

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article\_5bf8153902ccc3.93902413

М.Ю. Куликов, д.т.н.

(Институт конструкторско-технологической информатики РАН,  
127055 Москва, Вадковский пер. 18, стр. 1а)

Д.В. Волков, инженер

(ФГБОУ ВО Российский университет транспорта (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9)

E-mail: dvvolkov@list.ru; muk.56@mail.ru

## Проектирование геометрической формы инструмента для операций фрезоточения

*Статья посвящена методу расчета геометрических параметров инструмента для обработки наружных поверхностей тел вращения методом фрезоточения. Показано преимущество этого метода обработки. Представлены формулы расчета радиуса кривизны режущей кромки инструмента, используемого при фрезоточении. Приведены формулы расчета переднего и заднего углов в фактической плоскости.*

**Ключевые слова:** резание металлов; режущий инструмент; режущая кромка; фрезоточение.

M.Yu. Kulikov, Dr. Sc. Tech.,

(Institute of Design Technological Informatics of RAS, Building 1a, 18. Vadkovsky Alleyway, Moscow 127055)

D.V. Volkov, Engineer

(FSBEI HE Russian University of Transport (MITE), Building 9, 9, Obraztsov Str., Moscow 127994)

## Design of tool geometrical form for milling

*The paper reports the method for tool geometrical parameter computation for outer surface machining in solids of rotation by milling. The advantage of this method of machining is shown. The formulae for the curvature radius computation in a tool tip of the tool used in milling are presented. The formulae for the computation of a front clearance angle and a back angle in an actual plane are shown.*

**Keywords:** metal cutting; cutter; tool tip; milling.

При наличии ряда важных преимуществ фрезоточения, его широкому распространению препятствует отсутствие апробированных методов проектирования инструмента для данного процесса резания.

При изучении конструкций режущего инструмента приходится иметь дело с его геометрией. Различают геометрические элементы инструмента, связанные исключительно с его конфигурацией и не изменяющиеся при перемещении или движении, и кинематические элементы, определяющие взаимное положение и относительное движение инструмента и обрабатываемой заготовки.

подавляющее большинство наружных поверхностей тел вращения обрабатываются однолезвийным режущим инструментом – призматическими вершинными резцами. Вследствие того, что обработка заготовки ведется вершиной резца, этот метод имеет ряд ограничений по скорости резания, производитель-

ности и формообразованию поверхности.

Известны и другие способы обработки металлов резанием, такие как безвершинное резание, ротационное точение.

Отличительной особенностью фрезоточения является периодичность смены рабочих и холостых циклов каждого из зубьев фрезы. За время рабочего цикла затрачивается энергия, пропорциональная толщине срезаемого слоя и силе трения между поверхностями лезвия, сходящей стружкой и поверхностью резания. Примерно 95 % затраченной энергии превращается в теплоту, которая нагревает срезаемую стружку, обрабатываемую заготовку вблизи зоны резания, лезвие инструмента и частично отводится в окружающую среду.

Наиболее высокое значение температуры наблюдается на поверхности лезвия. В связи с периодической сменой рабочего и холостого циклов развитие тепловых явлений при фрезоточении имеет несколько другой характер,

чем при традиционном точении. За время рабочего цикла лезвие каждого зуба фрезы успевает нагреться, но до более низких значений температуры, чем при точении вершинными резцами. За время последующего холостого цикла лезвие зуба фрезы охлаждается, а накопленная за рабочий цикл теплота отводится в окружающую среду и в корпус фрезы. Даже с учётом роста температуры в период рабочего цикла значение температуры недостаточно велико, чтобы существенно повысить интенсивность изнашивания фрез [1].

В процессе теоретического исследования был проведен анализ схем обработки тел вращения фрезами. Целью этого анализа было изучение известных способов обработки и объединение их в прогрессивный метод для обработки тел вращения.

Способ обработки, когда сочетаются два вращательных движения по часовой стрелке с взаимно параллельными осями, известен уже давно, но малоизучен и на практике применяется крайне редко. В качестве инструмента используют дисковые фрезы с прямолинейными режущими пластинами или вставными зубьями. Известны также фрезы с винтовыми пластинками из твердого сплава. Номенклатура пластин строго регламентирована. Непременным условием для возможности использования одной и той же пластинки для разных диаметров является соблюдение постоянства и равенства шага винтового зуба инструмента шагу винтовой пластинки.

Фрезы с режущими пластинами, расположенными под некоторым углом  $\lambda$ , обладают рядом преимуществ, по сравнению с прямозубыми фрезами. Режущие пластины под углом отводят стружку в сторону, благодаря чему она не попадает под следующую режущую пластину, тем самым предохраняя режущую кромку от излишнего износа. Плавность работы способствует уменьшению вибраций фрезы и шероховатости поверхности. Угол наклона оказывает большое влияние на направление отвода стружки, равномерность фрезерования, производительность и стойкость фрезы.

Фрезы с большим углом наклона режущих пластин обладают целым рядом преимуществ, и в особенности в отношении более легкого резания, лучшего отвода стружки из зоны резания, большей производительности и стойкости. При резании происходит постоянная смена пятна контакта режущей пластины и заготовки вдоль главной режущей кромки, что обеспечивает равномерный износ, снижает

температуру резания и увеличивает стойкость режущей пластины [2].

При обработке цилиндрической поверхности форма главной режущей кромки дисковой фрезы с прямолинейными режущими пластинами является прямой, так как элементом касания двух цилиндров (дисков) с параллельными осями является прямая, которая полностью совпадает с профилем обрабатываемой поверхности заготовки.

На рис.1 представлена схема профиля главной режущей кромки при обработке фрезерованием с взаимно параллельными осями. Отрезок АБ можно представить как главную режущую кромку прямолинейной режущей пластины. Любая точка отрезка АБ равноудалена от оси вращения на величину радиуса фрезы и принадлежит цилиндрической поверхности диска.

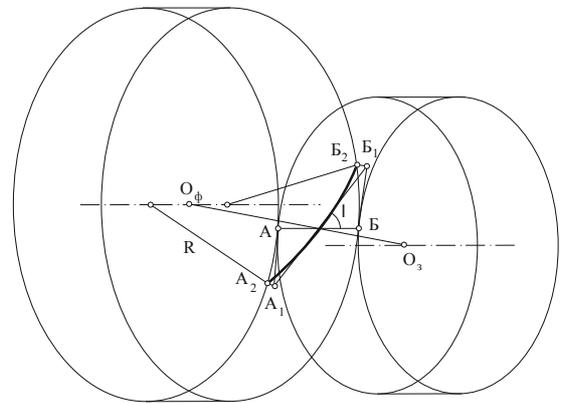


Рис. 1. Схема профиля главной режущей кромки

При повороте отрезка АБ на некоторый угол  $\lambda$ , точки А и В проецируются соответственно на точки А<sub>1</sub> и В<sub>1</sub>, которые не принадлежат цилиндрической поверхности диска. Соответственно, только одна точка середины отрезка АБ будет удалена от оси вращения на величину радиуса. При проекции отрезка А<sub>1</sub>В<sub>1</sub> на цилиндрическую поверхность диска получается криволинейный элемент А<sub>2</sub>В<sub>2</sub>, у которого все точки равноудалены от оси вращения диска.

Также известно, что существует три случая сечения поверхности цилиндра (диска) проектирующей плоскостью (рис. 2):

а) если секущая плоскость перпендикулярна оси вращения цилиндра, то сечением будет окружность;

б) если секущая плоскость не перпендикулярна и не параллельна оси цилиндра, то сечением будет эллипс;

в) если секущая плоскость содержит ось

вращения цилиндра или параллельна ей, то сечением будет прямоугольник.

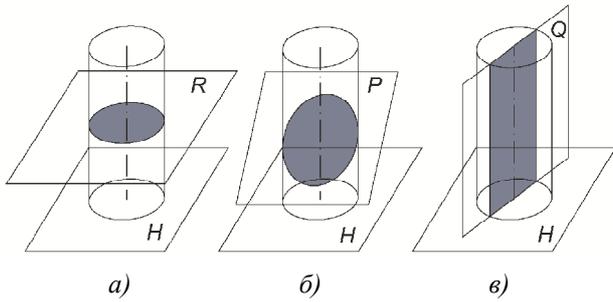


Рис. 2. Случаи сечения поверхности цилиндра плоскостью:

*a* – окружность; *b* – эллипс; *в* – прямоугольник

Особый интерес представляет случай, когда секущая плоскость пересекает торцевую поверхность цилиндра (плоскость  $P_1$ , рис. 3). Здесь часть эллипса может быть ошибочно принята за часть параболы или гиперболы.

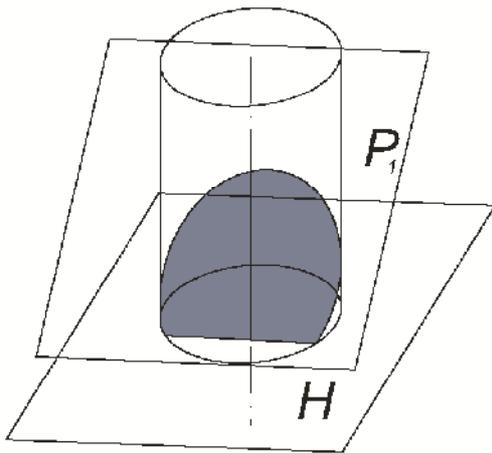


Рис. 3. Пересечение торцевой поверхности

Однако ни парабола, ни гипербола не могут быть получены как сечение поверхности кругового цилиндра плоскостью.

Установлено, что для осуществления эффективного формообразования при фрезоточении главная режущая кромка пластины должна быть выполнена криволинейной. Известно, что пересечением диска и плоскости под некоторым углом является эллипс. Для определения величины радиуса кривизны главной режущей кромки режущей пластины, использовалась аналитическая геометрия и материалы проф. Четверикова С.С. [Металло-режущие инструменты. М: Машгиз, 1941].

На рис. 4 видно, что радиус кривизны главной режущей кромки пластины равен радиусу

кривизны эллипса, и показан в сечении нормали (плоскость  $NN$ ) к плоскости режущей пластины. Поэтому, чтобы расчет радиуса был в плоскости режущей пластины, угол наклона кромки режущей пластины  $\lambda$  записывают как  $(90^\circ - \lambda)$ .

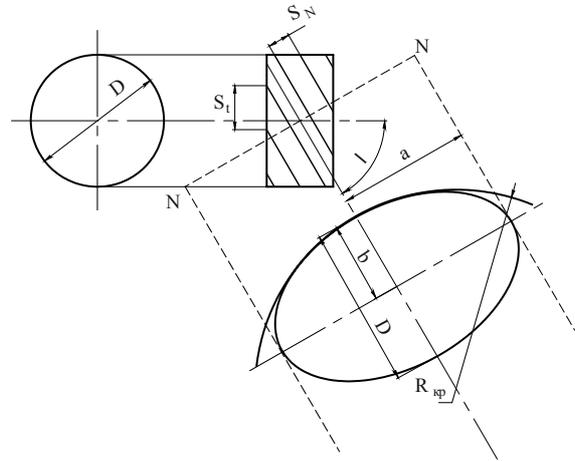


Рис. 4. Расчет радиуса кривизны эллипса

Известно, что радиус кривизны эллипса рассчитывают по формуле

$$R_i = \frac{a^2}{b}, \quad (1)$$

где  $a$  – большая полуось эллипса, которая рассчитывается как угол между большой осью эллипса и направлением диаметра фрезы  $D$ :

$$a = \left(\frac{D}{2}\right) / \cos(90 - \lambda); \quad (2)$$

$b$  – малая полуось эллипса, остается без изменений:

$$b = \frac{D}{2}. \quad (3)$$

Подставляя величины  $a$  и  $b$  в формулу эллипса, получим

$$R_i = \frac{D^2}{\frac{(2 \cdot \cos(90-\lambda))^2}{D/2}}. \quad (4)$$

И после преобразований получаем окончательное уравнение:

$$R_i = \frac{D}{2 \cdot \cos^2(90-\lambda)}. \quad (5)$$

Так как  $\cos^2(90 - \lambda) = \sin^2 \lambda$ , то получим уравнение

$$R_i = \frac{D}{2 \cdot \sin^2 \lambda}. \quad (6)$$

Следовательно расчет радиуса кривизны главной режущей кромки можно производить по одному из уравнений (5) или (6).

На рис. 5 показана схема проектирования рабочей части инструмента.

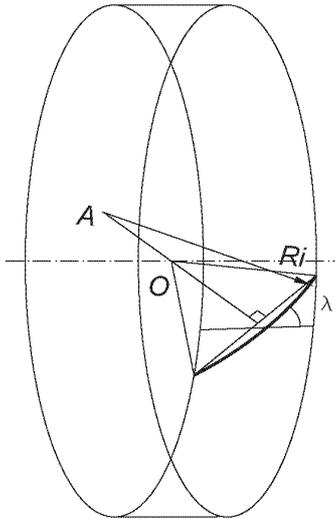


Рис. 5. Схема проектирования

То, что центр радиуса кривизны сегмента находится на перпендикуляре хорды сегмента, совпадающим с биссектрисой угла сегмента проходящим через ось вращения диска, является обязательным условием при проектировании профиля режущей кромки.

При конструировании инструмента и оценке его работоспособности важным является вопрос выбора системы отсчета геометрических параметров режущей части.

При проектировании и расчете данного вида фрез передний  $\gamma$  и задний  $\alpha$  углы режущей пластины связаны с углом наклона режущей пластины  $\lambda$ .

При прямоугольном резании ( $\lambda = 0$ ) передний и задний углы в процессе резания принято измерять в плоскости, перпендикулярной режущей кромке. В этом случае эта плоскость проходит через вектор скорости перпендикулярно поверхности резания и соответствует направлению движения стружки по передней поверхности.

При косоугольном резании ( $\lambda \neq 0$ ) передний и задний углы могут измеряться в двух сечениях.

Различают фактический передний угол  $\gamma_{\phi}$ , измеряемый в сечении перпендикулярном оси вращения фрезы, и нормальный передний угол  $\gamma_n$ , измеряемый в сечении нормали к направлению главной режущей кромки. С увеличением угла наклона режущей пластины  $\lambda$  разница между фактическим передним углом  $\gamma_{\phi}$  и передним углом в нормальном сечении  $\gamma_n$  резко возрастает [3].

Ведущие специалисты в области резания металлов считают, что определение передних и задних углов в одной секущей плоскости создает определенные практические преимущества, но с научной точки зрения представляется необоснованным. Изменение системы обозначения геометрических параметров фрезы ненамного упрощает технологию ее производства. Тем не менее, наиболее логичной системой обозначения с точки зрения механики резания является система, основанная на рассмотрении переднего угла резания в нормальной плоскости. Это позволяет провести анализ поперечного сечения режущей пластины при проектировании режущего инструмента и, в случае необходимости, увеличить геометрические параметры с целью предотвращения поломки и выхода инструмента из строя.

Считается, что задний угол следует измерять в поверхности движения или плоскости касательной к ней. Это позволяет определить траектории относительных перемещений всех или части точек задней поверхности и проанализировать возможность совершать инструментом беспрепятственное рабочее движение.

Изменение величин переднего и заднего углов в фактическом и нормальном сечении представлено на рис. 6.

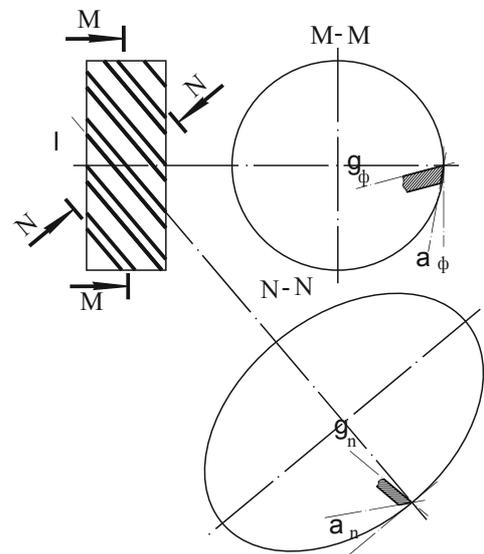


Рис. 6. Передний и задний углы в фактическом и нормальном сечениях

Определение величины переднего угла в нормальном сечении можно вычислить по формуле:

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_{\phi} \cos \lambda. \quad (6)$$

При обработке фрезами с наклонной режущей кромкой, при значении переднего угла  $\gamma = 0$  в нормальной плоскости, врезание в материал заготовки происходит с отрицательным значением фактического переднего угла режущей пластины. А выход режущей пластины из заготовки происходит с положительным значением фактического переднего угла при том, что сами величины углов одинаковы и зависят от величины угла наклона режущей пластины  $\lambda$  и ширины профиля фрезы. Чем больше величина угла наклона режущей пластины  $\lambda$  и ширина профиля фрезы, тем больше и изменение переднего угла при резании с двумя значениями – от отрицательного до положительного.

На рис. 7 представлена схема изменения величины переднего и заднего углов в процессе обработки.

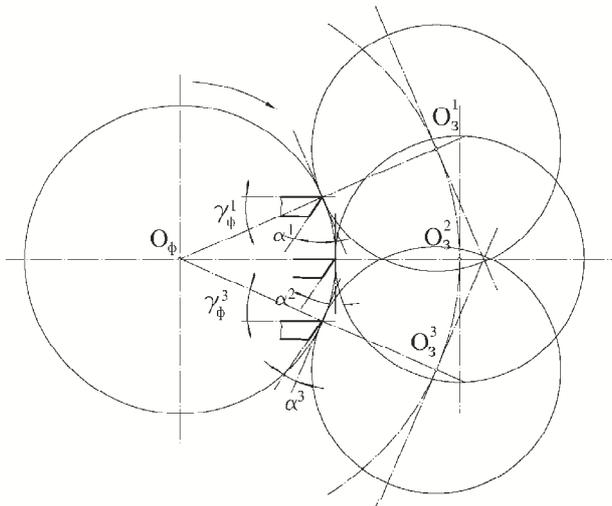


Рис. 7. Схема изменения переднего и заднего углов при фрезоточении

Для снижения значения заднего угла в целях предотвращения ослабления режущей кромки пластины и ее возможной поломки, необходимо задать отрицательный передний угол, что позволит уменьшить задний угол и тем самым увеличить прочность режущей пластины. Необходимо учесть, что при изменении величины переднего угла изменится и радиус кривизны режущей кромки режущей пластины.

Для расчета величины заднего угла режущей пластины  $\alpha$ , необходимо определить величину переднего угла режущей пластины  $\gamma_\phi$  в фактической плоскости. Поэтому, после предварительного расчета радиуса кривизны, при известных величинах: диаметра фрезы  $D$ , ее ширины  $l$  и угла наклона режущих пластин

$\lambda$ , следует рассчитать размер режущей пластины по величине хорды сегмента  $h$  в фактической плоскости фрезы и найти величину переднего угла.

На рис. 8 представлена схема построения и расчетов величины переднего угла  $\gamma_\phi$ . Величину хорды сегмента ( $AB$ ) можно вычислить по формуле

$$h = \text{tg}(\lambda) \cdot l \quad (7)$$

где  $l$  – ширина фрезы;  $\lambda$  – угол наклона режущей пластины.

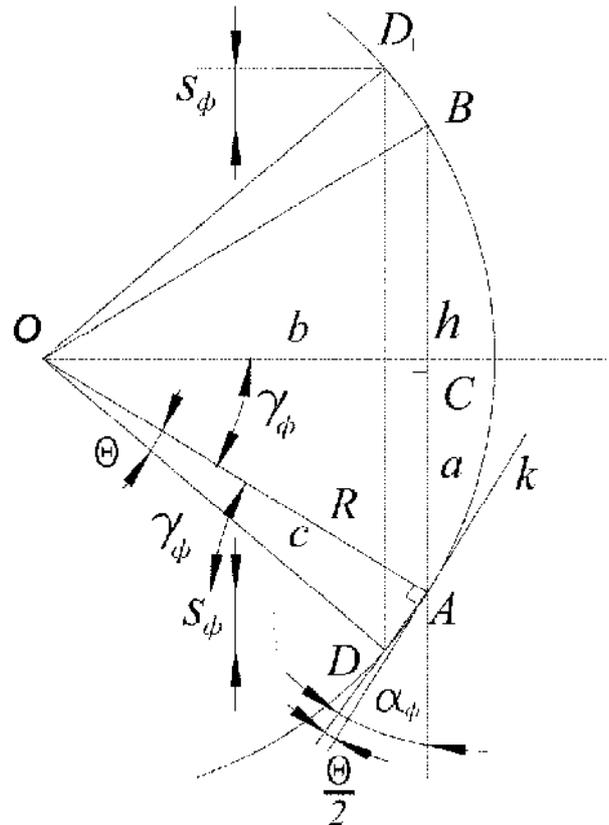


Рис. 8. Схема расчета углов в фактической плоскости

Так как передний угол режущей пластины  $\gamma_\phi$  является противолежащим углом  $AOC$ , то они равны по величине. Для определения величины угла  $AOC$  воспользуемся «теоремой синусов», в частности ее расширенным вариантом:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma} = 2R, \quad (8)$$

где  $a, b, c$  – стороны треугольника;  $\sin \alpha, \sin \beta, \sin \gamma$  – противолежащие им углы соответственно;  $R$  – радиус описанной окружности.

Тогда величина угла  $AOB$  будет равна:

$$AOB = 2 \arcsin \frac{h}{2R} \quad (9)$$

При проектировании режущего инструмента с большими значениями угла наклона  $\lambda$  режущей пластины, формула вычисления величины переднего угла  $\gamma_\phi$  в проекции фактической плоскости после подстановки значений будет иметь вид:

$$\gamma_\phi = \arcsin \frac{(\operatorname{tg}(\lambda) \cdot l) / 2}{R}. \quad (10)$$

По теореме «Об угле между касательной и хордой» угол измеряется половиной заключенной внутри этого угла дуги. Поэтому на величину заднего фактического угла будет влиять не только угол наклона, но и толщина режущей пластины в фактической плоскости. В связи с этим задний угол не может быть спроектирован меньше, чем сумма величин углов  $AOC$  и половина угла  $AOD$  ( $\theta$ ):

$$\alpha_\phi = \gamma_\phi + \frac{\theta}{2}. \quad (11)$$

Для вычисления значения угла ( $AOD$ )  $\theta$ , необходимо рассчитать толщину режущей пластины в фактической плоскости, при известной величине толщины режущей пластины  $s$  в нормальной плоскости, по формуле

$$s_\phi = \frac{s}{\cos \lambda}. \quad (12)$$

Значения угла  $\theta$  можно вычислить путем вычитания значения угла  $AOC$  из величины угла  $DOC$ , значение которого равно половине значения угла  $DOD_1$ . Чтобы получить значение угла  $DOD_1$ , применив формулу «теоремы синусов», нужно узнать величину хорды  $DD_1$ , которая равна сумме значений: величине хорды  $AB(h)$  и двойному значению толщины режущей пластины в фактической плоскости  $s_\phi$ :

$$DD_1 = \operatorname{tg}(\lambda) \cdot l + \frac{2s}{\cos \lambda}. \quad (13)$$

При полученном значении величины  $DD_1$  можно рассчитать значение угла  $DOD_1$  по формуле:

$$DOD_1 = 2 \arcsin \frac{h + 2s_\phi}{2R}. \quad (14)$$

Разница величин углов  $DOC$  и  $AOC$  будет равна величине угла  $\theta$ :

$$\theta = \arcsin \frac{(\operatorname{tg}(\lambda) \cdot l) / 2 + s_\phi}{R} - \arcsin \frac{(\operatorname{tg}(\lambda) \cdot l) / 2}{R}. \quad (15)$$

После подстановки значений в формулу (11) величину заднего угла можно вычислить по формуле:

$$\alpha_\phi = \arcsin \frac{(\operatorname{tg}(\lambda) \cdot l) / 2}{R} + \frac{\theta}{2}. \quad (16)$$

Таким образом, видно, что с увеличением угла наклона режущей кромки, увеличиваются и значения переднего и заднего углов. Это приводит к снижению значения угла заострения и снижению прочности режущей пластины в целом.

На основании изученных материалов и выведенных формул расчета геометрических параметров режущего инструмента была спроектирована дисковая фреза с наклонной режущей кромкой для обработки наружных поверхностей тел вращения. Данный расчет был проверен при 3D проектировании в программе Solid Works. Были спроектированы дисковые и цилиндрические фрезы, разного диаметра с разными значениями угла наклона режущей пластины. Расчетные данные полностью совпали с моделируемыми на данном участке диска.

### Заключение

Доказано, что при установке режущих пластин под некоторым углом  $\lambda$  к оси вращения фрезы, форма главной режущей кромки меняется на криволинейную. Это объясняется тем, что при фрезоточении все точки главной режущей кромки должны быть равноудалены от оси вращения инструмента и равны радиусу фрезы. При увеличении угла наклона режущей пластины с прямолинейной режущей кромкой это условие не соблюдается. С увеличением угла наклона режущей пластины, радиус кривизны главной режущей кромки пластины уменьшается.

Предложенный метод позволяет рассчитывать радиус кривизны режущей кромки, расположенной под различными значениями угла наклона к оси вращения инструмента, предназначенного для обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей методом фрезоточения.

С увеличением угла наклона режущей пластины возрастает осевая сила резания, которая в зависимости от правого или левого направления наклона может действовать по направлению к шпинделю или от шпинделя. Однако осевую силу можно компенсировать установкой двух дисковых фрез с одинаковыми зна-

чениями углов с правым и левым направлением наклона режущих пластин.

Также при моделировании было установлено, что для получения качественной поверхности с минимальными отклонениями по форме необходимо проводить обработку данной фрезой в три этапа (черновая, получистовая и чистовая) путем снижения скорости вращения фрезы. Причем последний чистовой этап проводить на минимальных скоростях вращения фрезы одной режущей пластиной, что позволяет полностью снять огранку с обрабатываемой детали.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов, М.Ю., Волков, Д.В., Скляр, В.М. Разработка рациональной формы режущей кромки инстру-

мента для фрезоточения // *Металлообработка*. – 2018. – № 3(105). – С. 9-12.

2. Грановский, Г.И., Грановский, В.Г. Резание металлов. – М.: Высш. шк. 1985. – 304 с.

3. Аршинов, В.А., Алексеев, Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. – М.: Машиностроение, 1975. – 440 с.

### REFERENCES

1. Kulikov, M.Yu., Volkov, D.V., Sklyarov, V.M. Development of tool tip efficient shape for milling // *Metal Processing*. – 2018. – No.3(105). – pp. 9-12.

2. Granovsky, G.I., Granovsky V.G. *Metal Cutting*. – M.: Higher School. 1985. – pp. 304.

3. Arshinov, V.A., Alexeev, G.A. *Metal Cutting and Cutter*. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 440.

*Рецензент д.т.н. Ф.С. Сабиров*

УДК 621.7.02

DOI: 10.30987/article\_5bf7a56d3dab40.87032409

**А.А. Кульков**, к.т.н.

(ФГБОУ ВО Российский университет транспорта (МИИТ),  
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9)

**М.А. Ларионов**, к.т.н.

(Институт конструкторско-технологической информатики РАН,  
127055, г. Москва, Вадковский пер. 18, стр. 1а)

E-mail: pioneer\_maxim@mail.ru

## Особенности абразивно-струйной обработки металлических поверхностей перед окрашиванием

*Приведены результаты исследования процесса обработки металлических поверхностей перед промышленной окраской или нанесением защитных покрытий. Предокрасочная обработка определяет качество нанесенного покрытия, его адгезию с основным металлом, равномерность и прочность. Подробно рассмотрены процессы формообразования шероховатости поверхности в зависимости от режимов обработки и свойств применяемого абразива.*

**Ключевые слова:** обработка свободным абразивом; шероховатость; адгезия; защитные покрытия.

**A.A. Kul'kov**, Can. Sc. Tech.,

(FSBEI HE Russian University of Transport (MITE),  
Building 9, 9, Obraztsov Str., Moscow 127994)

**M.A. Larionov**, Can. Sc. Tech.

(Institute of Design Technological Informatics of RAS, Building 1a, 18. Vadkovsky Alleyway, Moscow 127055)

## Peculiarities of metal surface abrasive jet processing before coloring

*The investigation results of metal surface processing before industrial painting or protective coat application are shown. A pre-coloring processing defines quality of the coating applied, its adhesion with basic metal, uniformity and strength. The processes of surface roughness formation depending on processing modes and properties of the abrasive used are considered thoroughly.*

**Keywords:** processing with free abrasive; roughness; adhesion; protective coats.