



ДРЕВАЛЬ

Алексей Евгеньевич
доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой



МАЛЬКОВ

Олег Вячеславович
кандидат технических
наук, доцент



ЛИТВИНЕНКО

Анатолий Васильевич
кандидат технических
наук, доцент кафедры
«Инструментальная
техника и технологии»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Точность обработки внутренних резьб комбинированным инструментом

А.Е. Древаль, О.В. Мальков, А.В. Литвиненко

Исследована работа спроектированного комбинированного режущего инструмента сверло-резьбофреза, предназначенного для обработки отверстий сложного профиля. Установлены закономерности влияния шага нарезаемой резьбы, диаметра резьбообразующей части сверло-резьбофрезы на величину погрешности профиля резьбы при различных соотношениях диаметров инструмента и обрабатываемой резьбы. Представлены результаты компьютерного моделирования процесса резьбофрезерования и результаты экспериментальных исследований возникающих погрешностей обработанной резьбы.

Ключевые слова: комбинированный инструмент, резьбофрезерование, резьбообразующий инструмент, резьба.

The article considers the operation of a special tool designed at the BMSTU for CNC machining of complex shape threaded holes. The tool combines the functions of a drill and a thread mill. The dependence of the kinematics and such machining parameters as thread diameter and pitch, and a tool-hole diameter ratio on the accuracy of the thread profile has been determined. The kinematics of thread milling results in widening of the thread profile and may introduce an error to the base thread diameter. The results of computer simulation of the thread milling process and the experimental data on threads inaccuracies are presented, a good agreement with the predicted calculations is demonstrated.

Keywords: combined tool, thread milling, thread-cutting tool, thread.

Кинематические возможности современных многокоординатных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) позволяют одним инструментом реализовать несколько кинематических схем резания для обработки различных видов поверхностей с одной установки. Этим предопределяется возможность создания многофункционального комбинированного инструмента.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разрабатывают комбинированные инструменты и исследуют их работоспособность. Один из видов комбинированных инструментов с условным названием «сверло-резьбофреза» представлен на рис.1, а [1–5]. Инструмент предназначен для выполнения отверстий сложного профиля (ОСП) с резьбой в заготовке за один проход как в сплошном материале, так и в готовом отверстии и представляет собой последовательное сочетание сверлильной (поз. 1), расточной (поз. 2), резьбообразующей (поз. 3), зенковочной (поз. 4) и хвостовой (поз. 5) частей. Инструмент реализует сочетание известных схем изготовления отверстий сложного профиля, которое включает следующие этапы (рис. 1, б): 1, 2 — сверление отверстия сверлильной частью инструмента с одновременной разделкой торца

(форма разделки торца отверстия определяется конструктивной формой ОСП), 3 — отвод инструмента из отверстия на величину, превышающую шаг резьбы, 4 — радиальное врезание на номинальный диаметр резьбы, 5 — фрезерование резьбы, 6 — выход на ось отверстия и 7 — вывод инструмента из отверстия.

Комбинированный инструмент также можно применять для обработки ОСП размеров больших, чем исходные диаметральный размер рабочих частей сверло-резьбофрезы. В этом случае сверлильная, расточная и зенковочная части выполняют роль двухзубой фрезы. Реализуется схема радиального врезания детали за один или несколько проходов на требуемый размер обработки отверстия посредством круговой подачи относительно оси отверстия (планетарное движение).

Каждая часть комбинированного инструмента выполняет определенный вид обработки и имеет свою специфику расчета и проектирования с учетом геометрических параметров режущих частей, стружкоотвода, форм лезвий и кромок, учета стойкости, прочности и других требований.

Расчет резьбовой части комбинированных инструментов имеет ряд особенностей, обусловленных тем, что точность формообразования резьбового профиля в отверстии детали при реализуемой кинематической схеме резания (см. рис. 1, б) зависит от: геометрических размеров обрабатываемой поверхности и инструмента, конструктивных размеров режущего профиля резьбовой части, геометрических параметров режущей части. В рамках предлагаемой работы рассмотрено влияние перечисленных параметров резьбообразующей части комбинированного инструмента на точность нарезания резьбы различного диаметра в отверстиях сложного профиля.

Известно [1, 6], что для получения при резьбофрезеровании профиля резьбы, соответствующего принятой степени точности, необходимо корректирование профиля зуба резьбообразующей части инструмента. Это связано, во-первых, с несовпадением профилирующей плоскости, проходящей через ось резьбы детали, в которой передается резьбовой профиль от

инструмента к детали, и осевой плоскости, проходящей через оси резьбы и инструмента; во-вторых [1], с наличием винтовой передней поверхности и затылования зубьев резьбообразующей части.

Рассмотрен инструмент с корригированным профилем зуба резьбообразующей части. Далее учитывают только геометрические погрешности резьбофрезерования от перечисленных выше параметров без учета жесткости детали, инструмента и технологических биений.

В работе [5] авторами разработана схема формообразования профиля нарезаемой резьбы, представленная на рис. 2, на которой профили резьбы и инструмента представлены в виде треугольника с теоретически острой вершиной и углом профиля 60° .

Введем систему координат $X_p Y_p Z_p$ с центром в т. O_p на оси резьбы. На рис. 2 резьба детали представлена наружным диаметром D , внутренним диаметром D_1 и углом подъема резьбы по наружному диаметру ψ . В процессе работы инструмент совершает главное движение резания D_r (на рис. 2 центр инструмента обозначен последовательными положениями точек $1_0 \dots 9_0$), круговая подача D_{S2} вокруг т. O_p по окружности радиуса $r_n = e$ и осевое перемещение D_s .

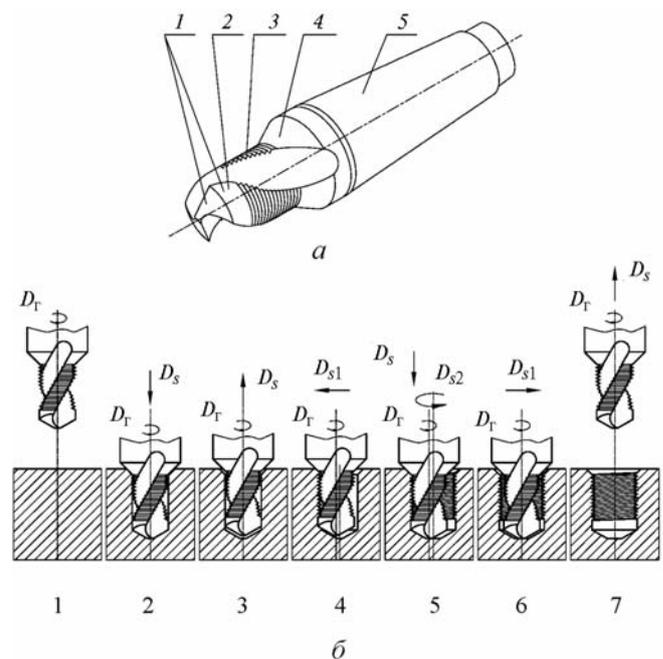


Рис. 1. Сверло-резьбофреза (а) и технологическая последовательность обработки ОСП (б)

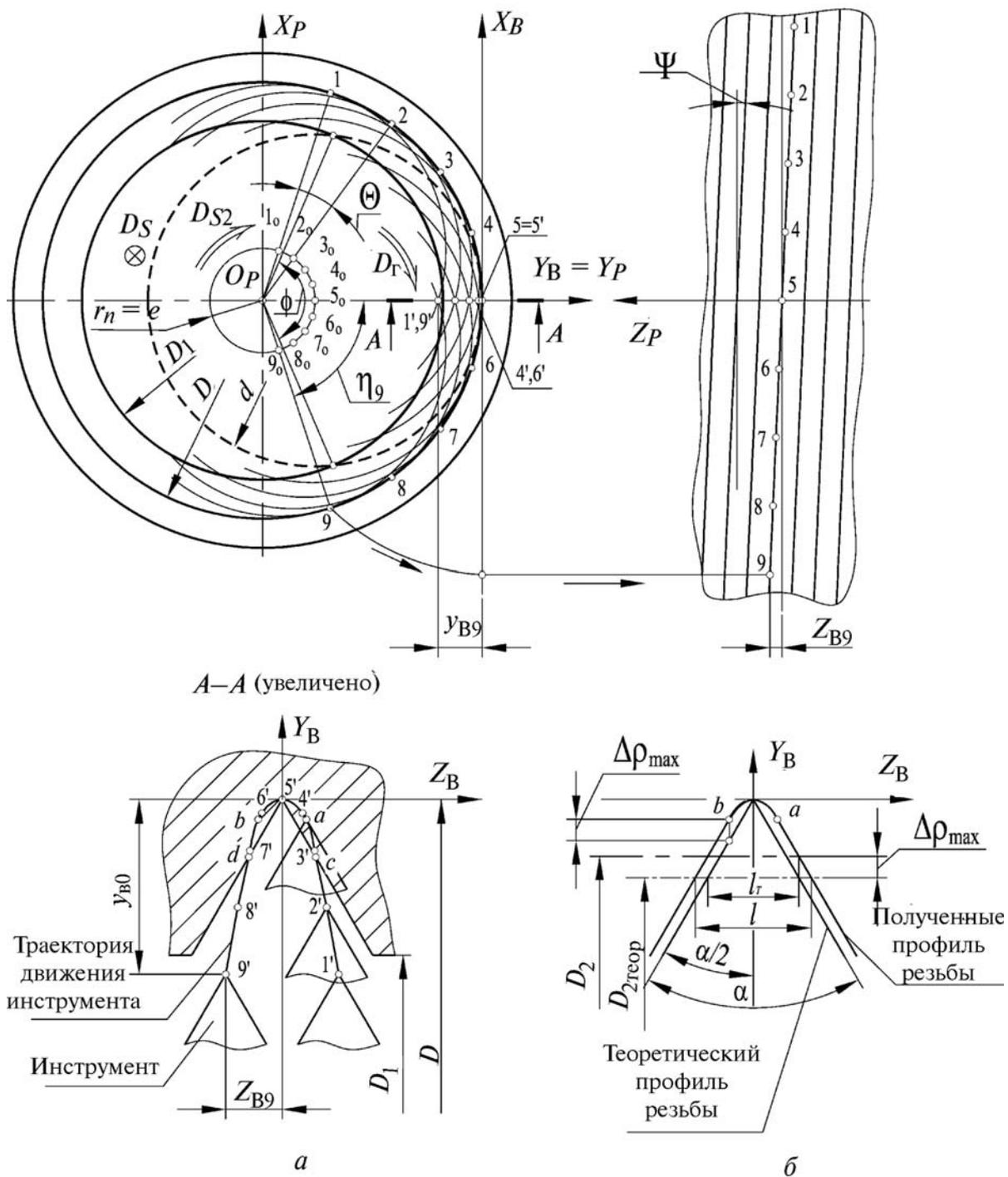


Рис. 2. Расчетная схема для определения геометрической погрешности профиля внутренней резьбы $\Delta\rho_{\max}$ при резьбофрезеровании:

1–9 — точки, обозначающие положение сечений (сечения, проходящие через оси резьбы детали и инструмента); 1_0 – 9_0 — точки, обозначающие положение центра вращения инструмента; Θ — угол между соседними положениями инструмента; η_i — угол между сечением A—A и i -м положением инструмента ($\eta_i = mQ$, где m — целое число, определяющее количество положений инструмента от положения инструмента в сечении A—A), на рисунке представлен углом η_0

Рассмотрим процесс формирования сечения A—A, где резьбовой профиль образован полно-

стью последовательными положениями инструмента 1–9 при его планетарном движении

вокруг центра O_p . Для этого введем систему координат $X_B Y_B Z_B$ с началом в вершине формируемого профиля резьбы, причем $Y_p = Y_B$. В положении 1 (рис. 2, сечение $A-A$, положению инструмента 1 соответствует точка 1' в сечении $A-A$) сверло-резьбофреза еще не проходит через рассматриваемое сечение $A-A$. В положении 2...8 инструмент формирует резьбовой профиль, а в положении 9 инструмент уже вышел из него. Координаты y_{Bi} и z_{Bi} (на рис. 2 представлены координатами точки 9) определяются на соответствующих проекциях и являются точками кривой движения вершины зуба инструмента во впадине резьбы относительно теоретического профиля резьбы (рис. 2, a). На рисунке видно, что изменение координаты Z_B линейно, поскольку она является функцией шага нарезаемой резьбы (движение подачи вдоль оси резьбы), а изменение координаты Y_B нелинейно, так как она описывает два движения (движения окружной и осевой подачи). Получается сложная, симметричная относительно оси Y_B кривая, пересекающая теоретический профиль резьбы в некоторых точках c и d (рис. 3, a). Кривая также имеет две симметричные точки a и b , которые максимально удалены от теоретического профиля резьбы в направлении среднего диаметра. Очевидно, что зуб формирует окончательный профиль именно тогда, когда его вершина находится в точках a и b , после чего участок резьбового профиля переходит в скругленную вершину. Координаты точек a и b могут быть определены согласно системе уравнений (1) при условии $\eta_i = \eta_{\max}$ (параметр η_{\max} определяется при исследовании зависимости (2)).

Таким образом, на рис. 2 видно, что в результате резьбофрезирования полученный профиль резьбы «поднимается» относительно теоретического профиля резьбы и следовательно, в результате обработки средний и внутренний диаметр резьбы увеличиваются на величину $2\Delta\rho_{\max}$, а ширина впадины профиля полученной резьбы l превышает теоретическую l_T (рис. 2, b).

Полученная траектория движения вершины зуба инструмента определяется координатами

y_{Bi} и z_{Bi} , которые находят из системы уравнений [5]:

$$\begin{cases} y_{Bi} = D/2 - \left(e \cos \eta_i + \sqrt{(d/2)^2 - e^2 \sin^2 \eta_i} \right); \\ z_{Bi} = R\eta_i \operatorname{tg} \psi = P\eta_i / (2\pi). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь d — диаметр резьбообразующей части инструмента; $e = (D - d)/2$ — радиус планетарного вращения сверло-резьбофрезы; $\operatorname{tg} \psi = P / (\pi D)$, где P — шаг нарезаемой резьбы.

Величина геометрической погрешности профиля резьбы $\Delta\rho_{\max}$ была определена в работе [5] и может быть получена при исследовании функции

$$\Delta\rho_i = e \cos \eta_i + \sqrt{(d/2)^2 - e^2 \sin^2 \eta_i} - D/2 + P\eta_i / (2\pi \operatorname{tg}(\alpha/2)), \quad (2)$$

где α — угол профиля резьбы.

Анализ зависимости (2) показал, что на величину геометрической погрешности профиля резьбы $\Delta\rho_{\max}$ большое влияние оказывает шаг резьбы (см. рис. 3, a). Это связано с тем, что при увеличении шага резьбы увеличивается угол подъема резьбы и, следовательно, степень подреза профиля. При расчете погрешности $\Delta\rho_{\max}$ и построении графиков (см. рис. 3, a) принималось соотношение резьбообразующей части инструмента и внутреннего диаметра резьбы $d/D_1 = 0,9$.

Также большое влияние оказывает диаметр d резьбообразующей части комбинированного инструмента (рис. 3, b), поскольку с его ростом увеличивается Π угол контакта ϕ инструмента и нарезаемой резьбы (см. рис. 2). На рис. 3, b указаны ограничения на диаметр d (стандартизованные значения внутреннего диаметра D_1 для резьб М30×3, М42×3), а также ограничения по точности обработки. По зависимости $\Delta\rho_{\max} = f(d)$ можно определить диаметр резьбообразующей части инструмента d , удовлетворяющий нарезанию резьбы принятой степени точности.

При принятом соотношении d/D_1 на погрешность $\Delta\rho_{\max}$ оказывает влияние номинальный диаметр резьбы D (рис. 3, b), поскольку при неизменном шаге резьбы при увеличении

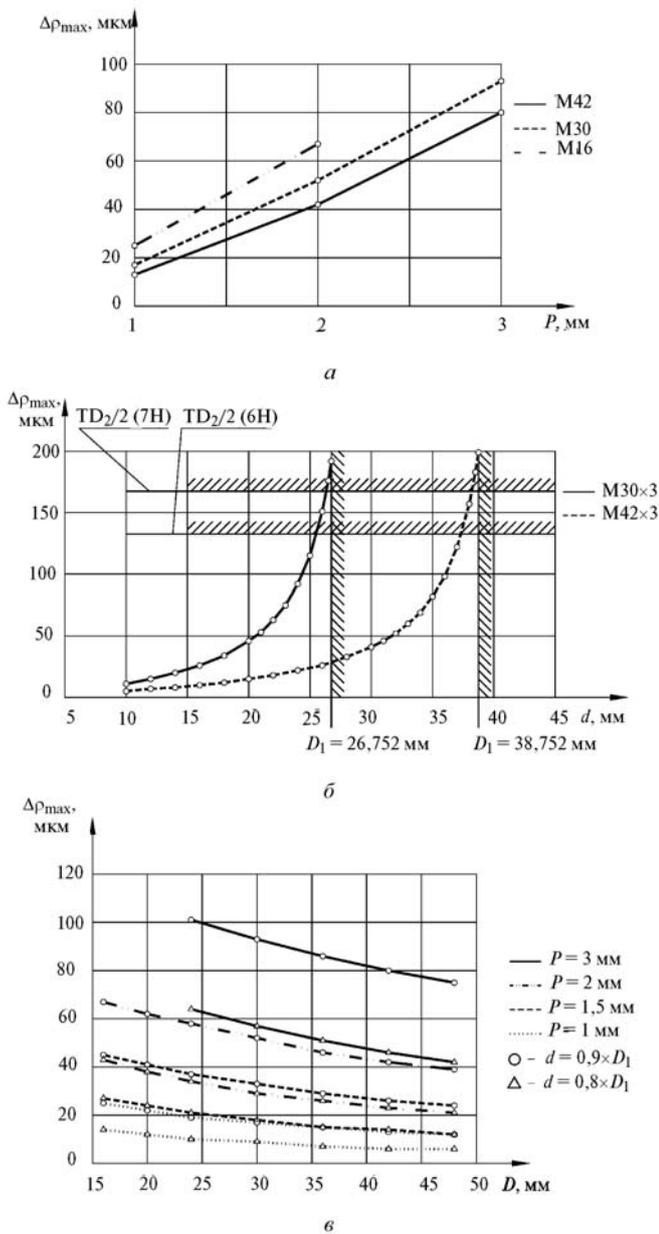


Рис. 3. Влияние шага резьбы P (а), диаметра резьбообразующей части сверло-резьбофрезы d (б) и номинального диаметра резьбы D (в) на величину геометрической погрешности профиля $\Delta\rho_{\max}$

наружного диаметра резьбы уменьшается угол подъема, что приводит к уменьшению подреза профиля. На рисунках также видно, что с ростом соотношения d/D_1 происходит увеличение погрешности $\Delta\rho_{\max}$. При расчете параметра $\Delta\rho_{\max}$, полученного при исследовании зависимости (2) и построении графиков (см. рис. 3, а–в) принималось, что $\alpha = 60^\circ$, $e = (D - d)/2$.

На практике вершина зуба резьбообразующей части инструмента не имеет теоретически острой вершины. При назначении размера ширины вершины a зуба резьбообразующей части сверло-резьбофрезы следует учитывать, что чрезмерное заострение вершин зубьев приводит к повышенному износу. Известно, что резьбовые фрезы могут нарезать резьбу одинакового шага в определенном диапазоне диаметров. Однако данных о совместном влиянии диаметра d и величины притупления вершины зуба инструмента нет.

Ширину вершины a зуба резьбообразующей части сверло-резьбофрезы можно рассчитать аналогично гребенчатым резьбовым фрезам, регламентированным ГОСТ 1336–77. В этом случае параметр a рассчитывают в соответствии с высотой головки зуба резьбовой фрезы.

На рис. 4, б представлен процесс образования профиля резьбы с учетом притупления вершины зуба резьбообразующей части инструмента. Для этого, согласно системе уравнений (1), строят траектории движения зуба инструмента (рис. 4, а) на примере нарезания резьб M27x2, M30x2, M33x2 и M42x2, сформированных инструментом с диаметром резьбообразующей части $d = 24,2$ мм. Далее, на основе графиков траектории движения зуба строят впадины нарезаемых резьб в несколько этапов:

- в соответствии с системой уравнений (1) строят траекторию движения зуба резьбообразующей части сверло-резьбофрезы, имеющего теоретически острую вершину (см. рис. 4, а);
- под углом профиля резьбы $\alpha = 60^\circ$ проводят условно две прямые, касательно боковым сторонам расчетной траектории (аналогично прямым, проведенным из точек a и b (см. рис. 2));
- поскольку на практике зуб инструмента не имеет острой вершины, обе половины кривой раздвигаем на величину a притупления вершины зуба инструмента. При этом форма траекторий сохранится.

Необходимо отметить, что указанный способ построения впадин является приближенным. Поскольку ось вращения инструмента не совпадает с осью резьбы, в результате обработки боковые стороны резьбы будут представлять собой огибающие семейства положений про-

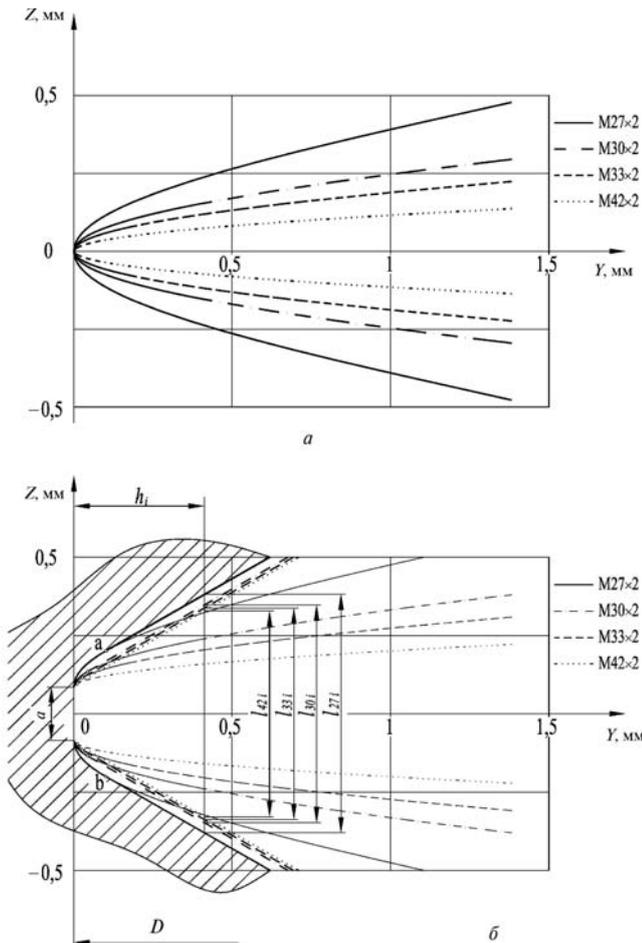


Рис. 4. Расчетные траектории движения вершины зуба резцообразующей части сверло-резцофрезы (а) и расчетные профили впадины формируемой резьбы (б)

межуточных боковых резов сторонами профиля зуба резцообразующей части инструмента. Как было указано выше (см. рис. 2, а), принимаем формирование боковых сторон профиля резьбы однократным положением профиля зуба инструмента слева и справа.

На рис. 4, б изображена впадина резьбы, построенная на основе траектории движения вершины зуба по методике, представленной выше при фрезеровании резьбы М27×2. Остальные, полученные в результате построений, впадины резьб на рисунке показаны штриховыми и штрихпунктирными линиями. Точки *a* и *b* перехода боковой стороны профиля во впадину соответствуют аналогичным точкам, представленным на рис. 2, а.

Анализ рис. 4, б показал, что кроме перечисленных выше параметров (*D*, *d*, *P*, α) на точ-

ность профиля нарезаемой резьбы также оказывает влияние ширина вершины *a* зуба резцообразующей части сверло-резцофрезы. Кроме того, видно, что с увеличением соотношения диаметров *D* и *d* ширина впадины полученной резьбы *l_i* уменьшается, что подтверждается теоретической зависимостью (2) и представленным на рис. 3, б графиком.

На рис. 5 изображено компьютерное моделирование формирования профиля резьбы М42×2 зубом резцообразующей части инструмента, имеющим ширину вершины: *a* = 0 мм (рис. 5, а) и *a* = 0,18 мм (рис. 5, б). Значение *a* = 0,18 мм рассчитывалось в соответствии с высотой головки зуба резцовой фрезы согласно ГОСТ 1336—77. Представленное на рисунке сечение впадины резьбы соответствует сечению А—А, а последовательные положения зуба инструмента, расположенные вдоль траектории движения — схеме, приведенной на рис. 2, а.

На рис. 5 видно, что впадина нарезаемой внутренней резьбы (поз. 1) формируется при последовательном (поз. 2) перемещении инструмента (поз. 4) вдоль проекции траектории движения (поз. 3), определяемой движениями *D₁*, *D_{S2}* и *D_S* (см. рис. 2). При построении траектории движения зуба принимался диаметр резцообразующей части инструмента *d* = 36 мм.

Из анализа рис. 5 следует вывод о том, что впадина нарезаемой резьбы формируется совокупностью последовательных резов зуба инструмента (т. е. материал впадины снимается во время каждого реза), но при этом, как было указано выше, окончательно стороны профиля резьбы формируются только двумя резами (соответственно левой и правой сторон профиля резьбы), соответствующими крайним формообразующим положениям зуба инструмента (точки *a* и *b* на рис. 2).

Теоретические предпосылки о наличии и величине геометрической погрешности профиля резьбы Δr_{max} и, как следствие, изменение ширины впадины нарезаемой резьбы при резцофрезеровании резцообразующей частью сверло-резцофрезы были проверены экспериментально.

Проведены сравнительные испытания двух сверло-резцофрез одинакового диаметра резцообразующей части (*d* = 24,2 мм) с различной

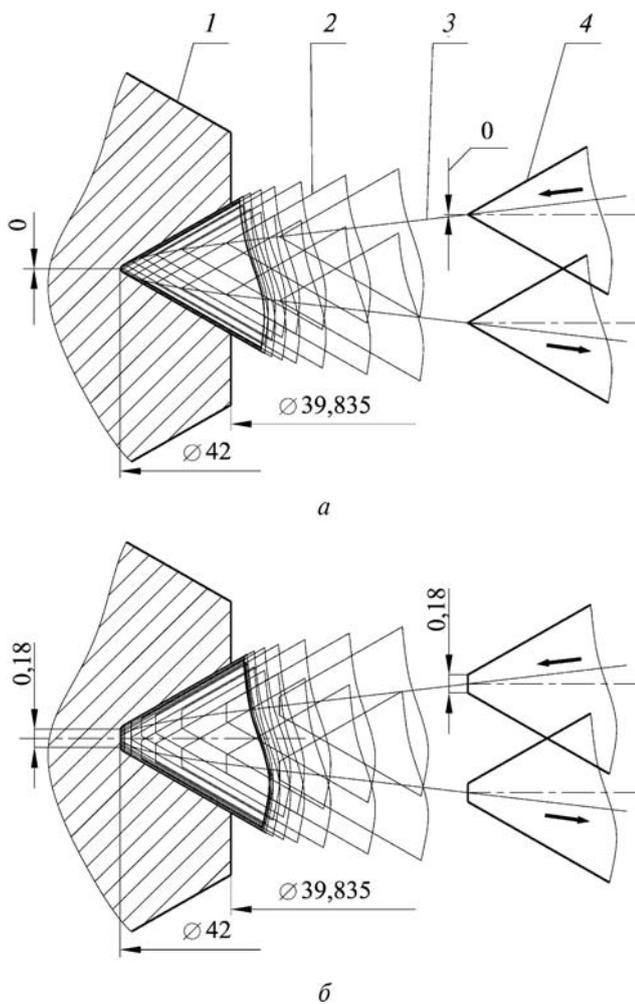


Рис. 5. Компьютерное моделирование формирования профиля внутренней резьбы М42×2 зубом резьбообразующей части сверло-резьбофрезы ($d = 36$ мм) с шириной вершины; а — $a = 0$ мм; б — $a = 0,18$ мм

величиной a притупления вершины зуба. В одном случае притупление $a_1 = 0,17$ мм, что соответствует ГОСТ1336—77, в другом притупление было увеличено с $a_2 = 0,36$ мм, что не соответствует ГОСТ1336—77. Испытания проводились на РКЗ ГКНПЦ им. Хруничева и ОАО «Серпуховский завод «Металлист». При проведении экспериментальных исследований обрабатывались глухие ОСП с резьбой М27×2, М30×2, М33×2 и М42×2 (все резьбы обрабатывались одним инструментом) в заготовках из алюминиевого сплава АМгб и стали 45, комплексный контроль нарезанных резьб проводился предельными резьбовыми калибрами. Резьба в отверстиях заготовок из стали 45 обрабатывалась на универсально-фрезерном станке с ЧПУ МН1000, $n = 400$ об/мин,

круговая подача $S_2 = 220$ град/мин, СОТС — сульфозфрезол; из АМгб — на обрабатывающем центре ИР800ПМФ4, $n = 1000$ об/мин, круговая подача $S_2 = 100$ мм/мин, СОТС — 5% эмульсия «Укринол-1». Контроль проводился резьбовыми калибрами М27×2 6Н, М30×2 6Н, М33×2 6Н и М42×2 6Н по ГОСТ 17758—72. Радиальное биение зубьев резьбообразующей части не превышало 0,020 мм.

Измерения резьбовыми калибрами показали, что резьбы, обработанные сверло-резьбофрезами с притуплением вершины зубьев резьбообразующей части $a_1 = 0,17$ мм, соответствуют принятой степени точности, а в случае притупления $a_2 = 0,36$ мм — не соответствуют при любой глубине врезания. В результате испытаний комбинированные инструменты показали свою работоспособность и подтвердили теоретические предпосылки о влиянии величины притупления зуба на точность получаемой резьбы.

На рис. 6 представлена схема измерения ширины впадины резьбы $l_{0,5}$ на расстоянии $l = 0,5$ мм, отложенном от ее вершины, которая выбрана за измерительную базу. Это можно объяснить тем, что резьбовая фреза является инструментом, передающим изделию свой профиль, а также тем, что положение профиля резьбы относительно оси обрабатываемого отверстия обеспечивается с высокой точностью позиционированием инструмента системой ЧПУ станка.

Базовое расстояние выбрано таким образом, чтобы измерения проводились на прямолинейных участках профилей, приближенно к среднему диаметру. Для этого заготовки с резьбовыми отверстиями были разрезаны в осевой плоскости на электроэрозионном вырезном станке, чтобы исключить внесение дополнительных напряжений и получить удовлетворительную точность профиля резьбы, а также отполированы с алмазной пастой.

Измерения проводились на пяти шлифах при измерении ширины десяти впадины профиля на диаметре резьбы. В результате вычислялось среднее значение ширины впадины резьбы. В таблице представлены результаты измерений профиля нарезанных резьб.

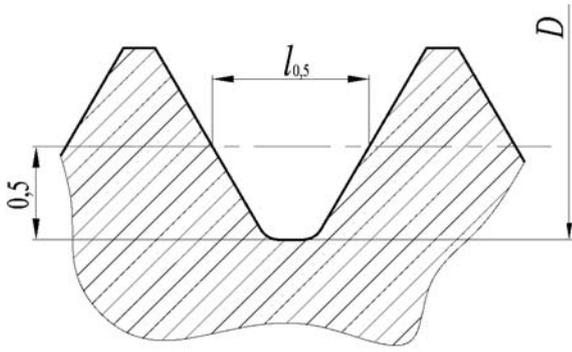


Рис. 6. Схема измерения ширины впадины резьбы

На рис. 7 изображены профили впадин резьб М27×2, М30×2 и М42×2, нарезанных инструментом с шириной вершины зубьев $a_1 = 0,17$ мм и $a_2 = 0,36$ мм и совмещенных по впадине резьбы. Профили резьб, представленные на рис. 7, иллюстрируют влияние номинального диаметра внутренней резьбы и ширины вершины зуба резьбообразующей части на ширину впадины обработанной резьбы при фиксированных значениях диаметра инструмента и шага резьбы. Экспериментальные исследования показали, что геометрическая погрешность профиля резьбы Δr_{\max} (геометрически связанная с шириной впадины профиля резьбы (см. рис. 4, б и рис. 7)) отличается от расчетной не более чем на 12%, что подтверждает теоретические зависимости (1) и (2).

Анализ данных, приведенных в таблице и на рис. 7, показывает, что:

- с увеличением номинального диаметра нарезаемой резьбы одним типоразмером инструмента ширина профиля на базовом расстоянии от вершины резьбы уменьшается, что тесно связано с геометрической погрешностью профиля резьбы Δr_{\max} ;
- увеличение диаметра нарезанной резьбы инструментом одного диаметра приводит

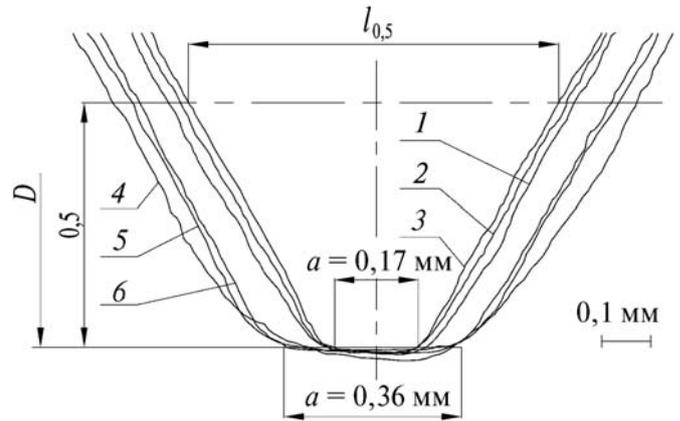


Рис. 7. Профили впадин обработанных резьб:

1 – М27×2; 2 – М30×2; 3 – М42×2 ($a = 0,17$ мм);
4 – М27×2; 5 – М30×2; 6 – М42×2 ($a = 0,36$ мм)

к изменению траектории движения зубьев резьбообразующей части инструмента, что вызывает изменение формы впадины нарезанной резьбы и подтверждается теоретической зависимостью (2).

Выводы

1. При нарезании внутренней резьбы резьбообразующей частью комбинированного инструмента появляется геометрическая погрешность профиля резьбы Δr_{\max} , которая приводит к увеличению среднего диаметра. Погрешность Δr_{\max} возникает вследствие расширения формируемой впадины резьбы, что обусловлено кинематикой формообразования. Разработано уравнение для расчета геометрической погрешности профиля резьбы Δr_{\max} в зависимости от диаметра резьбообразующей части сверло-резьбофрезы, шага и диаметра внутренней резьбы.

2. С ростом соотношения диаметров резьбообразующей части инструмента и диаметра нарезаемой резьбы d/D увеличивается погреш-

Таблица

Среднее значение ширины впадины резьб, обработанных резьбообразующей частью сверло-резьбофрезы с различной величиной притупления зуба, мм

$a_1 = 0,17$ мм					$a_2 = 0,36$ мм				
М27×2 АМг6	М30×2 АМг6	М33×2 АМг6	М42×2 АМг6	М27×2 Сталь 45	М27×2 АМг6	М30×2 АМг6	М33×2 АМг6	М42×2 АМг6	
0,821	0,758	0,739	0,725	0,825	1,026	0,960	0,935	0,912	

ность Δr_{\max} . При увеличении шага нарезаемой резьбы P степень влияния соотношения d/D на величину Δr_{\max} растет.

3. В связи с тем, что сверло-резьбофреза используется для обработки отверстий сложного профиля различных диаметральных размеров и содержащих резьбовой участок, представляется целесообразным устанавливать диаметральные размеры инструмента с учетом диаметра резьбообразующей части, который определяет точность нарезаемой резьбы во всем диапазоне диаметральных размеров ОСП.

Литература

1. Мальков О.В., Литвиненко А.В. Общий случай профилирования зубьев резьбовой части сверло-резьбофрезы // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 1997. № 2. С. 77–84.
2. Pat. DE 3627798 A1 DBR, Int.Cl.4 B23G 5/20. Verfahren und Werkzeug zur Herstellung von Gewindebohrungen / Rolf Klenk GmbH & Co Kg (DBR).

3. Pat. 5413438 USA, Int.Cl.6 B23C 3/00; B23G 5/20. Combined hole making and threading tool / M.C.Turchan (USA).

4. Pat. 456408 Sweden, Int.Cl.4 B23G 5/20. Borr- och gängverk-tyg / B. Bergström, H.Lindberg (Sweden); Sandvik AB (Sweden).

5. Мальков О.В., Литвиненко А.В. Выбор наружного диаметра резьбовой части сверло-резьбофрезы // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 1997. № 3. С. 78–84.

6. Левицкий М.Я. Резьбофрезерование. Киев: Машгиз. Украинское отд-ние, 1950. 192 с.

Статья поступила в редакцию 18.10.2011