

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article\_5bf3cb4d677621.74489692

М.Ю. Куликов, Д.В. Волков

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ ФРЕЗОТОЧЕНИЯ

Рассмотрено определение формы наклонной режущей кромки инструмента для обработки наружных поверхностей тел вращения методом фрезоточения. Показано преимущество этого метода обработки. Представлены формулы для расчета радиуса кривизны режущей кромки инструмента,

используемого при фрезоточении, а также для расчета переднего и заднего углов в фактической плоскости.

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

M.Yu. Kulikov, D.V. Volkov

## TOOL DESIGN PECULIARITIES FOR MILLING

The paper reports the theoretical analysis of circuits for milling the cylindrical surfaces of solids of rotation. The advantages of a milling cutter with cutter plates located at an angle in comparison with straight-flute milling cutters are shown. Formulae for the computation of the radius of a tool tip curvature and actual face and back angles for efficient shaping at milling are substantiated.

The theoretical investigations and computer simulation carried out have shown a possibility to use a

developed method for the computation of a cutter operation part.

The design data coincide completely with the modeled ones. The method offered allows calculating a radius of a tool tip curvature located at different inclination angles to the rotational axis of a tool intended for machining inner and outer cylindrical surfaces by milling.

**Key words:** metal cutting, cutter, tool tip, milling.

В настоящее время при механической обработке используется метод фрезоточения. При наличии ряда важных преимуществ его широкому распространению препятствует отсутствие апробированных методов проектирования инструмента для данного метода резания, так как в обработке металлов резанием важную роль играет инструмент. 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 [1].

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, производительности и формообразованию поверхности [2].

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

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 тра-

диционном 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 холодного 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 [3].

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 мало изучен 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 улучшению чистоты обрабатываемой 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, особенно 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 [1].

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 фрезоточением 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.

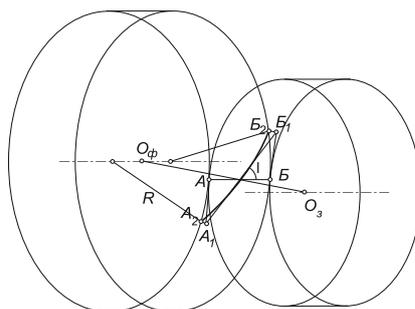


Рис. 1. Схема профиля главной режущей кромки

При повороте отрезка  $AB$  на некоторый угол  $\lambda$  точки  $A$  и  $B$  проецируются соответственно на точки  $A_1$  и  $B_1$ , которые не принадлежат цилиндрической поверхности диска. Следовательно, только одна точка середины отрезка  $AB$  будет удалена от оси вращения на величину радиуса. При проекции отрезка  $A_1B_1$  на цилиндрическую поверхность диска получается криволинейный элемент  $A_2B_2$ , у которого все точки равноудалены от оси вращения диска.

Также известно, что существует три случая сечения поверхности цилиндра

(диска) проецирующей 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.

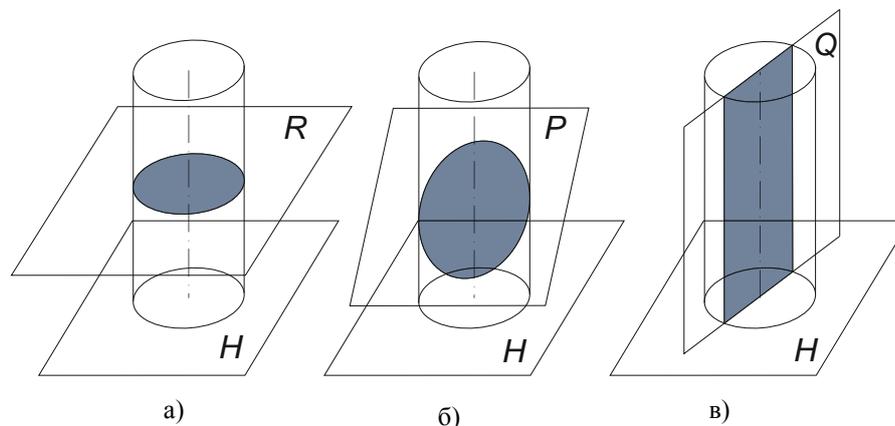


Рис. 2. Случаи сечения поверхности цилиндра плоскостью:  
а - окружность; б - эллипс; в - прямоугольник

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

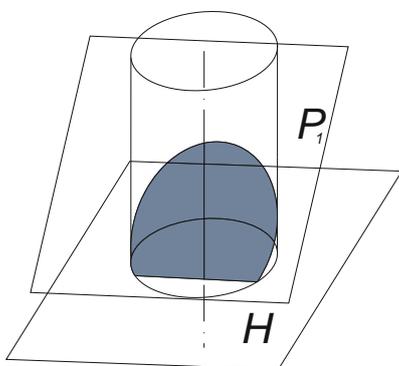


Рис. 3. Пересечение торцевой поверхности

Нужно знать, что ни парабола, ни гипербола не могут быть получены как сечение поверхности кругового цилиндра плоскостью.

Установлено, что для осуществления эффективного формообразования при фрезеровании главная режущая кромка режущей 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 использовались аналитическая геометрия и материалы проф. С.С. Четверикова [4].

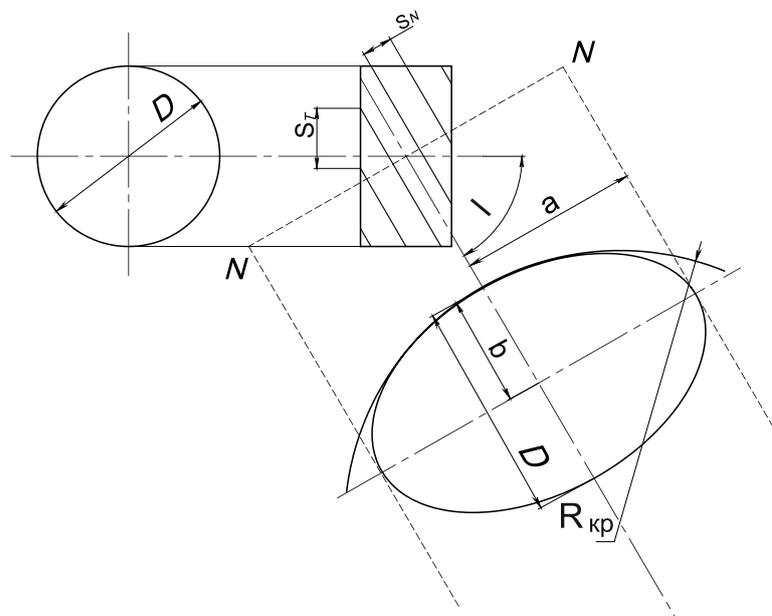


Рис. 4. Расчет радиуса кривизны эллипса

На рис. 4 видно, что радиус кривизны главной режущей кромки режущей пластины равен радиусу кривизны эллипса (показан в сечении нормали (плоскость NN) к плоскости режущей пластины). Поэтому для расчета радиуса в плоскости режущей пластины будем записывать угол наклона кромки режущей пластины  $\lambda$  как  $90^\circ - \lambda$ .

Известно, что радиус кривизны эллипса

$$R_i = \frac{a^2}{b}$$

Здесь  $a$  - большая полуось эллипса, которая рассчитывается как угол между большой осью эллипса и направлением диаметра:

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

где  $D$  - диаметр фрезы.

$b$  - малая полуось эллипса - остается без изменений:

$$b = \frac{D}{2}$$

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

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

После преобразований получаем окончательное уравнение:

$$R_i = \frac{D}{2 \cos^2(90 - \lambda)} \tag{1}$$

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

$$R_i = \frac{D}{2 \sin^2 \lambda} \tag{2}$$

также тождественно верно. Расчет радиуса кривизны главной режущей кромки можно производить по одному из уравнений (1) или (2).

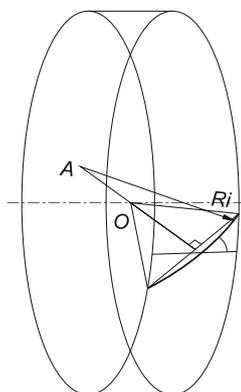


Рис. 5. Схема проектирования

На рис. 5 показана схема проектирования рабочей части инструмента.

То, что центр радиуса кривизны сегмента находится на перпендикуляре хорды сегмента, совпадающем с биссектрисой угла сегмента, проходящем 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  $\gamma_f$ , измеряемый в сечении, перпендикулярном оси вращения фрезы, и нормальный передний угол  $\gamma_n$ , измеряемый в сечении нормали к направлению главной режущей кромки. В своих исследованиях Н.А. Розно [5] указал как один из основных факторов повышения стойкости фрез с возрастанием угла наклона режущих пластин фрезы увеличение фактического переднего угла в процессе резания. С увеличением угла наклона режущей пластины  $\lambda$  разница между фактическим передним углом  $\gamma_f$  и передним углом в нормальном сечении  $\gamma_n$  резко возрастает [7].

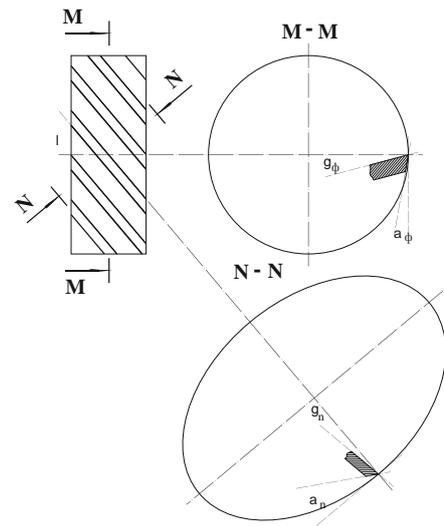


Рис. 6. Передний и задний углы в фактическом и нормальном сечениях

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 [6]. 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 на поверхности движения или плоскости, касательной к ней. Это позволяет определить траектории относительных перемещений всех или части точек задней поверхности и проанализировать возможность совершения инструментом беспрепятственного рабочего движения.

Изменение величины переднего и заднего углов в фактическом и нормальном сечениях представлено на рис. 6.

Величину переднего угла в нормальном сечении можно вычислить по формуле

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_\Phi \cos \lambda.$$

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. Причем 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 величина переднего угла с двумя значениями - от отрицательного до положительного.

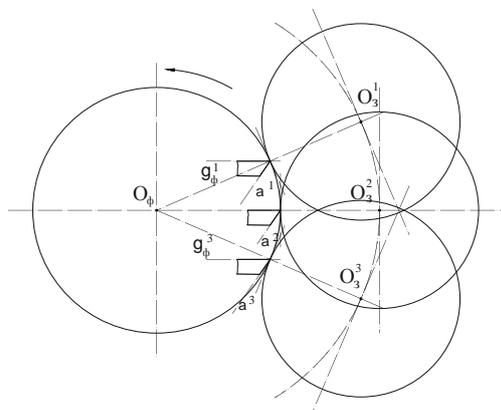


Рис. 7. Схема фактических переднего и заднего углов

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

Для снижения значения заднего угла, в целях предотвращения ослабления режущей кромки режущей пластины и ее возможной поломки, необходимо задать отрицательный передний угол. Это 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 значениях 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 расчета величины переднего угла  $\gamma_\Phi$ . Величину хорды сегмента ( $AB$ ) можно вычислить по формуле

$$h = \tan(\lambda) l, \quad (3)$$

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

Так как передний угол режущей пластины  $\gamma_\Phi$  является противолежащим углом  $AOC$ , то они равны по величине. Для определения величины угла  $AOC$  воспользуемся теоремой косинусов, частным случаем которой является теорема Пифагора:

$$\gamma_\Phi = \arccos \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc},$$

где  $a$  - величина, равная половине хорды  $h$ ,  $c$  является радиусом фрезы  $R$ , а  $b$  вычисляется по теореме Пифагора и имеет вид

$$b = \sqrt{R^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2}.$$

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

$$\gamma_\Phi = \arccos \frac{\sqrt{R^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2} + R^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2}{2\sqrt{R^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2} R}.$$

Согласно 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 меньше, чем сумма величин угла  $AOC$  и половины угла  $AOD$  ( $\theta$ ):

$$\alpha_\Phi = \gamma_\Phi + \frac{\theta}{2}. \quad (4)$$

Для вычисления значения угла  $AOD$  ( $\theta$ ) необходимо рассчитать толщину режущей пластины в фактической плоско-

сти, при известной толщине режущей пластины в нормальной плоскости, по формуле

$$S_{\phi} = \frac{s}{\cos \lambda}.$$

После подстановки значений в формулу (4) величину заднего угла можно вычислить по формуле

$$\alpha_{\phi} = \left( \arccos \frac{\left( \sqrt{R^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2} + R^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2 \right)}{2 \sqrt{R^2 - \left(\frac{h}{2}\right)^2} R} \right) + \frac{\theta}{2}.$$

Из формулы (3) видно, что с увеличением угла наклона режущей кромки увеличивается длина хорды  $AB$  (рис. 8), а значит, увеличиваются и значения переднего и заднего углов. Это приводит к снижению значения угла заострения и снижению прочности режущей пластины в целом.

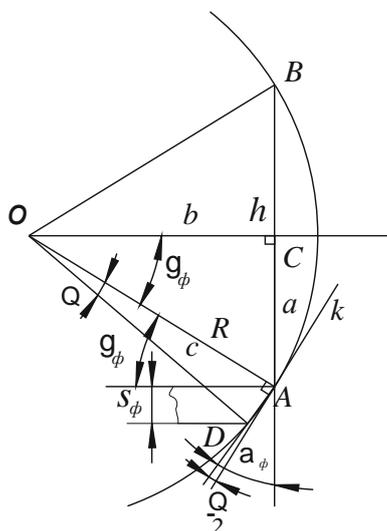


Рис. 8. Схема расчета величины переднего и заднего углов

На основании изученных материалов [5] была спроектирована дисковая фреза с наклонной режущей кромкой для обработки наружных поверхностей тел вращения. Данный расчет был проверен при 3D-проектировании в программе SolidWorks. 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.

Установлено, 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 на величину радиуса 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 режущей пластины уменьшается.

Предложенный метод позволяет рассчитывать радиус кривизны режущей кромки, расположенной под различными углами 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 значениями 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. При этом последний, чистовой этап следует проводить на минимальных скоростях вращения фрезы одной режущей пластиной, что позволяет полностью снять огранку с обрабатываемой детали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенченко, И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / И.И. Семенченко, В.М.

Матюшин, Г.Н. Сахаров. - М.: Машгиз, 1963. - 952 с.

2. Куликов, М.Ю. Разработка рациональной формы режущей кромки инструмента для фрезоточения / М.Ю. Куликов, Д.В. Волков, В.М. Скляр // *Металлообработка*. - 2018. - № 3 (105). - С. 9-12.
3. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. - М.: Высш. шк., 1985. - 304 с.
4. Четвериков, С.С. Металлорежущие инструменты / С.С. Четвериков. - М.: Машгиз, 1941. - 515 с.

1. Semenchenko, I.I. *Metal-Cutting Tool Design* / I.I. Semenchenko, V.M. Matyushin, G.N. Sakharov. - M.: Machgiz, 1963. - pp. 952.
2. Kulikov, M.Yu. Efficient form development of tool tip for milling / M.Yu. Kulikov, D.V. Volkov, V.M. Sklyarov // *Metal Machining*. - 2018. - No. 3(105). - pp. 9-12.
3. Granovsky, G.I. *Metal Cutting* / G.I. Granovsky, V.G. Granovsky. - M.: Higher School, 1985. - pp. 304.

5. Этин, А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием / А.О. Этин. - М.: Машиностроение, 1964. - 326 с.
6. Армарево, И.Дж.А. Обработка металлов резанием / И.Дж.А. Армарево, Р.Х. Браун; пер. с англ. В.А. Пастунова. - М.: Машиностроение, 1977. - 325 с.
7. Шевченко, Н.А. Геометрические параметры режущей кромки инструментов и сечения среза / Н.А. Шевченко. - М.: Машгиз, 1957. - 139 с.

4. Chetverikov, S.S. *Metal-Cutting Tools* / S.S. Chetverikov. - M.: Machgiz, 1941. - pp. 515.
5. Etin, A.O. *Kinematic Analysis of Methods for Metal Cutting* / A.O. Etin. - M.: Mechanical Engineering, 1964. - pp. 326.
6. Armarego, I.J. *Metal Cutting* / I.J. Armarego, R.H. Brown; transl. from Engl. by V.A. Pastunov. - M.: Mechanical Engineering, 1977. - pp. 325.
7. Shevchenko, N.A. *Geometrical Parameters of Tool Tip and Cut Section* / N.A. Shevchenko. - M.: Machgiz, 1957. - pp. 139.

Статья поступила в редакцию 04.09.18.

Рецензент: д.т.н., профессор «МГТУ «СТАНКИН»

Сабиров Ф.С.

Статья принята к публикации 10.10.18.

#### Сведения об авторах:

**Куликов Михаил Юрьевич**, д.т.н., профессор Института конструкторско-технологической информатики РАН, зав. кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта (МИИТ), тел. 8-964-578-56-89, e-mail–[muk.56@mail.ru](mailto:muk.56@mail.ru).

**Kulikov Mikhail Yurievich**, Dr. Sc. Tech., Prof., Institute of Design-Technological Informatics of RAS, Head of the Dep. “Transport Engineering Technique and Rolling-Stock Repair”, Russian University of Transport (MIET), e-mail–[muk.56@mail.ru](mailto:muk.56@mail.ru).

**Волков Дмитрий Валентинович**, зав. лабораторией кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта (МИИТ), тел. 8-903-121-63-44, e-mail–[dvvolkov@list.ru](mailto:dvvolkov@list.ru).

**Volkov Dmitry Valentinovich**, Head of the Lab. of the Dep. “Transport Engineering Technique and Rolling-Stock Repair”, Russian University of Transport (MIET), e-mail–[dvvolkov@list.ru](mailto:dvvolkov@list.ru).