

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ФРЕЗЫ С ПОДВИЖНЫМ СЕКТОРОМ-НОЖЕДЕРЖАТЕЛЕМ НА РЕЖИМЕ РАЗГОНА

Бобылев П.С., д.ф.-м.н. Вихренко В.С., к.ф.-м.н. Ласовский Р.Н.

Белорусский государственный технологический университет, Минск

Введение. Фрезерование широко используется в деревообработке [1–3]. В данной работе рассматривается конструкция сборной фрезы [4] для продольно-фрезерных, фрезерных и карусельно-фрезерных станков, обрабатывающих центров и автоматических линий, отличительной особенностью которой является наличие подвижных относительно корпуса фрезы секторов, несущих режущие ножи. Эта фреза предназначена для цилиндрического, профильного и фасонного фрезерования древесины всех пород и под разными углами резания, а также кромок облицованных и не облицованных древесностружечных, цементно-стружечных плит и плит MDF и кромок фанеры.

Фреза (рис. 1) состоит из корпуса, в котором расточены два, три или четыре паза типа “ласточкин хвост”. В пазы корпуса устанавливаются поворотные быстросъемные секторы-ножедержатели. В качестве режущих элементов используются ножи, изготовленные из инструментальной стали с твердосплавной напайкой, или неперетачиваемые двухлезвийные твердосплавные пластинки. Для настройки резца на требуемый угол резания (изменение режима резания, инструментального материала ножа и обрабатываемого материала) сектор-ножедержатель поворачивают и фиксируют в заданном положении винтами, так что сектор может быть расположен относительно корпуса несимметрично.

Для сокращения затрат времени на замену затупившихся режущих элементов и переналадку углов резания в соответствии с условиями эксплуатации фрезы секторы-ножедержатели должны фиксироваться в корпусе минимальным количеством крепежных элементов. Наиболее неблагоприятные условия возникают в процессах разгона и остановки фрезы, когда силы инерции стремятся повернуть подвижный сектор относительно корпуса фрезы при, возможно, недостаточно больших силах трения. Задача состоит в разработке средств, обеспечивающих безопасный разгон фрезы. Ранее [5] была рассмотрена фреза при симметричном расположении подвижного сектора. Ниже рассмотрение обобщается на его несимметричное расположение.

Начальный этап разгона фрезы. Начальный этап разгона характеризуется малыми значениями центробежных сил инерции, и поэтому методика расчета усилий на этом этапе существенно отличается от более позднего этапа, когда преобладающими становятся центробежные силы инерции.

Выполним анализ движения фрезы на начальном этапе разгона. Предположим, что в соединении сектора-ножедержателя с корпусом фрезы существует небольшой зазор. Тогда в начале процесса разгона фрезы, когда центробежная сила инерции не велика, сектор касается фрезы в двух противоположных точках А и В (рис. 1), и действие касательных сил инерции приводит к появлению нормальных реакций N_A и N_B в точках А и В, причем значения обеих реакций положительны, а также сил трения $F_{тр}^A$ и $F_{тр}^B$. При этом в т. В сектор прижимается к корпусу фрезы по цилиндрической поверхности, тогда как в т. А – по конической, и в результате действия расклинивающих усилий в т. А необходимо учитывать приведенный коэффициент трения, определяемый соотношением

$$f_{пр} = f / \sin 20^\circ \cong 3f. \quad (1)$$

Задача состоит в том, чтобы выяснить, достаточно ли сил трения для обеспечения относительного равновесия сектора при ускоренном движении фрезы в процессе ее разгона или остановки, или рассчитать параметры крепежного устройства.

Задачу решаем на основании принципа Даламбера методом предельного равновесия [6], когда предполагается, что силы трения достигли своих предельных значений, равных произведению коэффициентов трения на нормальные реакции:

$$F_{\text{тр}}^A = 3fN_A, \quad F_{\text{тр}}^B = fN_B. \quad (2)$$

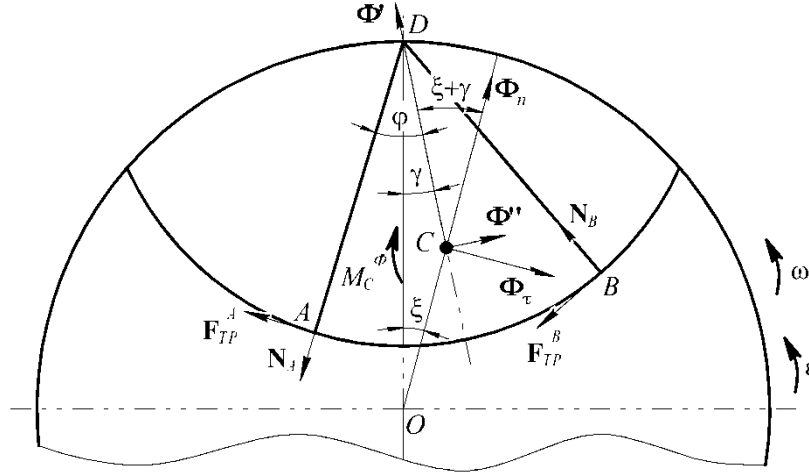


Рис.1. Схема фрезы с подвижным сектором DAB. Радиус корпуса фрезы равен R, подвижного сектора – r. Угол раствора сектора равен 2φ, угол поворота сектора γ отсчитывается против хода часовой стрелки. Фреза вращается против хода часовой стрелки с угловой скоростью ω и угловым ускорением ε.

Нормальная (Φ_n), касательная (Φ_τ) силы инерции и момент сил инерции определяются выражениями:

$$M_C^\phi = \left(\frac{1}{2}mr^2 - mDC^2 \right) \varepsilon = \left(\frac{1}{2}mr^2 - m\zeta^2r^2 \right) \varepsilon = (0.5 - \zeta^2)mr^2\varepsilon, \quad (3)$$

$$\Phi_n = m\omega^2 OC = m\omega^2 rp, \quad \Phi_\tau = m\varepsilon OC = m\varepsilon rp, \quad (4)$$

где

$$DC = r\zeta, \quad \zeta = \frac{2 \sin \varphi}{3 \varphi}, \quad OC = pr, \quad (5)$$

$$p = \sqrt{\frac{R^2}{r^2} + \zeta^2 - 2\zeta \cos \varphi}, \quad \xi = \arcsin \left(\frac{\zeta}{p} \sin \gamma \right). \quad (6)$$

Разложим силы инерции на составляющие вдоль оси симметрии (Φ') подвижного сектора и перпендикулярно ей (Φ'')

$$\Phi' = \Phi_n \cos(\xi + \gamma) - \Phi_\tau \sin(\xi + \gamma), \quad (7)$$

$$\Phi'' = \Phi_n \sin(\xi + \gamma) + \Phi_\tau \cos(\xi + \gamma). \quad (8)$$

Составив уравнения моментов сил относительно точек A и B, определим нормальные реакции:

$$N_A = \frac{b1 + d1 \cdot E}{2(\cos \varphi - 3f \sin \varphi) \sin \varphi} mr\omega^2, \quad (9)$$

$$N_B = \frac{b2 - d2 \cdot E}{2(\cos \varphi - f \sin \varphi) \sin \varphi} mr\omega^2, \quad (10)$$

где

$$b1 = 0.5 - \zeta^2 + p[\cos(\varphi + \theta) - \zeta \cos \theta], \quad (11)$$

$$d1 = p[\sin(\varphi + \theta) - \zeta \sin \theta], \quad (12)$$

$$b2 = 0.5 - \zeta^2 + p[\cos(\varphi - \theta) - \zeta \cos \theta], \quad (13)$$

$$d2 = p[\sin(\varphi - \theta) + \zeta \sin \theta], \quad (14)$$

$$E = (\varepsilon / \omega^2) = (1 / \varepsilon t^2). \quad (15)$$

Из уравнения моментов относительно т. D найдем

$$f(N_B + 3N_A) = Fmr\omega^2, \quad (16)$$

где

$$F = \zeta p \sin \theta - (0,5 - \zeta p \cos \theta - \zeta^2)E, \quad (17)$$

причем $F1 = Fmr\omega^2$ представляет собой величину окружного усилия, которое необходимо приложить на дуге АВ, чтобы удержать сектор от поворота относительно корпуса фрезы.

Используя в соотношении (17) выражения (9) и (10) для реакций в точках А и В, и сокращая на $mr\omega^2$, получим

$$f \left(\frac{b2 - d2 \cdot E}{2(\cos \varphi - f \sin \varphi) \sin \varphi} + 3 \frac{b1 + d1 \cdot E}{2(\cos \varphi - 3f \sin \varphi) \sin \varphi} \right) = F. \quad (18)$$

Приводя к общему знаменателю, перепишем это соотношение в виде квадратного уравнения

$$f^2 + 2bf + c = 0. \quad (19)$$

где

$$b = \frac{-8F \sin^2 \varphi - [3b1 + b2 + (3d1 - d2)E]}{6[2F \sin^2 \varphi + b1 + b2 + (d1 - d2)E]} \operatorname{ctg} \varphi, \quad (20)$$

$$c = \frac{2F \cos^2 \varphi}{3[2F \sin^2 \varphi + b1 + b2 + (d1 - d2)E]}. \quad (21)$$

Уравнение (19) позволяет определить минимальное значение коэффициента трения, достаточное для обеспечения относительного динамического равновесия подвижного сектора в корпусе фрезы

$$f_{\min} = -b \pm \sqrt{b^2 - c}. \quad (22)$$

Знак при втором слагаемом правой части следует выбирать в зависимости от знака величины F . При положительном ее значении коэффициент трения должен быть положительным, если корни уравнения (22) имеют разные знаки, либо следует выбрать меньшее значение, если оба корня уравнения положительны. Если значение величины F отрицательно, следует выбрать либо отрицательное значение f_{\min} , либо меньшее по

$$\Phi' - \int_{-\varphi}^{\varphi} (q_0 - q_1 \psi) \cos \psi d\psi - f \int_{-\varphi}^{\varphi} (q_0 - q_1 \psi) \sin \psi d\psi = 0, \quad (26)$$

$$\Phi'' - \int_{-\varphi}^{\varphi} (q_0 - q_1 \psi) \sin \psi d\psi - f \int_{-\varphi}^{\varphi} (q_0 - q_1 \psi) \cos \psi d\psi = 0. \quad (27)$$

Вычисляя интегралы, перепишем эти соотношения в виде

$$\Phi' - 2q_0 \sin \varphi - 2fq_1(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) = 0, \quad (28)$$

$$\Phi'' + 2q_1(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) - 2fq_0 \sin \varphi = 0. \quad (29)$$

Решая полученную систему уравнений, находим характеристики распределенной нагрузки:

$$q_0 = \frac{1}{2} \frac{\Phi' + f\Phi''}{(1+f^2)\sin\varphi},$$

$$q_1 = \frac{1}{2} \frac{f\Phi' - \Phi''}{(1+f^2)(\sin\varphi - \varphi \cos\varphi)}. \quad (30)$$

Подставляя сюда силы инерции согласно уравнениям (7) и (8), получим

$$q_0 = \frac{p[(\cos\theta + f \sin\theta) + (f \cos\theta - \sin\theta) E]}{2(1+f^2)\sin\varphi} mr\omega^2, \quad (31)$$

$$q_1 = \frac{p[(\sin\theta - f \cos\theta) + (\cos\theta + f \sin\theta) E]}{2(1+f^2)(\sin\varphi - \varphi \cos\varphi)} mr\omega^2. \quad (32)$$

Из уравнения моментов относительно точки D найдем:

$$2\varphi q_0 f = -Fmr\omega^2, \quad (33)$$

или с учетом соотношения (31)

$$p[(\cos\theta - E \sin\theta) + (\sin\theta + E \cos\theta) f] F = -(1+f^2) F \sin\varphi. \quad (34)$$

Полученное квадратное уравнение перепишем в виде

$$f^2 - 2b_1 f + c_1 = 0, \quad (35)$$

где

$$b_1 = -\frac{p\varphi(\cos\theta - E \sin\theta)}{2[F \sin\varphi + p\varphi(\sin\theta + E \cos\theta)]} \quad (36)$$

$$c_1 = \frac{F \sin\varphi}{F \sin\varphi + p\varphi(\sin\theta + E \cos\theta)}. \quad (37)$$

Один из корней уравнения (35)

$$f_{1,2} = b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - c_1} \quad (38)$$

определяет минимально допустимое значение коэффициента трения, обеспечивающее относительное динамическое равновесие подвижного сектора. При выборе знака перед вторым слагаемым в выражении (38) следует анализировать знак усилия F и знаки ко-

эффициентов b_1 и c_1 аналогично рассуждениям, изложенным после соотношения (22). Следует ожидать, что требуемое значение коэффициента трения будет не велико, и можно воспользоваться приближенным выражением

$$f_{\min} \cong \frac{c_1}{2b_1} = -\frac{F \sin \varphi}{p\varphi(\cos \theta - E \sin \theta)}. \quad (39)$$

При повороте сектора в противоположную сторону (когда углы γ , ξ и θ отрицательны) также необходим тщательный анализ знаков различных величин для правильного выбора корней уравнений (22) и (38).

Результаты численного анализа и заключение. Выполним числовые расчеты. Номинальный режим работы фрезы устанавливается при $\omega \cong 1250$ рад/с (12 000 об/мин). Тогда при $\varepsilon = 625$ рад/с² время разгона фрезы составит две секунды. Для проверки условий устойчивости относительного равновесия подвижной части фрезы вычисления выполнены в рамках программного пакета MathCAD [7]. Расчеты выполнены для фрезы шириной 0.04 м при $R=0.05$ м, $r=0.03$ м, $\varphi=\pi/4$.

Рассмотрим характеристики движения сектора при его повороте на угол $\gamma=0.1$ против хода часовой стрелки относительно корпуса. Продолжительность начального этапа разгона фрезы составляет $t_1=0,024$ с. На Рис. 3, 4 показана зависимость окружного усилия ($F1(t)=mr\omega^2 F(t)$) от времени на начальном этапе разгона фрезы и в течение всего времени разгона, соответственно.

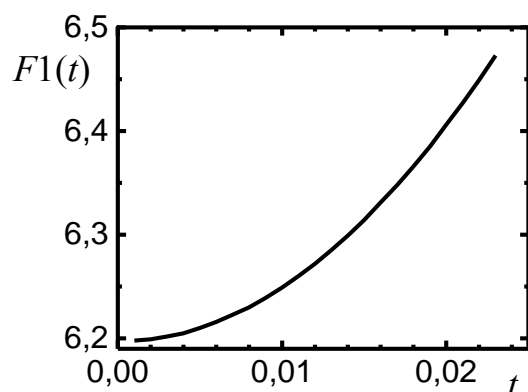


Рис. 3. Зависимость окружного усилия (в Н) от времени (в с) на начальном этапе разгона фрезы

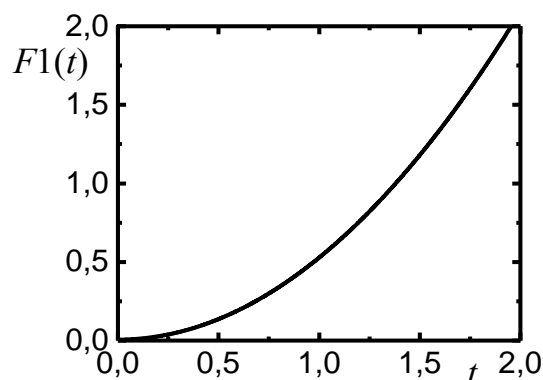


Рис. 4. Зависимость окружного усилия (в кН) от времени (в с) в течение всего времени разгона

На начальном этапе разгона фрезы эта сила составляет всего несколько ньютонов, тогда как к концу этапа разгона эта величина возрастает до нескольких тысяч ньютонов. Это связано с пропорциональностью центробежной силы квадрату угловой скорости.

На Рис. 5 представлены минимально допускаемые коэффициенты трения на начальном этапе, определенные из решения квадратного уравнения (22) (f_{m1}) и по приближенной зависимости (23) (f_{m11}). На начальном этапе разгона значение коэффициента трения примерно равен 0,17, что несколько больше его значения для стали по стали (примерно 0.12–0.15). Однако при этом величина сдвигающей силы $F1$ составляет несколько ньютонов. Поэтому фрезу целесообразно снабдить каким-либо фиксирующим устройством, например, винтом М4, достаточным для компенсации возникающего окружного усилия.

На заключительном этапе разгона фрезы результаты расчета справедливы при выполнении условия $q(\psi) \geq 0$. В противном случае отсутствует контакт по всей цилиндрической поверхности подвижного сектора. Для рассматриваемого случая отмеченное условие

выполняется для $t > 0.06$ с. При $t = 0.06$ с окружное усилие составляет величину около 8 Н, так что до этого времени все сказанное выше о фиксирующем устройстве остается справедливым, и можно не выполнять уточненный расчет. Проанализируем зависимость требуемого значения коэффициента трения, начиная с момента времени $t = 0.06$ с, показанную на рис. 6 ($fm2$ или $fm21$), определенную соответственно по точному решению (38) или приближенной зависимости (39).

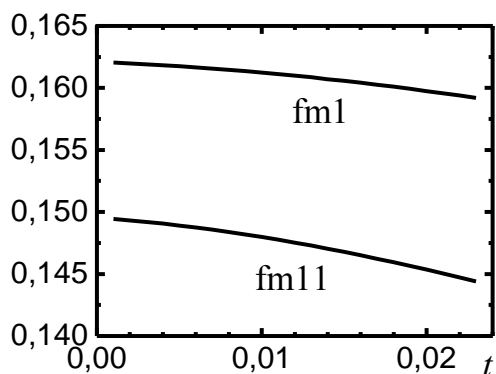


Рис. 5. Зависимость минимально допустимого коэффициента трения от времени (в с) на начальном этапе разгона фрезы, полученного по соотношениям (22) и (23)

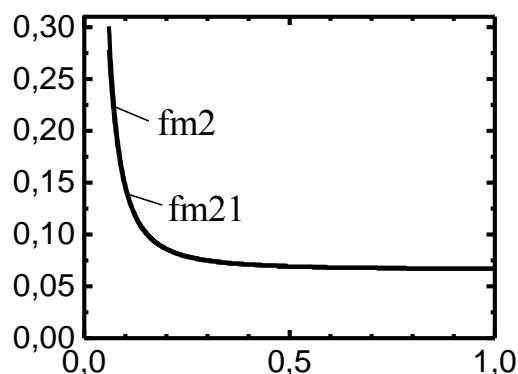


Рис. 6. Зависимость минимально допустимого коэффициента трения от времени (в с) на заключительном этапе разгона фрезы, полученного по соотношениям (38) и (39)

Можно отметить, что приближенное соотношение (39) хорошо соответствует точному решению (38) даже при значениях коэффициента трения около 0.3, а при его значении 0.15 и меньше различие составляет менее одного процента.

Поскольку на заключительном этапе разгона фрезы подвижный сектор контактирует с корпусом по конической поверхности, то речь идет о приведенном коэффициенте трения, превосходящем его стандартное значение для стали по стали (примерно 0.12–0.15) примерно в три раза вследствие эффекта расклинивания, так что предельно допустимое значение приведенного коэффициента трения составляет 0.36–0.45, и полученный результат позволяет утверждать, что силы трения обеспечивают относительное равновесие подвижного сектора при больших угловых скоростях вращения фрезы со значением коэффициента запаса, превышающим 3. При больших угловых скоростях коэффициент запаса превышает 10, что очень важно, поскольку в этом случае нарушения относительного равновесия сектора может привести к разрушению фрезы и поражению обслуживающего персонала.

РЕЗЮМЕ

Рассмотрено равновесие подвижного сектора деревообрабатывающей фрезы относительно корпуса в процессе ее разгона. Показано, что на начальном этапе (при малых центробежных силах инерции) необходимый коэффициент трения незначительно превосходит его значение для стали по стали, однако сдвигающее усилие составляет всего несколько ньютонов, так что для обеспечения требуемого положения сектора фрезу целесообразно снабдить фиксирующим устройством, например, винтом М4. На заключительном этапе разгона, когда центробежные силы инерции становятся преобладающими, а сдвигающая сила достигает нескольких килоньютонов, силы трения обеспечивают относительное равновесие подвижного сектора с большим коэффициентом запаса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амалицкий, В. В. Деревообрабатывающие станки и инструменты / В. В. Амалицкий. – М.: Академия, 2007.
2. Морозов, В. Г. Дереворежущий инструмент: Справочник / В. Г. Морозов – М.: Лесн. промышл., 1988. – 344 с.
3. Песоцкий, А. Н. Проектирование лесопильно-деревообрабатывающих производств. – М.: Лесная промышленность, 1976 г.
4. Гришкевич, А. А. Экспериментальная установка для исследования процесса фрезерования древесины и древесных материалов / А. А. Гришкевич, А. Ф. Аникеенко // Труды БГТУ. Лесная и деревообр. промышл. – Минск, 2005.– Вып XIII. Сер. II. – С. 202–204.
5. Аникеенко, А. Ф. Анализ относительного равновесия подвижного сектора деревообрабатывающей фрезы / А. Ф. Аникеенко, П. С. Бобылёв, В. С. Вихренко // Теоретическая и прикладная механика. Междунар. науч.-техн. сб. – Мн.: БНТУ, 2013. – Вып. 28. – С. 104–108.
6. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин – М.: Лань, 2009. – 736 с.
7. Дьяконов, В.М. Специальный справочник по MathCAD / В.М. Дьяконов. – СПб: Петербург, 2001.

SUMMARY

The balance of the adjustable sector-knife carrier of a woodworking rolling mill relative to the device body in the process of acceleration is considered. It is shown that at the initial stage (with small centrifugal forces of inertia) the required coefficient of friction slightly exceeds the value for steel on steel, but the shearing force is of a few newtons only, so that to achieve the desired sector position is expedient to provide a fixing device, for example, M4 screws. At the final stage of acceleration when the centrifugal forces of inertia are prevalent, and the shearing force reaches several kN, the friction forces provide a relative balance of the sector with a large safety factor.

E-mail: pavelb92@mail.ru
vvikhre@mail.ru
lasovsky@tut.by

Поступила в редакцию 25.10.2015