

УДК 621.9.02

Солодкий В.И. к.т.н., доц.

НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ДЛЯ ФАСОННЫХ ФРЕЗ С НАКЛОННЫМ ЗУБОМ

Solodkiy V.

The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (solodkiyvi@bigmir.net)

PROFILING OF POLISHING CIRCLES FOR THE SHAPED CUTTERS WITH A SLOPING TOOTH

Рассмотрены особенности профилирования абразивных шлифовальных кругов для формообразования задней поверхности дисковых фасонных фрез с наклонным зубом. Получены математические зависимости, которые описывают положение режущей кромки в пространстве для фрез, которые одновременно имеют как положительный передний угол, так и наклонную стружечную канавку. Рассмотрен общий аналитический метод определения профиля шлифовального круга, который образует задние фасонные поверхности фрезы. Предложены два способа численного определения координат его радиального сечения. Способ определения искоемых координат методом последовательного сравнения расчетных параметров, а также способ непосредственного расчета координат, основанный на методе Ньютона, который применяют при решении трансцендентных уравнений. Выведены математические зависимости для замены кривой частью окружности.

Ключевые слова: профилирование, затылование, фрезы.

Вступление

Дисковые затылованные фрезы широко применяют для образования фасонных цилиндрических поверхностей. Затылованные фрезы имеют сложную форму задней поверхности зуба и плоскую переднюю поверхность. Перетачивают такие фрезы только по передней плоской поверхности. Это значительно упрощает восстановление их работоспособности.

Профиль осевого профиля абразивного круга, который образует заднюю фасонную поверхность зуба фрезы, зависит не только от ее профиля, но и от габаритных размеров, как фрезы, так и абразивного круга которым осуществляется затылование [1], что значительно усложняет процесс профилирования.

Существует несколько методик [2-6] расчета профиля абразивного затыловочного круга. Но эти методики ориентированы для фрез, которые имеют стружечные канавки параллельные оси вращения фрезы. Однако в последнее время приобрели распространения дисковые фасонные фрезы с наклонной стружечной канавкой как более производительные. Для фрез такой конструкции характерным является плавное изменение усилий резания в процессе их работы, а так же меньшая шероховатость обработанной поверхности. Все это способствует их широкому распространению в промышленности.

Целью данной работы является разработка методики профилирования абразивных кругов для затылования дисковых фасонных фрез, которые имеют положительный передний угол и наклонную стружечную канавку. А так же замена полученного криволинейного профиля более технологичным, который состоит из дуг окружностей.

Фрезы с наклонным зубом

Определим в пространстве проекции режущей кромки дисковой фасонной фрезы, которая имеет не равный нулю угол λ наклона стружечной канавки и положительный передний угол γ (рис. 1.). На координатной плоскости YZ изображен известный профиль детали D как общая кривая. Точка R_B это вершинная точка профиля детали, она расположена на наибольшем расстоянии r_B от оси O_Φ инструмента. Ось Y проходит через вершинную точку R_B . Положение произвольной точки M_d профиля детали определено расстоянием T_d от вершинной точки R_B и расстоянием l вдоль оси фрезы. Параметр T_d может быть только положительным. Параметр l может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Точка M_l это проекция точки M_d на координатную плоскость XY . Точка M_K это точка режущей кромки, которая образует (обрабатывает) точку M_d профиля детали. Последовательность точек $M_2 \Rightarrow M_3 \Rightarrow M_4$ определяет последовательность нахождения формообразующей точки M_K режущей кромки инструмента. Положение точки M_K определяется расстоянием (радиусом) ρ от оси вращения инструмента и суммой отрезков m и n относительно вдоль оси X .

Радиус ρ расчетной точки M_K профиля режущей кромки и параметры m и n можно определить как

$$\rho = r_b - T_d, \quad m = T_\phi \sin \gamma, \quad n = l \cdot \operatorname{tg} \lambda, \quad T_\phi = r_b \cos \gamma - \sqrt{\rho^2 - a^2}, \quad a = r_b \sin \gamma.$$

Где: γ - передний угол фрезы в вершинной точке R_B измеренный в координатной плоскости YX , которая перпендикулярна к оси вращения инструмента; l - расстояние расчетной точки M_d профиля детали относительно оси Z взятое с соответствующим знаком; λ - угол наклона стружечной канавки фрезы.

Тогда полярный угол τ возможно определить как

$$\sin \tau = \frac{m+n}{\rho} = \frac{T_\phi \sin \gamma + l \operatorname{tg} \lambda}{\rho}.$$

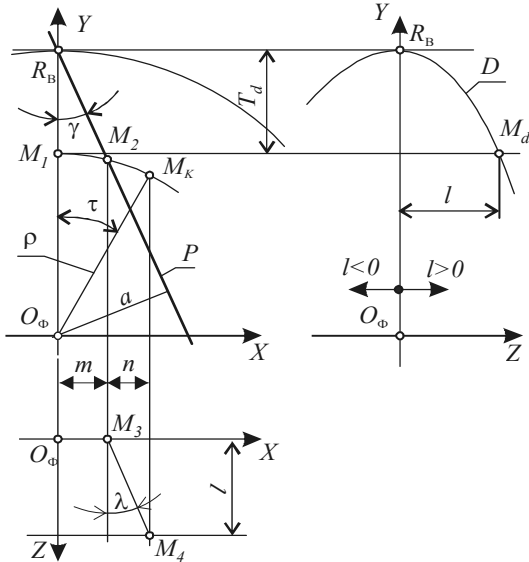


Рис. 1. Профилирование фрез с наклонными канавками

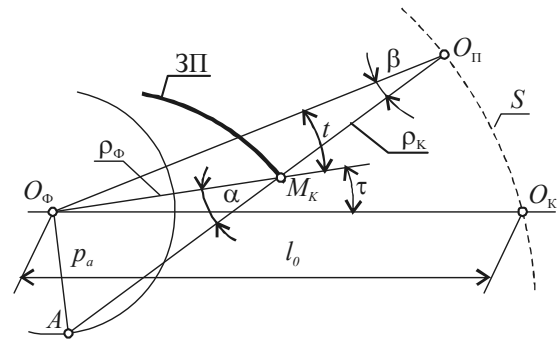


Рис. 2. Профилирование затыловочного инструмента

Следовательно, положение произвольной расчетной точки M_k принадлежащей режущей кромке фрезы, которая имеет положительный передний угол и наклонную стружечную канавку, можно определить в координатной плоскости XY параметрами ρ и τ . Положение точки вдоль оси инструмента определено отрезком l , который может иметь как положительные, так и отрицательные значения.

Профилирование затыловочного круга

На рис. 2 изображена кинематическая схема формообразования задней поверхности фасонного зуба фрезы фасонным абразивным кругом. Затылование осуществляется по спирали Архимеда. В начальный момент профилирования центры O_ϕ фрезы и O_k круга занимают положения обозначенные на рисунке. Расстояние l_0 между ними равняется $l_0 = r_b + r_k$. Где r_b - радиус фрезы в ее вершинной точке (габаритный радиус фрезы); r_k - расчетный габаритный радиус затыловочного круга. Радиус затыловочного круга принимают в зависимости от количества зубьев Z_ϕ фрезы и величины ее затылования K по зависимости

$$r_k = (8 \dots 14) \frac{KZ_\phi}{2\pi} - r_\phi.$$

Найденный радиус r_k затыловочного круга необходимо проверить на подрезание соседнего зуба фрезы. Суть проверки состоит в том, что абразивный круг в момент задней поверхности зуба фрезы не должен касаться режущей кромки соседнего зуба. Наиболее просто выполнить эту проверку прочертив взаимное положение круга и фрезы в конечный момент затылования и принять $r_k = 0,75r_k$.

В процессе затылования центр затыловочного круга описывает спираль Архимеда S вокруг оси O_ϕ фрезы. Положение расчетной точки M_k режущей кромки фрезы определяется параметрами τ и ρ рассчитанными выше. Задний угол α в расчетной точке равен $\operatorname{tg} \alpha = \frac{KZ_\phi}{2\pi\rho_\phi}$. Точка A лежит находится на расстоянии $p_a = \frac{KZ_\phi}{2\pi}$ от центра O_ϕ фрезы.

Расположение графических элементов, показанное на рис. 2 соответствует моменту образования задней поверхности зуба в расчетной точке M_k режущей кромки фрезы. Положение точки M_k определено углом τ и радиусом ρ . Кривая ЗП это линия задней поверхности зуба фрезы, которая проходит через расчетную точку M_k . Прямая $M_k A$ проходит под углом α к радиусу ρ и ориентирована ортогонально к задней затылованной поверхности зуба фрезы. Ее продолжение до пересечения с Архимедовой траекторией S образует точку O_π которая совпадает с центром затыловочного круга в момент профилирования (формообразования) задней

поверхности зуба фрезы. Следовательно, отрезок $M_K O_{\Pi}$ равен радиусу ρ_K затыловочного круга в момент образования задней поверхности зуба фрезы в расчетной точке M_K режущей кромки фрезы.

Для того чтобы определить величину радиуса ρ_K затыловочного круга применим теорему синусов. Из треугольника $M_K A O_{\Phi}$ получим для фрезы

$$\frac{\rho_K}{\sin t} = \frac{l_0 - p_a(t + \tau)}{\sin(\pi - \alpha)}.$$

Из треугольника $O_{\Phi} M_K O_{\Pi}$ получаем для затыловочного круга

$$\frac{\rho_{\Phi}}{\sin(\pi - t - (\pi - \alpha))} = \frac{l_0 - p_a(t + \tau)}{\sin(\pi - \alpha)}.$$

Параметр t это переменный параметр, который определяет положение центра O_{Π} затыловочного круга в момент профилирования (формообразования) расчетной точки M_K режущей кромки фрезы.

Полученные зависимости можно переписать в таком виде

$$\rho_K = \frac{(l_0 - p_a(t + \tau)) \sin t}{\sin(\pi - \alpha)}, \quad \rho_{\Phi} = \frac{(l_0 - p_a(t + \tau)) \sin(\alpha - t)}{\sin(\pi - \alpha)}.$$

Последующее определение величины радиуса ρ_{Φ} затыловочного круга для расчетной точки M_K профиля фрезы можно выполнить двумя способами.

Первый способ. Определение радиуса ρ_K круга для каждой расчетной точки $M_K(\rho; \tau)$ профиля режущей кромки фрезы осуществляется в такой последовательности:

- для расчетной точки $M_K(\rho; \tau)$ профиля задать ряд последовательный значений параметра t и рассчитать ряд значений параметров ρ_{Φ} и ρ_K ;
- для принятого значения ρ из рассчитанного ранее ряда значений ρ_{Φ} выбрать ближайшее рассчитанное значение ρ_{Φ} . Соответствующее ему значение параметра ρ_K и будет искомым радиусом затыловочного круга, который образует точку фрезы с радиусом ρ_{Φ} (именно с радиусом ρ_{Φ} , а не ρ).

При выполнении расчетов необходимо учитывать, что параметр ρ это полярный радиус расчетной точки режущей кромки, а параметр ρ_{Φ} это величина рассчитанная приведенной выше по формуле. Далее необходимо выполнить несколько уточнений параметра t таким образом, чтобы разница $|\rho_{\Phi} - \rho|$ была минимальной по модулю. Для этого необходимо принять новый (более мелкий) ряд значений параметру t и повторить расчеты найдя новое, ближайшее к ρ значение ρ_{Φ} и так далее.

Преимуществом этого способа является возможность предварительного построения общей таблицы значений ρ_{Φ} и ρ_K в определенном диапазоне их значений, с последующим использованием готовых результатов расчетов. Недостатком способа является значительный объем расчетов.

Второй способ. Итерационный метод Ньютона позволяет значительно упростить процесс поиска радиуса ρ_{Φ} затыловочного круга. В соответствии с методом Ньютона, если x_i является приближенным значением корня уравнения $f(x) = 0$ то ближайшее, более точное приближение, рассчитывают как

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x)}{f'(x)}.$$

Перепишем ранее найденное выражение для ρ_K в виде

$$f(t) = \frac{(l_0 - p_a(t + \tau)) \sin t}{\sin(\pi - \alpha)} - \rho_K.$$

Первая производная от $f(t)$ по параметру t будет

$$f'(t) = \frac{\partial f(t)}{\partial t} = (l_0 - p_a(t + \tau)) \cos t \csc \alpha - p_a \csc \alpha \sin t.$$

Тогда математическое выражение метода Ньютона примет вид

$$t_{i+1} = t_i - \frac{f(t)}{f'(t)} = t_i - \frac{-\rho_{\Phi} + (l_0 - p_a(t_i + \tau)) \csc \alpha \sin t_0}{(l_0 - p_a(t_i + \tau)) \cos t_i \csc \alpha - p_a \csc \alpha \sin t_i}.$$

После превращений и упрощений получим

$$t_{i+1} = t_i + \frac{(-l_0 + p_a(t_i + \tau)) \sin t_i + \rho_{\Phi} \sin \alpha}{(l_0 - p_a(t_i + \tau)) \cos t_i - p_a \sin t_i}.$$

При применении метода Ньютона последовательность определения радиуса ρ_K затыловочного круга в расчетной точке M_K режущей кромки такая:

- принимаем за первое приближение $t_0 = 0$ и выполняем итерационный поиск до тех пор, пока значения искомого параметра t не будут удовлетворять условию $|t_{i+1} - t_i| \leq \Delta$. Где Δ заданная величина погрешности вычислений;

– полученное значение t подставить в выражения для ρ_{Φ} и ρ_K и рассчитать их значение.

Расчет значения ρ_K это контрольная проверка итерационного процесса, получено значение ρ_K должно совпадать со значением параметра ρ для данной расчетной точки M_K режущей кромки.

Замена дуги частью окружности

В большинстве случаев осевой профиль абразивного затыловочного круга состоит из ряда плоских дуг переменной кривизны. Для того, что бы упростить технологический процесс правки абразивного круга участка его профиля, очерченные кривыми, заменяют частью окружности. Проведем заменяющую окружность таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений расчетных точек профиля от линии окружности была минимальной. В этом случае окружность может не пройти ни через одну расчетную точку профиля. Однако в сумме это будет "наилучшая" заменяющая окружность.

Будем считать известными координаты точек профиля затыловочного круга в системе координат XU . Ось U расположена параллельно оси затыловочного круга. Ось X направлена от центра затыловочного инструмента. Чтобы определить координаты x_c и y_c центра такой окружности и ее радиус r , воспользуемся способом наименьших квадратов [7].

Запишем уравнение окружности в виде

$$(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 = r^2.$$

Следовательно, искомая функция выражающая способ наименьших квадратов примет вид

$$f \equiv \left(\left(\sum x_i - x_c \right)^2 + \left(\sum y_i - y_c \right)^2 - nr^2 \right)^2.$$

Выполнив дифференцирование уравнения f по параметру r с учетом общего количества n расчетных точек, получим

$$\frac{\partial f}{\partial r} = nr^2 - r \sum x_i^2 + 2rx_c \sum x_i - nrx_c^2 - r \sum y_i^2 + 2ry_c \sum y_i - ny_c^2 = 0$$

Параметр n это общее количество точек относительно, которых будет проходить заменяющая окружность. Решив это уравнение относительно параметра r , найдем выражение для определения радиуса заменяющей окружности

$$r = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{nx_c^2 + ny_c^2 - 2x_c \sum x_i + \sum x_i^2 - 2y_c \sum y_i + \sum y_i^2}.$$

Далее, выполняем дифференцирование уравнения f по параметру x_c и получаем выражение

$$\frac{\partial f}{\partial x_c} = \frac{4}{n} \sum x_i \left(\sum x_i^2 - 2y_c \sum y_i + \sum y_i^2 \right) - \frac{8}{n} x_c \left(\sum x_i \right)^2 + 2x_c \sum x_i^2 - \sum x_i^3 + 2y_c \sum x_i y_i - \sum x_i y_i^2 = 0.$$

Откуда определяем координату y_c центра заменяющей окружности

$$y_c = \frac{2x_c \left(\sum x_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n x_i \left(\sum x_i^2 + \sum y_i^2 \right) + n \left(-2x_c \sum x_i^2 + \sum x_i^3 + \sum y_i^2 x_i \right)}{-2 \sum x_i \sum y_i + 2n \sum x_i y_i}.$$

Выполнив дифференцирование уравнения f по параметру y_c получим выражение

$$\frac{\partial f}{\partial y_c} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i} = 0,$$

$$C_1 = \sum x_i^3 \left(\sum x_i \right)^2 + n \sum x_i^2 y_i \sum x_i y_i - 2nx_c \left(\sum x_i y_i \right)^2 - 2x_c \left(\sum x_i \right)^2 \sum y_i^2 - n \sum x_i^3 \sum y_i^2 - \sum y_i \sum x_i y_i \sum y_i^2,$$

$$C_2 = \sum x_i^2 \left(2x_c \left(\sum y_i \right)^2 + \sum y_i \sum x_i y_i - 2nx_c \sum y_i^2 \right) + \left(\sum y_i^2 \right)^2 \sum y_i^2 x_i - n \sum y_i^2 \sum y_i^2 x_i,$$

$$C_3 = \sum x_i \left(-\sum x_i^2 y_i \sum y_i + \sum y_i^2 \left(\sum u_i^2 + \sum x_i^2 \right) \right) + \sum x_i \left(\sum y_i \left(4x_c \sum x_i y_i - \sum y_i^3 \right) \right) + n \sum x_i y_i \sum y_i^3.$$

Из полученного уравнения определяем координату x_c центра заменяющей окружности

$$x_c = \frac{a_1 + a_2}{a_3},$$

$$a_1 = n \sum y_i x_i^2 \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i \sum x_i y_i - \sum y_i \sum x_i y_i \sum y_i^2 + \sum x_i^3 \left(\left(\sum y_i \right)^2 - n \sum y_i^2 \right) + \left(\sum y_i \right)^2 \sum y_i x_i^2,$$

$$a_2 = \sum x_i \left(-\sum y_i x_i^2 \sum y_i + \sum x_i^2 \sum y_i^2 + \left(\sum y_i^2 \right)^2 - \sum y_i \sum y_i^3 \right) - n \sum y_i^2 \sum x_i y_i^2 + n \sum x_i y_i \sum y_i^2,$$

$$a_3 = -4 \sum x_i \sum y_i \sum x_i y_i + 2n \left(\sum x_i y_i \right)^2 + 2 \left(\sum x_i y_i \right)^2 \sum y_i^2 + 2 \sum x_i^2 \left(\left(\sum y_i \right)^2 - n \sum y_i^2 \right).$$

Полученные уравнения позволяют непосредственно рассчитать значения параметров x_c , y_c и r заменяющей окружности, которая "наилучшим образом" проходит через массив точек x_i, y_i ($i=1 \dots n$). Положение

центра заменяющей окружности всегда расположено с вогнутой стороны кривой, которая заменяется дугой окружности.

Выводы

Изложенная методика расчета затыловочного инструмента позволяет профилировать абразивные круги для затылования фасонных фрез, которые имеют наклонную стружечную канавку и положительный передний угол. Предложенная методика аналитического профилирования позволяет определить осевое сечение затыловочного абразивного инструмента и обеспечивает минимальную погрешность профилирования. Полученные результаты могут быть применены на практике при профилировании абразивного инструмента.

Анотація. Розглянуто особливості профілювання абразивних шліфувальних кругів для формоутворення задньої поверхні дискових фасонних фрез з похилим зубом. Отримано математичні залежності, які описують положення ріжучої кромки в просторі для фрез, які одночасно мають як позитивний передній кут, так і похилу стружкову канавку. Розглянуто загальний аналітичний метод визначення профілю шліфувального круга, який утворює задні фасонні поверхні фрези. Запропоновано два способи чисельного визначення координат його радіального перетину. Спосіб визначення шуканих координат методом послідовного порівняння розрахункових параметрів. І спосіб безпосереднього розрахунку координат, заснований на методі Ньютона, який застосовують при вирішенні трансцендентних рівнянь. Отримано математичні залежності для заміни криволінійного профілю частиною кола.

Ключові слова: профілювання, затилювання, фрези.

Abstract.

Purpose. Creating a method of profiling tools, which forms the rear surface shaped cutters. Analysis of the established methods. The study of the error in determining the profile of the tool.

Design / methodology / approach. The back surface of the shaped cutter produces abrasive tools. To determine the profile of abrasive tools using the kinematic method. The surfaces of the tool and parts have a common perpendicular. The tool moves along its trajectory. The point where the common perpendicular intersects with the trajectory is the center of the abrasive tool. There are two methods for determining the position of this point. The method of constructing the table. The center of the abrasive wheel is determined by the tables. The table can make before you start. The table is suitable for any instrument. Using the table you can define any profile. For each point shaped profile cutters always have two answers. The method of solution of the transcendental equation. The center of the abrasive tool is determined by Newton's method. You can calculate the coordinates of each point of the profile shapes of abrasive tools. These points are treated with a ribbon, which is located on the tooth cutters. Calculations can be done with a given accuracy.

Findings. Created by two methods for determining the profile of abrasive tool that handles the back surface of the contoured mills. Found the equations for determining the parameters of the circle that replaces the curved line

Originality/value. These results allow us to determine the profile instrument for the formation of the back of the cutter to the desired accuracy.

Keywords: Cutter, profiling, rear surface of the tool.

1. Баев А.К., Деркач Ю.А. Расчет профиля шлифовального круга для затылования фасонных фрез с криволинейной передней поверхностью / А.К. Баев, Ю.А. Деркач // Самолетостроение. Техника воздушного флота. — 1974. — № 35. — С. 147—151.
2. Дихтярь Ф.С. Расчет профиля дискового шлифовального круга для затылования фасонных фрез / Ф.С. Дихтярь // Вестник машиностроения. — 1964. — №5. — С. 62—66.
3. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов / П.Р. Родин // К., Вища школа. — 1990. — 423 с.
4. Чурилин А.Н. Профилирование шлифовальных кругов для фасонных фрез с нулевым и положительным передними углами. Фрезы / Чурилин А.Н. // Сб. докладов Всесоюзного совещания по фрезам. М. — 1986. — С. 273—284.
5. Солодкий В.И. Профилирование теоретически точных абразивных затыловочных кругов / В.И. Солодкий // Вестник национального технического университета Украины "КПИ". Машиностроение. — Киев 1999. — № 37. — С. 215 — 221.
6. Солодкий В.И. Зміна форми затилюваного інструменту після його переточування / В.И. Солодкий // Вісник Житомирського інженерно—технологічного інституту. Технічні науки. Вип. 11. — Житомир 1999. — С. 76—71.
7. Dubbel H. Tashenbuch für den maschinenbau. Dresden. 1925. — 298 p.

REFERENCES

1. Baev A.K., Derkach Ju.A. Raschet profilja shlifoval'nogo kruga dlja zatylovanija fasonnyh frez s krivolinej-noj perednej poverhnost'ju (Calculation of type of polishing circle for formation of the shaped milling cutters with a curvilinear front surface) Samoletostroenie. Tehnika vozdushnogo flota. 1974, no 35, pp. 147-151.
2. Dihjar' F.S. Raschet profilja diskovogo shlifoval'nogo kruga dlja zatylovanija fasonnyh frez (The calculation of type of disk polishing circle for creation is back surfaces of the shaped milling cutters). Vestnik mashinostroenija. 1964, no 5, pp. 62-66.
3. Rodin P.R. Osnovy proektirovanija rezhuwih instrumentov (Bases of calculation of cuttings instruments). Kyiv, Vischa shkola. 1990. 423 p.
4. Churilin A.N. Profilirovanie shlifoval'nyh krugov dlja fasonnyh frez s nulevym i polozhitel'nyh pered-nimi uglami. Frezy (Profiling of polishing circles for the shaped milling cutters). Sb. dokladov Vsesojuznogo sozewanija po frezam. Moscow. 1986. pp. 273-284.
5. Solodkij V.I. Profilirovanie teoreticheski tochnyh abrazivnyh zatylovochnyh krugov (Profiling in theory of exact abrasive circles for formation of back surfaces of milling cutters). Journal of mechanical engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Mashinostroenie. Kyiv 1999, no 37. pp. 215-221.
6. Solodkij V.I. Zmina formy zatylovanogo instrumentu pislja jogo peretochuvannja (Change of form of instrument after his repeated sharpening). Visnyk Zhytomys'kogo inzhenerno—tehnologichnogo instytutu. Tehnichni nauky. Vyp. 11. Zhytomyr 1999. pp. 76-71.
7. Dubbel H. Tashenbuch für den maschinenbau. Dresden. 1925. 298 p.