

УДК 621.914.22

Определение минимального диаметра концевой фрезы

Древаль А. Е.¹, Виноградов Д. В.^{1,*},

[*vdv2010@bk.ru](mailto:vdv2010@bk.ru)

Мальков О. В.¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Получены зависимости для оценки минимального диаметра концевых фрез при контурной обработке и фрезеровании пазов, основанные на прочностном расчете фрезы. Исходными данными для расчета являются свойства обрабатываемого материала (удельная сила резания $K_{s1.1}$ и коэффициент m), допускаемое напряжение инструментального материала, вылет фрезы, подача на зуб, длина обрабатываемой поверхности. Показано, что предлагаемые формулы могут быть использованы для определения подачи на зуб при фрезеровании пазов. Зависимости могут быть использованы на ранних стадиях проектирования концевых фрез для заданных условий обработки.

Ключевые слова: минимальный диаметр фрезы, концевая фреза, прочность концевой фрезы

Введение

В технологии механической обработки в связи с переходом на использование многооперационных станков с ЧПУ фрезерование занимает значительное место. По данным фирмы Maral, доля фрезерования в общем объеме механической обработки достигает до 40%, а по данным [1], этот показатель для изделий авиационной техники превышает 80%. Это определяется тем, что современное программное обеспечение станков позволяет обрабатывать концевыми фрезами отверстия, резьбовые поверхности, окна, карманы на заготовках сложных корпусных деталей. При этом обработка таких поверхностей (за исключением резьбовых) может осуществляться одним и тем же фрезерным инструментом.

Производственные наблюдения показывают, что конструкции стандартных фрез во многих случаях не обеспечивают выполнения всего многообразия технологических операций и многие предприятия вынуждены проектировать и изготавливать специальные (оригинальные) конструкции инструментов.

Информационный поиск показал, что в литературных источниках не приводится расчет диаметра концевых фрез. Диаметр фрезы предлагается или рассчитывать по эмпирическим формулам [2, 3], или выбирать из таблиц [4].

Прочность концевой фрезы является одним из главных критериев ее работоспособности. Она ограничивает производительность обработки (объем снимаемого за минуту материала заготовки) и определяет минимальный диаметр фрезы. В рамках выполнения работ по госбюджетной теме¹ разработана методика определения минимального диаметра концевой фрезы для выполнения заданной технологической операции исходя из обеспечения прочности корпуса фрезы, что позволяет ограничить область возможных значений диаметра с одной стороны.

Исходными данными для расчета являются технологическая схема выполнения операции фрезерования и параметры режима резания.

Важно отметить, что предлагаемый расчет диаметра концевой фрезы является укрупненным и предварительным. Поэтому после назначения диаметры фрезы следует выполнить проверку ее прочности, жесткости, оценить потребную мощность станка и т.д., например, как это показано в [5].

1. Расчетная модель

Концевая фреза является режущим инструментом со сложным поперечным сечением. На фрезу действуют переменные по величине и направлению изгибающие и крутящие силы. Поэтому для расчета минимального диаметра фрезы по прочности, выполняемого на начальных этапах проектирования фрезы, будем рассматривать фрезу как консольно закрепленную балку круглого сечения диаметром равным диаметру сердцевины фрезы с заданным вылетом от заделки и нагруженной максимальными изгибающей силой и крутящим моментом. Выбор для расчета диаметра сердцевины, а не наружного диаметра фрезы D или диаметра хвостовика несколько завышает величину получаемого минимального диаметра (т.к. D_c меньше диаметра фрезы и хвостовика), но позволяет производить расчет с некоторым коэффициентом запаса. При этом можно записать:

$$D_c = K_c D, \quad (1)$$

¹ Создание системы автоматизированного проектирования режущих инструментов с фасонной производящей поверхностью и режущей кромкой в виде винтовой линии [Текст]: отчет о НИР (заключ.) / МГТУ. НОЦ «НМКН»; руководитель В.А. Нелюб; исполн.: А.Е. Древаль [и др.]. - М., 2013. - 69 с. - Библиогр.: с. 67-69. - ГР № 114121970012. - Инв. № БИГЕ.27.6340.100.

где D_c – диаметр сердцевин фрезы, D – наружный диаметр фрезы, K_c – коэффициент сердцевин, показывающий во сколько раз диаметр сердцевин фрезы меньше ее наружного диаметра.

Прочность концевой фрезы обеспечивается при выполнении неравенства [6]

$$\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

Максимальные напряжения при нагружении концевой фрезы возникают в заделке. Поэтому при использовании цельной концевой фрезы следует использовать допускаемое напряжение для выбранного инструментального материала, а в случае применения сварного или паяного инструмента – для материала хвостовика или шейки.

Эквивалентное напряжение определим по известному выражению [6] для случая одновременного изгиба и кручения стержня:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}, \quad \sigma = \frac{M_{\text{изг}}}{W_x}; \quad \tau = \frac{M_{\text{кр}}}{W_p},$$

где σ – нормальное напряжение; τ – касательное напряжение; $M_{\text{изг}}$ – максимальный изгибающий момент, действующий на фрезу; $M_{\text{кр}}$ – максимальный крутящий момент; W_x – момент инерции при изгибе; W_p – момент инерции при кручении.

Запишем эти выражения по-другому:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{\sigma^2 + K_\tau \sigma^2} = \sigma \sqrt{1 + K_\tau},$$

где K_τ – коэффициент учитывающий увеличение эквивалентного напряжения при действии касательных напряжений, $K_\tau = \frac{4\tau^2}{\sigma^2}$.

С учетом того, что изгибающий момент можно определить по максимальной изгибающей силе и моменту инерции при изгибе по известным формулам [7] имеем:

$$M_{\text{изг}} = P_{\text{изг}} L_B; \quad W_x = \frac{\pi D_c^3}{32};$$

где L_B – вылет фрезы, $P_{\text{изг}}$ – максимальная изгибающая сила.

Следовательно:

$$\sigma_{\text{экв}} = 32 \frac{P_{\text{изг}} L_B}{\pi D_c^3} \sqrt{1 + K_\tau},$$

С учетом (1) и (2) получаем формулу для определения минимального диаметра фрезы:

$$32 \frac{P_{\text{изг}} L_B}{\pi K_c^3 D^3} \sqrt{1 + K_\tau} \leq [\sigma],$$

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{32 P_{\text{изг}} L_B \sqrt{1 + K_\tau}}{\pi K_c^3 [\sigma]}}. \quad (3)$$

Формула (3) показывает, что для расчета минимального диаметра фрезы необходимо предварительно определить:

- вылет фрезы L_v ;
- коэффициент K_t ;
- максимальную изгибающую силу резания $P_{изг}$;
- коэффициент K_c .

2. Определение вылета фрезы

За вылет режущей части фрезы L_v принимаем расстояние между торцом фрезы и началом хвостовика (рис.1).

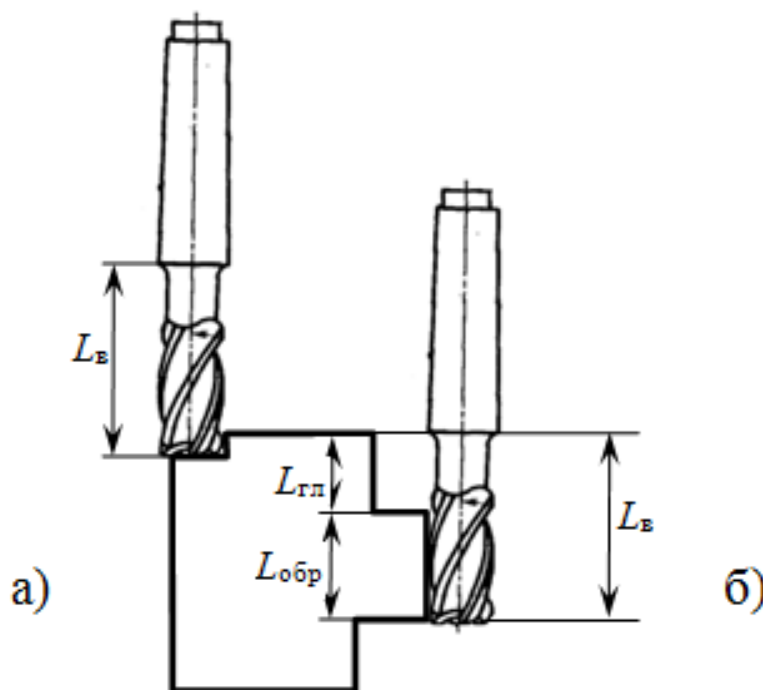


Рис. 1. Схемы определения вылета фрезы: а – для поверхности, расположенной наверху заготовки, б – для заглубленной поверхности

Вылет может быть определен из особенностей выполнения операции на станке.

При фрезеровании поверхностей, расположенных ниже верхней поверхности детали вылет можно рассчитать по формуле исходя из схемы обработки (рис.1, б):

$$L_v = L_{обр} + L_{гл},$$

где $L_{обр}$ – длина обрабатываемой поверхности, измеренная вдоль оси фрезы; $L_{гл}$ – величины заглубления обрабатываемой поверхности относительно верха детали.

При обработке поверхности, расположенной сверху заготовки или заглубленной незначительно (рис.1,а), эту формулу применять нельзя. В этом случае авторы предлагают при расчете вылета фрезы опираться на относительные размеры стандартных концевых фрез, а именно - на зависимость вылета фрезы от ее диаметра полученные по данным ГОСТов для различных концевых фрез [8-12] и приведенные на рис.2-4.

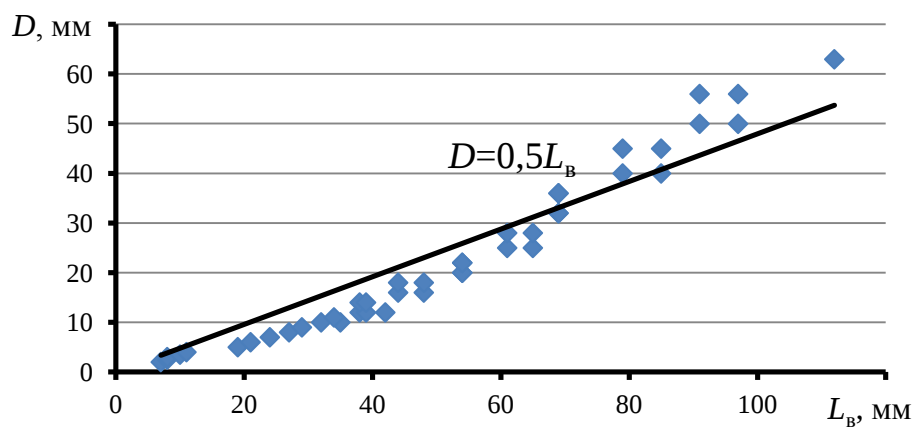


Рис. 2. Зависимость диаметра сердцевины от вылета для фрез концевых с цилиндрическим и коническим хвостовиком по ГОСТ 17025-71 и ГОСТ 17026-71

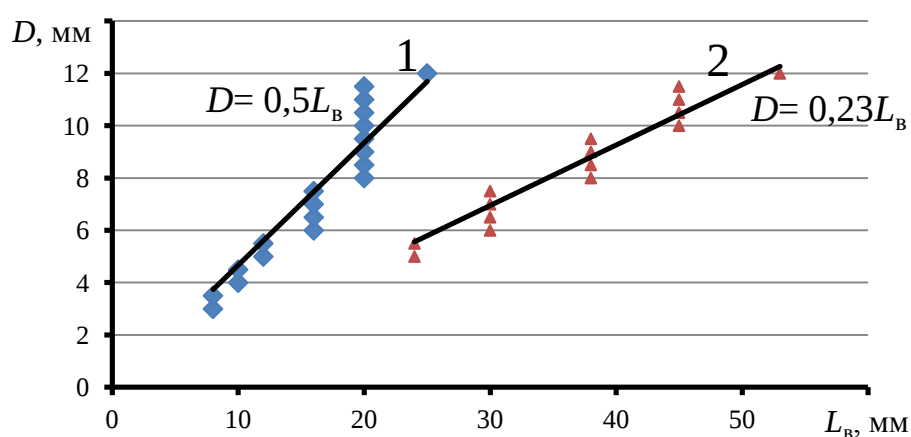


Рис. 3. Зависимость диаметра сердцевины от вылета для фрез концевых твердосплавных цельных (1) и паяных (2) по ГОСТ 18372-73

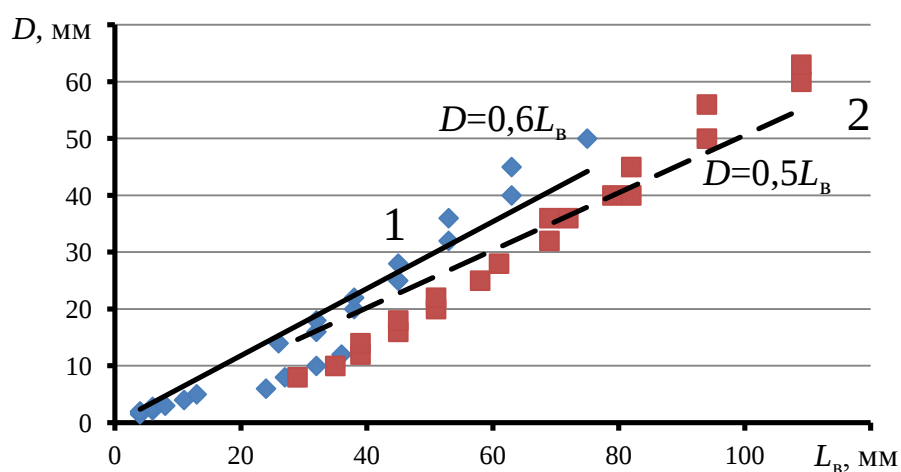


Рис. 4. Зависимость диаметра сердцевины от вылета для фрез концевых для обработки легких сплавов по ГОСТ 16225-81 (1) и ГОСТ 23247-78 (2)

3. Расчет изгибающей и крутящей силы

При фрезеровании на зуб фрезы, находящийся в контакте с заготовкой, действуют следующие силы (рис.5): касательная сила P_z , радиальная сила P_y и осевая P_x . Максимальную касательную силу резания, действующую на один зуб фрезы, $P_{z \max}$ будем рассчитывать по формуле [13, 14] (заметим, что расчет ведется для фрезы с прямым зубом ($\omega = 0$), т.к. наличие угла наклона зуба ω ведет к снижению величины силы, действующей на фрезу):

$$P_{z \max} = K_{Cl.1} a_{\max}^{1-m} L_{\text{обр}}, \quad (4)$$

где $K_{Cl.1}$ – удельная сила резания, зависящая от обрабатываемого материала и его твердости; m – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала; $a_{\max}$ – максимальная толщина срезаемого слоя, мм.

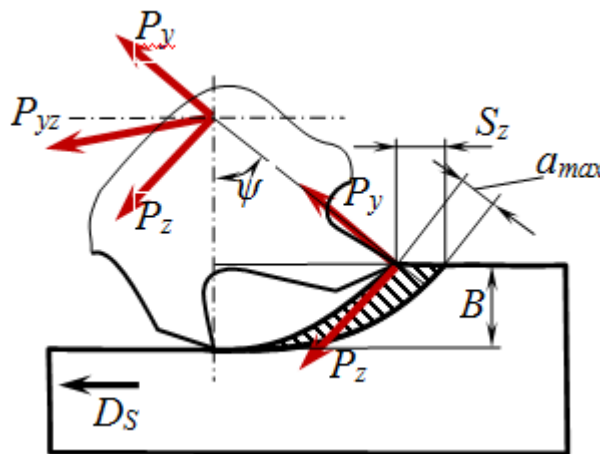


Рис.5. Схема для определения сил, действующих на фрезу, при контурном фрезеровании

Величина подачи на зуб S_z , а также удельная сила резания $K_{Cl.1}$ задаются конструктором по справочным данным, длина обрабатываемой поверхности $L_{\text{обр}}$ берется из технологической карты.

Радиальная сила P_y может быть определена в долях от силы P_z . По данным [15]

$$P_y = (0,4 \dots 0,6) P_z, \quad (5)$$

Максимальные изгибающая и крутящая силы, действующие на фрезу, зависят от количества одновременно режущих зубьев. При контурном фрезеровании в контакте с заготовкой находится только один зуб, при фрезеровании пазов в контакте могут находиться от 1 (двухзубая фреза) до 3 зубьев (шестизубая фреза). Поэтому в дальнейшем случаи контурного фрезерования и фрезерования пазов рассмотрены отдельно.

Контурное фрезерование

Из рис.6, выражений (4) и (5) следует, что

$$P_{\text{изг}} = P_{yz} = \sqrt{P_{z \max}^2 + P_{y \max}^2} = \sqrt{P_{z \max}^2 + 0,36 P_{z \max}^2} \approx 1,2 P_{z \max},$$

$$P_{изг} = 1,2K_{C1.1}a_{max}^{1-m}L_{обр}, \quad (6)$$

$$P_{кр} = P_z = K_{C1.1}a_{max}^{1-m}L_{обр}. \quad (7)$$

Не трудно показать, что максимальная толщина срезаемого слоя зависит от ширины фрезерования B , подачи на зуб S_z и диаметра фрезы D :

$$a_{max} \approx S_z \sin \psi; \quad \sin \psi = \frac{\sqrt{R^2 - (R - B)^2}}{R},$$

поэтому

$$a_{max} \approx 2S_z \frac{\sqrt{B(D - B)}}{D}.$$

где S_z – подача на зуб, B – ширина фрезерования.

Эта формула не дает возможности в явном виде связать a_{max} и D , поэтому для дальнейших расчетов воспользуемся тем фактом, что при контурном фрезеровании обычно $B=0,1D$ [16], тогда $a_{max}=0,6S_z$.

Примем $m=0,26$, что соответствует обработке стали (при обработке конструкционных материалов m находится в пределах 0,14..0,39). Тогда из (6) и (7) следуют выражения для расчета максимальной изгибающей и крутящей силы для случая контурного фрезерования:

$$P_{изг} = 1,2K_{C1.1}0,6^{1-m}S_z^{1-m}L_{обр} = 0,98K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}.$$

$$P_{кр} = K_{C1.1}0,6^{1-m}S_z^{1-m}L_{обр} = 0,82K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}.$$

2. Фрезерование пазов

В этом случае в резании принимают участие несколько зубьев. Не трудно показать, что крутящая сила является алгебраической суммой сил, действующими на каждый зуб в определенный момент времени, а изгибающая сила - векторной суммой (рис.6).

$$P_{кр} = \sum P_z; \quad \overline{P_{изг}} = \sum \overline{P_z}.$$

Найдем максимальную крутящую силу.

Касательная сила, действующая на один зуб:

$$P_z = K_{C1.1}L_{обр}a_{max}^{1-m} = K_{C1.1}L_{обр}S_z^{1-m}(\sin(\psi))^{1-m}.$$

Для случая фрезерование паза фрезой с 4 зубьями (угол между зубьями 90°) суммарная касательная сила:

$$P_{кр} = \sum P_z = K_{C1.1}L_{обр}S_z^{1-m}(\sin^{1-m}(\psi) + \sin^{1-m}(\psi + 90^\circ)).$$

При этом суммарная сила будет в K_Σ раз больше, чем $K_{C1.1}L_{обр}S_z^{1-m}$, где

$$K_\Sigma = \sin^{1-m}(\psi) + \sin^{1-m}(\psi + 90^\circ).$$

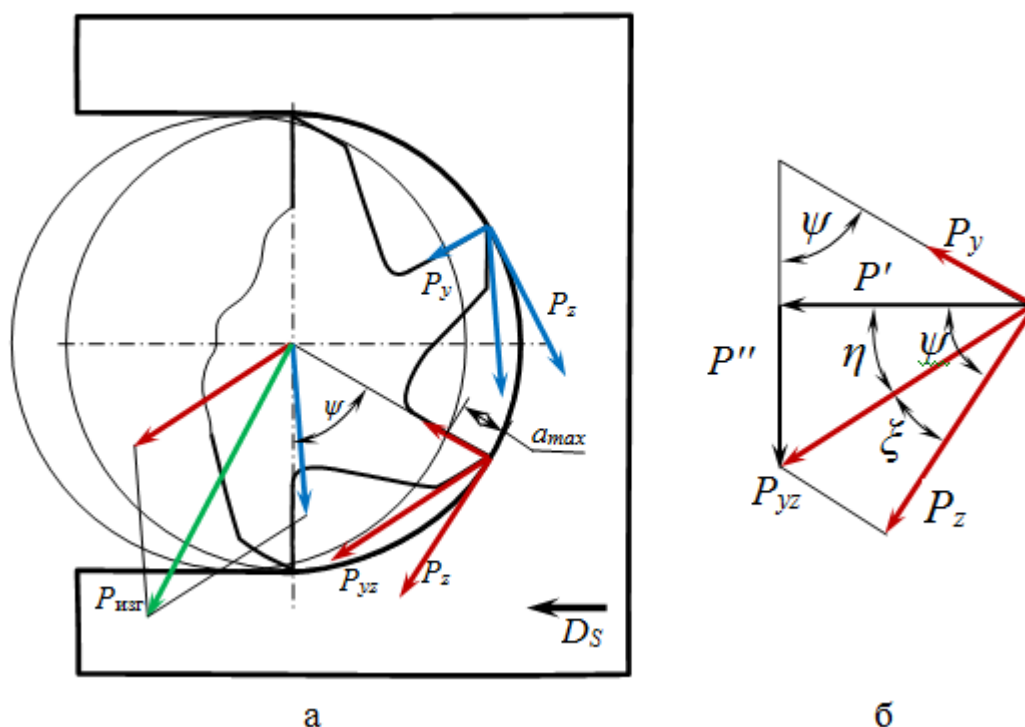


Рис.6. Схема для определения сил, действующих на фрезу, при фрезеровании пазов (а) и векторы действия сил на зуб (б)

Зависимости коэффициента K_{Σ} от угла контакта зубьев фрезы с заготовкой ψ (для $m=0,26$) представлен на рис. 7. Там же представлены зависимости, построенные для фрез с 5 и 6 зубьями. Из рисунка видно, что максимальное значение K_{Σ} достигается при использовании шестизубой фрезы (при $\psi=30^\circ, 90^\circ$) и составляет 2,2.

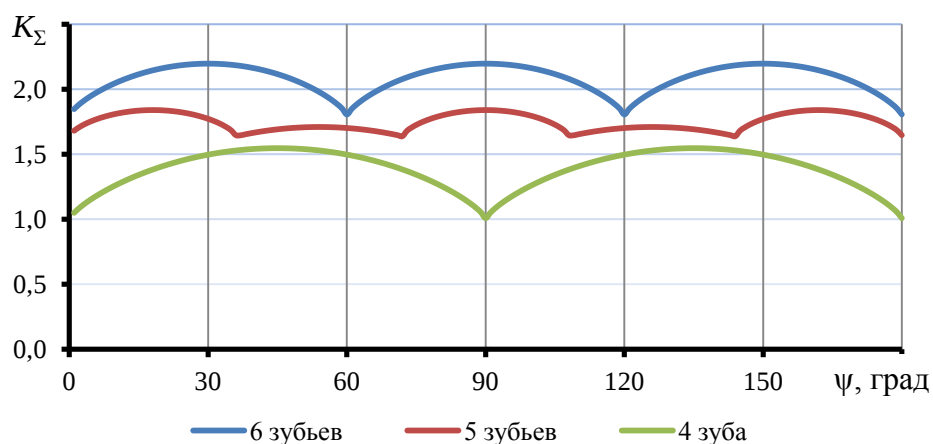


Рис. 7. Зависимости коэффициента K_{Σ} от угла контакта зубьев фрезы с заготовкой ψ для расчета крутящей силы при фрезеровании пазов

Таким образом, при фрезеровании пазов максимальная крутящая сила может быть определена по формуле:

$$P_{кр} = K_{\Sigma} P_z = 2,2 K_{C1.1} L_{обр} S_z^{1-m}.$$

Для вывода формулы для определения максимальной изгибающей силы воспользуемся расчетной схемой, показанной на рис.7.

Для одного зуба имеем:

$$P' = P_{yz} \cos \eta = 1,2 P_z \cos \eta; \quad P'' = P_{yz} \sin \eta = 1,2 P_z \sin \eta,$$

$$\eta = \psi - \xi = \psi - \arctg \frac{P_y}{P_z} = \psi - \arctg 0,6 = \psi - 30^\circ,$$

где P' и P'' - проекции силы P_{yz} .

Сила, действующая на четырехзубую фрезу, может быть определена следующим образом:

$$P_{изг} = \sqrt{(P'_\Sigma)^2 + (P''_\Sigma)^2}$$

$$P'_\Sigma = P'_1 + P'_2; \quad P''_\Sigma = P''_1 + P''_2$$

$$P'_\Sigma = K_{C1.1} L_{обр} S_z^{1-m} (\sin^{1-m} \psi \cdot \cos(\psi - 30^\circ) + \sin^{1-m}(\psi + 90^\circ) \cdot \cos(\psi + 90^\circ - 30^\circ)),$$

$$P''_\Sigma = K_{C1.1} L_{обр} S_z^{1-m} (\sin^{1-m} \psi \cdot \sin(\psi - 30^\circ) + \sin^{1-m}(\psi + 90^\circ) \cdot \sin(\psi + 90^\circ - 30^\circ)).$$

Следовательно:

$$K_\Sigma^2 = (\sin^{1-m} \psi \cdot \cos(\psi - 30^\circ) + \sin^{1-m}(\psi + 90^\circ) \cdot \cos(\psi + 60^\circ))^2 + (\sin^{1-m} \psi \cdot \sin(\psi - 30^\circ) + \sin^{1-m}(\psi + 90^\circ) \cdot \sin(\psi + 60^\circ))^2,$$

Графики зависимости коэффициента K_Σ для фрез с 4, 5 и 6 зубьями представлены на рис.8. (Методика расчета K_Σ для фрез с 5 и 6 зубьями аналогично изложенной выше). Анализ графиков позволил сделать вывод, что K_Σ не превышает 1,6.

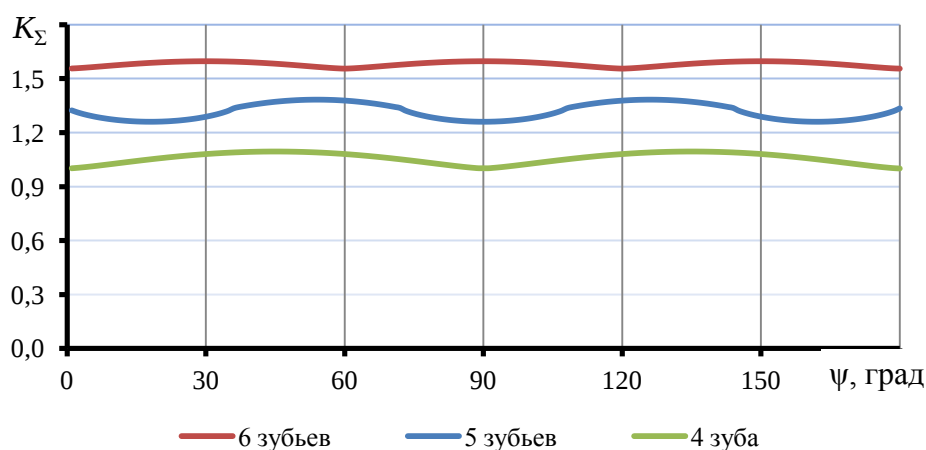


Рис. 8. Зависимости коэффициента K_Σ от угла контакта зубьев фрезы с заготовкой ψ для расчета изгибающей силы при фрезеровании пазов

Поэтому формулу для определения силы $P_{изг}$, действующей на фрезу при фрезеровании пазов можно записать так:

$$P_{изг} = K_\Sigma K_{C1.1} L_{обр} S_z^{1-m} = 1,6 K_{C1.1} L_{обр} S_z^{1-m}.$$

Полученные расчетные формулы для определения изгибающей и крутящей сил для различных случаев фрезерования приведены в табл.1.

Таблица 1. Формулы для оценки изгибающих и крутящих сил при фрезеровании

Сила	Контурное фрезерование	Фрезерование пазов
Изгибающая	$0,98K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}$	$1,6K_{C1.1}L_{обр}S_z^{1-m}$
Крутящая	$0,82K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}$	$2,2K_{C1.1}L_{обр}S_z^{1-m}$

4. Определение коэффициента K_τ

Ранее было показано, что

$$K_\tau = \frac{4\tau^2}{\sigma^2} = 4 \frac{M_{кр}^2 W_x^2}{M_{изг}^2 W_p^2}.$$

С учетом того, что

$$M_{изг} = P_{изг} L_B; \quad M_{кр} = P_{кр} \frac{D}{2},$$

$$W_x = \frac{\pi D_c^3}{32}; \quad W_p = \frac{\pi D_c^3}{16}$$

имеем:

$$K_\tau = 4 \left(\frac{P_{кр} \frac{D}{2} \cdot \frac{\pi D_c^3}{16}}{P_{изг} L_B \cdot \frac{\pi D_c^3}{32}} \right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{P_{кр} D}{P_{изг} L_B} \right)^2.$$

Подставим в это выражение формулы для нахождения крутящей и изгибающей сил и, с учетом того, что $D \leq 0,6L_B$ (см. рис.2-4), имеем:

- для контурного фрезерования:

$$K_\tau = \frac{1}{4} \left(\frac{0,82K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}D}{0,98K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}L_B} \right)^2 = 0,18 \left(\frac{D}{L_B} \right)^2 = 0,065;$$

- для фрезерования пазов:

$$K_\tau = \frac{1}{4} \left(\frac{2,2K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}D}{1,6K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}L_B} \right)^2 = 0,47 \left(\frac{D}{L_B} \right)^2 = 0,17.$$

5. Определение коэффициента K_c

Анализ графиков, построенным по данным ГОСТ [8-12] (рис.9-11), позволил сделать вывод, что между диаметром фрезы D и диаметром сердцевины фрезы D_c существует линейная зависимость: $D_c = K_c D$. Коэффициент K_c варьируется от 0,44 до 0,62. Для дальнейших расчетов выбираем минимальный - 0,44.

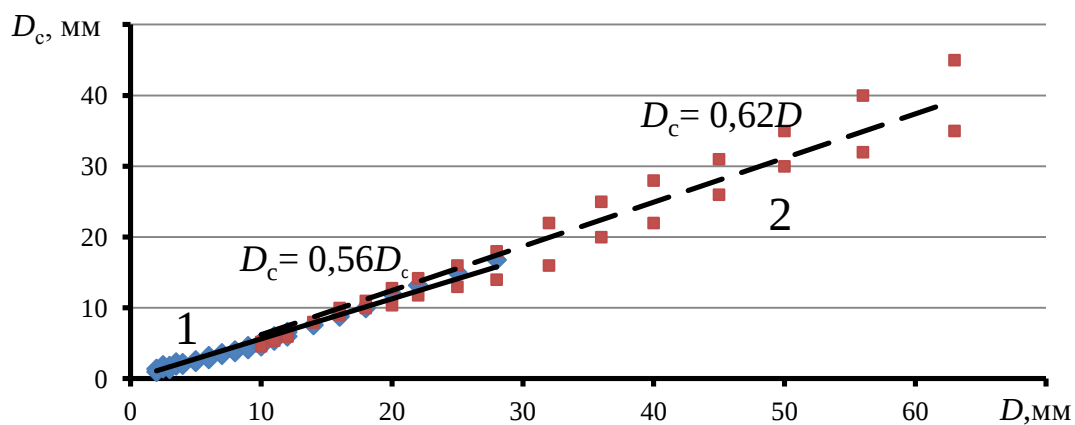


Рис. 9. Зависимость диаметра сердцевины D_c от диаметра фрезы D для фрез концевых с цилиндрическим (1) и коническим (2) хвостовиком по ГОСТ 17025-71 и ГОСТ 17026-71

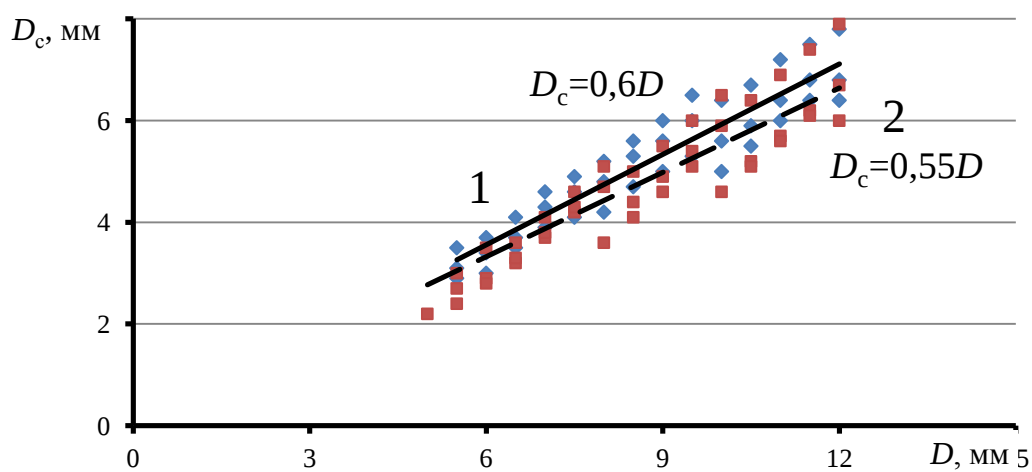


Рис. 10. Зависимость диаметра сердцевины D_c от диаметра фрезы D для фрез концевых твердосплавных цельных (1) и паяных (2) по ГОСТ 18372-73

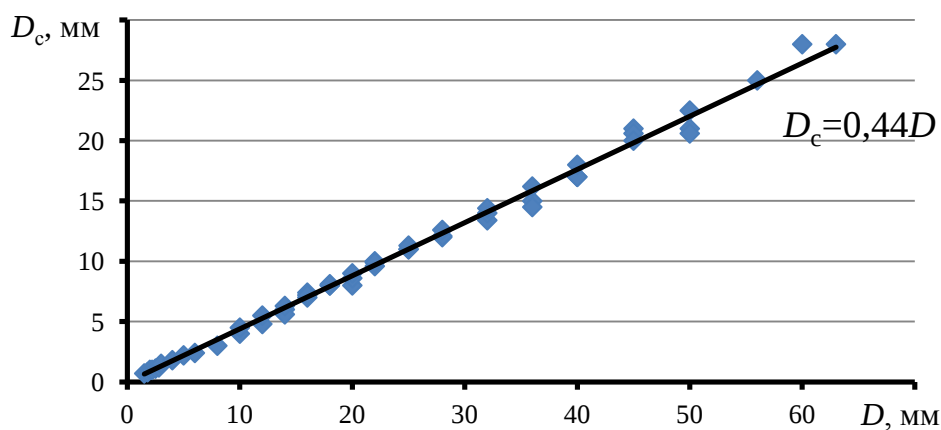


Рис. 11. Зависимость диаметра сердцевины D_c от диаметра фрезы D для фрез концевых для обработки легких сплавов по ГОСТ 16225-81 и ГОСТ 23247-78

6. Общая формула для расчета минимального диаметра фрезы

Обобщая вышесказанное получаем выражения для укрупненного расчета минимального диаметра концевой фрезы, приведенные в табл.2.

Таблица 2. Формулы для определения минимального диаметра фрезы

Параметр	Контурное фрезерование	Фрезерование пазов
$P_{изг}$	$0,98K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}$	$1,6K_{C1.1}L_{обр}S_z^{1-m}$
K_τ	0,065	0,17
K_c	0,44	0,44
D	$\sqrt[3]{\frac{121 \cdot K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}L_B}{[\sigma]}}$	$\sqrt[3]{\frac{207 \cdot K_{C1.1}S_z^{1-m}L_{обр}L_B}{[\sigma]}}$

Кроме расчета минимального диаметра концевой фрезы эти формулы позволяют производить проверку выбранных режимов резания. Для этого перепишем эти уравнения.

Для контурного фрезерования и фрезерования пазов максимальная подача на зуб по условию прочности фрезы может быть определена по формулам

$$S_z = \sqrt[1-m]{\frac{D^3[\sigma]}{121 \cdot K_{C1.1}L_{обр}L_B}}, \text{ и } S_z = \sqrt[1-m]{\frac{D^3[\sigma]}{207 \cdot K_{C1.1}L_{обр}L_B}}$$

соответственно.

Примеры использования полученных выражений представлены ниже.

Пример 1. Фрезерование паза глубиной 10 мм ($L_{обр}=10$ мм) в стальной заготовке ($K_{C1.1}=1990$ Н/мм², $m=0,26$ [17]) концевой фрезой $D=20$ мм с вылетом $L_B=50$ мм из быстрорежущей стали Р6М5 ($[\sigma]=2120$ МПа [18]). В этом случае целесообразно рассчитать максимально возможную подачу на зуб S_z .

$$S_z = \sqrt[1-m]{\frac{D^3[\sigma]}{207 \cdot K_{C1.1}L_{обр}L_B}} = \sqrt[1-m]{\frac{20^3 \cdot 2120}{207 \cdot 1990 \cdot 10 \cdot 50}} = 0,034 \text{ мм/зуб}$$

Результаты расчета можно сравнить с данными, полученными по методике, описанной в [19], и по табличным данным из [16]. В первом случае подача на зуб фрезы S_z , может быть рассчитана по формуле

$$S_z = \frac{C_z D^z K_{MS} K_{IS} K_{LS}}{t^x B^u},$$

где $C_z = 0,04$, $z=0,83$, $x=0,41$, $u=0,42$, $t=D$, $B=L_{обр}$, $K_{MS}=1$, $K_{IS}=1$,

$$K_{IS} = \frac{1,2}{(l/D)^{0,21}} = \frac{1,2}{(50/20)^{0,21}} = 0,98.$$

$$S_z = \frac{0,04 \cdot 20^{0,83} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,98}{20^{0,41} \cdot 10^{0,42}} = 0,052 \text{ мм/зуб}.$$

Таким образом, максимальная подача, которая не вызовет поломки фрезы дает несколько заниженные результаты, объясняется введением в расчет допущений, увеличивающих подачу.

Пример 2. Фрезерование контура кармана с внутренними радиусами R 15, 10 и 25 мм в стальной заготовке ($K_{C1.1}=1990$ Н/мм², $m=0,26$ [17]) фрезой из быстрорежущей стали Р6М5 ($[\sigma]=2120$ МПа [18]) с вылетом $L_b=50$ мм. Ширина обрабатываемой поверхности $B=20$ мм, припуск $t=2$ мм, $S_z=0,05$ мм/зуб.

Определим минимальный диаметр фрезы:

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{121 \cdot K_{C1.1} S_z^{1-m} L_{обp} L_b}{[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{121 \cdot 1990 \cdot 0,05^{1-0,26} \cdot 20 \cdot 50}{2120}} = 23,1 \text{ мм.}$$

Таким образом, фрезерование заданного кармана с назначенными режимами не возможно, т.к. радиус внутреннего скругления не может быть меньше диаметра фрезы ($D/2 \geq R = 10$ мм). В этом случае необходимо изменить или подачу, или радиус скругления.

7. Заключение

1. Полученные зависимости, позволяющие оценить минимальный диаметр концевой фрезы исходя из обеспечения ее прочности, могут быть использованы при проектировании фрез для обработки контуров, имеющих радиусные переходные участки, отверстий различных диаметров в корпусных деталях и других случаях, когда предпочтительно выполнить обработку одной фрезой.

2. Использование предлагаемых зависимостей для расчета максимально допустимой по прочности подачи целесообразно использовать при проектировании операций фрезерования пазов.

3. Использованные при выводе зависимостей допущения приводят к заниженным результатам расчета минимального диаметра фрезы и завышенным - максимальной подачи. При уточнении конструкции фрезы (например, при назначении количества зубьев z) коэффициенты в формулах могут быть уточнены.

Список литературы

1. Балла О.М., Замашиков Ю.И., Лившиц О.П., Медведев Ф.В., Пономарев Б.Б., Промптов А.И., Савилов А.В., Свинин В.М. Фрезы и фрезерование / под общ. ред А.И. Промптова. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 172 с.
2. Largest diameter end mill // Cutting Tool Engineering. 2008. Vol. 60, no. 5. P. 69.
3. Древаль А.Е., Мальков О.В., Павлюченков И.А., Виноградов Д.В. Определение диаметра резьбообразующей части резьбовых фрез // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 74-87. DOI: [10.7463/1015.0821197](https://doi.org/10.7463/1015.0821197)
4. Ординарцев И.А., Филиппов Г.В., Шевченко А.Н. и др. Справочник инструментальщика / под общ. ред. И.А.Ординарцева. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 846 с.

5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
7. Справочник машиностроителя. В 6 т. Т. 3 / под ред. С.В. Серенсена. 3-е изд., исправ. и доп. М.: Машгиз, 1962. 651 с.
8. ГОСТ 17025-71. Фрезы концевые с цилиндрическим хвостовиком. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1972. 24 с.
9. ГОСТ 17026-71. Фрезы концевые с коническим хвостовиком. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1972. 28 с.
10. ГОСТ 18372-73. Фрезы концевые твердосплавные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1984. 16 с.
11. ГОСТ 16225-81. Фрезы концевые для обработки легких сплавов. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1990. 38 с.
12. ГОСТ 23247-78. Фрезы концевые для обработки деталей легких сплавов на станках с программным управлением. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1989. 115 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания: учеб. Минск: Новое знание, 2006. 512 с.
14. Справочник по технологии резания металлов: пер. с нем. В 2 кн. Кн. 1 / ред. нем. изд. Г. Шпур, Т. Штеферле. М.: Машиностроение, 1985. 616 с.
15. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение-1, 2001. 944 с.
16. Барановский Ю.В., Брахман Л.А., Гдалевич А.И., Корчемкин А.Д. и др. Режимы резания металлов: Справочник / под. ред. А.Д. Корчемкина. М.: НИИТавтопрпом, 1995. 456 с.
17. Справочник GARANT по обработке резанием [Garant Machining Handbook] // The Hoffmann Group: company website. Режим доступа: <https://www.hoffmann-group.com/RU/ru/horu/service/downloads/zerspanungshandbuch> (дата обращения 01.10.2015).
18. Марки быстрорежущей стали и таблица физических свойств // arxipedia.ru: сайт. Режим доступа: <http://arxipedia.ru/materialy-i-svoystva/instrumentalnye-materialy/marki-bystrorezhushhej-stali-i-tablica-fizicheskix-svoystv.html> (дата обращения 01.10.2015).
19. Даниленко Б.Д., Зубков Н.Н. Выбор режимов резания. Продольное точение. Сверление спиральными сверлами. Фрезерование концевыми фрезами : учеб. пособие / ред. В.С. Булошников. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 51 с.

Defining a Minimum End Mill Diameter

A.E. Dreval¹, D.V. Vinogradov^{1,*},
 O.V. Malkov¹

[*vdv2010@bk.ru](mailto:vdv2010@bk.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: minimum diameter of mill, end mill, strength end mill

Industrial observations show that the standard mill designs in many cases do not provide a complete diversity of manufacturing operations, and a lot of enterprises are forced to design and manufacture special (original) designs of tools. The information search has revealed a lack of end mill diameter calculations in publications. There is a proposal to calculate the end mill diameter either by empirical formulas [2, 3], or by selection from the tables [4].

To estimate a minimum diameter of the end mill to perform the specified manufacturing operations based on the mill body strength the formulas are obtained. The initial data for calculation are the flow sheet of milling operation and properties of processed and tool materials. The end mill is regarded, as a cantilevered beam of the circular cross section having D_c diameter (mill core diameter) with overhang L_b from rigid fixing and loaded by the maximum bending force and torque.

In deriving the formulas were used the following well-reasoned assumptions based on the analysed sizes of the structural elements of the standard mills: a diameter of mill core is linearly dependent on the mill diameter and the overhang; the $4\tau^2$ to σ^2 $4\tau^2$ ratio is constant and equal to 0.065 for contour milling and 0.17 for slot milling.

The formulas for calculating the minimum diameter are as follows:

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{121 \cdot K_{C1.1} S_z^{1-m} L_{\text{оп}} L_b}{[\sigma]}} \quad \text{for contour milling;}$$

$$D \geq \sqrt[3]{\frac{207 \cdot K_{C1.1} S_z^{1-m} L_{\text{оп}} L_b}{[\sigma]}} \quad \text{for slot milling.}$$

Obtained dependences that allow defining a minimum diameter of the end mill in terms of ensuring its strength can be used to design mills for contour milling with radius transition sections, holes of different diameters in the body parts and other cases when for processing a single-mill is preferable.

Using the proposed dependencies for calculating a feed of the maximum tolerable strength is reasonable in designing the mills for slots.

Assumptions used in deriving lead to erroneously low results of calculating minimum diameter of mill and erroneously high results - the maximum feed; more accurate results can be obtained by specifying a mill design (e.g. the number of teeth).

References

1. Balla O.M., Zamashchikov Yu.I., Livshits O.P., Medvedev F.V., Ponomarev B.B., Promptov A.I., Savilov A.V., Svinin V.M. *Frezy i frezerovanie* [Mills and milling]. Irkutsk, IrSTU Publ., 2006. 172 p. (in Russian).
2. Largest diameter end mill. *Cutting Tool Engineering*, 2008, vol. 60, no. 5, p. 69.
3. Dreval' A.E., Mal'kov O.V., Pavlyuchenkov I.A., Vinogradov D.V. Determination of the Tapping Part Diameter of the Thread Mill. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 10, pp. 74-87. DOI: [10.7463/1015.0821197](https://doi.org/10.7463/1015.0821197) (in Russian).
4. Ordinartsev I.A., Filippov G.V., Shevchenko A.N., et al. *Spravochnik instrumental'shchika* [Reference book for toolmaker]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 846 p. (in Russian).
5. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of metal cutting theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 344 p. (in Russian).
6. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1999. 592 p. (in Russian).
7. Serensen S.V., ed. *Spravochnik mashinostroitelya. V 6 t. T. 3* [Reference book for mechanical engineer. In 6 vols. Vol. 3]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 651 p. (in Russian).
8. GOST 17025-71. *Frezy kontsevye s tsilindricheskim khvostovikom. Konstruktsiya i razmery* [State Standard 17025-71. End mills with cylindrical shank. Design and]. Moscow, Standards Publishing House, 1972. 24 p. (in Russian).
9. GOST 17026-71. *Frezy kontsevye s konicheskim khvostovikom. Konstruktsiya i razmery* [State Standard 17026-71. End mills with tapered shank. Design and dimensions]. Moscow, Standards Publishing House, 1972. 28 p. (in Russian).
10. GOST 18372-73. *Frezy kontsevye tverdospavnyye. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 18372-73. Carbide end mills. Specifications]. Moscow, Standards Publishing House, 1984. 16 p. (in Russian).
11. GOST 16225-81. *Frezy kontsevye dlya obrabotki legkikh splavov. Konstruktsiya i razmery* [State Standard 16225-81. End milling cutters for machining light alloys. Design and dimensions]. Moscow, Standards Publishing House, 1990. 38 p. (in Russian).
12. GOST 23247-78. *Frezy kontsevye dlya obrabotki detalei legkikh splavov na stankakh s programmym upravleniem. Konstruktsiya i razmery* [State Standard 23247-78. End cutters

- for use on NC machine tools for machining parts of light alloys. Design]. Moscow, Standards Publishing House, 1989. 115 p. (in Russian).
13. Yashcheritsyn P.I., Fel'dshtein E.E., Kornievich M.A. *Teoriya rezaniya* [Theory of cutting]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2006. 512 p. (in Russian).
 14. Spur G., Stoferle T., eds. *Spravochnik po tekhnologii rezaniya metallov. V 2 kn. Kn. 1* [Handbook of metal cutting technology. In 2 books. Book 1]. Transl. from German. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 616 p. (in Russian).
 15. Dal'skiy A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. V 2 t. T. 1* [Handbook for technologist- machinist. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2001. 944 p. (in Russian).
 16. Baranovskii Yu.V., Brakhman L.A., Gdalevich A.I., Korchemkin A.D., et al. *Rezhimy rezaniya metallov: Spravochnik* [Metal cutting modes: Handbook]. Moscow, NIITavtoprom Publ., 1995. 456 p. (in Russian).
 17. *Garant Machining Handbook*. The Hoffmann Group: company website. Available at: <https://www.hoffmann-group.com/GB/en/houk/service/downloads/zerspanungshandbuch> , accessed 01.10.2015.
 18. *Marki bystrorezhushchei stali i tablitsa fizicheskikh svoistv* [High speed steel grades and table of physical properties]. arxipedia.ru: website. Available at: <http://arxipedia.ru/materialy-i-svoystva/instrumentalnye-materialy/marki-bystrorezhushhej-stali-i-tablica-fizicheskix-svoystv.html> , accessed 01.10.2015. (in Russian).
 19. Danilenko B.D., Zubkov N.N. *Vybor rezhimov rezaniya. Prodol'noe tochenie. Sverlenie spiral'nymi sverlami. Frezerovanie kontsevyimi frezami* [Choice of cutting conditions. Longitudinal turning. Drilling twist drills. Milling end mills]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005. 51 p. (in Russian).