

УДК 621.9

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СРЕЗАНИЯ ПРИПУСКА ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

М. И. МИХАЙЛОВ

*Учреждение образование «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Анализ литературы по обработке поверхностей [1]–[6] позволяет заключить, что все авторы выделяют схемы резания, которые классифицируют в основном для обработки протягиванием.

Такой подход ограничивает возможности создания новых методов обработки и методику моделирования инструментов.

Методы формообразования отражают лишь кинематику процесса обработки. Для того чтобы срезание припуска было действенным инструментом при проектировании видов обработки и инструментов, необходимо дополнить их методами формирования припуска. При этом необходимо рассматривать две задачи срезания припуска – прямую и обратную. При решении прямой задачи исходными данными являются все параметры режущего инструмента и станка, а необходимо найти параметры срезаемых слоев припуска. При решении обратной задачи известны параметры срезаемого припуска, а нужно найти наиболее рациональные режущие кромки и траектории их движения.

Целью работы является совершенствование методологии процесса резания.

Основная часть

Разработка и развитие методологии теории резания и режущих инструментов требуют, прежде всего, построения единой системы координации всех элементов этих объектов, без которой невозможно компьютерное моделирование технологических систем обработки резанием и режущих инструментов при эффективном использовании для этой цели современных средств вычислительной техники.

Такую координацию необходимо выполнять на различном уровне и поэтапно. На первом этапе необходимо провести детальное изучение обработанных поверхностей. Системный подход к формированию поверхностей детали позволяет выделить: геометрическую, кинематическую, статическую и динамическую поверхности [7] (рис. 1).

Кинематическая поверхность отличается от геометрической тем, что она получена в результате процесса формообразования при условии идеальной обрабатываемости материала заготовки и недеформируемости всех элементов технологической системы.

Статическая поверхность является производной от кинематической и дополняется отклонениями, обусловленными пространственными деформациями элементов технологической системы (станка, заготовки, инструмента и приспособления), полученными статическими составляющими сил резания и температуры.



Рис. 1. Классификация поверхностей по этапам их формирования

Динамическая поверхность, являясь производной от статической, формируется с дополнительным учетом обрабатываемости материала заготовки, силовых и тепловых процессов зоны обработки, вибраций в зоне резания, а также с учетом износа элементов технологической системы. Основные термины и определения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Термины и определения процесса срезания припуска

Термин	Определение
Срезание припуска	Процесс удаления припуска с заготовки режущим зубом инструмента
Движения резания	Движения (главное и подачи) инструмента и заготовки, обеспечивающие срезание припуска
Схема срезания припуска	Схематическое изображение тела припуска в поперечной и продольной секущих плоскостях, разделенного на слои, с выделением их разнонаправленной штриховкой
Продольная секущая плоскость припуска	Секущая плоскость, содержащая векторы, нормали и касательные к кинематическим направляющим геометрических поверхностей заготовки и детали
Поперечная секущая плоскость припуска	Секущая плоскость, содержащая векторы, нормали и касательные к кинематическим образующим геометрических поверхностей заготовки и детали
Профильная схема срезания припуска	Схема срезания припуска, в которой линии наибольшей протяженности, разделяющие припуск на слои в секущих плоскостях, параллельны соответственно образующей и направляющей геометрической поверхности детали

Окончание табл. 1

Термин	Определение
Генераторная схема срезания припуска	Схема срезания припуска, в которой линии наибольшей протяженности, разделяющие припуск на слои в секущих плоскостях, не параллельны соответственно образующей и направляющей геометрической поверхности детали
Комбинированная схема срезания припуска	Схема срезания припуска, в которой тело припуска в поперечной секущей плоскости разделено по профильной схеме, а в продольной – по генераторной, или наоборот
Схема срезания припуска (профильная, генераторная, комбинированная) одинарная	Схема срезания, в которой каждый слой удаляется одним зубом инструмента
Схема срезания припуска (профильная, генераторная, комбинированная) групповая	Схема срезания, в которой каждый слой удаляется несколькими зубьями инструмента
Схема срезания припуска (профильная, генераторная, комбинированная) одноцикловая	Схема срезания, в которой припуск удаляется за один цикл движений резания
Схема срезания припуска (профильная, генераторная, комбинированная) многоцикловая	Схема срезания, в которой припуск удаляется за несколько циклов движений резания
Схема срезания припуска (профильная, генераторная, комбинированная) постоянная	Схема срезания припуска, в которой геометрические размеры слоев постоянны
Схема срезания припуска (профильная, генераторная, комбинированная) переменная	Схема срезания припуска, в которой геометрические размеры слоев переменны

Рассмотрим на отдельных примерах выделенные схемы срезания припуска.

Для этого проанализируем рис. 2, на котором изображены сечения срезаемого слоя, разделенные по профильной (рис. 2, а–е, о) и по генераторной (рис. 2, з–н) схемам.

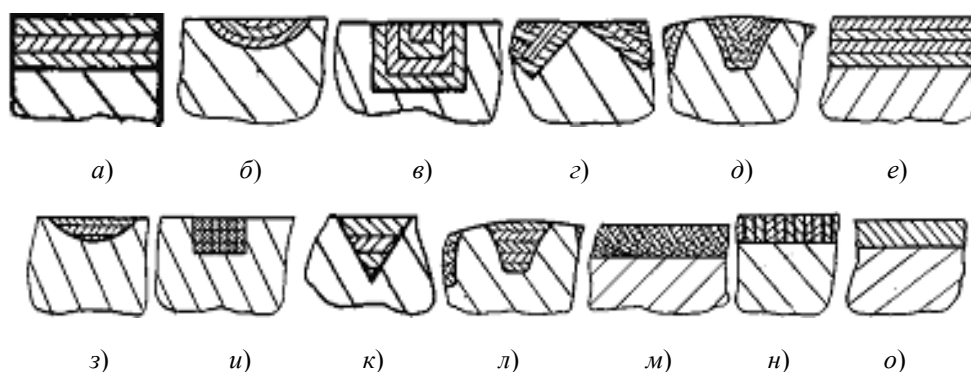


Рис. 2. Эскизы сечений припуска

В табл. 1 приведены термины и определения применительно к разработанной структуре на рис. 3.



Рис. 3. Структура процесса срезания припуска

Если принять, что сечения на рис. 2, *a–d* выполнены поперечной секущей плоскостью, а на рис. 2, *e* – продольной, то они будут отражать профильную одинарную схему срезания припуска. Кроме того, если принять, что изображена одноцикловая схема, то она будет реализована многозубым стержневым инструментом (протяжкой для наружного протягивания). Если принять, что это многоцикловая схема, то она будет реализована однозубыми строгальными резцами. Если принять, что сечения на рис. 2, *з, к, л, н* выполнены поперечной секущей плоскостью, а на рис. 2, *м* – продольной, то они будут отражать генераторную одинарную, переменную схему срезания припуска. Если принять, что это многоцикловая схема, то она будет реализована многозубым дисковым инструментом за несколько проходов, а если на рис. 2, *м* припуск был бы разделен дугами окружностей, то схема была бы реализована дисковой протяжкой.

Если сечения на рис. 2, *a–d* выполнены поперечной секущей плоскостью, а сечения на рис. 2, *м* – продольной, или сечение на рис. 2, *з–н* – поперечной, а сечение на рис. 2, *e* – продольной, то они будут отражать комбинированные схемы срезания припуска. Если схемы, объединяющие сечения на рис. 2, *a, б, г, д* и рис. 2, *м* будут реализованы многоцикловогой обработкой однозубым инструментом, то в качестве такого инструмента необходимо использовать борштангу, а если многозубым инструментом – то это будет фасонная дисковая фреза. Для реализации схем с сечениями, изображенными на рис. 2, *з, к, л, н* в поперечной секущей плоскости и рис. 2, *e* – в продольной плоскости, по одноцикловогой обработке требуется применить многозубый инструмент – призматическую протяжку. В качестве примера в табл. 2 приведены схемы срезания припуска при обработке цилиндрической заготовки.

Анализ табл. 1, 2 позволяет заключить, что выделенные схемы срезания припуска при получении цилиндрической поверхности определяют различные виды и типы режущего инструмента, реализующие ту или иную схему.

Для повышения производительности обработку наружных поверхностей тел вращения можно производить одним или несколькими призматическими резцами, устанавливаемыми в продольном суппорте.

В случае работы нескольких резцов толщина срезаемого слоя будет определяться:

$$a = \frac{F}{mz} = \frac{ts}{mz}, \quad (1)$$

где F , t , S , m , z – соответственно, площадь сечения срезаемого слоя, глубина, подача на один цикл главного движения, длина линии контакта режущей кромки и заготовки, количество инструментов в наладке.

Для резца с прямолинейной режущей кромкой, имеющей угол наклона λ , длина образующей может быть приближенно принята за проекцию линии соприкосновения режущей кромки с обрабатываемой заготовкой.

Суммарная ширина срезаемого слоя при работе z резцами будет равна:

$$b = \frac{zt}{\sin \varphi \cos \lambda}, \quad (2)$$

где b , φ , λ – соответственно, ширина сечения срезаемого слоя, углы в плане и наклона режущей кромки.

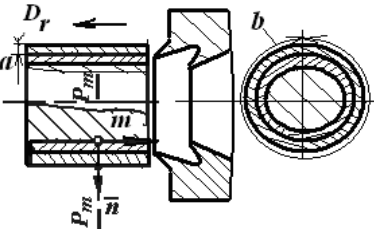
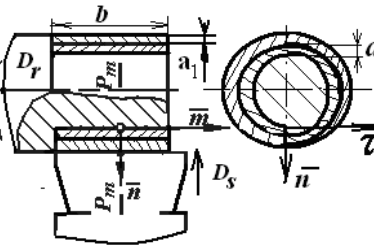
Средний путь, проходимый точкой режущей кромки каждого резца:

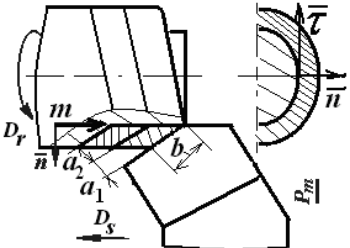
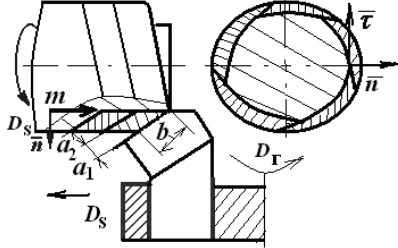
$$l_{cp} = \frac{\pi(D-t)L}{S \cos \tau}; \quad \operatorname{tg} \tau = \frac{S}{\pi(D-l)}, \quad (3)$$

где D , L , τ – соответственно, диаметр обработанной поверхности, ее длина и угол подъема винтовой линии траектории относительного перемещения резца.

Таблица 2

Примеры схем срезания припуска

Эскиз схем срезания припуска	Назначение, признаки, параметры
Профильная схема	
<p>– одинарная, постоянная, одноцикловая, копирования</p> 	<p>Обработка цилиндрической заготовки наружным протягиванием</p> <p>Геометрическая направляющая – окружность, образующая – прямая</p> <p>$b = \text{const}$, $a = \text{const}$</p>
Комбинированные схемы	
<p>В поперечной секущей плоскости – профильная, в продольной – генераторная</p> <p>– одинарная, постоянная, многоцикловая, копирования</p> 	<p>Поперечное точение широким резцом</p> <p>Геометрическая направляющая – окружность, образующая – прямая</p> <p>$b = \text{const}$, $a_1 = \text{var}$, $a_2 = \text{const}$</p>

Эскиз схем среза припуска	Назначение, признаки, параметры
<p>В поперечной секущей плоскости – генераторная, в продольной – профильная – одинарная, постоянная, многоцикловая, копирования</p> 	<p>Точение цилиндра проходным резцом Геометрическая направляющая – винтовая, образующая – отрезок прямой $a_1 = \text{var}, b_1 = \text{var}, a_2 = \text{const}, b_2 = \text{const}$</p>
Генераторная схема	
<p>– одинарная, переменная, многоцикловая, копирования и касания</p> 	<p>Фрезерование цилиндра торцевой фрезой Геометрическая направляющая – винтовая, образующая – отрезок прямой $a = \text{var}, b = \text{var}$</p>

В условиях жестких технологических систем находят применение резцы, оснащенные круглыми (чашечными) пластинками, которые поворачиваются для смены затупившегося участка режущей кромки. В данном случае режущая кромка криволинейна с дугой окружности радиуса $r = \frac{d}{2}$. Сечение срезаемого слоя такой режущей кромкой имеет форму, показанную на рис. 4.

Максимальная толщина сечения срезаемого слоя из треугольника EFD :

$$a_{\max} = \frac{2s_0}{dz} \sqrt{t(t-d)} \approx \frac{2s_0}{z} \sqrt{\frac{t}{d}}. \quad (4)$$

Длина образующей m поверхности резания (дуга CD) представляет собой в данном процессе длину линии b соприкосновения режущей кромки с обрабатываемой поверхностью (т. е. ширину срезаемого слоя) и выражается следующим образом:

$$b = \frac{d}{2}(\varphi + \varepsilon) = \frac{d}{2} \left(\arccos \frac{\frac{d}{2} - t}{\frac{d}{2}} + \arcsin \frac{s_z}{\frac{d}{2}} \right). \quad (5)$$

Приближенно получим:

$$m = b \approx \frac{d}{2} \left(2\sqrt{\frac{t}{d}} + \frac{s_0}{dz} \right) \approx \sqrt{dt} + \frac{s_0}{2z}. \quad (6)$$

Средняя толщина срезаемого слоя будет равна:

$$a_{\text{cp}} \approx \frac{t \frac{s_0}{z}}{\sqrt{dt} + \frac{s_0}{2z}} \approx \frac{s_0}{z} \sqrt{\frac{t}{d}}. \quad (7)$$

Длина пути, выраженная через a_{cp} для z резцов:

$$l = l_0 = \frac{\pi(D-t)L}{s_0} \approx \frac{\pi(D-t)L}{a_{\text{cp}} z} \sqrt{\frac{t}{d}}. \quad (8)$$

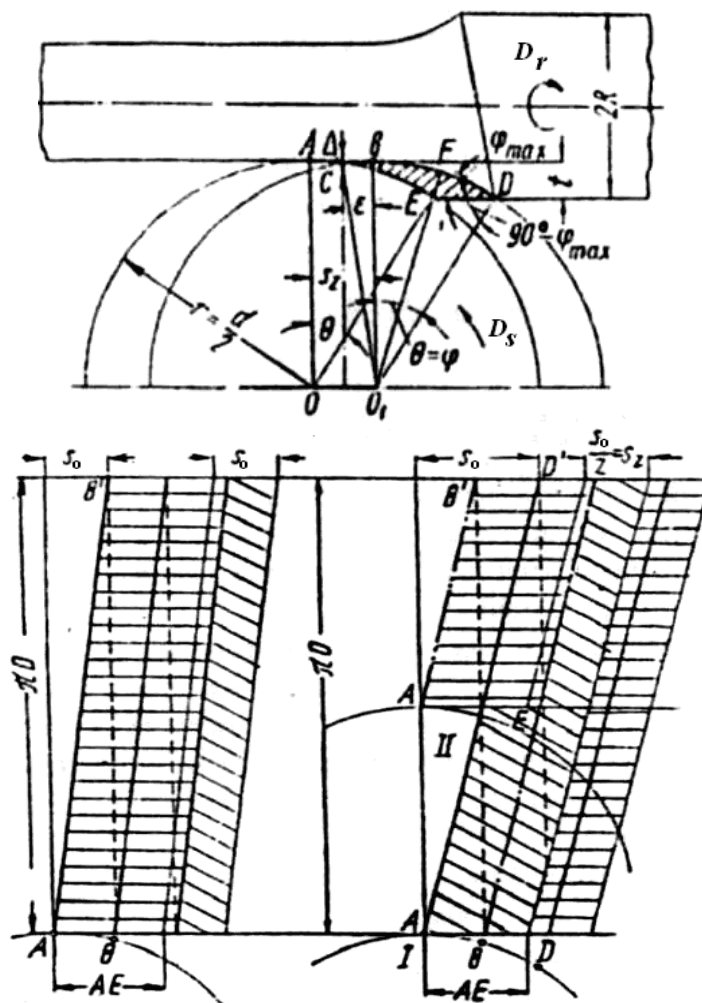


Рис. 4. Схема продольного точения круглым чашечным резцом по методу обката

Широкие резцы с радиальной подачей предназначены для формирования образующей обрабатываемой поверхности. Исходя из этого, форма режущей части инструмента соответствует формируемому профилю детали. Обрабатывать можно точением одним или несколькими радиально расположенными резцами (рис. 5).

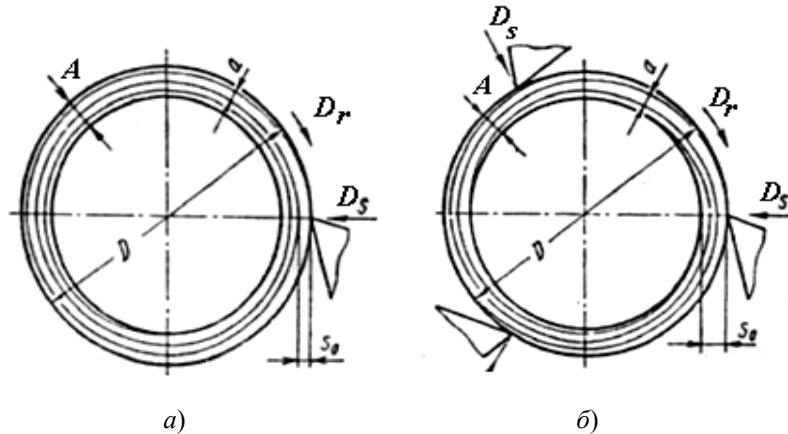


Рис. 5. Траектория движения резца (а) и трех резцов (б) с радиальной подачей

Выбор наиболее эффективного метода решения технологической задачи в конкретных условиях производства должен базироваться на объективном сравнительном анализе процесса резания. Такой анализ позволяет не только решать частные вопросы выбора наиболее эффективных методов обработки для отдельных характерных случаев, но и определять в целом рациональную область применения методов.

К наиболее полным показателям эффективности того или иного процесса относятся производительность и стоимость обработки деталей требуемого качества. Поэтому при сравнительном анализе ответ дают отношения основных и штучных времен, а также стоимости осуществления одного перехода различными методами.

Основное (машинное) время обработки резанием любой детали при удалении с нее припуска объемом Q может быть выражено следующей зависимостью:

$$t_0 = \frac{Q}{a_{cp} v b_0}, \tag{9}$$

где a_{cp} – средняя толщина срезаемого слоя, характеризующая среднюю нагрузку на единицу длины режущей кромки; v – скорость резания.

Произведение $a_{cp} v$ определяет разрешающую способность единицы длины режущей части инструмента в анализируемом процессе.

К косвенным физическим параметрам процесса относится суммарная ширина срезаемого слоя b_0 , являющаяся функцией, с одной стороны, параметров детали, а с другой – параметров инструмента.

Под суммарной шириной срезаемого слоя следует понимать суммарную ширину всех режущих элементов, принимающих одновременное участие в резании. Если выразить суммарную ширину срезаемого слоя b_0 через параметры детали и инструмента и подставить в формулу (9) основного времени, получим зависимость вида:

$$t_0 = \frac{Q}{a_0 v} f(A),$$

где A – параметры детали и инструмента L, t, B, D, d, z, S и т. д. Поделив выраженное в такой форме основное время t_{01} осуществления перехода одним методом обработки на основное время t_{02} осуществления его другим методом, можно получить отношение основных времен выполнения одного перехода различными методами

в виде непрерывной функции параметров обрабатываемой детали (его формы, размеров, величины припуска и т. п.), а также параметров инструмента (размеров, чисел зубьев и т. п.), т. е.

$$\frac{t_{0_1}}{t_{0_2}} = \frac{a_{cp_2} v_2}{a_{cp_1} v_1} f\left(\frac{L}{B}; \frac{t}{D}; \frac{S}{R}; \frac{d}{D}; z\right).$$

Для конкретизации установленной закономерности необходимо знать соотношение $\frac{a_{cp_2} v_2}{a_{cp_1} v_1}$ двух сравниваемых методов обработки.

Величина $a_{cp} v$ зависит от различных условий работы инструмента, условий протекания процесса стружкообразования и условий нагрузки системы. Условия работы инструмента и процесса стружкообразования, влияющие на износ инструмента и на допустимую толщину срезаемого слоя, можно охарактеризовать следующими показателями: длиной пути l , проходимого каждой точкой режущего лезвия в детали без перерыва в резании, общей длиной l_0 пути, проходимого точкой одной режущей кромки за все время обработки детали, коэффициентом непрерывности процесса ρ_n и коэффициентом изменения толщины срезаемого слоя, т. е. отношением $\frac{a_{max}}{a_{cp}}$. Если срав-

ниваемые методы допускают работу с одинаковой толщиной срезаемого слоя, то условия нагрузки технологической системы будут определяться суммарной шириной срезаемого слоя b_0 от всех режущих кромок, одновременно участвующих в резании.

Анализ условий работы инструмента позволяет сгруппировать близкие по своей физической сущности методы обработки, для которых можно принять:

$$a_{cp_1} v_1 \approx a_{cp_2} v_2.$$

Из изложенного выше следует, что при сравнительном анализе методов обработки рекомендуется исходить из кинематического анализа показателей процесса – пути, проходимого точкой режущей кромки в детали без перерыва в резании (например, при фрезеровании – длина дуги контакта l' , общего пути режущей кромки в детали за время ее обработки l_0), параметров срезаемого слоя a_{cp} , a_{max} , b , b_0 и выраженного через эти параметры основного времени обработки t_0 и отклонений Δ деталей от требуемой формы.

При изучении различных методов обработки и сопоставлении их возможностей необходимо знать зависимости трех основных физических параметров процесса (a_0, v, b_0) от технологических параметров – подачи s , глубины резания t , частоты вращения детали n_0 и инструмента n_u .

Если определение скорости резания не представляет затруднения, то при определении параметров срезаемого слоя используются различные расчетные зависимости, что усложняет сопоставление процессов обработки.

Существует общее определение толщины срезаемого слоя как расстояния между двумя последовательными поверхностями резания (образованными режущими кромками), измеряемого в направлении по нормали к поверхности резания в рассматриваемой ее точке.

Средняя толщина срезаемого слоя a_{cp} может быть определена как частное от деления объема Q снимаемого припуска на суммарный средний путь l_{0cp} (проходимый

активной частью всех режущих кромок в детали за все время обработки) и на длину m образующей поверхности резания:

$$a_{\text{ср}} = \frac{\iint_S (b \frac{dr_0}{du} \frac{dr_0}{dv}) dudv}{l_{0\text{ср}} m},$$

где r_0, u, v – соответственно, радиус-вектор точки на обрабатываемой поверхности и ее криволинейные координаты.

При схемах обработки типа торцового фрезерования путь l_1 , проходимый в изделии режущей кромкой, будет определяться произведением длины дуги контакта на число относительных положений этих дуг, и поэтому эта величина l_1 , так же как и длина образующей поверхности резания m , будет определяться по-разному – в зависимости от расположения оси инструмента по отношению к оси обрабатываемой детали.

Если ширина среза b_0 меняется в процессе резания, то принимают ее среднюю величину $b_{\text{ср}}$:

$$b_{\text{ср}} = l_0 z',$$

где z' – число режущих кромок, одновременно участвующих в резании.

Анализ обработанных поверхностей производили по виду траектории движения зубьев фрезы, с параметрами: $S_0 = 0,8$ мм/об; $D = 70$ мм; $Z = 4$.

Траектория зубьев фрезы, у которой один зуб имел радиальное биение +20 мкм, представлена на рис. 6, а.

Затем рассматривали вариант, в котором фреза имела один зуб с биением –20 мкм (рис. 6, б), в результате максимальное значение отклонения высоты топографии поверхности от прилегающей плоскости было равно 0,576 мкм.

В третьем расчетном варианте – два зуба, рядом стоящие, имели биение +20 мкм (рис. 7, а).

В случае, когда два зуба, не рядом стоящие, имели биение +20 мкм, а один зуб между ними не имел погрешности, максимальное значение отклонения высоты топографии поверхности от прилегающей плоскости было равно 0,446 мкм (рис. 7, б).

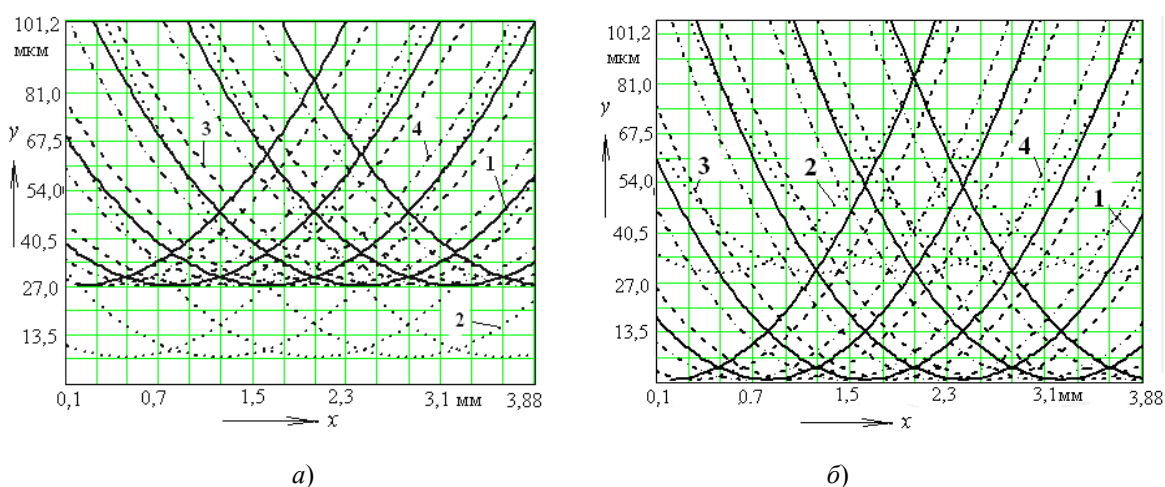


Рис. 6. Траектория зубьев фрезы:
а – с биением одного зуба +20 мкм; б – с биением одного зуба –20 мкм

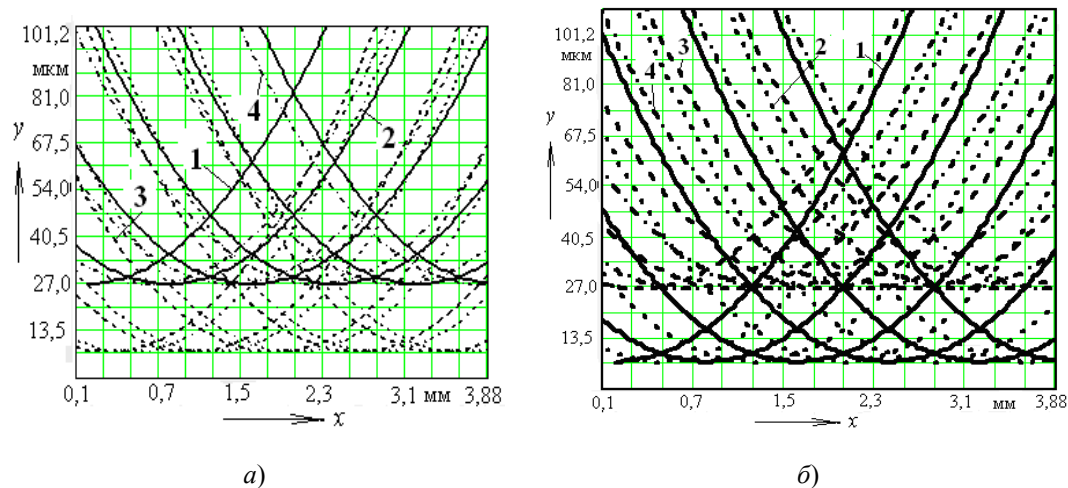


Рис. 7. Траектория зубьев фрезы для случаев:
 а – два рядом стоящих зуба имеют биение +20 мкм б – два смежных зуба имеют биение +20 мкм

Кроме того, было исследовано влияние параметров фрезы на толщину срезаемого слоя. Результаты расчетов позволили определить толщину срезаемого слоя в зависимости от угла поворота зуба фрезы и радиального биения зубьев:

$$a_{\max} = S_z \sin \theta, \quad (10)$$

где S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб; θ – угол поворота зуба фрезы.

Расчетные значения изменения толщины срезаемого слоя представлены на рис. 8.

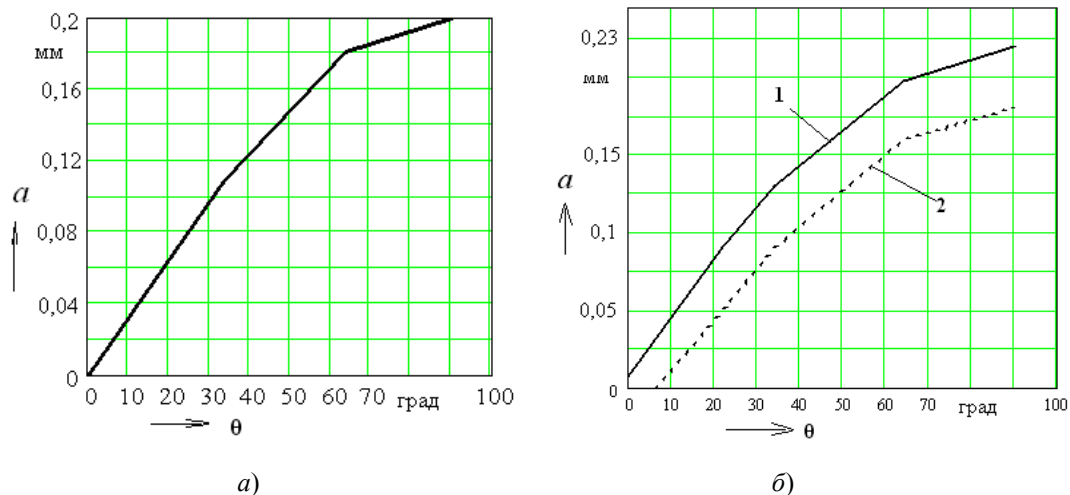


Рис. 8. Графики зависимости толщины срезаемого слоя от угла поворота фрезы:
 а – без биения зубьев; б – с биением одного зуба

Заключение

Данные рис. 8 позволяют заключить, что при увеличении угла поворота фрезы в 9 раз, толщина срезаемого слоя увеличивается в 6,6 раза (рис. 8, а). Сравнивая два графика (рис. 8, б), можно заключить, что толщина срезаемого слоя при одном и том же угле поворота зуба фрезы, например, $\theta = 10$, у фрезы с биением зубьев больше на 0,0315 мм, а при $\theta = 90$ – на 0,04 мм.

Литература

1. Лашнев, С. И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ / С. И. Лашнев, М. И. Юликов. – М. : Машиностроение, 1980. – 208 с.
2. Данилов, В. А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В. А. Данилов. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 264 с.
3. Родин, П. Р. Обработка фасонных поверхностей на станках с ЧПУ / П. Р. Родин, Г. А. Линкин, В. Н. Татаренко. – Киев : Техника, 1976. – 198 с.
4. You, S. Y. Scallop Removal in Die Milling by Tertiary Cutter Motion / S. Y. You, K. F. Eman // Journal of Engineering for Industry. – 1989. – № 3. – P. 213–215.
5. Bedi, S. Computer-aided Fairing and Direct Numerical Controlled Machining of Ship Hull Hydrodynamic Testing Models / S. Bedi, W. Chernoff, G. Vickers // CSME Transactions. – 1988. – Vol. 12, № 1. – P. 43–48.
6. Vickers, G. W. The Definition and Manufacture of Compound Curvature Surfaces Using G-surf / G. W. Vickers, S. Bedi, R. Haw // Computers in Industry. – 1985. – Vol. 6, № 3. – P. 173–183.
7. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плещачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.

Получено 02.02.2016 г.