

УДК 674.05

А. А. Гришкевич, В. С. Вихренко, В. Н. Гаранин, А. Ф. Аникеенко
Белорусский государственный технологический университет

АДАПТИВНЫЙ ФРЕЗЕРНЫЙ ИНСТРУМЕНТ И УСЛОВИЕ УСТОЙЧИВОЙ ЕГО РАБОТЫ

В статье рассмотрена новая конструкция адаптивного фрезерного инструмента, имеющая возможность изменять угол наклона кромки, передний и задний углы, а также угол наклона в радиальном направлении (переход цилиндрического на коническое фрезерование). Сегментный узел, на котором крепится нож, имеет три степени свободы относительно корпуса фрезы. Основной проблемой при эксплуатации инструмента с подвижными элементами является фиксация движущихся частей во время разгона. С целью определения условий устойчивой его работы на этапах разгона и торможения фрезы или в процессе резания требуется исследование распределения действующих на него сил, включая силы инерции. Установлено, чем ниже угловая скорость разгона инструмента, тем больше времени требуется сдерживать сегментный узел от смещения относительно корпуса инструмента и поэтому для фиксации сегментного узла необходимо предусматривать механизм, предотвращающий в момент разгона смещение ножей относительно выставленных положений. В результате расчетов была получена зависимость минимально допустимого коэффициента трения в процессе разгона фрезы.

Ключевые слова: фреза, адаптивный инструмент, наклон кромки, трение, сила.

A. A. Grishkevich, V. S. Vikhrenko, V. N. Garanin, A. F. Anikeenko
Belarusian State Technological University

ADAPTIVE MILLING TOOL AND CONDITION OF ITS STABLE OPERATION

The article deals with a new design of the adaptive milling tool having the ability to change the edge inclination, the cutting and back angles, and the edge inclination in the radial direction (transition from cylindrical to conic milling). Segment assembly on which the blade is fixed has three degrees of freedom relative to the mill body. The main problem when operating the instrument with moving parts is to fix the moving parts during acceleration. For the purpose of determining the conditions of its stable operation during acceleration and deceleration of the mill or cutting process the study of the distribution of acting forces, including inertia forces is required. It was found that the lower the angular velocity of the tool acceleration is, the longer it takes to contain a segment assembly from the displacement relative to the tool housing and therefore for fixing a segment assembly, it is necessary to include a mechanism that prevents in the time of acceleration, displacement of the blades relative to the exhibited provisions. The dependence of the minimum coefficient of friction during acceleration of the mill was obtained on the basis of calculations.

Key words: mill, adaptive tool, edge inclination, friction, force.

Введение. Обработка древесины и древесных материалов методом фрезерования остается значимым технологическим процессом в столярно-строительном и мебельном производствах. Получение при этом продукции установленного качества согласно нормативно-технической документации с одновременным снижением энергетических затрат является и сегодня насущным вопросом для научных исследований. В этом направлении в настоящее время ведутся работы на кафедре деревообрабатывающих станков и инструментов и уже разработана новая конструкция фрезы сборной, которая позволяет вести исследовательские работы благодаря возможности в конструкции инструмента изменять положение ножа относительно оси вращения (угол наклона кромки λ) и изменять передний и задние углы [1].

Основная часть. Рассматриваемая фреза (рис. 1) позволяет уменьшить составляющие силы резания, повысить суммарную стойкость инструмента, устранить сколы на обработанной поверхности.

Однако, как указывалось в статье [1], конструкция инструмента требует доработки, что ведет к необходимости проведения дополнительных теоретических расчетов, особенно в режимах ее разгона и торможения, которым и посвящена данная работа.

Новая конструкция фрезы (рис. 1) состоит из крепежных винтов 1, винтов для фиксации ножа 2, ножа 3, сегментного узла 4, на котором крепится нож, являющегося частью шара, и контактирует с корпусом 5, 6 по части сферической поверхности. Сегментный узел фиксируется винтами 7. Он имеет три вращательных

степени свободы относительно корпуса фрезы, что обеспечивает широкие возможности по установке ориентации ножа как для целей научных исследований, так и при использовании в производстве с целью оптимизации процессов обработки заготовок.

С целью определения условий устойчивой работы сегмента на этапах разгона – торможения фрезы или в процессе резания необходимо исследовать распределение действующих на

него сил, включая силы инерции. Для этого определим координаты центра тяжести и компоненты тензора моментов инерции сегментного узла в сборе с ножом. Так как сегментный узел симметричен относительно плоскости деления двух частей корпуса фрезы, делаем разрез по оси симметрии и разбиваем на простейшие фигуры, что позволяет рассчитать положение центра тяжести без использования специализированных программ (рис. 2).

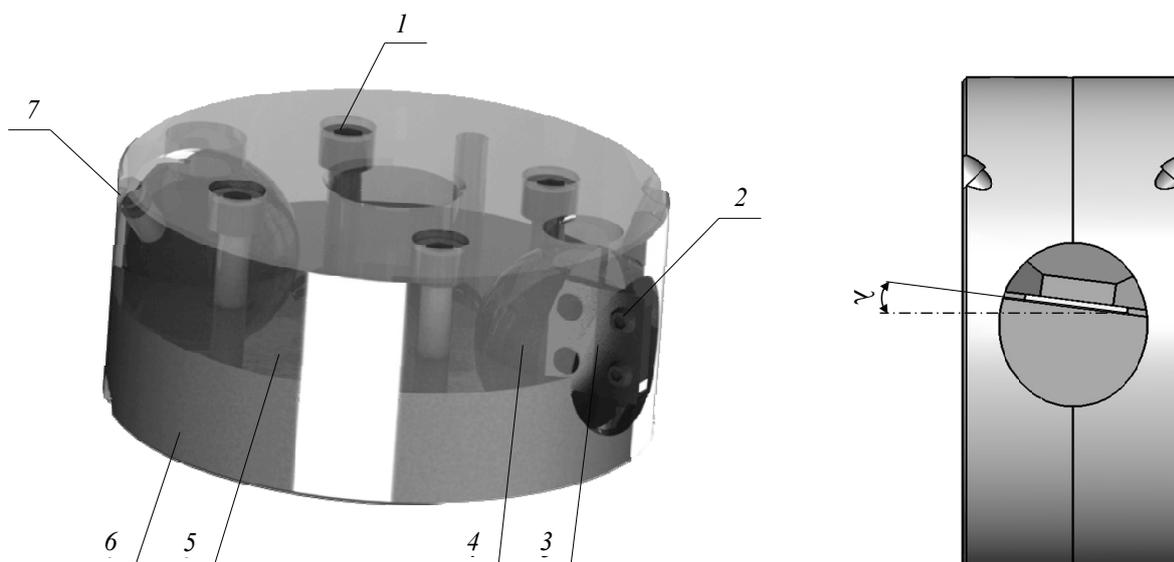


Рис. 1. Фреза адаптивная сборная с изменяемыми угловыми параметрами:
1 – крепежный винт; 2 – винт для фиксации ножа; 3 – нож; 4 – сегментный узел;
5, 6 – левая и правая части корпуса фрезы; 7 – винт для фиксации сегмента;
 λ – угол наклона кромки

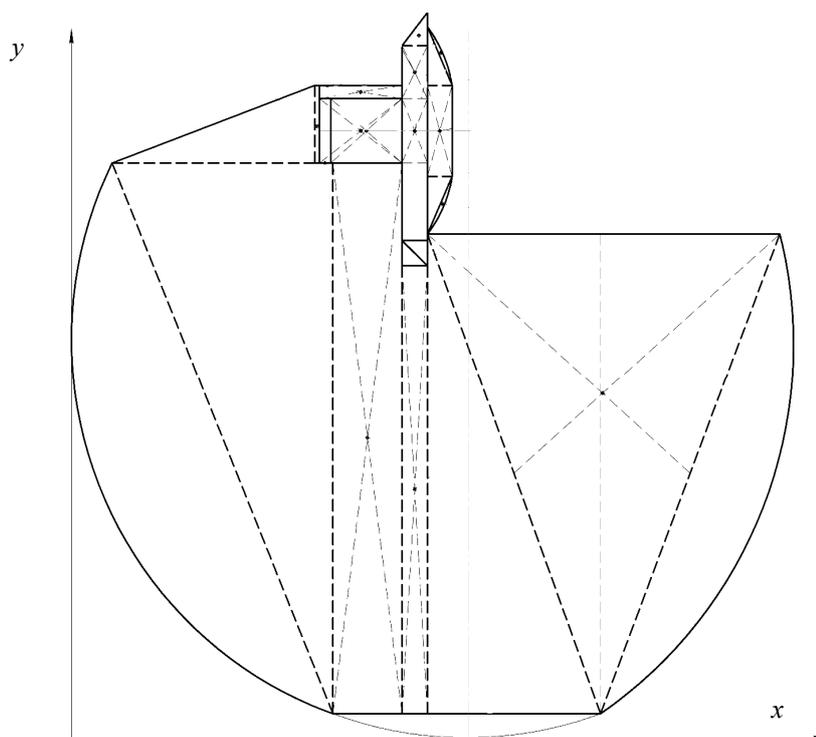


Рис. 2. Схема для расчета центра масс системы

Однако более точные результаты можно получить, если воспользоваться одной из таких программ, как SolidWorks. Для этого была построена 3D модель сегментного узла и выполнены соответствующие вычисления. Результаты вычислений приведены ниже (рис. 3). Отметим, что на рисунках расстояния указаны в миллиметрах, тогда как в формулах и в результатах вычислений используются основные единицы системы СИ (кг, м, с).

Основная проблема при эксплуатации инструмента с подвижными элементами – это фиксация движущихся частей во время разгона. При установившейся работе инструмента такая проблема отсутствует, поскольку на сегментный узел действуют большие центробежные (нормальные) силы инерции, обеспечивающие силы трения, достаточные для стабилизации позиционирования для всех элементов фрезы.

Составим расчетную схему сегментного узла (рис. 4) и зададимся следующими параметрами:

$\omega = 800 \text{ с}^{-1}$ – угловая скорость вращения инструмента;

$\varepsilon = 800 \text{ с}^{-2}$ – угловое ускорения инструмента в режиме разгона;

$m = 0,2 \text{ кг}$ – масса подвижной части.

Во время разгона момент центробежной силы инерции, действующей на сегментный узел,

в соответствии с расположением центра масс, стремится повернуть его по ходу часовой стрелки. Поэтому силы трения, предотвращающие этот поворот, должны быть направлены, как указано на рис. 4.

Предположим, что нормальное давление распределено пропорционально углу, составляемому направлением нормального усилия с горизонтальной осью. Задачу сведем к плоской, а направление результирующего нормального усилия определим интегрированием распределенной нагрузки по углу. Для упрощения расчетов пренебрегаем некоторой асимметрией распределения нормальных реакций в правой и левой частях рис. 4. Будем полагать, что нормальные реакции N_1 и N_2 составляют с горизонтальной осью одинаковый угол φ в обеих частях рисунка. Вычисления показывают, что $\varphi \cong 10^\circ$.

Нормальная Φ_n , касательная Φ_τ силы инерции и момент сил инерции относительно центра масс M_C^Φ определяются по известным соотношениям ($R = 0,05 \text{ м}$ – расстояние центра масс сегментного узла до оси вращения фрезы) [2]:

$$\begin{aligned} \Phi_n &= ma_n = m\omega^2 R; \\ \Phi_\tau &= ma_\tau = m\varepsilon R; \\ M_C^\Phi &= I_{Cz} \varepsilon. \end{aligned} \tag{1}$$

Центр масс: (мм)		
X = -0.68		
Y = -3.36		
Z = 0.00		
Главные оси инерции и главные моменты инерции:		
Относительно центра масс.		
Ix = (0.98, -0.21, 0.00)		Px = 26112.07
Iy = (0.00, 0.00, -1.00)		Py = 26956.43
Iz = (0.21, 0.98, 0.00)		Pz = 34689.64
Момент инерции:		
Взято относительно центра масс с привязкой к системе координат тела.		
Lxx = 26496.34	Lxy = -1774.37	Lxz = 0.11
Lyx = -1774.37	Lyy = 34305.38	Lyz = -0.01
Lzx = 0.11	Lzy = -0.01	Lzz = 26956.43
Момент инерции:		
Взято относительно центра масс с привязкой к общей системе координат.		
Ixx = 28468.77	Ixy = -1303.12	Ixz = 0.11
Iyx = -1303.12	Iyy = 34417.97	Iyz = 0.00
Izx = 0.11	Izy = 0.00	Izz = 29041.46

Рис. 3. Результаты расчетов по программе SolidWorks

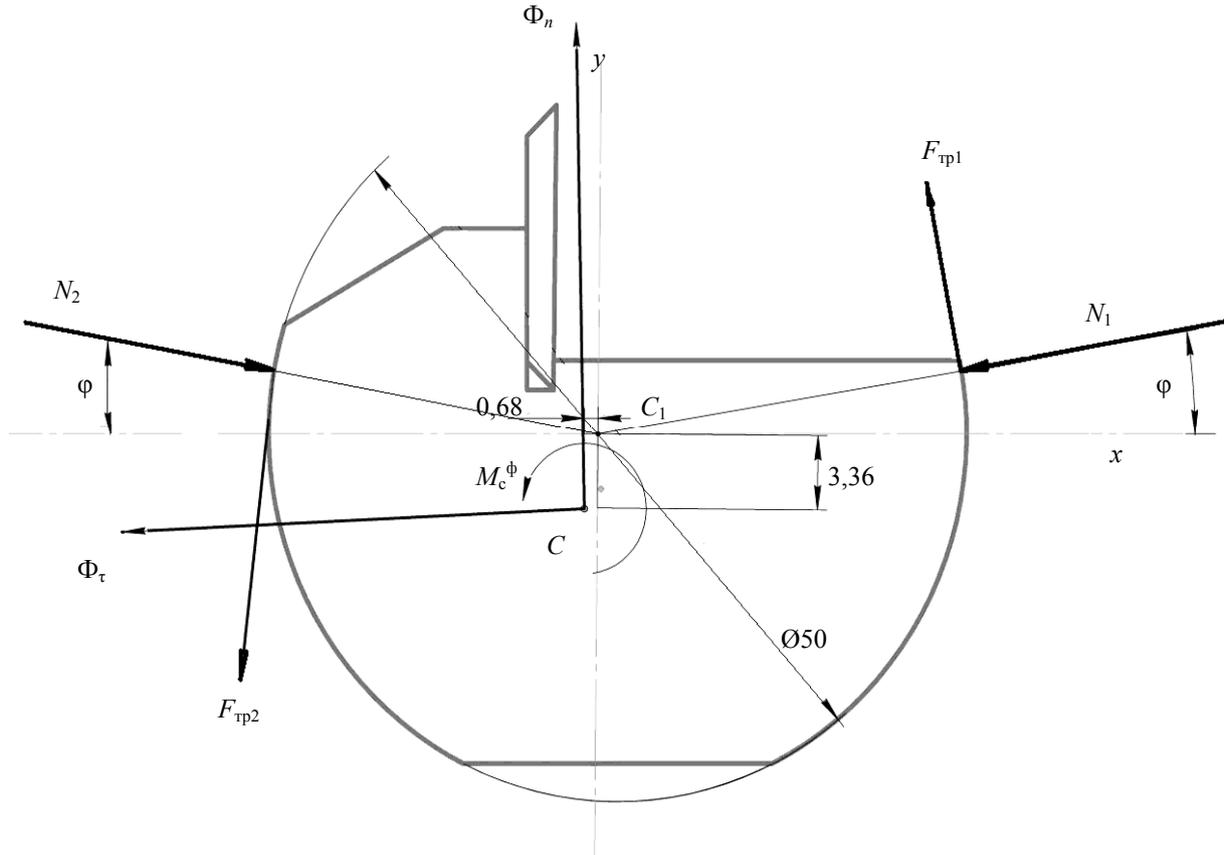


Рис. 4. Схема распределения сил, действующих на сегмент во время разгона фрезы

Составим в рамках принципа Даламбера [2] три уравнения динамического равновесия сегментного узла: суммы проекций сил на оси x , y и сумму моментов сил относительно центра сферы соответственно:

$$\begin{aligned} & -\Phi_n \sin \psi - \Phi_\tau \cos \psi - F_{\text{тр}1} \sin \varphi - \\ & - F_{\text{тр}2} \sin \varphi + N_2 \cos \varphi - N_1 \cos \varphi = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $F_{\text{тр}1}$ и $F_{\text{тр}2}$ – результирующие силы трения, действующие на сегментный узел со стороны опорных поверхностей 5 и 6 корпуса фрезы, Н; ψ – угол между линией, проходящей через центр тяжести сегментного узла и осью вращения фрезы, и вертикальной осью на рис. 4;

$$-x\Phi_n - y\Phi_\tau + (2/\pi)r; \quad (3)$$

$$(F_{\text{тр}1} + F_{\text{тр}2}) + M_c^\varphi = 0;$$

$$\begin{aligned} & \Phi_n \cos \psi - \Phi_\tau \sin \psi + F_{\text{тр}1} \cos \varphi - \\ & - F_{\text{тр}2} \cos \varphi - N_2 \sin \varphi - N_1 \sin \varphi = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$R = 0,05$ м – расстояние от оси вращения фрезы до центра тяжести сегментного узла;

$r = 0,025$ м – радиус сферической поверхности сегментного узла;

$x = 0,00068$ м и $y = 0,00336$ м – плечи сил инерции относительно центра масс.

Отметим, что при переходе к плоской модели плечи сил трения относительно оси сферы изменяются от r до нуля, и интегрирование по угловой переменной приводит к появлению множителя $(2/\pi)$ в уравнении (3).

Решая задачу по методу предельного равновесия [2], т. е. полагая, что силы трения достигли своих предельных значений, определим минимальное значение коэффициента трения \bar{f} (для сокращения обозначений в последующих уравнениях фигурирует приведенный коэффициент трения f , отличающийся от действительного множителем $\pi/2$ согласно уравнению (5), достаточное для обеспечения относительного равновесия сегментного узла в корпусе фрезы:

$$F_{\text{тр}j} = fN_j; \quad f = (2/\pi)\bar{f}; \quad j=1, 2, \quad (5)$$

где N_j – результирующая нормальная реакция опорной поверхности j , Н.

Используя уравнение (5) в уравнениях равновесия (2) и (4), перепишем последние в следующем виде:

$$\begin{aligned} & (N_2 - N_1) \cos \varphi - f(N_2 + N_1) \sin \varphi = \\ & \Phi_n \sin \psi + \Phi_\tau \cos \psi; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & (N_2 + N_1) \sin \varphi + f(N_2 - N_1) \cos \varphi = \\ & = \Phi_n \cos \psi - \Phi_\tau \sin \psi, \end{aligned} \quad (7)$$

решение данных уравнений позволяет определить сумму нормальных реакций

$$N_1 + N_2 = \frac{\Phi_n(\cos \psi - f \sin \psi) - \Phi_\tau(\sin \psi + f \cos \psi)}{(1 + f^2) \sin \varphi} \quad (8)$$

Подставляя полученный результат в уравнение (4) с использованием (5), приходим к уравнению

$$\begin{aligned} & \frac{f}{1 + f^2} \times \\ & \times \frac{\Phi_n(\cos \psi - f \sin \psi) - \Phi_\tau(\sin \psi + f \cos \psi)}{\sin \varphi} r = \\ & = x\Phi_n + y\Phi_\tau - M_C^\Phi, \end{aligned} \quad (9)$$

которое сводится к квадратному уравнению относительно искомого минимально допустимого значения коэффициента трения

$$f^2 - 2bf + c = 0, \quad (10)$$

где b и c находим по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} b &= \frac{1}{2B}(\epsilon t^2 \cos \psi - \sin \psi); \\ c &= \frac{1}{B} \left(\frac{x}{r} \epsilon t^2 + \frac{y}{r} - \frac{J_C}{mrR} \right) \sin \varphi, \end{aligned} \quad (11)$$

где J_C – момент инерции сегментного узла относительно точки C , кг · м²;

B – коэффициент, который находим по следующей зависимости:

$$\begin{aligned} B &= \left(\frac{x}{r} \sin \varphi + \sin \psi \right) \epsilon t^2 + \\ &+ \left(\frac{y}{r} - \frac{J_C}{mrR} \right) \sin \varphi + \cos \psi. \end{aligned} \quad (12)$$

При получении записанных соотношений предполагалось, что разгон фрезы происходит равноускоренно $\omega = \epsilon t$; $\epsilon = \omega_{\text{ном}} / \tau$, где $\omega_{\text{ном}}$ – номинальная угловая скорость вращения фрезы в установившемся режиме; τ – время разгона.

При положительных значениях коэффициентов b и c в качестве решения уравнения (10) следует принять

$$f = b - \sqrt{b^2 - c}. \quad (13)$$

На рис. 5 показана зависимость от времени минимально допустимого значения коэффициента трения f , найденная по уравнению (13) (с учетом (5)), при различных угловых ускорениях на этапе разгона фрезы. Результаты расчетов показывают, что по мере увеличения угловой скорости (пропорционально времени)

минимально допустимое значение коэффициента трения асимптотически стремится к пределу 0,0075, что значительно меньше коэффициента трения стали по стали (около 0,1).

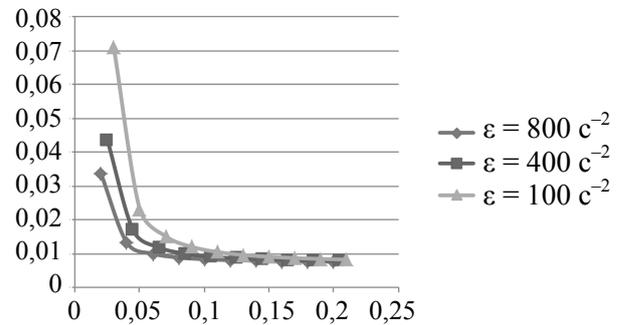


Рис. 5. График зависимости коэффициента трения \bar{f} от времени t

При $b^2 < c$ действительные решения уравнения (13) отсутствуют и при $b^2 - c < 0$ (рис. 6) в предположении малости коэффициента трения его следует искать согласно выражению

$$f = \frac{c}{2b} = \frac{(x/r)\epsilon t^2 + (y/r) - (J_C/mrR)}{|\epsilon t^2 \cos \psi - \sin \psi|}. \quad (14)$$

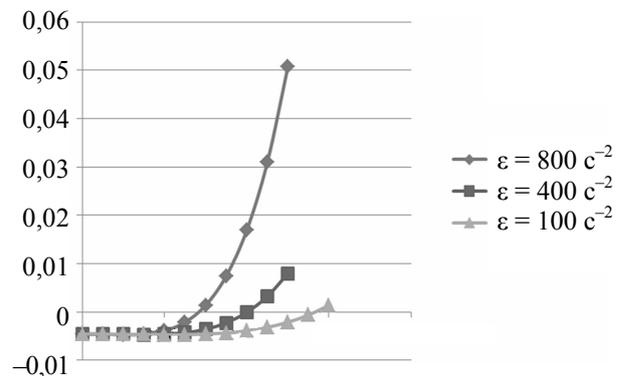


Рис. 6. График зависимости $b^2 - c$ от времени t

Отметим, что условие $b > 0$ выполняется для моментов времени

$$t > \sqrt{\text{tg} \psi / \epsilon}. \quad (15)$$

При меньших временах после начала разгона фрезы вследствие действия момента сил инерции M_C^Φ силы трения будут действовать противоположно указанным на рис. 4 направлениям.

Поскольку решение уравнения (10) приводит к значениям коэффициента трения, значительно меньшим единицы, то можно пренебречь слагаемым f^2 в этом уравнении, и для любых моментов времени определять коэффициент трения по соотношению (13).

Таким образом, для фиксации сегментного узла необходимо предусматривать механизм,

предотвращающий в момент разгона смещение ножей относительно выставленных положений. Причем, как видно из графика на рис. 6, чем ниже угловая скорость разгона инструмента, тем больше времени требуется сдерживать сегментный узел от смещения относительно корпуса инструмента.

Заключение. В результате расчетов была получена зависимость минимально допустимого коэффициента трения в процессе разгона фрезы.

Полученные результаты показали, что при не слишком малых временах с начала разгона коэффициент трения порядка 0,1, характерный для сопрягаемых стальных деталей, надежно обеспечивает фиксацию сегментного узла относительно корпуса фрезы. При малых временах возникающие силы инерции не велики, и для обеспечения фиксации узла достаточно использовать одно из простейших фиксирующих приспособлений, например, один или два винта небольшого сечения.

Литература

1. Гришкевич А. А., Аникеенко А. Ф., Гаранин В. Н. Особенности фрезерного сборного инструмента с изменяемыми углами: передним и наклона режущей кромки // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 175–177
2. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для вузов. 12-е изд., стер. М.: Высш. шк., 1998. 416 с.

References

1. Grishkevich A. A., Anikeenko A. F., Garanin V. N. Features of the milling combined tool with changeable corners: to lobbies and an inclination of the cutting edge. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 175–177 (In Russian).
2. Targ S. M. *Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki: ucheb. dlya vuzov* [Short course of theoretical mechanics. Studies]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1998. 416 p.

Информация об авторах

Гришкевич Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Вихренко Вячеслав Степанович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической механики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tm@belstu.by

Гаранин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: garanin@wmt.by

Аникеенко Андрей Федорович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hasper@tut.by

Information about the authors

Grishkevich Aleksandr Aleksandrovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Vikhrenko Vyacheslav Stepanovich – DSc (Physics and Mathematics), Professor, the Department of Theoretical Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tm@belstu.by

Garanin Viktor Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: garanin@wmt.by

Anikeenko Andrey Fedorovich – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hasper@tut.by

Поступила 16.02.2016