наклонной осью инструмента при продольном перемещении вдоль оси резьбы (*Traversing method*), б - с параллельными осями при продольном перемещении вдоль оси резьбы (*Traversing method*), в - с параллельными осями и обработкой сразу по всей длине резьбы (*Plunge method*).

Инструмент имеет ряд зубьев расположенных на его периферии с шагом равным шагу нарезаемой резьбы, а диаметр инструмента и резьбы должны быть различными. Направление винтовой линии на инструменте противоположно направлению нарезаемой резьбы, т.е. для нарезания правой резьбы используется фреза с левым направлением винтовой линии зубьев и наоборот. Заготовка и инструмент вращаются с различными скоростями в противоположном направлении с относительно малой подачей не равной шагу резьбы (встречная обработка). Передаточное отношение частоты вращения инструмента и заготовки отлично от единицы ($i = 0,8...1,2$ согласно патента *US № 4606683*). Скорости подачи и вращения инструмента, а также скорость вращения заготовки синхронизируются системой управления оборудования. Резьба нарезается за один проход. Представлены два способа обработки резьбы: с использованием подачи вдоль оси резьбы (*Traversing method*) (рисунок 12, а,б) и обработки сразу по всей длине резьбы (*Plunge method*) (рисунок 12, в). На рисунке 13 представлен внешний вид конструкций инструментов для реализации схемы с использованием подачи вдоль оси резьбы (слева) и обработки сразу по всей длине резьбы (справа).



Рисунок 13. Инструменты для токарно-фрезерной обработки резьбы.

При использовании схемы обработки с использованием подачи вдоль оси резьбы инструмент может быть расположен под углом или параллельно оси заготовки (рисунок 12 а и б соответственно). При использовании поворота оси инструмента получается резьба более высокой точности и качества. В случае использования схемы с параллельными осями требуется корректирование резьбового профиля инструмента. В обоих случаях инструмент располагается на наружном диаметре резьбы и обрабатывает отверстие за один проход в продольном направлении. Возможна обработка конической резьбы или ряда типов размеров резьбы с различным диаметром и одинаковым шагом.

При использовании схемы с обработкой сразу по всей длине резьбы (рисунок 12, в) оси инструмента и нарезаемой резьбы размещаются параллельно, а резьба нарезается сразу на всю длину за один проход. Длина режущей части инструмента должна быть больше или равна длине обрабатываемой резьбы. Качество поверхности резьбы получается хуже, чем при использовании схемы обработки с использованием подачи вдоль оси резьбы.

При реализации обработки на станке с ЧПУ системой управления поддерживается синхронизация движений двух шпинделей и одной или двух линейных осей, а в зависимости от применяемой схемы обработки шпиндель должен быть наклонен.

5. Фрезерование дисковыми фрезами

Анализ литературных источников, посвященных фрезерованию резьбы, показывает, что резьбовую фрезу можно представить как геометрическое тело с формообразующей поверхностью, имеющий профиль, ось которого ориентирована параллельно, перпендикулярно или совпадает с осью вращения инструмента. Например, при фрезеровании резьбы методом копирования ось формообразующего профиля совпадает с осью фрезы; при фрезеровании наружной резьбы торцевой фрезой формообразующий профиль ориентирован параллельно оси фрезы (в общем случае под углом к оси инструмента); при вихревом нарезании резьбы - перпендикулярно оси инструмента и т.д. В этом случае под дисковой фрезой можно понимать диск с формообразующими профилями ориентированными перпендикулярно оси вращения инструмента, а сам диск может иметь несколько зубьев.

Таким образом, под дисковой фрезой можно понимать ряд конструкций, которые в различной литературе позиционируются как «дисковая (однониточная фреза)», «вихревая головка», «концевая резьбовая фреза». По своей сути все эти конструкции являются дисковыми фрезами. Различие может быть только в реализации кинематической схемы фрезерования (с параллельными или скрещивающимися осями).

На рисунке 14 представлены кинематические схемы работы дисковых резьбовых фрез: со скрещивающимися осями резьбы и дисковой фрезы (рисунок 14 а,в) и с параллельными осями резьбы и инструмента (рисунок 14, б). На рисунке 14,в показана схема нарезания резьбы дисковой фрезой на станке с ЧПУ посредством поворота детали в двух плоскостях (сечения А-А и Б-Б (АС №1389954)) с целью размещения инструмента в отверстии и обеспечения требуемой точности резьбы (аналогично вихревому нарезанию внутренней резьбы [8]).

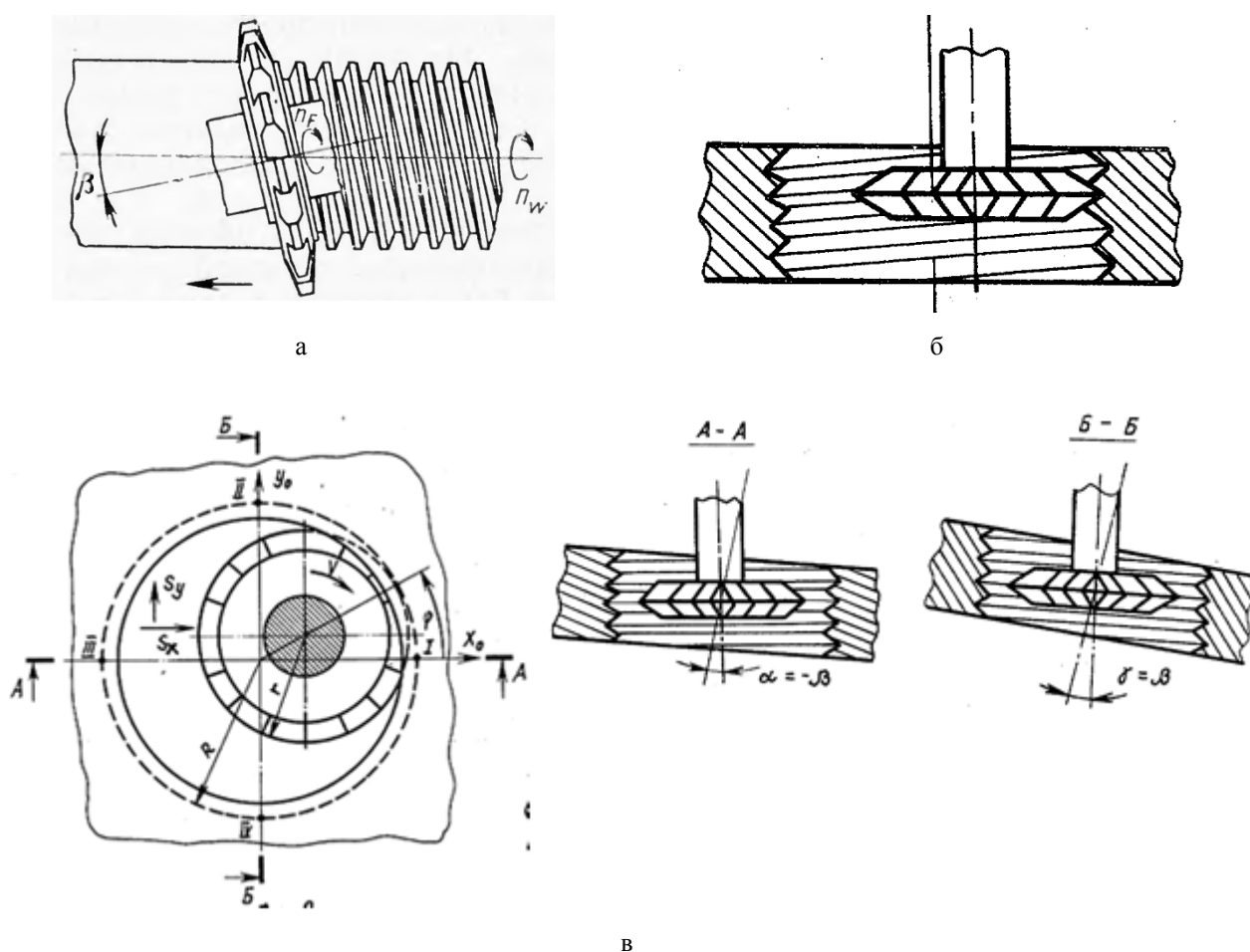


Рисунок 14. Фрезерование резьбы дисковой фрезой: а - фрезерование наружной резьбы, б,в - фрезерование внутренней резьбы.

На рисунке 14 представлены схемы для фрезерования наружной резьбы фрезой со скрещенными осями и фрезерование внутренней резьбы фрезой с параллельными осями. Аналогично может быть получена внутренняя и наружная резьба для указанных схем.

При фрезеровании дисковыми фрезами по схеме со скрещивающимися осями профиль зуба фрезы не совпадает с осевой плоскостью резьбы, поэтому для чистовой обра-

ботки резьбы, особенно с большим шагом, требуется пересчет профиля зубьев фрезы. Для предварительной обработки резьбы можно использовать непрофилированные фрезы. При фрезеровании дисковыми фрезами по схеме с параллельными осями следует учитывать геометрическую погрешность профиля резьбы, связанную с особенностями данной схемы обработки [35,36,37]. Согласно работы [33] угол профиля зуба фрезы (при представлении фрезы в виде диска без учета стружечных канавок, переднего и заднего углов) больше угла профиля резьбы на единицы минут, что не требует пересчета профиля.

Расширяя способ обработки дисковыми фрезами можно отметить, что охватывающее фрезерование наружной резьбы также возможно по представленным схемам. В общем случае указанные схемы могут содержать сочетание движений, соответствующее попутной и встречной схемам обработки.

Фрезерование резьбы дисковыми фрезами имеет ограниченную и устойчивую область применения [2,4,6,32,33,34]. Дисковые фрезы применяют в основном для нарезания длинной резьбы трапецеидального профиля, предварительной обработки ходовых винтов, профилей червяков и другой специальной резьбы крупных размеров. Дисковыми фрезами обрабатывают резьбу с большим шагом (более 3мм) и профилем, соответствующим профилю нарезаемой резьбы. Обработка может осуществляться на специализированных резьбофрезерных станках, станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах.

Анализ работ, посвященных использованию дисковых фрез, показал, что применение дисковых насадных фрез целесообразно при обработке резьбы с шагом более 3 мм или хвостовых дисковых фрез при обработке резьбы с мелким шагом по схеме скрещивающихся осей для избегания значительных погрешностей искажения профиля резьбы. Применение хвостовых дисковых фрез по схеме с параллельными осями целесообразно: при обработке отверстий малого диаметра; внутренней или наружной резьбы с длиной, превышающей три диаметра резьбы, для которых не производят гребенчатых резьбовых фрез.

Общим недостатком обработки резьбы дисковыми фрезами можно считать основное время обработки большее, чем при обработке гребенчатыми фрезами.

6. Фрезерование гребенчатыми фрезами

Фрезерование резьбы гребенчатыми фрезами является наиболее распространенным способом фрезерования резьбы. Это связано с широким применением в машиностроительных деталях резьбовых отверстий, содержащих крепежную резьбу с длиной, не превышающей трех номинальных диаметров резьбы. Для наружной резьбы гребенчатые фрезы применяются существенно меньше, о чем может свидетельствовать ограниченная номенклатура этих инструментов в каталогах производителей резьбовых фрез.

По конструкции гребенчатая резьбовая фреза является многониточной фрезой, у которой каждую нитку можно рассматривать как дисковую фрезу с резьбовым профилем зубьев. В таком случае многониточную фрезу можно представить как неразъемный набор дисковых фрез на одной оси. Фрезы имеют кольцевые нитки – витки с профилем нарезае-

мой резьбы. Наличие кольцевых витков на фрезе обуславливает отличие их профиля от профиля нарезаемой резьбы. При фрезеровании групповыми фрезами по схеме с параллельными осями следует учитывать геометрическую погрешность профиля резьбы, связанную с особенностями данной схемы обработки [35,36,37].

При фрезеровании резьбы гребенчатыми резьбовыми фрезами реализуется схема фрезерования с параллельными осями инструмента и резьбы. Реализация схемы со скрещивающимися осями невозможна из-за получения резьбы в виде гиперболоида, причем расхождение в диаметрах посередине резьбы и на концах тем больше, чем больше угол наклона обрабатываемой резьбы. Реализовать подобную схему можно, если изготовить фрезу с переменными диаметрами резьбообразующих колец, что ограничивает конструкцию фрезы для определенного угла подъема резьбы и является нетехнологичным решением.

На рисунке 15,а-в представлены кинематические схемы фрезерования наружной и внутренней резьбы гребенчатыми фрезами наружного и внутреннего касания.

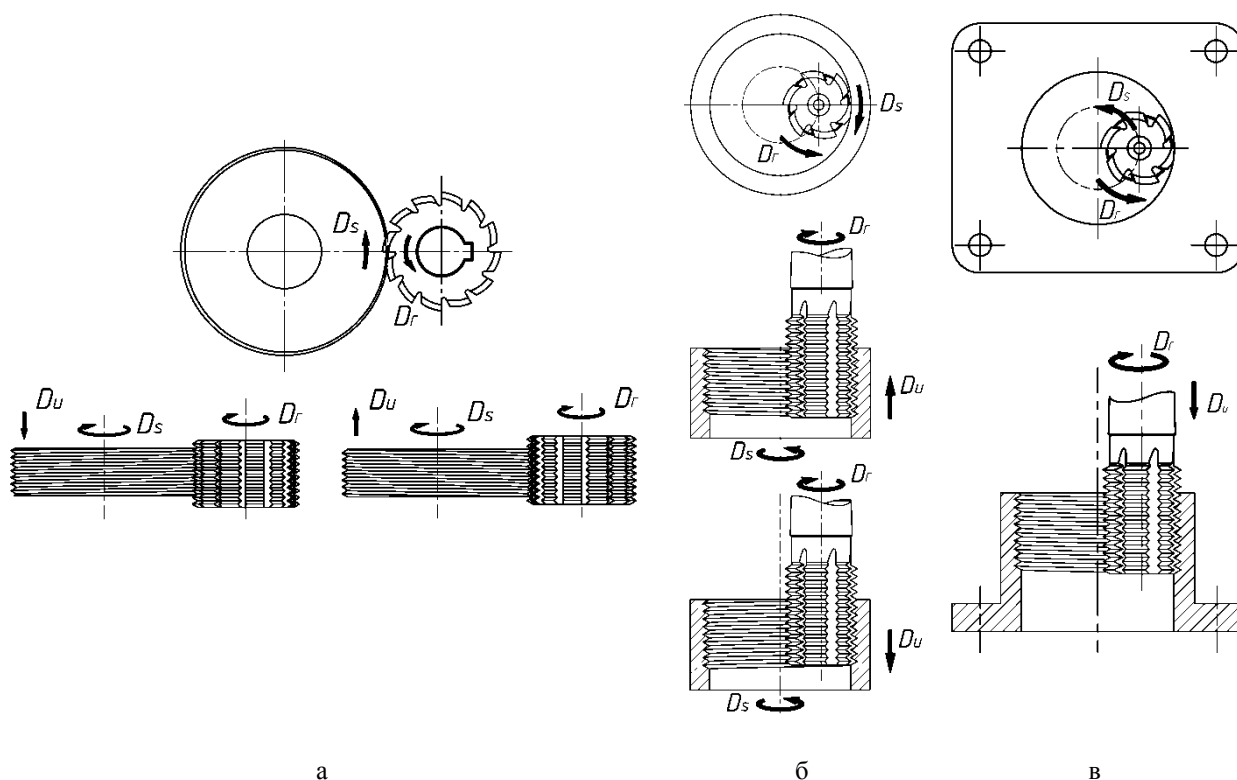


Рисунок 15. Фрезерование резьбы гребенчатой резьбовой фрезой: а - фрезерование правой и левой наружной резьбы, б – фрезерование правой и левой внутренней резьбы с использованием движения заготовки, в – фрезерование внутренней резьбы при неподвижной заготовке

Фреза устанавливается параллельно оси заготовки на всю длину нарезаемой резьбы. При вращении (движение D_r) фреза врезается радиально или тангенциально в заготовку до достижения полной глубины профиля резьбы. При одновременных движениях окружной подачи D_s и дополнительного движения вдоль оси D_u производится фрезерование резьбы по всей цилиндрической поверхности заготовки одновременно всеми режущими

профилями зубьев фрезы. Движения окружной подачи D_S и вдоль оси $D_{\text{и}}$ кинематически связаны между собой. Одному обороту относительного движения инструмента по среднему диаметру нарезаемой резьбы, совершаемому за счет движения D_S , должно соответствовать относительное перемещение фрезы вдоль оси на один шаг P за счет движения $D_{\text{и}}$. Таким образом, обработка резьбы совершается за $1 \dots 1,25$ оборота заготовки (или оси вращающейся фрезы вокруг оси заготовки - планетарное движение) при относительном перемещении заготовки и фрезы на $(1 \dots 1,25)$ шага. Дополнительное перемещение на $0,25$ оборота требуется для перекрытия захода фрезы при врезании на высоту профиля резьбы.

Направление движения $D_{\text{и}}$ при фрезеровании определяет направление нарезаемой резьбы – правое или левое (рисунок 15,а,б).

Движения D_S и $D_{\text{и}}$ в зависимости от технологического оборудования могут выполняться заготовкой или фрезой (рисунок 15,б,в). Движение окружной подачи D_S фрезы (планетарное движение) используется при нарезании резьбы в корпусных деталях, что часто применяется на станках с ЧПУ (рисунок 15,в на примере фрезерования внутренней резьбы).

Фрезерование резьбы гребенчатыми резьбовыми фрезами по сравнению с другими способами резьбонарезания имеет ряд преимуществ. К ним можно отнести: высокую производительность, обусловленную образованием резьбы на всей длине заготовки, отсутствие обратных ходов; фреза с одним шагом может быть использована для нарезания резьбы в определенном интервале диаметров заготовок; обеспечивается лучшее проникновение СОЖ в зону обработки, лучшие условия размещения стружки. Имеются и другие преимущества. Одновременно для реализации резьбонарезания гребенчатыми фрезами требуется более сложное технологическое оборудование, имеется ограничение по длине и по размерам наружного диаметра фрез.

Классификация способов фрезерования резьбы

Рассмотренные способы резьбофрезерования позволяют выявить классификационные признаки и разработать классификацию способов с целью оценки перспективы разработки новых способов фрезерования резьбы.

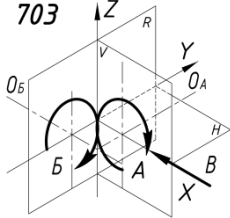
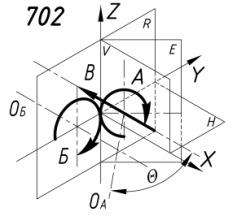
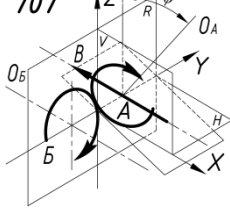
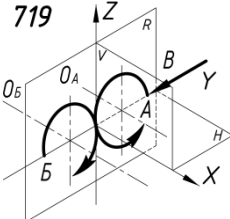
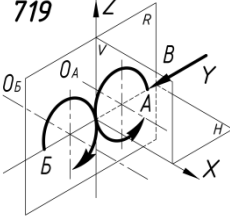
Классификационные признаки способов:

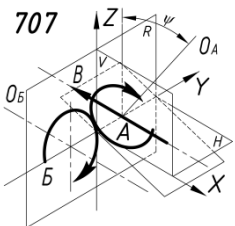
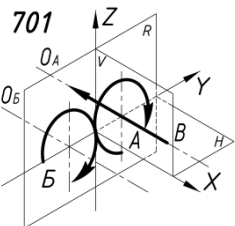
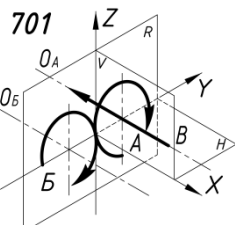
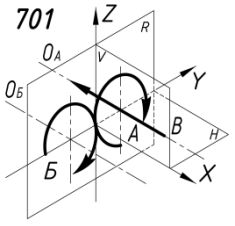
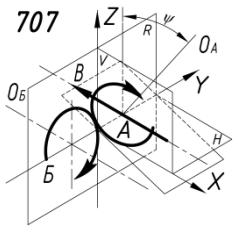
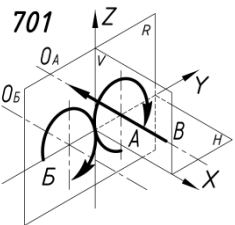
1. По методу образования резьбы: копированием, касанием, огибанием [38,39,40].
2. По расположению осей инструмента и нарезаемой резьбы: оси расположены в одной плоскости, скрещиваются.
3. По углу наклона осей инструмента и нарезаемой резьбы: параллельны, пересекаются под расчетным углом, перпендикулярны.
4. Кинематические схемы: все способы относятся к 7-ой группе кинематических схем с двумя вращательными и одним поступательным движениями [41].
5. По направлению контакта инструмента и заготовки: внешнее касание (обработка наружной резьбы (Н)), внутреннее касание (обработка наружной (Н) и внутренней (В) резьбы).

6. По отношению скоростей главного движения и движения подачи.
7. По способу реализации движений при резьбофрезеровании на различном типе оборудования.

В таблице 2 представлена классификация способов фрезерования резьбы на основе указанных выше классификационных признаков (признаки 1 и 7 не указаны). В таблице приняты следующие обозначения: n_i (ω_i) - частота вращения инструмента, n_d (ω_d) - частота вращения детали с резьбой, Z_i , Z_d - число заходов инструмента и нарезаемой резьбы. Обозначения на кинематических схемах приняты согласно [41].

Таблица 2. Классификационные признаки способов резьбофрезерования

№	Способ фрезерования	Расположение осей	Угол между осями	Кинематическая схема	Направление контакта/резьба	Соотношение вращательных движений
1	Концевой фрезой	В одной плоскости	Перпендикулярны		внешнее касание (Н)	$\frac{n_u}{n_o} = \frac{\pi d}{s_z z}$
2	Торцевой фрезой	В одной плоскости	Угол подъема резьбы [5]		внешнее касание (Н)	
3	Скоростное (вихревое) нарезание резьбы	Скрещиваются	Расчетное значение углов наклона и поворота		внешнее (Н) и внутреннее касание (Н, В)	
4	Фрезерование огибанием	В одной плоскости	Параллельны		внешнее (Н) и внутреннее касание (В)	$u_{12} = \omega_d / \omega_i = Z_i / Z_d$
5	Фрезоточение	В одной плоскости	Параллельны, расчетное значение угла		внешнее (Н) и внутреннее касание (Н, В)	$k = \omega_d / \omega_i$ (целое число)

№	Способ фрезерования		Расположение осей	Угол между осями	Кинематическая схема	Направление контакта/резьба	Соотношение вращательных движений
6	Токарно-фрезерная обработка (Thread-turn-milling)	Traversing method	Скрещиваются	Сумма углов наклона резьбы заготовки и инструмента		внешнее (H) и внутреннее касание (B)	$i = \omega_n / \omega_d = 0,8 \dots 1,2$
		Traversing method	В одной плоскости	Параллельны			
		Plunge method	В одной плоскости	Параллельны			
7	Дисковой фрезой		В одной плоскости	Параллельны		внешнее (H) и внутреннее касание (H, B)	$\frac{n_u}{n_o} = \frac{\pi d}{s_z z}$
			Скрещиваются	Расчетное значение угла поворота			
8	Гребенчатой фрезой		В одной плоскости	Параллельны		внешнее (H) и внутреннее касание (H, B)	

Заключение

Выбор способа обработки резьбы связан с большим количеством факторов, таких как конструктивные размеры резьбы, требуемая степень точности, качество поверхности,

тип обрабатываемого материала, производительность обработки и ряд других. Представленные способы резьбофрезерования отличаются производительностью, точностью и качеством обработки, возможностью обработки определенных типов резьбы и реализацией на разных типах оборудования при использовании кинематических схем с двумя вращательными и одним поступательным движениями. Это позволяет выбрать требуемый способ резьбофрезерования для использования его в технологическом процессе.

Список литературы

1. Мальков О.В., Литвиненко А.В., Малькова Л.Д. Обзор конструкций комбинированных инструментов для изготовления отверстий сложного профиля, содержащих резьбовой участок // Справочник. Инженерный журнал. 2002. № 10. С. 49-57.
2. Якухин В.Г., Ставров В.А. Изготовление резьбы: справочник. М.: Машиностроение, 1989. 192 с.
3. Milling a thread with our High-Z S-720 / turn table / indexer RounDINO 120 // CNC-STEP. CNC Maschinenbau: website. Режим доступа: <https://www.cnc-step.de/en/applications/cnc-router-high-z-cnc-milling/1125-2d-and-3d-milling-with-the-rotational-axis-rotary-table> (дата обращения 01.12.2014).
4. Аврутин С.В., Баклунов Е.Д., Глейзер Л.А. Справочник металлиста. В 5 т. Т. 5 / под ред. А.Н. Малова. М.: Машгиз, 1960. 1184 с.
5. Этин А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. М.: Машиностроение, 1964. 320 с.
6. Карцев С.П. Инструмент для изготовления резьбы. М.: Машгиз, 1955. 252 с.
7. Виксман Е.С. Скоростное нарезание резьб и червяков. М.: Машиностроение, 1966. 83 с.
8. Никитин В.К., Шведков Л.К., Скородумов Б.А. Вихревое нарезание резьбы в гайках. М.: Машгиз, 1956. 42 с.
9. Барановский М.А., Молочков А.В. Справочник токаря. Минск: Государственное издательство БССР, 1962. 493 с.
10. Высокопроизводительное вихревое резьбонарезание // WTO. Higher Productivity: сайт. Режим доступа: http://www.wto-russia.com/index.php?id=17&Itemid=27&option=com_content&view=article (дата обращения 24.03.2015).
11. Инструменты для вихревого нарезания резьбы // ST Group: сайт компании. Режим доступа: http://www.s-t-group.com/catalog/17/Carmex2012/ThreadWhirling_site.pdf (дата обращения 25.03.2015).
12. Костный винт // Sandvik Coromant: сайт. Режим доступа: <http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/industrysolutions/medical/bone-screw> (дата обращения 25.03.2015).

13. High precision threading performance // Sandvik Coromant: website. Режим доступа: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/brochures/en-gb/C-1040-092.pdf> (дата обращения 25.03.2015).
14. Thread Whirling on CNC Turning Machines // Cncmanual: website. Режим доступа: <http://cncmanual.com/thread-whirling-on-cnc-turning-machines/> (дата обращения 25.03.2015).
15. Шпур Г., Штеферле Т. Справочник по технологии резания материалов. В 2 т. Т. 2 / пер. с нем. Ю.М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 1985. 688 с.
16. Этин А.О. Кинематический анализ схем обработки металлов резанием / под ред. А.Е. Прокоповича. М.: Центральное бюро технической информации, 1958. 96 с.
17. Воронов В.Н. Теоретические основы технологии обработки резьбы винтовым инструментом с радиальной подачей: дис. ... докт. техн. наук. Тула, 1993. 369 с.
18. Серова Е.В. Геометрическая теория процесса формирования резьб винтовым инструментом при синхронном вращении с заготовкой: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 1995. 121 с.
19. Солянкин Д.Ю. Фрезоточение разнонаправленных резьб на примере обработки радиаторных ниппелей: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2011. 205 с.
20. Смирнов И.М. Повышение эффективности процессов резбообразования скоростным фрезерованием резцами из композитов: дис. ... канд. техн. наук. Чита, 2000. 154 с.
21. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. Скоростное нарезание трапецеидальных резьб резцами из композита 10 // Известия Юго-Западного государственного университета. Машиностроение. 2012. № 5 (44), Ч. 2. С. 85-88.
22. Барановский М.А. Справочник токаря / под ред. М.А. Барановского, А.В. Молочкова. Минск: Государственное издательство БССР, 1962. 493 с.
23. Лоцманенко В.В. Резьбофрезерование способом огибания // Машиностроитель. 1997. № 8. С. 30.
24. Глушко Е.В., Лоцманенко В.В. Технологическое обеспечение резьбофрезерования методом огибания в условиях производства // Техника машиностроения. 2007. № 3. С. 22-25.
25. Глушко Е.В. Резьбофрезерование методом огибания // СТИН. 2008. № 4. С. 28-30.
26. Солянкин Д.Ю., Ямников А.С. Фрезерование резьб винтовой фрезой с радиальной подачей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. № 4, ч. 2. С. 93-96. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/frezerovanie-rezb-vintovoy-frezoy-s-radialnoy-podachey> (дата обращения 01.03.2016).
27. Воронов В.Н. Обработка резьбы винтовыми инструментами с радиальной подачей: учеб. пособ. / под ред. В.Н. Воронова. Ковров: Ковровский технологический институт, 1994. 60 с.
28. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в профилировании режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1968. 372 с.

29. Воронов В.Н. Фрезоточение // Известия ТулГУ. Машиностроение. 2003. № 2. С. 158-161.
30. Grzesik W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. Theory, Modelling and Applications. Oxford: Elsevier, 2008. 435 p.
31. Thread-turn-milling of internal threads // Yumpu: website. Режим доступа: <https://www.yumpu.com/en/document/view/22657001/thread-turn-milling-of-internal-threads-index-werke-gmbh-amp-co-> (дата обращения 26.03.2015).
32. Барбашов Ф.А. Резьбофрезерные работы. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1977. 256 с.
33. Левицкий М.Я. Резьбофрезерование. Киев: Машгиз. Украинское отд-ние, 1950. 192 с.
34. Левицкий М.Я. Основы резьбофрезерования. Киев: Машгиз. Украинское отд-ние, 1953. 156 с.
35. 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.
36. Мальков О.В. Исследование точности резьбы при резьбофрезеровании сверло-резьбофрезой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2007. № 11. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/68985.html> (дата обращения 03.04.2015).
37. Древаль А.Е., Мальков О.В., Литвиненко А.В. Точность обработки внутренних резьб комбинированным инструментом // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 12 (621). С. 44-52. DOI: [10.18698/0536-1044-2011-12-44-52](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-12-44-52)
38. Брусов С.И., Маркин С.А., Тарапанов А.С. Кинематический анализ методов обработки винтовых поверхностей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4 (4). С. 939-941. Режим доступа: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011_4_939_941.pdf (дата обращения 01.03.2016).
39. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1970. 403 с.
40. Таратынов О.В., Земсков Г.Г., Баранчукова И.М. и др. Металлорежущие системы машиностроительных производств: учеб. пособ. / под ред. Г.Г. Земскова, О.В. Таратынова. М.: Высшая школа, 1988. 464 с.
41. Грановский Г.И. Кинематика резания. М.: Машгиз, 1948. 200 с.

Analysis of the Thread Milling Methods

O.V. Malkov^{1,*}

^{*}olma70@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: thread milling, thread milling cutter, thread, methods of processing threads

Presently, in thread cutting there is a growing application share of thread milling cutters because of widely used CNC machines in industrial production. The thread milling cutters have a number of advantages, which determine the effective scope of their application. However, manufacturers use them in quantities considerably less than those of taps. This can be explained by the fact that, in product manufacturing, taps have been longer using for internal thread milling and, therefore, this operation has a better literary methodological and manufacturing support. This proves that wide introduction of thread milling into manufacturing requires providing a full set of activities, from design of thread milling cutter structures to research of parameters of machining conditions. It is particularly relevant to solve these tasks now that developers have faced the challenge to provide import substitution of tools engineering and technology.

Conducted patent review identified domestic (30) and foreign (about 300) inventions on thread milling methods and thread milling cutter designs.

Based on the literature review are discussed the thread milling techniques using the end- and face-milling cutters, thread whirling, helical milling, thread turn-milling, and single-thread and multiple-thread milling cutters. The paper describes the features of each method, the kinematic scheme, advantages, and disadvantages. Analysis of the thread milling techniques allowed identification of classification features and classification development of these techniques.

The work results can be useful for technologists of engineering companies and experts in threading process to assess the possibility of using the above techniques in manufacturing process.

References

1. Mal'kov O.V., Litvinenko A.V., Mal'kova L.D. Review of designs of combined tools for making holes of complex profile containing the threaded section. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = HANDBOOK. An Engineering journal*, 2002, no. 10, pp. 49-57. (in Russian).
2. Yakukhin V.G., Stavrov V.A. *Izgotovlenie rez'by: spravochnik* [Manufacturer of thread: a handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 192 p. (in Russian).

3. *Milling a thread with our High-Z S-720 / turn table / indexer RounDINO 120*. CNC-STEP. CNC Maschinenbau: website. Available at: <https://www.cnc-step.de/en/applications/cnc-router-high-z-cnc-milling/1125-2d-and-3d-milling-with-the-rotational-axis-rotary-table> , accessed 01.12.2014.
4. Avrutin S.V., Baklunov E.D., Gleizer L.A. *Spravochnik metallista. V 5 t. T. 5* [Reference of metalist. In 5 vols. Vol. 5]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 1184 p. (in Russian).
5. Etin A.O. *Kinematicheskii analiz metodov obrabotki metallov rezaniem* [Kinematic analysis of methods of processing of metals by cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 320 p. (in Russian).
6. Kartsev S.P. *Instrument dlya izgotovleniya rez'by* [Tool for manufacturing thread]. Moscow, Mashgiz Publ., 1955. 252 p. (in Russian).
7. Viksman E.S. *Skorostnoe narezanie rez'b i chervyakov* [High-speed cutting threads and worms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 83 p. (in Russian).
8. Nikitin V.K., Shvedkov L.K., Skorodumov B.A. *Vikhrevoe narezanie rez'by v gaikakh* [Vortex thread cutting in nuts]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956. 42 p. (in Russian).
9. Baranovskii M.A., Molochkov A.V. *Spravochnik tokarya* [Reference of Turner]. Minsk, Gosudarstvennoe izdatel'stvo BSSR Publ., 1962. 493 p. (in Russian).
10. *Vysokoproizvoditel'noe vikhrevoe rez'bonarezanie* [Highly productive vortex threading]. WTO. Higher Productivity: website. Available at: http://www.wto-russia.com/index.php?id=17&Itemid=27&option=com_content&view=article , accessed 24.03.2015. (in Russian).
11. *Instrumenty dlya vikhrevogo narezaniya rez'by* [Thread Whirling Tools]. ST Group: company website. Available at: http://www.s-t-group.com/catalog/17/Carmex2012/ThreadWhirling_site.pdf , accessed 25.03.2015. (in Russian).
12. *Kostnyi vint* [Bone screw]. Sandvik Coromant: website. Available at: <http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/industrysolutions/medical/bone-screw> , accessed 25.03.2015. (in Russian).
13. *High precision threading performance*. Sandvik Coromant: website. Available at: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/brochures/en-gb/C-1040-092.pdf> , accessed 25.03.2015.
14. *Thread Whirling on CNC Turning Machines*. Cncmanual: website. Available at: <http://cncmanual.com/thread-whirling-on-cnc-turning-machines/> , accessed 25.03.2015.
15. Spur G., Stoferle T. *Handbuch der Fertigungstechnik*. München-Wien, Carl Hanser Verlag, 1979. (in German). (Russ. ed.: Spur G., Stoferle T. *Spravochnik po tekhnologii rezaniya materialov. V 2 t. T. 2*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 688 p.).
16. Etin A.O.; Prokopovich A.E., ed. *Kinematicheskii analiz skhem obrabotki metallov rezaniem* [Kinematical analysis of processing circuits of metals by cutting]. Moscow, Tsentral'noe byuro tekhnicheskoi informatsii Publ., 1958. 96 p. (in Russian).

17. Voronov V.N. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii obrabotki rez'by vintovym instrumentom s radial'noi podachei. Dokt. diss.* [Theoretical foundations of processing technology thread by screw tool with radial feed. Dr. diss.]. Tula, 1993. 369 p. (in Russian, unpublished).
18. Serova E.V. *Geometricheskaya teoriya protsessa formirovaniya rez'b vintovym instrumentom pri sinkhronnom vrashchenii s zagotovkoi. Kand. diss.* [Geometrical theory of process of formation of threads by screw tool during a synchronous rotation with workpiece. Cand. diss.]. Tula, 1995. 121 p. (in Russian, unpublished).
19. Solyankin D.Yu. *Frezotochenie raznonapravlennykh rez'b na primere obrabotki radiatornykh nipplei. Kand. diss.* [Turn-milling of multidirectional carvings on example of processing of radiator nipples. Cand. diss.]. Tula, 2011. 205 p. (in Russian, unpublished).
20. Smirnov I.M. *Povyshenie effektivnosti protsessov rez'boobrazovaniya skorostnym frezerovaniem reztami iz kompozitov. Kand. diss.* [Improving efficiency of processes of thread formation by high-speed milling cutters made of composites. Cand. diss.]. Chita, 2000. 154 p. (in Russian, unpublished).
21. Kudryashov E.A., Smirnov I.M. Cutting trapezoidal thread cutters from 10 composite. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Mashinostroenie = Proceedings of the South-West State University. Mechanical engineering*, 2012, no. 5, pt. 2, pp. 85-88. (in Russian).
22. Baranovskii M.A. *Spravochnik tokarya* [Reference of turner]. Minsk, Gosudarstvennoe izdatel'stvo BSSR Publ., 1962. 493 p. (in Russian).
23. Lotsmanenko V.V. Thread milling by method of rounding. *Mashinostroitel' = Mechanician*, 1997, no. 8, pp. 30. (in Russian).
24. Glushko E.V., Lotsmanenko V.V. Technological support of thread milling by method of rounding in conditions of production. *Tekhnika mashinostroeniia*, 2007, no. 3, pp. 22-25. (in Russian).
25. Glushko E.V. Thread milling by method of rounding. *STIN*, 2008, no. 4, pp. 28-30. (in Russian).
26. Solyankin D.Yu., Yamnikov A.S. Helical thread milling with radial feed. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 4, pt. 2, pp. 93-96. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/frezerovanie-rezb-vintovoy-frezoy-s-radialnoy-podachei> , accessed 01.03.2016. (in Russian).
27. Voronov V.N. *Obrabotka rez'by vintovymi instrumentami s radial'noi podachei: ucheb. posob.* [Processing of thread by screw tools with radial feed: tutorial]. Kovrov, Kovrovskii tekhnologicheskii institut Publ., 1994. 60 p. (in Russian).
28. Lyukshin V.S. *Teoriya vintovykh poverkhnostei v profilirovanii rezhushchikh instrumentov* [Theory of screw surfaces in profiling of cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 372 p. (in Russian).
29. Voronov V.N. Turn-milling. *Izvestiya TulGU. Mashinostroenie*, 2003, no. 2, pp. 158-161. (in Russian).

30. Grzesik W. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials. Theory, Modelling and Applications*. Oxford, Elsevier, 2008. 435 p.
31. *Thread-turn-milling of internal threads*. Yumpu: website. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/22657001/thread-turn-milling-of-internal-threads-index-werke-gmbh-amp-co->, accessed 26.03.2015.
32. Barbashov F.A. *Rez'bofrezernye raboty* [Thread-milling works]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977. 256 p. (in Russian).
33. Levitskiy M.Ya. *Rez'bofrezerovanie* [Thread milling]. Kiev, Mashgiz Publ., 1950. 192 p. (in Russian).
34. Levitskiy M.Ya. *Osnovy rez'bofrezerovaniya* [Basics of thread milling]. Kiev, Mashgiz Publ., 1953. 156 p. (in Russian).
35. Malkov O.V., Litvinenko A.V. Choosing the outer diameter of threaded part of drill/thread-mill. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 1997, no. 3, pp. 78-84. (in Russian).
36. Malkov O.V. Research of accuracy of a carving at carving-milling with the help of drill thread milling. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2007, no. 11. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/68985.html>, accessed 03.04.2015. (in Russian).
37. Dreval' A.E., Mal'kov O.V., Litvinenko A.V. Accuracy of machining internal threads with a combined tool. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 12, pp. 44-52. DOI: [10.18698/0536-1044-2011-12-44-52](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-12-44-52) (in Russian).
38. Brusov S.I., Markin S.A., Tarapanov A.S. The kinematic analysis of methods of screw surfaces machining. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 4, pp. 939-941. Available at: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011_4_939_941.pdf, accessed 01.03.2016. (in Russian).
39. Fedotenok A.A. *Kinematicheskaya struktura metallovezhushchikh stankov* [Kinematic structure of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 403 p. (in Russian).
40. Taratynov O.V., Zemskov G.G., Baranchukova I.M., et al. *Metallorazreshchchie sistemy mashinostroitel'nykh proizvodstv: ucheb. posob* [Metal-cutting systems of engineering industries: tutorial]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 464 p. (in Russian).
41. Granovskii G.I. *Kinematika rezaniya* [Kinematics of cutting]. Moscow, Mashgiz Publ., 1948. 200 p. (in Russian).