

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА СУММАРНОЙ ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ СРЕЗА И МГНОВЕННОЙ ОКРУЖНОЙ СИЛЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ИНСТРУМЕНТАМИ С РАЗНОНАПРАВЛЕННЫМИ КРОМКАМИ

1. Постановка проблемы

Уже более двух десятилетий для обработки волокнистых полимерных композиционных материалов используются фрезы с разнонаправленными режущими кромками (рис. 1).

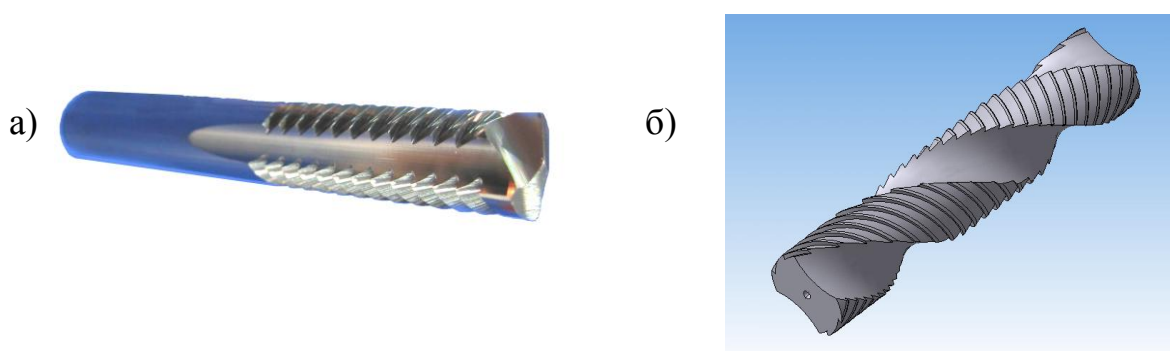


Рис. 1 - Фрезы с разнонаправленными режущими кромками

а - Фреза с РНРК с прямой стружечной канавкой; б - 3D модель рабочей части фрезы с РНРК с винтовой стружечной канавкой

Эффективность этих инструментов особенно при обработке полимеров армированных органическими волокнами обеспечиваются возможностью избегать специфического дефекта на обработанной поверхности - так называемой «ворсистости» за счет конструктивных и геометрических особенностей фрез.

Однако, несмотря на уже достаточно большую длительность использования этих инструментов, процесс резания с их применением исследован недостаточно полно. К числу вопросов, которые, по данным

литературных источников, практически не исследована – относится изменение параметров среза и суммарной мгновенной окружной силы при фрезеровании. Без изучения этих вопросов нельзя исследовать динамические характеристики процесса резания, что особенно важно для использования этих инструментов, поскольку они применяются в диапазонах частот вращения шпинделя 2000÷50000 об/мин.

2. Основной материал

При проведении расчетов нами использовался более общий случай – применение фрезы с формой рабочей части в соответствии с рис. 1б.

Суммарная площадь сечения среза и суммарная мгновенная окружная сила при фрезеровании с фрезой с винтовым зубом определяются зависимостями [1]:

$$F_{\text{сум}} = \frac{s_z D}{2 \sin \omega} \sum_1^m (\cos \theta_1 - \cos \theta_2). \quad (1)$$

$$P_z = \frac{2^{1-k}}{2-k} C_p C_\omega D \cot \omega \cdot s_z^{1-k} \left[\sin^{2-k} \left(\frac{\theta_2}{2} \right) - \sin^{2-k} \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right]. \quad (2)$$

где θ_1, θ_2 – мгновенные углы контакта крайних точек зуба.

На рис. 2 представлены примеры мгновенного положения цилиндрической косозубой фрезы и косозубой фрезы с разнонаправленными режущими кромками при ширине фрезерования b и c мгновенным углом контакта θ_m . Как видно из данного рисунка, определение $F_{\text{сум}}$ и P_z для варианта b является более сложной задачей, так как достаточно сложно определить длину рабочих зубьев находящихся в контакте, а значит и углов θ_{1i} и θ_{2i} . Также проблематично определение количества контактирующих зубьев. Это связано с тем, что для случая a мы знаем максимальную рабочую длину лезвий l_{max} , которая для всех зубьев одинакова, а в случае b максимальная рабочая длина всех зубьев, находящихся в области контакта, разная. Причиной этого являются геометрические особенности фрезы. В

результате нет единой формулы, которая бы описывала длину контакта каждого зуба. Задача усложняется тем, что в области контакта могут находиться зубья, как с левым наклоном, так и с правым.

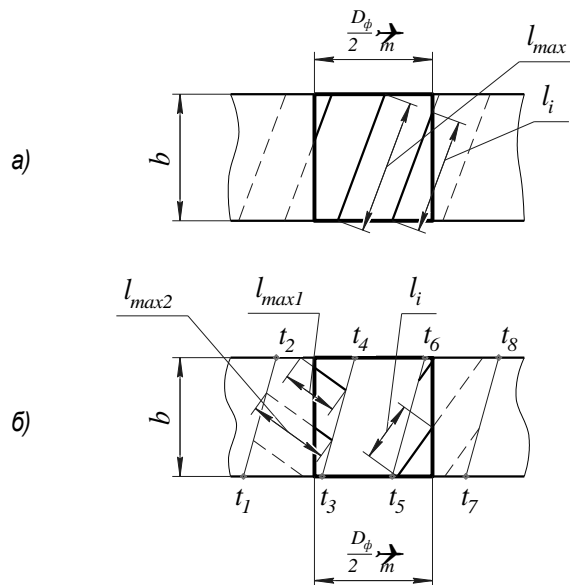


Рис. 2 – Схема расположения зубьев в области контакта с деталью при мгновенном положении фрезы:

a – цилиндрической косозубой; *б* – концевой косозубой, с разнонаправленными режущими кромками.

Вследствие этого возникла необходимость поиска новых моделей, позволяющих минимизировать переменность сил резания при обработке фрезами с РНРК. В работе проведено моделирование силовых закономерностей работы фрезы с РНРК, которые позволили определить зависимость силы резания от геометрических параметров фрезы и режимов резания.

Для решения поставленной задачи составим математическую модель, описывающую суммарную площадь сечения среза и мгновенную силу резания при некотором угле поворота фрезы вокруг своей оси ψ_i , при $0^\circ \leq \psi \leq 360^\circ$.

Изобразим развертку фрезы и внесем ее в систему координат, как показано на рис. 3:

- $A_1B_1B_1'A_1'$ – полная развертка фрезы, ограниченная сверху и снизу шириной фрезерования b .

- Точки A_1, A_1' являются характерными точками положения фрезы, соответствующие $\psi = 0^\circ$ и $\psi = 360^\circ$.
- $A_1B_1C_1D_1$ – поверхность с левонаправленными режущими кромками (ЛРК).
- $A_2B_2C_2D_2$ – поверхность с правонаправленными режущими кромками (ПРК).
- $D_1C_1B_2A_2, D_2C_2B_1'A_1'$ – винтовые канавки.
- $EFGH$ – поверхность контакта фрезы с обрабатываемой деталью, соответствующая углу поворота фрезы $\psi = 0^\circ$.
- $E'F'G'H'$ – поверхность контакта фрезы с обрабатываемой деталью, соответствующая углу поворота фрезы $\psi = 360^\circ$.

Положение фрезы при $\psi = 0^\circ$ идентично положению при $\psi = 360^\circ$, поэтому количество контактирующих зубьев, их длина, а соответственно и значения $F_{сум}$ и P_z для этих положений будут идентичны. Для того чтобы это изобразить графически, на рис. 3 изображена поверхность $A_1'B_1'C_1'D_1'$ – это поверхность $A_1B_1C_1D_1$ смещенная вправо на угол полного оборота фрезы (360°), т.е. в точку, в которой она будет находиться в начале следующего оборота.

Таким образом, внутри прямоугольников $EFGH$ и $E'F'G'H'$ мы видим идентичную картину.

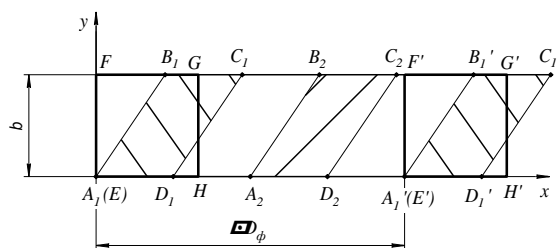


Рис. 3 – Площадь контакта развертки фрезы с обрабатываемой заготовкой

На рис. 4 изображена фреза с обрабатываемой деталью и указаны следующие параметры:

D_ϕ – диаметр фрезы;

ζ – угол наклона винтовой канавки;

ω – угол наклона режущих кромок;
 t_n – нормальный шаг зубьев фрезы;
 φ – угол обхвата винтовой канавки;
 b – ширина фрезерования;
 S_z – величина подачи на зуб;
 t – глубина фрезерования;
 Θ_m – максимальный угол контакта;
 V – направление главного движения фрезы;
 S – направление движения подачи.

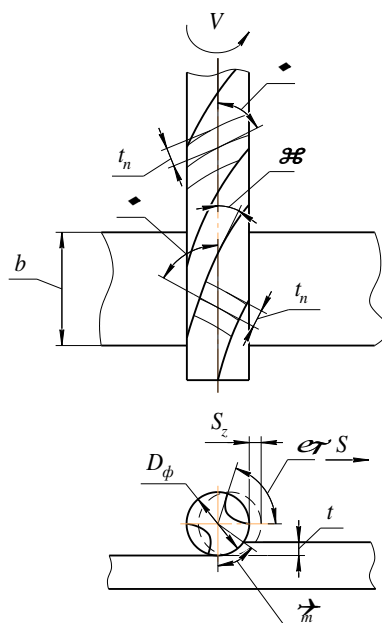


Рис. 4 – Геометрические параметры фрезы и параметры режимов резания

Для того чтобы найти углы Θ_{1i} и Θ_{2i} для i -й кромки, необходимо определить какие и сколько кромок находится в области контакта, после чего для каждой из них найти начальный и конечный углы контакта. Для более четкого представления о том, какие именно углы должны участвовать в расчетах, рассмотрим возможные варианты положения режущих кромок относительно прямоугольника $EFGH$ (рис. 5):

- a – крайние точки кромки лежат внутри прямоугольника контакта;
- b – точки лежат за пределами прямоугольника контакта.

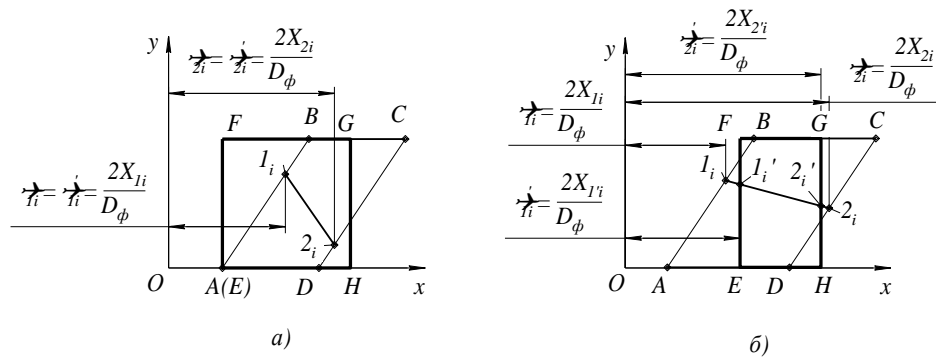


Рис. 5 – Варианты положения кромок относительно поверхности контакта инструмента и заготовки

Таким образом, кромка может полностью или частично находиться в области контакта, или же лежать за ее пределами. Если кромка полностью лежит в области контакта, как в случае (а), то искомыми будут углы между точкой O и точками I_i и 2_i . Если же кромка находится в области контакта частично, как в случае (б), то в расчет берутся углы между точкой O и точками пересечения кромки с поверхностью контакта (I_i' и $2_i'$). Возможны различные комбинации для этих вариантов, когда кромка одной из точек лежит в области контакта, а другой – за ее пределами.

Для определения искомых углов необходимо знать абсциссы соответствующих точек, после чего их можно найти по формуле (3):

$$\Theta_i = x_i \frac{2}{D_\phi}. \quad (3)$$

Имея значения этих углов можно рассчитать значения F и P_z для i -й кромки. Рассмотрим более подробно принцип нахождения углов Θ_{1i} и Θ_{2i} , используя ранее описанную методику.

Изобразим развертку винтовой рабочей поверхности фрезы ($ABCD$), наклоненной под углом ζ к оси фрезы и ограниченной шириной фрезерования b (рис. 4). Точка A лежит в начале системы координат XOY .

Через точку A под углом ω к оси X проведем прямую N . Начиная с точки A , разобьем прямую на участки, равные нормальному шагу зубьев t_n .

В действительности шаг зубьев не совпадает с точкой A , но то, что мы приняли идеальный вариант, не влечет за собой существенных погрешностей в расчетах.

В пределах интервала проводим отрезки под углом ω к оси Y – режущие кромки фрезы. Количество зубьев, которое попадает в область поверхности $ABCD$, является величиной переменной и зависит от ширины фрезерования, угла наклона винтовой канавки и ширины рабочей поверхности фрезы.

Определение количества зубьев, находящихся в работе, мы рассмотрим ниже.

Построим точку K_1 , которая находится на пересечении прямой, проведенной через отрезок AB и прямой, проведенной из точки C параллельно режущим кромкам.

Для удобства расчетов все угловые величины принимались в радианах.

Определим вспомогательные линейные размеры Lr_1-Lr_4 , которые необходимы для дальнейших расчетов.

Как видно из рисунка, величину Lr_1 можно определить по формуле (4):

$$Lr_1 = \left(r - \frac{D_\phi}{2} \right) \cdot \tan \varphi. \quad (4)$$

Величину Lr_2 определяем из треугольника AK_2B по формуле (5):

$$Lr_2 = \frac{b}{\cos \zeta}. \quad (5)$$

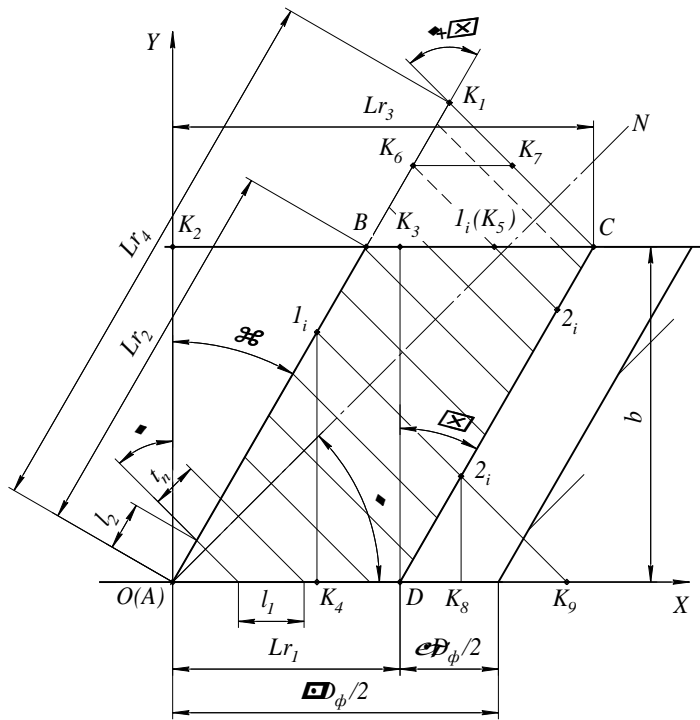


Рис. 6 – Определение координат точек I_i и 2_i для ЛРК

Lr_3 состоит из двух отрезков: $K_2 K_3 = Lr_1$ и $K_3 C$, величину которого можно найти из треугольника $DK_3 C$. В результате получим зависимость (6):

$$Lr_3 = b \cdot \tan \zeta + Lr_1. \quad (6)$$

Lr_4 состоит из двух отрезков: $AB = Lr_2$ и $K_1 B$, величину которого можно найти из треугольника $BK_1 C$. В результате получим зависимость (7):

$$Lr_4 = \frac{Lr_1 \cdot \cos \omega}{\sin(\omega + \zeta)} + Lr_2. \quad (7)$$

Определим количество кромок, находящихся в рабочей зоне по формуле (8). Из зависимости $n_{кр}$ уберем дробную часть и получим искомую величину:

$$n_{кр} = \frac{Lr_4}{t_n}. \quad (8)$$

Шаг зубьев вдоль прямой AD определим по формуле (9):

$$l_1 = \frac{t_n}{\cos \omega}. \quad (9)$$

Шаг зубьев вдоль прямой AB определим по формуле (10):

$$l_2 = \frac{t_n}{\cos(\omega + \zeta)}. \quad (10)$$

К именам всех переменных, которые касаются рабочих поверхностей с ЛРК ($A_1B_1C_1D_1$) и ПРК ($A_2B_2C_2D_2$) будем прибавлять индексы соответственно « l .» и « n .».

Получим зависимости, описывающие абсциссы точек I_i каждой из режущих кромок. Как видно из рис. 6, точка I_i каждой из кромок может занимать два положения: 1) принадлежать отрезку AB ; 2) принадлежать отрезку BC .

Если точка I_i принадлежит отрезку AB , то значение ее абсциссы определяется из треугольника AK_4I_i по формуле (11):

$$X_{l.I_i} = AK_4 = l_2 \cdot i \cdot \sin \zeta; \quad (11)$$

где i – номер кромки. Нумерация кромок идет, начиная от самой ближней к точке A и до самой ближней к точке C .

Если точка I_i принадлежит отрезку BC , то ее абсцисса определяется по формулам (12). Расчет параметра проведен по треугольнику $K_1 K_6 K_7$:

$$X_{l.I_i} = Lr_3 - K_3C = Lr_3 - K_6K_7 = Lr_3 - \frac{(Lr_4 - l_2 \cdot i) \cdot \sin(\omega + \zeta)}{\cos \omega}; \quad (12)$$

Аналогично определим абсциссы точек для 2_i каждой из режущих кромок. Точка 2_i каждой из кромок может занимать два положения: 1) принадлежать отрезку AD ; 2) принадлежать отрезку DC .

Если точка 2_i принадлежит отрезку AD , то ее абсцисса определяется по формуле (13):

$$X_{л.2i} = l_1 \cdot i; \quad (13)$$

Если точка 2_i принадлежит отрезку DC , то ее абсцисса определяется з подобия треугольников $A1_iK_9 - D2_iK_9$ и $K_4I_iK_9 - K_82_iK_9$ по формуле (14):

$$X_{л.2i} = Lr_1 + DK_8 = Lr_1 + \frac{(l_2 \cdot l_1 \cdot i - l_2 \cdot Lr_1) \cdot \sin \zeta}{l_1}; \quad (14)$$

Аналогично определяем абсциссы точек I_i и 2_i для ПРК (рис. 6).

За начальную точку отсчета выбираем точку D . Переменные параметры Lr_4 и l_2 определяются по формулам (7), (10):

$$l_2 = \frac{t_n}{\cos(\omega - \zeta)}; \quad (15)$$

$$Lr_4 = \frac{Lr_1 \cdot \cos \omega}{\sin(\omega - \zeta)} + Lr_2. \quad (16)$$

Если точка 2_i принадлежит отрезку BC , то ее абсциссы определяются по зависимости (20):

$$X_{n.2i} = \frac{\pi \cdot D_\phi}{2} + Lr_1 + b \cdot \tan \zeta - \frac{l_1 \cdot l_2 \cdot i - l_1 \cdot Lr_2}{l_2}; \quad (20)$$

Как ранее сказано, необходимо так же определить абсциссы точек режущих кромок на поверхности $A_1'B_1'C_1'D_1'$ (рис. 3). Для этих точек абсциссы имеют следующие значения:

$$X'_{л.i} = X_{л.i} + \pi \cdot D_\phi; \quad (21)$$

На рис. 6 мы видим, что возможны ситуации, когда область контакта несколько раз охватывает одну из поверхностей с ЛРК и ПРК. К этому приводит увеличение ширины фрезерования и уменьшение осевого шага винтовой канавки фрезы. В таких случаях, для верности расчетов, эти наложения также необходимо учитывать.

Определим число поверхностей с режущими кромками, которые попадают в область контакта. Их количество можно определить по формуле:

$$n_{н.н.} = \frac{b - A_1K_1}{K_1K_2}; \quad (22)$$

где A_1K_1 – осевая ширина винтовой канавки;

K_1K_2 – половина осевого шага винтовой канавки.

Значения A_1K_1 и K_1K_2 находим из треугольников $D_2A_1K_1$ и $D_1''A_1K_1$, соответственно. Таким образом, получаем расчетную зависимость (23):

$$n_{н.н.(расч.)} = \frac{2 \cdot b \cdot \tan \zeta - \varphi \cdot D_\phi}{\pi \cdot D_\phi}. \quad (23)$$

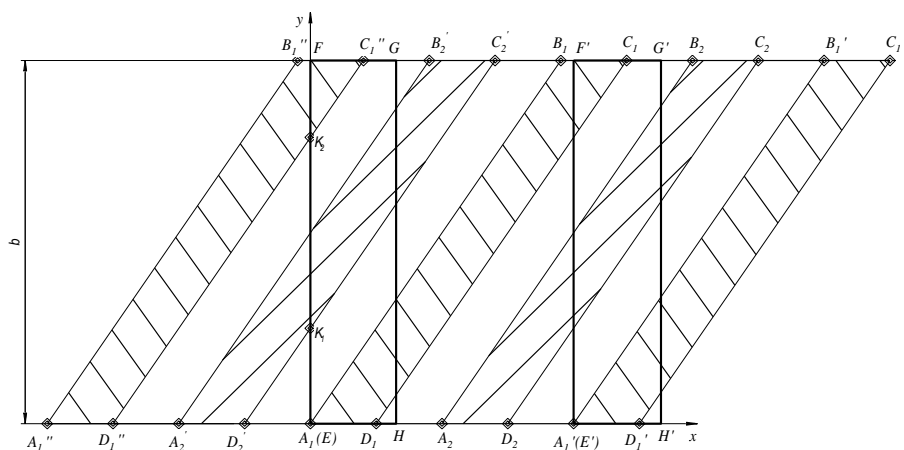


Рис. 8 – Совмещение поверхностей с режущими кромками на область контакта

Округлив расчетное число $n_{н.н.(\text{расч.})}$ до целого в большую сторону, получим искомую величину $n_{н.н.}$. Если $n_{н.н.} \leq 0$, то это значит, что совмещения поверхностей не происходит. Если $n_{н.н.} > 0$, то следующим шагом необходимо определить число совмещений поверхностей $A_1B_1C_1D_1$ и $A_2B_2C_2D_2$. Если $n_{н.н.}$ – число четное, то эти параметры рассчитываются по формуле (24):

$$n_{л.н.н.} = n_{н.н.н.} = \frac{n_{н.н.}}{2}. \quad (24)$$

Если $n_{н.н.}$ – нечетное, то справедливы формулы (25), (26):

$$n_{л.н.н.} = \frac{n_{н.н.} - 1}{2}; \quad (25)$$

$$n_{н.н.н.} = \frac{n_{н.н.} + 1}{2}. \quad (26)$$

Далее необходимо определить абсциссы крайних точек всех режущих кромок на совмещенных поверхностях. Для поверхностей с ЛРК (27):

$$X_{л.и}^k = X_{л.и} - k \cdot \pi \cdot D_\phi; \quad (27)$$

где $k = 1 \dots n_{л.н.н.}$

Для поверхностей с ПРК (28):

$$X_{n,i}^k = X_{n,i} - k \cdot \pi \cdot D_\phi; \quad (28)$$

где $k = 1 \dots n_{n.n.}$.

Таким образом, мы получили универсальную методику, при помощи которой можно вычислить абсциссы крайних точек всех режущих кромок, находящихся в области прямоугольника с шириной $\pi \cdot D_\phi$ и высотой b .

Зная значения абсцисс по формуле (3), можно определить значения центральных углов для всех кромок, участвующих в процессе резания.

Определим значения углов θ_{1i} и θ_{2i} для всех кромок, участвующих в процессе резания в некоторый момент времени. Для этого рассмотрим все возможные варианты положения кромки относительно области контакта.

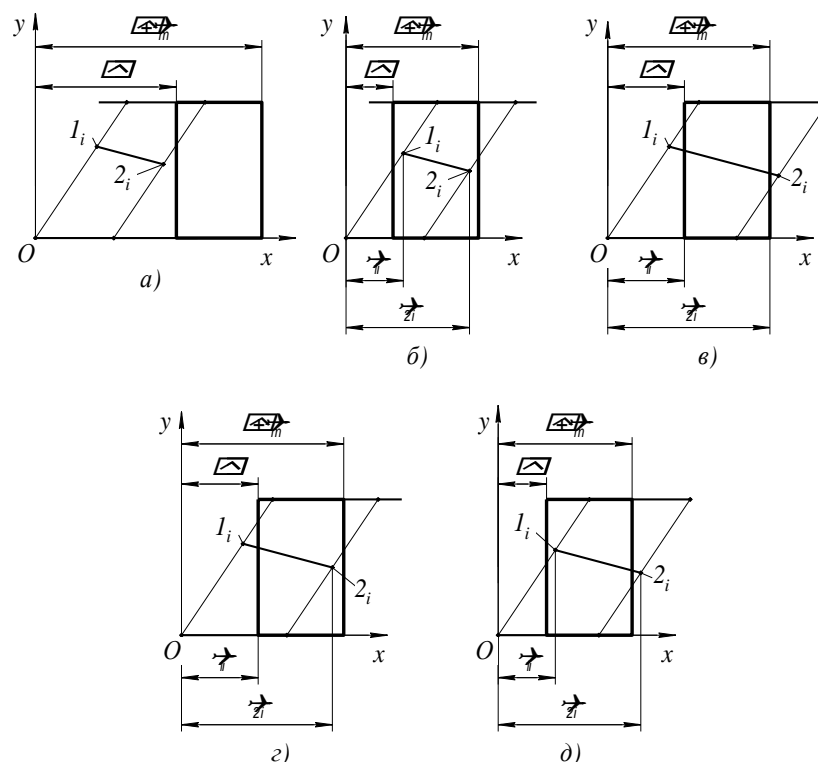


Рис. 9 – Возможные варианты положения режущей кромки относительно области контакта

Как видно из рис. 9а, если ни одна из крайних точек кромки не попадает в область контакта (т.е. в промежуток $\psi \dots (\psi + \theta)$), то такая кромка в данный момент в процессе резания не участвует и отбрасывается из расчетов.

Если обе точки кромки лежат в промежутке $\psi \dots (\psi + \theta_m)$ (рис. 9б), то такая кромка включается в расчет, а в качестве углов Θ_{1i} и Θ_{2i} принимаются центральные расчетные углы для крайних точек кромки. Если крайние точки кромки лежат за пределами области $\psi \dots (\psi + \theta_m)$, но сама кромка проходит через эту область (рис. 9в), то начальный центральный угол равняется $\Theta_{1i} = \psi$, а конечный $\Theta_{2i} = \psi + \theta_m$. В варианте (9г) $\Theta_{1i} = \psi$, а Θ_{2i} равняется центральному расчетному углу точки 2_i . В варианте (9д) Θ_{1i} равняется центральному расчетному углу точки 1_i , а $\Theta_{2i} = \psi + \theta_m$.

Имея эти значения, мы можем найти суммарную площадь сечения срезаемого слоя $F_{сум}$ и суммарную мгновенную окружную силу $P_{z_сум}$ по формулам (5), (6).

Между силами P_z и P_x среднее отношение :

$$P_x = (0,2 \div 0,4) P_z \cdot \tan(\omega). \quad (29)$$

Принимаем значение коэффициента равным 0,3.

Ввиду особенностей геометрии фрезы, осевые силы, создаваемые ЛРК и ПРК направлены в противоположные стороны. Суммарной осевой силой будет разница между ними. Условно принимаем, что силы, создаваемые ЛРК имеют положительный знак, а ПРК – отрицательный.

Исходя из этого, суммарная мгновенная осевая сила $P_{x_сум}$ рассчитывается по формуле (30):

$$P_{x_сум} = \sum_{i=1}^{k_n} 0,3 \cdot P_{z_л.i} \cdot \tan(\omega) - \sum_{i=1}^{k_n} 0,3 \cdot P_{z_п.i} \cdot \tan(\omega); \quad (30)$$

где $P_{z_л.i}$ – сила P_z на i -й ЛРК;

$P_{z_п.i}$ – сила P_z на i -й ПРК;

k_n – количество ЛРК, находящихся в области контакта;

k_n – количество ПРК, находящихся в области контакта;

Вывод

Таким образом, мы получили универсальную математическую модель, которая описывает суммарную площадь сечения среза, а также окружную и осевую силы в текущий момент поворота фрезы при заданной геометрии фрезы, а также режимах резания. Данную модель можно использовать для проведения анализа зависимости сил резания в текущий момент времени от геометрических параметров фрезы и режимов резания, а так же анализировать неравномерности фрезерования.

Список использованных источников

1. Вереzub Н. В. Научные основы высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов: дис. ... д-ра. техн. наук / Н. В. Вереzub. – Х., 1995.
2. Кобобши А. Обработка пластмасс резанием / А. Кобобши. – М. : Машиностроение, 1974.
3. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении : учеб. пособие для студ. техн. спец. / Н. В. Вереzub, Э. Весткемпер, Ю. Н. Внуков [и др.] ; под ред. А. И. Грабченко / Харьк. гос. политехн. ун-т. – Х. : ХГПУ, 1999. — 435с. : ил.
4. Сенчишин В. Г. Технология производства полимерных оптических изделий / В. Г. Сенчишин, Н. В. Вереzub, С. Н. Лавриенко. – К. : Техника, 1992.

Тарасюк А.П., Кобеляков П.В. «Особенности расчета суммарной площади сечения среза и мгновенной окружной силы при фрезеровании инструментами с разнонаправленными кромками».

В статье разработали универсальную математическую модель, которая описывает суммарную площадь сечения среза, а также окружную и осевую

сили в текущий момент поворота фрезы при заданной геометрии фрезы, а также режимах резания.

Тарасюк А.П., Кобеляков П.В. «Особенности расчета суммарной площади перетину среза и мгновенной окружной силы при фрезеровании инструментами с разноспрямованными крайками».

У статті розробили універсальну математичну модель, що описує сумарну площу перетину зрізу, а також окружну й осьову сили в сучасний момент повороту фрези при заданій геометрії фрези, а також режимах різання.

Tarasyuk A.P., Kobelyakov P.V. «Particularities of the calculation total area sections of the cut and instant district power under cutting instrument with differently directed edges».

The universal mathematical model, which describes the total area of the section of the cut was developed in the article, as well as district and axial power at the current moment of the tumbling of the milling cutter under given geometries of the milling cutter, as well as mode of the cutting.