

2. Боровиков Е.М., Фефилов Л.А., Шестаков В.В. Лесопиление на агрегатном оборудовании. М.: Лесная промышленность, 1985. 216 с.

3. Влияние ионно-лучевого азотирования дереворежущего инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали, на период его стойкости / А.В. Белый, В.Н. Гаранин, А.А. Гришкевич, А.Ф. Аникеенко // Труды БГТУ. Минск: БГТУ, 2016. № 2. С. 266–269.

УДК 539.422.5

**А.А. Гришкевич, В.С. Вихренко, В.Н. Гаранин, А.Ф. Аникеенко, Д.Л. Болочко**  
(А.А. Grishkevich, V.S. Vikhrenko, V.N. Garanin, A.F. Anikeenko, D.L. Bolochka)  
(БГТУ, г. Минск, РБ)

E-mail для связи с авторами: dosy@belstu.by

### **АДАПТИВНЫЙ РЕФЛЕКТОРНЫЙ ФРЕЗЕРНЫЙ ИНСТРУМЕНТ И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ЕГО КОНСТРУКЦИИ**

#### **ADAPTIVE REFLECTORY MILLING TOOLS AND PECULIARITIES OF PAYMENT OF ITS CONSTRUCTION**

*В работе представлены исследования, связанные с фрезерным инструментом, имеющим возможность изменять углы резания. Определение сил инерции подвижных частей инструмента на базе 2D-моделей, анализ которых был выполнен в предыдущих работах [1–3], не позволяет с высокой степенью достоверности определять параметры узлов инструмента, которые необходимо использовать при проектировании фрез с адаптивными свойствами.*

*В данной работе ставится задача разработать 3D-модель фрезерного инструмента и провести вычисления с использованием существующих программных пакетов. Исследования в области фрезерного инструмента с изменяющимися углами резания представлены в этой работе. Проблема определения инерционных характеристик инструмента с подвижными частями на основе 2D-моделей, анализ которых был проведен в предыдущих работах [1–3], не позволяет определить параметры инструмента, которые должны использоваться при проектировании фрез с адаптивными свойствами.*

*The main tasks of this work are develop 3D-model of milling tool and carried out it colculations using the existing software packages.*

Механическая обработка древесины и древесных материалов занимает значимое место в добавочной стоимости продукции деревообработки. Сложность лезвийного резания обусловлена, в первую очередь, различными физико-механическими свойствами материалов, что затрудняет обеспечение стабильности установленного качества получаемых поверхностей, а также высокой удельной энергоемкостью процесса. Как результат, необходимость использования дорогостоящих машин, оборудования и инструментов, обеспечивающих эффективность и безопасность процесса при получении деталей из древесины и древесных материалов.

Проблема эксплуатации современного деревообрабатывающего оборудования (в том числе и инструмента) заключается в необоснованных режимах его эксплуатации, приводящих к уменьшению производительности процесса и увеличению текущих материальных издержек. В данной работе внимание уделяется фрезерному дереворежущему инструменту, который широко используется на деревоперерабатывающих предприятиях. Получение при этом продукции установленного качества согласно

нормативно-технической документации с одновременным снижением энергетических затрат является и насущным вопросом для научных исследований. С целью решения этого вопроса была разработана конструкция фрезы сборной, которая позволяет изменять: положение ножа относительно оси вращения (угол наклона кромки  $\lambda$ ), передний и задний углы, технологический процесс (цилиндрическое или коническое фрезерование) [1].

Цель представленной работы – разработать расчетную 3D-модель для использования ее в инженерных расчетах при проектировании деталей и узлов инструмента с подвижными элементами в адаптивных фрезерных инструментах.

Задачи работы:

1. Оценить существующую 2D-модель, используемую для расчетов фрезерного инструмента с адаптивными свойствами [2].

2. Определять инерционные характеристики инструмента с адаптивными свойствами при использовании разработанной 3D-модели.

3. Произвести расчеты и определить закономерности поведения инструмента с адаптивными свойствами.

4. Сделать соответствующие выводы по возможности применения представленной 3D-модели в инженерных расчетах.

Для частичного решения выше обозначенных проблем при резании древесины и древесных материалов методом фрезерования разработана конструкция фрезы сборной, которая позволяет вести исследовательские работы благодаря возможности в конструкции инструмента изменять положение ножа относительно оси вращения (угол наклона кромки  $\lambda$ ) и изменять передний и задние углы [1]. Рассматриваемая фреза (рис. 1, 2) позволяет уменьшить составляющие силы резания, повысить период (полный период) стойкости инструмента, устранить сколы на обработанной поверхности.

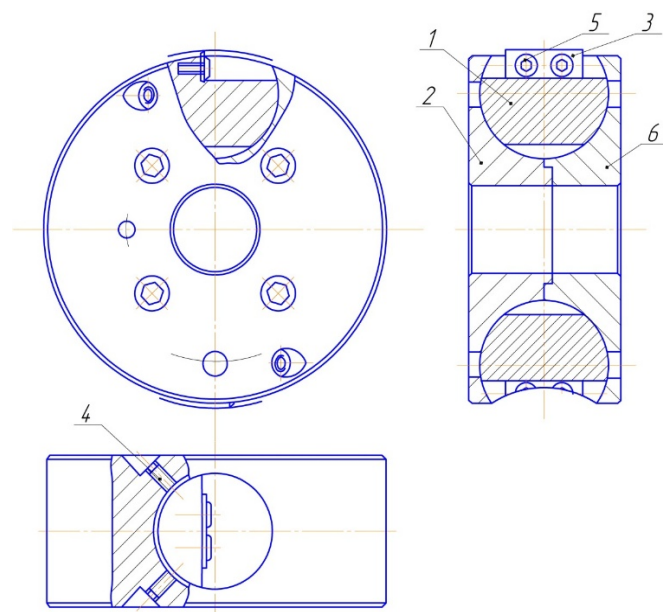


Рис. 1. Фреза сборная с адаптивными свойствами (изменяемыми углами):

1 – сегментный узел; 2, 6 – левая и правая части корпуса фрезы соответственно; 3 – нож;

4 – винт для фиксации сегмента;

5 – винт для фиксации ножа



Рис. 2. Натурный образец фрезы сборной с адаптивными свойствами

Сегментный узел 1, на котором крепится нож 3 при помощи винтов 5, является частью шара, и контактирует с корпусом 2, 6 по части сферической поверхности. Ввиду этого 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).

Основная проблема при эксплуатации инструмента с подвижными элементами – это фиксация движущихся частей во время разгона, что было рассмотрено в работе [3].

*Определение инерционных характеристик инструмента*

Для определения инерционных характеристик инструмента авторы воспользовались программным пакетом SolidWorks, где инструмент был начерчен в масштабе 1:1 (с указанием материала – сталь 40X). Были получены координаты центра тяжести сегмента и моменты инерции подвижной части инструмента. Результаты были представлены в следующем виде:

$$X = 0, \quad Y = -0,68, \quad Z = -3,36$$

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams\*<sup>2</sup> millimeters)

Taken at the center of mass.

$$\begin{array}{ll} I_Y = (0.98, -0.21, 0.00) & P_Y = 26\,112.07 \\ I_Z = (0.00, 0.00, -1.00) & P_Z = 26\,956.43 \\ I_X = (0.21, 0.98, 0.00) & P_X = 34\,689.64 \end{array}$$

Moments of inertia: (grams\*<sup>2</sup> millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

$$\begin{array}{lll} L_{YY} = 26\,496.34 & L_{YZ} = -1\,774.37 & L_{YX} = 0.11 \\ L_{ZY} = -1\,774.37 & L_{ZZ} = 34\,305.38 & L_{ZX} = -0.01 \\ L_{XY} = 0.11 & L_{XZ} = -0.01 & L_{XX} = 26\,956.43 \end{array}$$

Moments of inertia: (grams\*<sup>2</sup> millimeters)

Taken at the output coordinate system.

$$\begin{array}{lll} I_{YY} = 28\,468.77 & I_{YZ} = -1\,303.12 & I_{YX} = 0.11 \\ I_{ZY} = -1\,303.12 & I_{ZZ} = 34\,417.97 & I_{ZX} = 0.00 \\ I_{XY} = 0.11 & I_{XZ} = 0.00 & I_{XX} = 29\,041.46 \end{array}$$

В дальнейшем полученные данные моментов инерции будем использовать с размерностью кг·м<sup>2</sup>.

Рассмотрим разработку расчетной 3D-модели фрезерного инструмента с адаптивными свойствами. На основании ранее выполненных расчетов предлагается использование в плоскости углов Эйлера с центром координат, которые находятся на оси вращения инструмента *O* (рис. 3, 4).

Предложенная модель позволяет определять реакцию связи корпуса инструмента с подвижным сектором и в дальнейшем изучать особенности взаимодействия адаптивного инструмента, изображенного на рисунке 2, с обрабатываемым древесным материалом.

Пространственную схему распределения сил представим на рисунке 3 (это объемная иллюстрация) и в плоскости (рис. 4), которые отражают работу инструмента в холостом режиме (отсутствует процесс резания). В настоящей работе, в том числе на рисунках 3, 4, не учтены составляющие силы резания:  $F_X$  – касательная составляющая силы резания;  $F_R$  – радиальная составляющая силы резания. Они влияют на устойчивую работу подвижного элемента, и это будет учтено в дальнейших исследованиях.

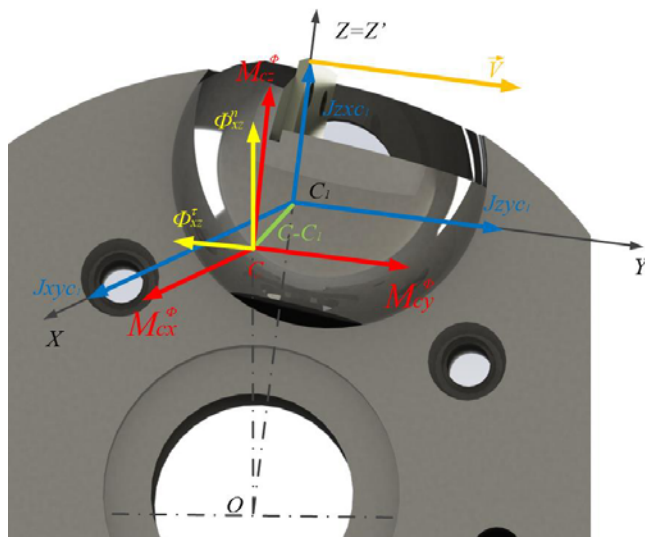


Рис. 3. Схема объемной иллюстрации подвижного элемента с указанием действующих сил на подвижный элемент в режиме разгона

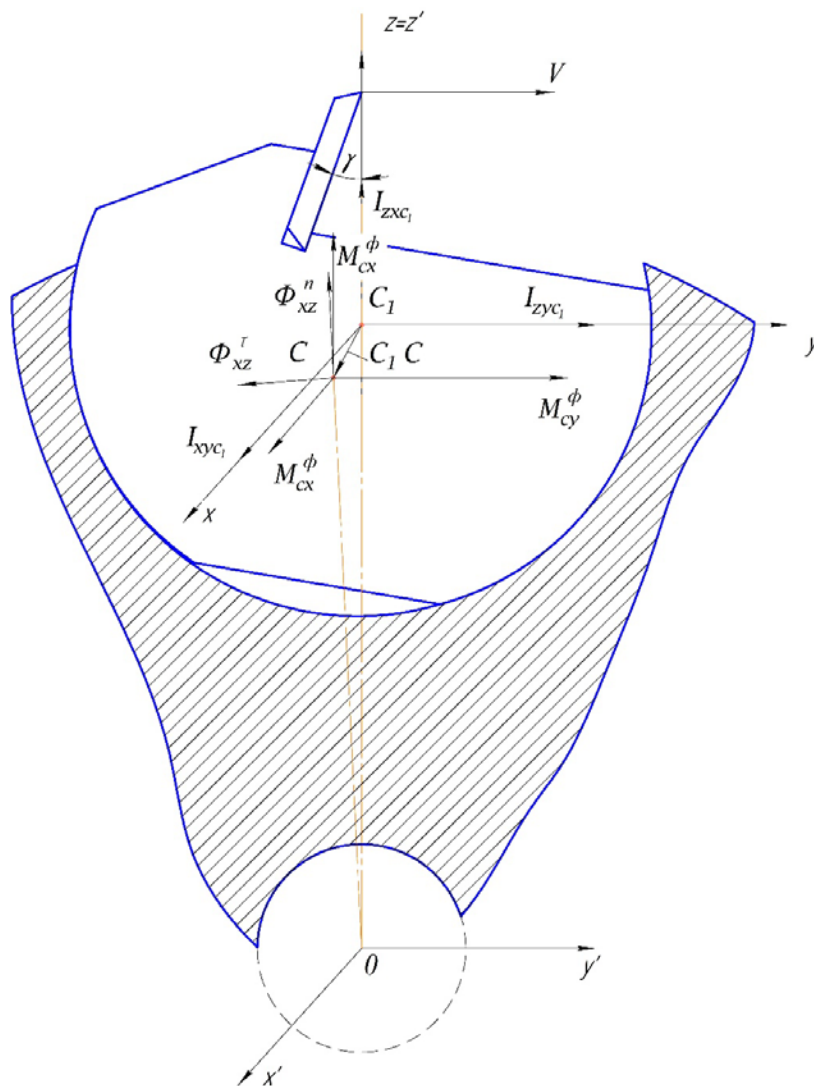


Рис. 4. Схема сил, действующих на подвижный элемент в режиме разгона в плоскости

Дальнейшие расчеты будем выполнять согласно представленной модели на основании работы [4]. На рисунке 5 представим схему выполнения трех последовательных поворотов подвижного элемента (углы Эйлера).

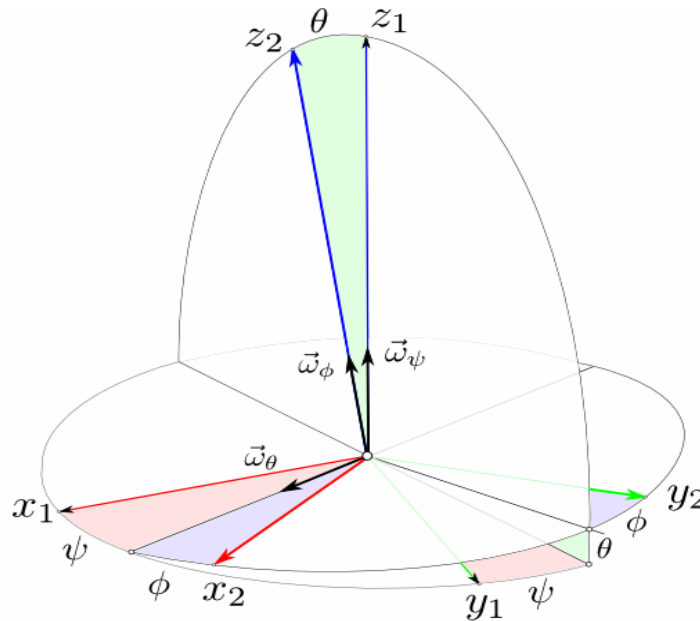


Рис. 5. Схема трёх последовательных поворотов:  
 $\psi$  – угол прецессии,  $\theta$  – угол нутации,  $\phi$  – угол собственного вращения

Матрицы элементарных поворотов будут иметь вид:

$$A_\psi = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}; A_\phi = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

На основании рисунков 3 и 4 «старый» базис соотносится с сектором инструмента  $C_1 XYZ$ , а новый – с центром вращения инструмента  $OX'Y'Z'$ .

Координаты центра тяжести сектора в «старом» базисе в матричном виде запишем, мм:

$$x = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.68 \\ -3.36 \end{pmatrix} = \overline{CC}_1, \quad (1)$$

где  $\overline{CC}_1$  – матрица расстояния центра тяжести подвижного сектора от центра его вращения.

Координаты центра тяжести сектора в «новом» базисе запишем в следующем виде, мм:

$$x' = A^{-1}x + x'_0, \quad (2)$$

где  $A^{-1}$  – обратная матрица;

$$x'_0 = A^{-1}x_0,$$

$$x_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ OC_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 50 \end{pmatrix} - \text{координата «нового» базиса относительно «старого»,}$$

где  $OC_1$  – расстояние от центра вращения подвижного сектора до оси вращения инструмента вдоль координаты  $Z$ .

*Выполнение расчетов*

Дальнейшие расчёты будем выполнять с использованием программы Mathcad. Зададимся следующими параметрами разгона фрезерного инструмента с целью изучения расчетной модели:

$\omega = 600 \text{ с}^{-1}$  – угловая скорость вращения инструмента;

$\varepsilon = 20 \text{ с}^{-2}$  – угловое ускорение инструмента в режиме разгона;

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

$\varphi_0 = \theta_0 = \psi_0 = 0$  – углы в начальном положении.

Матрица угловых ускорений,  $\text{с}^{-1}$ :

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Значения для моментов инерции берём из расчёта программой SolidWorks (данные представлены выше). Составляем матрицу моментов инерции,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ :

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 28.46877 & -1.30312 & 0.00011 \\ -1.30312 & 34.41797 & 0 \\ 0.00011 & 0 & 29.04146 \end{pmatrix}.$$

Касательная сила инерции, Н:

$$\Phi_\tau = m\varepsilon r_c, \quad (4)$$

где  $r_c$  – вектор координаты центра тяжести подвижного сектора в системе координат вращения инструмента.

$$\Phi_\tau = \begin{pmatrix} \Phi_X^\tau \\ \Phi_Y^\tau \\ \Phi_Z^\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -0,187 \\ -2,72 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$|\Phi_\tau| = 0,187.$$

Нормальная сила инерции, Н:

$$\Phi_n = m\omega^2 r_c, \quad (6)$$

$$\Phi_n = \begin{pmatrix} \Phi_X^n \\ \Phi_Y^n \\ \Phi_Z^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -48,96 \\ -3,358 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$|\Phi_n| = 3,358 \cdot 10^3.$$

Сила инерции относительно центра масс, кг·м<sup>2</sup>:

$$I_c = A^T I A, \quad (8)$$

где  $A^T$  – транспонированная матрица;

$I$  – матрица моментов инерции подвижного сектора в системе центра его вращения;

$A$  – матрица направляющих косинусов для сложного поворота.

$$I_C = \begin{pmatrix} I_{xx}^c & I_{xy}^c & I_{xz}^c \\ I_{yx}^c & I_{yy}^c & I_{yz}^c \\ I_{zx}^c & I_{zy}^c & I_{zz}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 29.041 & 1.1 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 1.1 \cdot 10^{-4} & 28.469 & -1.303 \\ 0 & -1.303 & 34.418 \end{pmatrix},$$

$$|I_c| = 2,841 \cdot 10^4.$$

Момент силы инерции относительно центра масс в режиме разгона фрезы, Н·м:

$$\vec{M}_C^\Phi = \vec{I}_C \cdot \vec{\varepsilon} = \begin{pmatrix} I_{xx}^c & I_{xy}^c & I_{xz}^c \\ I_{yx}^c & I_{yy}^c & I_{yz}^c \\ I_{zx}^c & I_{zy}^c & I_{zz}^c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \varepsilon_z \end{pmatrix}, \quad M_C^\Phi = \begin{pmatrix} M_{C_x}^\Phi \\ M_{C_y}^\Phi \\ M_{C_z}^\Phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 580.829 \\ 2.2 \cdot 10^{-3} \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$|M_C^\Phi| = 580,829.$$

#### Анализ полученных данных

Анализ полученных данных выполним на основании графиков, полученных при расчете матриц в программном пакете Mathcad путем изменения углов  $\theta$  (относительно оси X – угол резания) и  $\psi$  (относительно оси Z – угол в плане) в диапазоне 0–9° (угол  $\varphi = 0 = \text{const}$ ). На рисунке 6 приведён график зависимости  $M_{\text{сф.х}}$  от углов  $\psi$  и  $\theta$ .

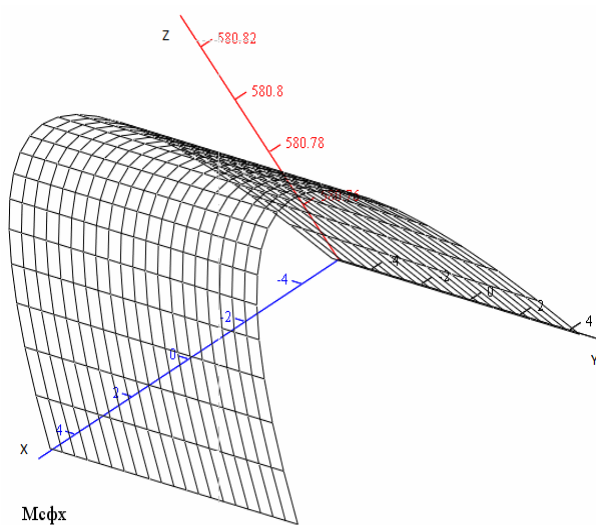


Рис. 6. График зависимости  $M_{\text{сф.х}}$  (Н·м) от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град)

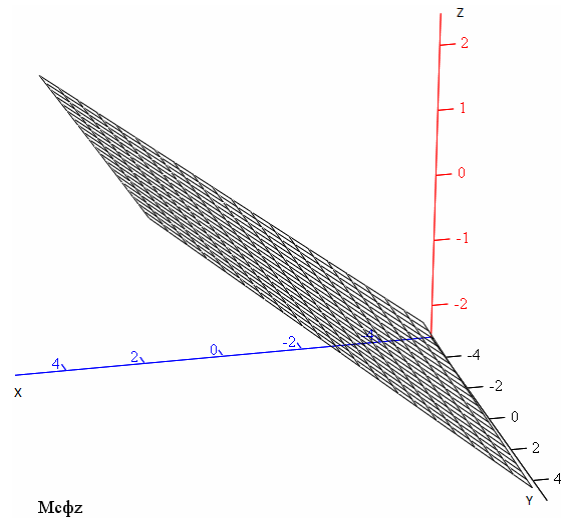


Рис. 7. График зависимости  $M_{\text{сф.з}}$  (Н·м) от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град)

Максимальное значение момента силы инерции (ось Z) относительно оси X достигается при угле  $\theta = 0$ .

На рисунке 7 приведён график зависимости  $M_{сф. z}$  от углов  $\psi$  и  $\theta$ . Момент силы инерции  $M_{сф. z}$  (ось Z) увеличивается с увеличением угла  $\psi$  (ось X) и не зависит от изменения угла  $\theta$  (ось Y).

На рисунке 8 приведён график зависимости  $M_{сф. y}$  (Н·м) от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град). Момент силы инерции  $M_{сф. y}$  (ось Z) увеличивается с ростом угла  $\theta$  (ось X) и практически не зависит от изменения угла  $\psi$  (ось Y).

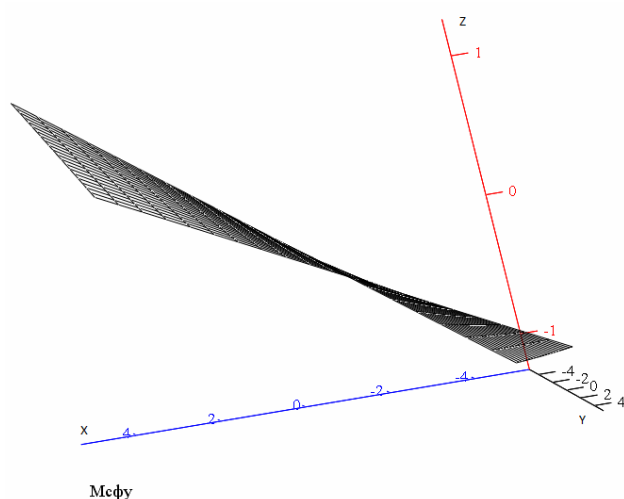


Рис. 8. График зависимости  $M_{сф. y}$  (Н·м) от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град)

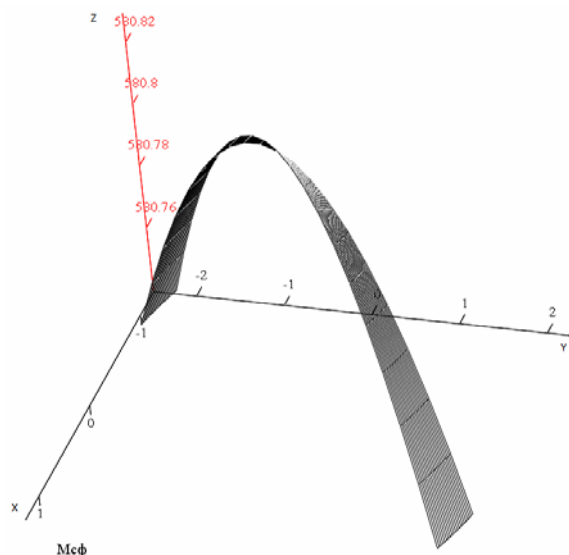


Рис. 9. График зависимости общего момента силы инерции от углов  $\psi$  и  $\theta$  (град)

На рисунке 9 приведён график зависимости общего момента силы инерции от углов  $\psi$  и  $\theta$ . Как видно из графика, максимальный общий момент силы инерции (ось Z) достигается тогда, когда угол в плане  $\psi$  (ось Y) и угол резания  $\theta$  (ось X) равны 0.

*Выводы:*

1. С целью более достоверного решения задачи по устойчивой работе ножа, жестко зафиксированного на подвижном держателе, следует рассматривать пространственную схему распределения сил.

2. Для определения сил, действующих на сегмент инструмента, разработана 3D-модель и для расчёта сил введены углы Эйлера.

3. Проведены расчёты и определены составляющие силы инерции, действующие на нож и подвижный элемент фрезы (держатель ножа) с учётом углов Эйлера.

4. Анализируя графики, представленные программой Mathcad, можно сделать вывод о том, что момент силы инерции меняет своё значение при изменении углов в диапазоне от  $-4$  до  $4$  градусов. Максимальный момент силы инерции достигается при углах, равных  $0^\circ$  и  $580,829$  Н·м.

5. В дальнейших исследованиях следует учесть при расчетах касательную  $F_x$  и радиальную  $F_R$ , составляющие силы резания в процессе фрезерования материала и сделать анализ работы подвижного элемента фрезы.



**Библиографический список**

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 деревообраб. пром-сть. С. 175–177.
2. Гришкевич А.А., Вихренко В.С., Гаранин В.Н. Особенности расчета сопрягаемых поверхностей рефлекторного фрезерного инструмента // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды X Междун. Евразийск. симпозиума. Екатеринбург, 2015. С. 149–156.
3. Адаптивный фрезерный инструмент и условие устойчивой его работы / А.А. Гришкевич, В.С. Вихренко, В.Н. Гаранин, А.Ф. Аникеенко // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 275–280.
4. Мусхелишвили Н.И. Курс аналитической геометрии. М.: МГУ, 1967. 655 с.

**УДК 674.055**

**А.А. Гришкевич, О.И. Костюк**

(А.А. Grishkevich, O.I. Kostyuk)

(БГТУ, г. Минск, РБ)

E-mail для связи с авторами: dosy@belstu.by

**РЕЖИМЫ ШЛИФОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ,  
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ  
И ПЕРИОД СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА**

**THE MODES OF GRINDING OF PINE WOOD,  
WHICH DETERMINE THE SURFACE QUALITY AND TOOL LIFE**

*В данной статье определялось допустимое качество поверхности древесины сосны по параметрам шероховатости поверхности ( $Rm_{max}$  – среднее арифметическое высот отдельных наибольших неровностей на поверхности,  $R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам при отсчете от базовой линии,  $R_a$  – среднее арифметическое абсолютных отклонений профиля) от различных режимов обработки (скорости подачи, зернистости шлифовальной шкурки, припуска на обработку). Было определено, по каким варьируемым режимам нельзя использовать шлифовальный дереворежущий инструмент, т. к. на шлифовальной ленте появлялись прижоги в виде темно-коричневых, черных пятен, что в свою очередь могло привести к неработоспособности шлифовального инструмента и снижению производительности в целом.*

*This article was defined as the acceptable wood surface of pine in the parameters of surface roughness ( $Rm_{max}$  – the arithmetic mean of heights of individual the greatest irregularities on the surface,  $R_z$  – height of roughness profile on ten points if you count from the baseline,  $R_a$  – the arithmetic average of the absolute deviations of the profile) from various modes of processing (allowance for processing, feed speed, grit of the sandpaper). It was determined how variable modes, you cannot use the grinding-cutting tool, as on the sanding belt*