

*Агрегатные фрезерные головки
с пересекающимися траекториями режущих ножей*

к.т.н. П.В.Кушников, к.т.н. Ю.Я.Тарасевич, А.А.Нешта // СумГУ, г.Сумы, Украина

Учредитель ООО «СТИН»

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЕ СТАНКИ

**Изнаиров Б. М.,
Васин А. Н.,
Изнаиров О. Б.**

Математическая модель взаимодействия рабочих элементов упорных подшипников качения 2

МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

**Кушников П. В.,
Тарасевич Ю. Я.,
Нешта А. А.**

Агрегатные фрезерные головки с пересекающимися траекториями режущих ножей 5

ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**Пилюшина Г. А.,
Пыриков П. Г.,
Рухлядко А. С.**

Повышение работоспособности рабочих органов оборудования и режущих инструментов для обработки неметаллических материалов 9

Абрамов Ф. Н.

Экспериментальное исследование погрешностей базирования цилиндрических заготовок одной шейкой на широкой призме 14

Назарьева В. А.

Алгоритмическая рационализация операций абразивной обработки 19

**Кане М. М.,
Иванов Б. В.,
Загорская Н. Б.**

Влияние различных факторов на стойкость червячных фрез при зубонарезании цилиндрических шестерен 21

**Васин А. Н.,
Изнаиров Б. М.,
Мукатова Г. Х.**

Вероятностный анализ условий взаимодействия деталей винтовых передач. 25

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Гусев В. Г.,
Андрианов С. Б.**

Моделирование давления смазочно-охлаждающей жидкости при шлифовании инструментом с радиально-подвижными абразивными сегментами. 29

Лукьянов К. Ю.

Повышение эффективности отделочной обработки деталей из алюминия и его сплавов 33

МЕНЕДЖМЕНТ И МАРКЕТИНГ

**Мухин А. В.,
Островский Ю. А.,
Петров В. В.**

Метод оптимального распределения ресурсов при решении производственных задач в условиях экономической неопределенности. 35

Тогда

$$f(h_i) = f(h) \sum_{c=i}^k C_k^c (c[F(h)]^{c-1} [1 - F(h)]^{k-c} - (k-c)[F(h)]^c [1 - F(h)]^{k-c-1}).$$

Преобразуем это выражение. Определим, например,

$$\begin{aligned} & \sum_{c=(k-1)}^k C_k^c (c[F(h)]^{c-1} [1 - F(h)]^{k-c} - (k-c) \times \\ & \times [F(h)]^c [1 - F(h)]^{k-c-1}) = \frac{k!}{(k-1)!} \{(k-1) \times \\ & \times [F(h)]^{k-2} [1 - F(h)] - [F(h)]^{k-1}\} - k[F(h)]^{k-1} = \\ & = C_k^{k-1} [F(h)]^{k-2} [1 - F(h)]. \end{aligned}$$

Подобным образом найдем значение суммы для любого i . После этого, суммируя по переменной « c »

во всем интервале ее изменений (от i до k) и учитывая основное свойство сочетаний

$$C_k^{i-1} = k C_{k-1}^{i-1},$$

получим

$$f(h_i) = k C_{k-1}^{i-1} f(h) [F(h)]^{i-1} [1 - F(h)]^{k-i}. \quad (16)$$

Используя выражение (16), несложно определить основные характеристики случайной величины зазора (математическое ожидание и дисперсию):

$$h_{i0} = \int_0^{\infty} h \varphi_i(h) dh = k C_{k-1}^{i-1} \int_0^{\infty} h f(h) [F(h)]^{i-1} \times [1 - F(h)]^{k-i} dh;$$

$$\sigma_i^2 = k C_{k-1}^{i-1} \int_0^{\infty} h^2 f(h) [F(h)]^{i-1} [1 - F(h)]^{k-i} dh - [M(h_i)]^2.$$

МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Агрегатные фрезерные головки с пересекающимися траекториями режущих ножей

к.т.н. П. В. Кушниров, к.т.н. Ю. Я. Тарасевич, А. А. Нешта // СумГТУ, г. Сумы, Украина

Повышение производительности и качества обработки плоских поверхностей фрезерованием является важной задачей металлообрабатывающего производства.

Существуют объективные трудности обработки торцовыми фрезами плоских поверхностей шириной более 400 мм [1]. Прежде всего, эти трудности связаны с процессом эксплуатации торцовых фрез (установка, снятие, настройка режущих элементов) вследствие их значительных размеров и массы.

Некоторые разработчики идут по пути снижения массы снимаемых частей режущего инструмента. Например, шведская фирма Sandvik Coromant разработала фрезы Auto в исполнении Cap или AF/FS, предусматривающие постоянное крепление на шпинделе станка только опорного корпуса фрезы. Тем самым масса, с которой приходится работать при установке инструмента, уменьшается до массы

съемной фрезерной чашки, что составляет примерно третью часть общей массы.

Другой путь — разработка разнообразных по конструкции агрегатных фрезерных головок (АФГ) с целью использовать различные траектории относительного перемещения инструмента и заготовки (например, многопроходное маятниковое движение, движение по ломаной линии, движение по спирали Архимеда и т. д.). Это позволяет обеспечивать обработку широких плоских поверхностей, но значительно усложняет процесс подготовки и реализации указанных траекторий перемещений.

Для осуществления однопроходного торцового фрезерования предложены также АФГ на различных опорах (качения, гидростатических) [2—4]. Однако при этом требуется применение фрез больших диаметров.

Один из вариантов решения проблемы обработки крупногабаритных плоскостей — использование конструкций специальных АФГ с независимым приводом, содержащих как минимум две торцовые фрезы с пересекающимися траекториями движения режущих элементов [5] (рис. 1).

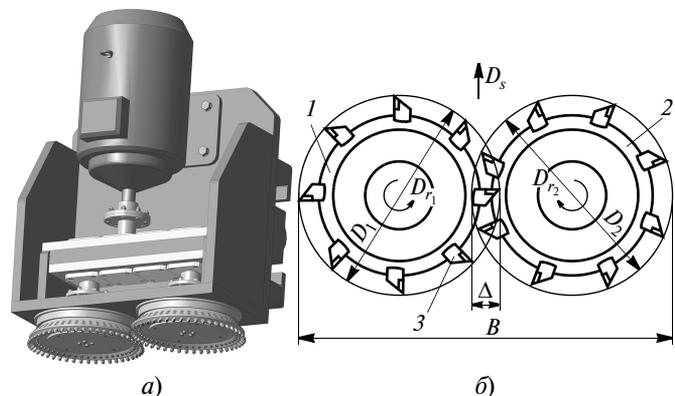


Рис. 1. Общий вид агрегатной фрезерной головки (АФГ) с двумя торцовыми фрезами (3D-модель) (а) и принцип пересечения траекторий режущих ножей в такой АФГ (б): 1 и 2 — право- и леворежущая торцовые фрезы; 3 — режущий нож; D_1 и D_2 — диаметры фрез; B — ширина фрезерования; Δ — величина перекрытия траекторий вращения режущих ножей фрез; D_s — направление рабочей подачи; D_{r1} и D_{r2} — направления вращения шпинделей

Такое техническое решение позволяет получать при обработке непрерывную плоскую поверхность за один проход, при этом диаметры используемых торцовых фрез меньше ширины обработки.

Данную АФГ можно устанавливать, например, на продольно-фрезерных станках с возможностью перемещения вдоль направляющих, что позволяет при необходимости использовать при работе и штатные станочные шпиндели (вертикальный, горизонтальные).

Торцовые фрезы 1 и 2 размещены таким образом, чтобы оси шпинделей, на которых фрезы установлены, находились в одной плоскости, перпендикулярной к направлению рабочей подачи D_s . При этом режущие ножи 3 одной фрезы располагаются между ножами другой. Вращение от независимого привода передается через зубчатые передачи на шпиндели, вращающиеся в направлениях D_{r1} и D_{r2} . При сообщении АФГ поступательного перемещения с подачей D_s относительно обрабатываемой заготовки будет осуществляться фрезерование с общей шириной B .

Величина B находится из выражения (см. рис. 1): $B = D_1 + D_2 - \Delta$, где D_1 , D_2 — диаметры торцовых фрез, Δ — величина перекрытия траекторий вращения режущих ножей фрез.

При этом одну из торцовых фрез выполняют праворежущей (D_1), а другую — леворежущей (D_2). Наличие зубчатого соединения между шпинделями двух соседних фрез дает возможность выдерживать относительное расположение ножей этих фрез и не допускает касания ножей друг друга.

Например, для АФГ с двумя торцовыми фрезами $\varnothing 315$ мм, оснащенными ножами из сверхтвердых материалов, рекомендуемая фактическая ширина обрабатываемых заготовок составляет 420–500 мм. Приведенный интервал значений указан не только с учетом величины перекрытия $\Delta = 1\div 5$ мм траекторий вращения режущих ножей фрез, но и с учетом общепринятых рекомендаций, что ширина обрабатываемых заготовок обычно составляет в 1,25–1,5 диаметра торцовой фрезы.

Число фрез, расположенных в конструкции АФГ, может быть равным или большим двух (рис. 2, а). Фактором, ограничивающим использование при этом большого числа фрез, является усложнение конструкции АФГ и необходимость увеличения мощности привода главного движения.

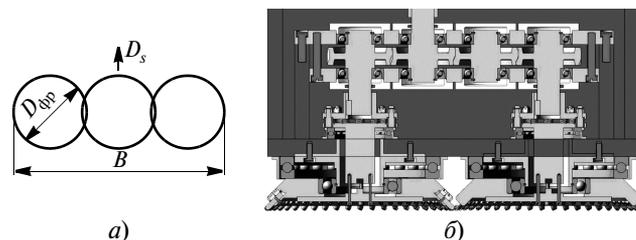


Рис. 2. Схема получения непрерывной плоской поверхности общей шириной B с помощью АФГ, содержащей три фрезы диаметром $D_{фр}$, при подаче D_s (а) и вариант конструктивного выполнения шпиндельных узлов АФГ (разрез) (3D-модель) (б)

Один из вариантов конструктивного выполнения шпиндельных узлов АФГ представлен на рис. 2, б. На шпиндельной плите выполнено базовое отверстие, в котором расположена центрирующая втулка. Она служит для базирования в радиальном направлении упорного и радиального подшипников, на которые устанавливают корпус фрезы. Упорные подшипники в осевом направлении базируются непосредственно по шпиндельной плите, имеющей параллельные опорные поверхности. Вра-

шение передается от полумуфты торцовой фрезе через крышку со шпонкой, жестко соединенную с корпусом фрезы. Силовое замыкание упорных подшипников осуществляют стягиванием винтов, крепящих крышку к полумуфте, при этом упорный подшипник большего диаметра поджимают торцом фрезы. От пыли и стружки подшипники защищают с помощью кожухов.

Указанное конструктивное выполнение АФГ позволяет иметь высокую жесткость шпиндельного узла при его минимальных осевых размерах. Конструкции торцовых фрез, используемых в АФГ, могут быть различными, например, с режущими ножами в виде цилиндрических режущих вставок [6]. Фреза содержит 48 режущих вставок, установку и настройку которых можно осуществлять либо по эталонному жесткому упору, либо с помощью индикаторных приборов. Более предпочтительным является использование режущих ножей с непереключаемыми режущими пластинами, которые не требуют дополнительной настройки величины осевого вылета.

Рассматриваемые конструкции АФГ наиболее эффективны при условии высокой жесткости технологической системы и при стабильной работе всей системы в динамике.

Для анализа динамических характеристик АФГ разработана математическая модель фрезерного узла и построена траектория движения его центра масс.

При описании динамики фрезерной головки приняли наиболее неблагоприятные условия резания, при которых фреза врезается в заготовку или выходит из зоны резания, и возникающие при этом силы менее уравновешены относительно оси вращения.

Под действием этих сил инструмент может совершать осевые, радиальные и крутильные колебания, частота которых зависит от частоты вращения шпинделя, неравномерности распределения припуска заготовки и других факторов.

В случае совпадения частот вынужденных колебаний подвижных масс с собственными в системе возникают незатухающие колебания, которые отрицательно влияют на качество и точность обработанной поверхности, на стойкость инструмента.

В общем случае фрезерная головка является системой с распределенными параметрами, аналитическое описание которой с учетом всех существенных факторов практически невозможно, поэтому ее анализ проведен на более упрощенной модели.

Так, одномассовая модель фрезерной головки с приведенной массой и жесткостью адекватно описывает колебания на резонансных частотах. Хотя такая упрощенная модель, за исключением частных случаев, не соответствует реальной системе фрезерной головки, она сохраняет ее важнейшие динамические свойства и дает возможность оценить влияние отдельных параметров на динамику.

Одномассовая динамическая модель фрезерного узла (рис. 3, а) может быть представлена в виде твердого тела с приведенной массой $\Sigma m_1 = m$ (суммарная масса вала-шестерни, фрезы, двух соединенных муфт), ориентированного в плоскости XOY жесткостями C_x, C_y, C_o и демпфирующими характеристиками h_x, h_y, h_o , приведенными к центру жесткости (точке O). Центр масс фрезерного узла совпадает с осью фрезы и вала-шестерни. В этой модели главные оси жесткости совпадают с осями O_1X_1 и O_1Y_1 , а положение центра жесткости (точка O) определяют координаты $x_1 = 0; y_1 = 0$.

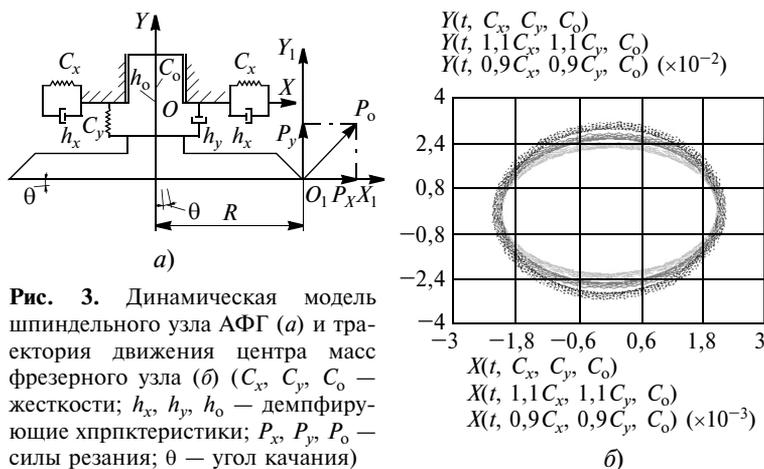


Рис. 3. Динамическая модель шпиндельного узла АФГ (а) и траектория движения центра масс фрезерного узла (б) (C_x, C_y, C_o — жесткости; h_x, h_y, h_o — демпфирующие характеристики; P_x, P_y, P_o — силы резания; θ — угол качения)

При возникновении колебаний точка O центра масс фрезерного узла будет совершать независимые колебательные движения: радиальные по координатам X и Y и крутильные относительно центра жесткости (точка O). Уравнения этих колебаний имеют следующий вид: $m\ddot{X}_1 + h_x\dot{X}_1 + C_xX = P_x$; $m\ddot{Y}_1 + h_y\dot{Y}_1 + C_yY = P_y$; $J\ddot{\theta}_1 + h\dot{\theta}_1 + C_o\theta = P_o$, где P_x, P_y, P_o — приращения сил резания, вызванные

изменением толщины срезаемого слоя металла за один цикл колебаний; θ — угол качания; J — момент инерции фрезы, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Значение жесткости $C_x = 82 \text{ кН}$ и $C_y = 11 \text{ кН}$ определены с помощью программного комплекса АРМ WinMachine; крутильная жесткость — по зависимости $C_o = C_y R^2 = 103 \text{ кН}$. Значения характеристик демпфирования находим по формулам: $h_x = \frac{\Psi}{2\pi} \sqrt{m C_x}$; $h_y = \frac{\Psi}{2\pi} \sqrt{m C_y}$; $h_o = \frac{\Psi}{2\pi} \sqrt{m C_o}$, где $\Psi = 0,8 \div 1$ — коэффициент рассеивания энергии; принимаем $\Psi = 0,9$.

Решение уравнений колебательных движений принимаем в виде уравнений гармонических колебаний.

Значения амплитуд X_{a1} , Y_{a1} , θ_{a1} и фаз φ_{x1} , φ_{y1} , $\varphi_{\theta 1}$ определяем по формулам:

$$X_{a1} = \frac{P_o}{m \sqrt{(C_x - m \omega^2)^2 + h_x^2 \omega^2}}; \quad \varphi_{x1} = \arctg \frac{h_x \omega}{C_x - m \omega^2};$$

$$Y_{a1} = \frac{P_o}{m \sqrt{(C_y - m \omega^2)^2 + h_y^2 \omega^2}}; \quad \varphi_{y1} = \arctg \frac{h_y \omega}{C_y - m \omega^2};$$

$$\theta_{a1} = \frac{P_o l}{l \sqrt{(C_o - \omega^2 J)^2 + \omega^2 h_o^2}}; \quad \varphi_{\theta} = \arctg \frac{h_o \omega}{C_o - J \omega^2},$$

где $\omega = \pi n / 30 = 150 \text{ рад/с}$ — рабочая частота вращения, определяемая с учетом частоты вращения фрезы ($n = 1440 \text{ об/мин}$).

Таким образом, траектория движения центра масс фрезерного узла (точка O) под действием возмущающей силы P_o будет формироваться тремя независимыми переменными: двумя линейными $X_1 = X_{a1} \cos(\omega t + \varphi_{x1})$, $Y_1 = Y_{a1} \cos(\omega t + \varphi_{y1})$ и одной угловой $\theta_1 = \theta_{a1} \cos(\omega t + \varphi_{\theta 1})$.

Ввиду малости угла θ криволинейное движение по дуге можно рассматривать как прямолинейное $U = \theta_{a1} l \cos(\omega t + \varphi_{\theta 1})$, осуществляемое вдоль оси OU , перпендикулярной к плечу качания l . Спроецировав колебания U на оси OY и OX и сложив их с соответствующими линейными перемещениями Y_a и X_a , после преобразований получим: $X = X_a \cos(\omega t + \varphi_x)$, $Y = Y_a \cos(\omega t + \varphi_y)$.

При этом новые амплитуды X_a , Y_a и фазы φ_x , φ_y определяют по следующим зависимостям:

$$X_a = \sqrt{(X_{a1})^2 + (\theta_{a1} l \cos \beta)^2 + 2 Z_{a1} \theta_{a1} l \cos \beta \cos(\varphi_{\theta 1} - \varphi_{x1})};$$

$$Y_a = \sqrt{(Y_{a1})^2 + (\theta_{a1} l \sin \beta)^2 + 2 Y_{a1} \theta_{a1} l \sin \beta \cos(\varphi_{\theta 1} - \varphi_{y1})};$$

$$\varphi_x = \varphi_{x1} + \arctg \frac{\sin(\varphi_{\theta 1} - \varphi_{x1})}{X_{a1} / [\theta_{a1} l \cos \beta + \cos(\varphi_{\theta 1} - \varphi_{x1})]};$$

$$\varphi_y = \varphi_{y1} + \arctg \frac{\sin(\varphi_{\theta 1} - \varphi_{y1})}{X_{a1} / [\theta_{a1} l \sin \beta + \cos(\varphi_{\theta 1} - \varphi_{y1})]}.$$

При сложении амплитуд колебаний Y и X вершина режущего зуба фрезы опишет эллиптическую траекторию, уравнение которой имеет вид:

$$\frac{X^2}{X_a^2} + \frac{Y^2}{Y_a^2} - 2 \frac{XY}{X_a Y_a} \cos(\varphi_x - \varphi_y) = \sin(\varphi_x - \varphi_y).$$

Расчет траектории движения центра масс фрезерного узла произведен с помощью системы MathCad. На рис. 3, б показана полученная траектория движения центра масс фрезерного узла.

Из графика видно, что центр масс фрезерного узла для приведенных выше жесткостных и демпфирующих характеристик перемещается в интервале от $-2,2 \times 10^{-3}$ до $2,2 \times 10^{-3} \text{ мм}$ в плоскости XU . Согласно проведенным исследованиям изменение жесткостей в плоскости подачи даже на 10 % приводит к изменению главной полуоси эллипса траектории движения вдоль оси Y , в то время как изменение (до 2 %) второй полуоси можно считать несущественным. Таким образом, правильным подбором жесткостных характеристик фрезерного узла можно обеспечить стабильную работу инструмента, размерную и геометрическую точность обрабатываемой поверхности детали.

Также проведен анализ жесткости системы «шпиндель—фреза» с помощью универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS.

Конечно-элементная модель фрезерного узла представляет собой часть шпиндельной плиты с установленной на ней фрезой, валом-шестерней и двумя муфтами. Часть шпиндельной плиты неподвижно закрепляют и ограничивают в перемещении относительно всех осей координат, а к торцу муфты накладывают ограничения в перемещении, ос-

тавляя возможность шпинделю и муфтам вращаться относительно оси Z.

Для определения деформации элементов фрезерного узла смоделирован процесс резания с учетом действия следующих сил: а) перпендикулярно к торцам режущих пластин прикладываем тангенциальную составляющую силы резания $P_z = 60$ Н; б) так как в процессе обработки детали в металл врезаются не все режущие вставки, а половина из них, поэтому прикладываем силу $P_z = 60$ Н к каждой из них; в) к торцу упорного подшипника (который воспринимает только осевую нагрузку) прикладываем силу $P = 1060$ Н, что соответствует действию на него суммарной силы резания и силы затяжки винтов, с помощью которых фрезу крепят к муфте шпинделя; г) на радиальный шарикоподшипник (который воспринимает только радиальную нагрузку) действует радиальная составляющая силы $P_y = 840$ Н резания 24 режущими вставками.

Учитывая то, что деформации ($\delta = 1\div 5$ мкм) от воздействия приложенных нагрузок в процессе резания минимальны, можно утверждать, что применяемые подшипники качения обеспечивают необходимую жесткость фрезерного узла. Поэтому рассматриваемая система фрезерного узла позволяет получать достаточно высокие технологические параметры обработки плоских поверхностей как по точности, так и по качеству фрезерования.

Выводы

1. АФГ с пересекающимися траекториями режущих ножей позволяют производить торцовое фрезерование широких плоских поверхностей, обеспечивая непрерывную плоскую поверхность обработки.

2. Результаты проведенных исследований позволили оценить влияние основных параметров фрезерного узла и его динамических характеристик на прогнозируемое качество обработки. Подтверждено, что АФГ с базированием фрезы в осевом направлении по упорному подшипнику качения позволяют обеспечивать достаточную для качественной обработки жесткость данного участка технологической системы.

Список литературы

1. Таурит Г. Э. Обработка крупногабаритных деталей.— Киев: Техника, 1981. — 208 с.
2. Кушников П. В., Захаров Н. В. Агрегатные головки для фрезерования широких плоских поверхностей // СТИН. — 1996. — № 2. — С. 29—31.
3. Кушников П. В. Обработка плоскостей торцовой фрезой: новые варианты // Оборудование и инструмент для профессионалов. — 2004. — № 4 (51). — С. 4—5.
4. Кушников П. В., Акилов А. И., Фесенко А. И. Исследование динамических характеристик агрегатной фрезерной головки // Вестник СумГУ. Серия «Технические науки». — Сумы: СумГУ, 2009. — № 4. — С. 141—145.
5. Пат. 29842 Украина, МПК В 23 С 3/00. Агрегатная фрезерная головка.
6. Пат. 60129 Украина, МПК В 23 С 5/06. Торцовая фреза.

ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Повышение работоспособности рабочих органов оборудования и режущих инструментов для обработки неметаллических материалов

к.т.н. Г. А. Пилюшина, д.т.н. П. Г. Пыриков, А. С. Рухлядко // БГИТА, г. Брянск

Состояние вопроса и постановка задач. Расширение спектра обрабатываемых конструкционных материалов в машиностроении, дерево- и бумагообрабатывающих отраслях, а также возрастающее использование в отечественной промышленности специализированного импортного оборудования позволяет отметить ограничение возможностей

применения серийно выпускаемых режущих и деформирующих инструментов, что связано с необходимостью поиска путей существенного повышения уровня их эксплуатационных свойств.

В частности, технологическая специфика обработки широкого спектра неметаллических материалов (различных пластиков, технического бумаги и

Список литературы

1. Таурит, Г.Э. Обработка крупногабаритных деталей [Текст] / Г.Э.Таурит.– К.: Техніка, 1981.–208 с.
2. Кушников, П. В. Агрегатные головки для фрезерования широких плоских поверхностей [Текст] / П. В. Кушников, Н. В. Захаров // СТИН.– 1996.– № 2 . – С. 29-31.
3. Кушников, П.В. Обработка плоскостей торцовой фрезой: новые варианты [Текст] / П.В.Кушников // Оборудование и инструмент для профессионалов. – Харьков, 2004. – № 4 (51). – С. 4–5.
4. Кушников, П.В. Исследование динамических характеристик агрегатной фрезерной головки [Текст] / П.В.Кушников, А.И.Акилов, А.И.Фесенко // Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки». – 2009. – № 4. – С. 141-145.
5. Пат. 29842 U Україна, МПК6 В23С 3/00. Агрегатна фрезерна головка / П.В.Кушніров, О.О.Сергієнко; заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. – №u200711636; заявл. 22. 10. 2007; опубл. 25. 01. 2008, бюл. №2.
6. Пат. 60129 U Україна, МПК (2006.01) В23С 5/06. Торцева фреза/ П.В.Кушніров, А.О.Нешта, Ю.Я.Тарасевич; заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т.– №u201014175; заявл. 29.11.2010; опубл. 10.06.2011, бюл. №11.

Кушников, П.В. Агрегатные фрезерные головки с пересекающимися траекториями режущих ножей [Текст] / П.В.Кушников, Ю.Я.Тарасевич, А.А.Нешта // СТИН. – 2013. – №2.– С. 5–9.