

УДК 674.05

В. Н. Гаранин, ассистент (БГТУ);**А. А. Гришкевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ);**В. С. Вихренко**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой (БГТУ)

УСЛОВИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА С ИЗМЕНЯЕМЫМИ НА ДУГЕ КОНТАКТА УГЛАМИ РЕЗАНИЯ

Исследована модель фрезерного инструмента с подвижным сектором, позволяющего изменять угол резания на дуге контакта под действием сил резания.

The model of the milling tool with a mobile sector that allows changing the cutting angle on the arch of contact under the influence of cutting forces is investigated.

Введение. Древесина, как анизотропный материал природного происхождения, имеет различные физико-механические свойства, зависящие не только от породы и влажности, но и от условий ее произрастания. В связи с этим при взаимодействии с древесиной инструмент испытывает неодинаковые условия нагружения, что и вызывает необходимость использовать фрезерный инструмент с разными параметрами, в том числе и с различными углами резания.

Одним из эффективных направлений решения задач по повышению эффективности процесса обработки древесины является придание инструменту возможности переналадки углов резания с одних режимов на другие, что позволяет снизить затраты энергии на деформацию удаляемого слоя и повысить ресурс работы инструмента.

Основная часть. Резание древесины – процесс ее разделения с использованием сжимающих напряжений в заранее заданном направлении. Создание сжимающих напряжений в настоящее время обеспечивается благодаря использованию лезвийного инструмента.

Существует два основных режима взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом: а) режим образования микростружки; б) режим образования макростружки. При фрезеровании древесины режущая кромка инструмента описывает на дуге контакта траекторию в виде циклоиды, обеспечивающую переменную толщину стружки. При встречном фрезеровании, наиболее широко используемом на практике, толщина стружки изменяется от нуля до максимального значения и обратно до нуля. Изменение толщины стружки на дуге контакта при фрезеровании древесины с жестко установленными резцами представлено на рис. 1.

Автор физико-технологической теории резания древесины профессор А. Л. Бершадский [1] обращает внимание на пороговое значение средней толщины стружки ($e = 0,1$ мм), при которой происходит изменение режима образования с микростружки к макростружке (рис. 2). Им предложена зависимость изменения удельной касательной силы резания F_t / b от средней толщины стружки, представленная на рис. 2 (кривая 1)

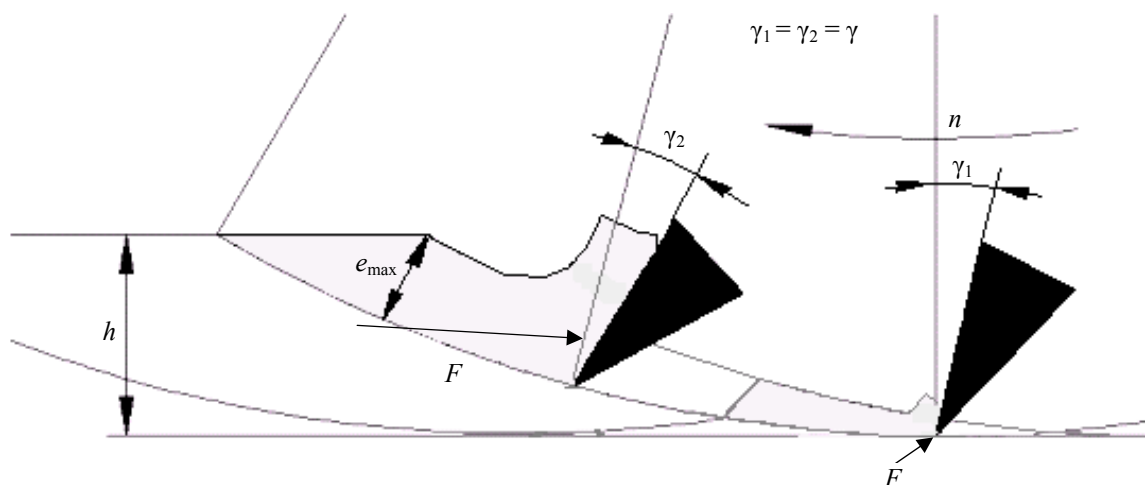


Рис. 1. Процесс формирования стружки при открытом цилиндрическом фрезеровании:

h – припуск на обработку, мм; e_{\max} – максимальная толщина стружки, мм;
 F – результирующая сила резания, Н; n – частота вращения инструмента, мин⁻¹;
 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma$ – передний угол, град

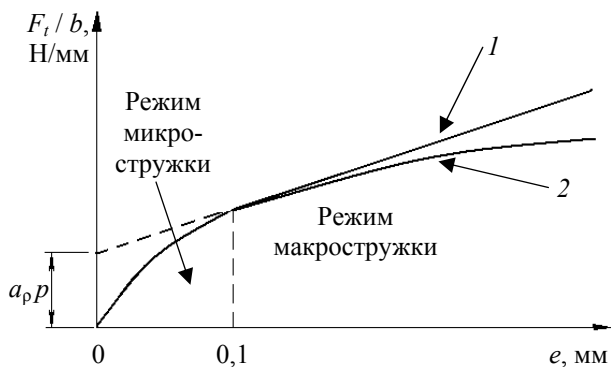


Рис. 2. График зависимости касательной силы резания от средней толщины стружки:

- 1 – при постоянном угле резания;
- 2 – при изменяемом угле резания;
- p – фиктивное давление по задней грани реза, Н/мм; a_p – коэффициент затупления

Режим микростружки является неблагоприятным для лезвия инструмента, поскольку на данном этапе взаимодействия, из-за отсутствия устойчивого формирования стружки работает в основном задняя поверхность ножа, что ведет к неравномерному износу режущей кромки инструмента. Воздействие сил отжима на нож приводит к тому, что сжимающие усилия, обеспечивающие разделение древесины, не совпадают с направлением разделения материала, что затрудняет процесс резания.

Это приводит к возникновению больших перпендикулярных к скорости движения реза сил резания. Наличие сил трения по задней грани реза ведет к нелинейному росту касательной силы резания на дуге контакта (область микростружки). Значительная часть работы на разделение материала затрачивается на нагрев лезвия, что существенно снижает работоспособность инструмента в целом. На этом этапе необходимо стремиться к снижению площади контакта лезвия инструмента с обрабатываемым материалом за счет повышения угла резания δ .

В режиме макростружки процесс стружкообразования носит более стабильный характер. На этом этапе рост сил происходит по передней поверхности ножа. Основная работа, затрачиваемая на этом этапе, идет на создание сжимающих напряжений впереди лезвия ножа, что оправдано только у режущей кромки.

Таким образом, предлагается разделить дугу контакта на два отрезка по критерию формирования обработанной поверхности и выделить два этапа работы инструмента.

На первом этапе происходит формирование поверхности обработки. Здесь в основном образуется микростружка, и поэтому с целью снижения затрат энергии на трение материала о заднюю поверхность лезвия ножа в этой зоне следует увеличить угол резания за счет заднего угла α .

На втором этапе происходит отделение и удаление снимаемого слоя. Здесь нет необходимости обеспечивать качество поверхности обработки. Главное на этом участке – снизить затраты энергии на деформацию стружки (рис. 2, кривая 2). Это можно обеспечить путем уменьшения угла резания δ на этом этапе (рис. 3).

Обрабатываемый материал поступает со скоростью подачи V_s к инструменту, вращающемуся с угловой скоростью ω , с целью снятия слоя толщины h . Лезвие ножа воздействует на обрабатываемый материал на дуге контакта l_k . Из-за роста толщины стружки до максимального значения e_{\max} на пути взаимодействия x (в зависимости от времени t) лезвие испытывает увеличение касательной силы резания $F_t(x) \equiv F_t(t)$ и результирующего момента резания $M(x) \equiv M(t)$. Плавное снижение угла резания $\delta(x)$ с δ_1 (первый этап формирования стружки на пути l_{k1}) до δ_2 (второй этап формирования стружки на пути l_{k2}) способствует уменьшению роста $F_t(x)$ и $M(x)$, что позволяет обеспечить экономию энергии на разделение обрабатываемого материала.

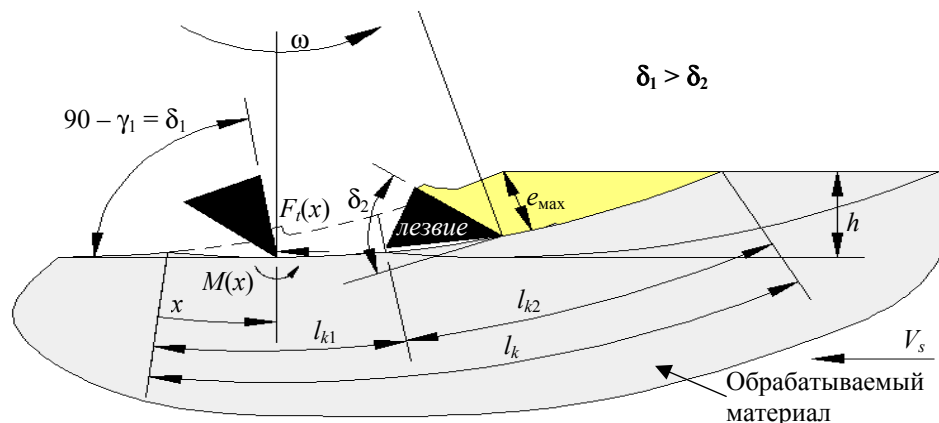


Рис. 3. Схема стружкообразования при фрезеровании древесины с использованием изменяемого на дуге контакта угла резания:

l_{k1} – путь лезвия на первом этапе резания; l_{k2} – путь лезвия на втором этапе резания

В процессе взаимодействия лезвия на дуге контакта с обрабатываемым материалом при снижении угла резания будет происходить снижение скорости роста касательной составляющей F_t результирующей силы резания, что в конечном итоге приведет не только к снижению сил резания, но и экономии энергии на разделение материала.

Использование постоянных угловых параметров для фрезерования древесины приводит к необходимости выбирать между большими углами резания (повышая силы резания) и между малыми углами резания (снижая качество поверхности и прочность реза). Производители дереворежущего инструмента в основном выбирают первое направление, обеспечивая стойкость режущих элементов инструмента к нагрузкам, в ущерб затратам энергии за счет повышения сил резания.

Обеспечение условий работы инструмента с вынужденными колебаниями ножей – задача, которую необходимо решать на стадии его проектирования, устанавливая необходимые параметры работы фрезерного инструмента.

Скорость вращения инструмента является основным внешним параметром работы фрезерного инструмента с вынужденными колебаниями сектора, который влияет на условия его работы.

Рассмотрим расчетную схему фрезерного инструмента с изменяемыми углами резания, представленную на рис. 4 и разработанную на основании фрезы, предложенную А. П. Клубковым [2], в которой переналадка углов резания может осуществляться поворотом ножа относительно оси, совпадающей с режущей кромкой, после остановки инструмента.

Отличие рассматриваемой нами модели состоит в возможности обеспечения изменения угла резания на дуге контакта ножей в процессе работы фрезы.

Высокие инерционные силы, а также малое время взаимодействия ножа с материалом определили необходимость использовать вынужденные угловые колебания ножа для обеспечения изменения угла резания на дуге контакта.

Подвижная часть инструмента (сектор) имеет фиксированную относительно корпуса инструмента ось вращения O , совпадающую с режущей кромкой лезвия ножа благодаря подвижным связям A и B . Связи A и B находятся на расстоянии r от оси O . В результате режущая кромка лезвия описывает цилиндрическую поверхность радиусом R относительно оси вращения инструмента O_1 независимо от нагрузки и угла поворота сектора $\varphi_{\text{вын}}(t)$. При установившейся угловой скорости вращения инструмента ω сектор занимает положение устойчивого относительного равновесия φ , при котором начальный угол резания составляет δ_0 . Сектор с центром масс C , расположенным на расстоянии r_c от точки O , испытывает инерционные силы, что обуславливает необходимость стабилизации его положения в процессе работы. С этой целью вводится упругая связь (пружина NK жесткости c) сектора с корпусом инструмента. Пружина крепится с одной стороны к корпусу инструмента (точка N) на расстоянии L от оси O , а с другой – к сектору в точке K , расположенной на расстоянии r_k от оси.

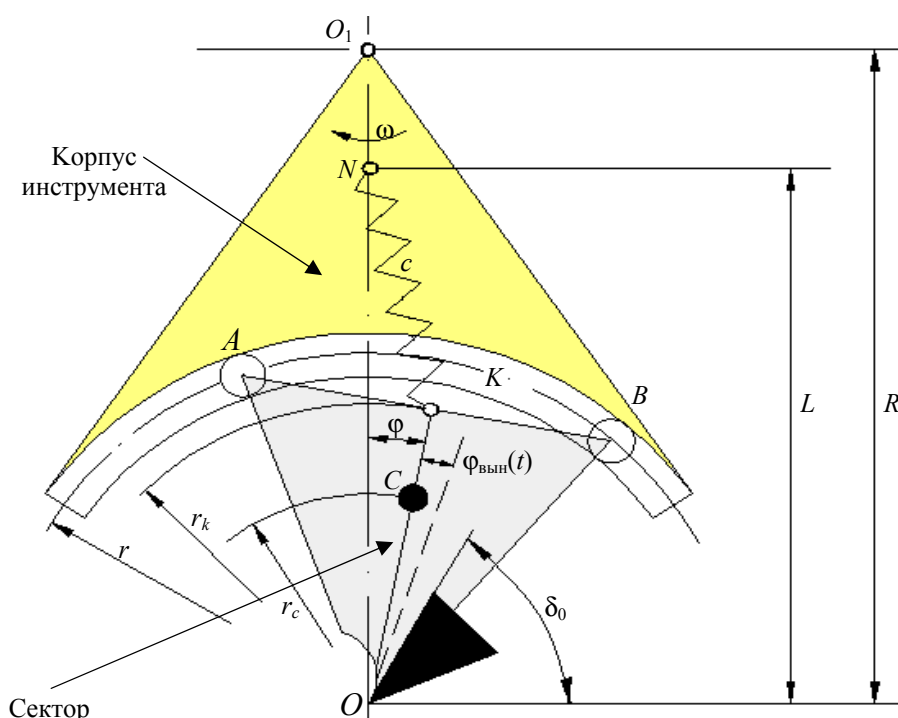


Рис. 4. Расчетная схема фрезерного инструмента с изменяемыми углами резания

Сектор при взаимодействии с обрабатываемым материалом испытывает высокочастотное нагружение. Из-за инерционности он не может за малые промежутки времени существенно изменять угловые характеристики резания. Поэтому работа сектора должна проходить при частотах нагружения, близких к частотам собственных его колебаний, т. е. в околорезонансной области, чтобы обеспечить большую амплитуду вынужденных колебаний.

Определим амплитуду вынужденных колебаний сектора в зависимости от момента сил резания $M(t)$. С целью моделирования процесса нагружения режущего элемента со стороны обрабатываемого материала воспользуемся тригонометрической зависимостью

$$M(t) = M_{\max} \sin^{2u} \left(\frac{\omega}{2} t \right), \quad (1)$$

являющейся периодической функцией времени с периодом $2\pi/\omega$ и обеспечивающей достаточную локализацию взаимодействия на дуге контакта при достаточно больших значениях u .

Поскольку ставится задача моделирования периодичной нагрузки и наглядного описания работы сектора, выбираем $2u = 12$, получив при этом наглядное и негромоздкое решение, которое в дальнейшем позволит выполнить анализ результата.

После разложения $\sin^{12}(\omega t/2)$ на гармонические составляющие [3] найдем вынужденные колебания сектора в виде

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{вын}} = & \frac{M_{\max}}{I_0 \omega^2} \times \left(\frac{231}{1024(k/\omega)^2} - \right. \\ & - \frac{99 \cos(\omega t)}{256((k/\omega)^2 - 1)} + \frac{495 \cos(2\omega t)}{2048((k/\omega)^2 - 4)} + \\ & + \frac{55 \cos(3\omega t)}{512((k/\omega)^2 - 9)} + \frac{33 \cos(4\omega t)}{1024((k/\omega)^2 - 16)} - \\ & \left. - \frac{3 \cos(5\omega t)}{512((k/\omega)^2 - 25)} + \frac{\cos(6\omega t)}{2048((k/\omega)^2 - 36)} \right), \quad (2) \end{aligned}$$

где I_0 – момент инерции сектора относительно точки O , кг·м²; k – частота собственных колебаний сектора, с⁻¹.

В графическом виде зависимость (2) для двух значений отношения k/ω представлена на рис. 5. Анализ показывает, что сектор может работать как в фазе, так и противофазе с нагрузкой. В первом случае будет наблюдаться снижение сил резания вследствие изменения угла резания на дуге контакта, а во втором – увеличение сил ре-

зания, поскольку увеличивается давление передней грани ножа на стружку.

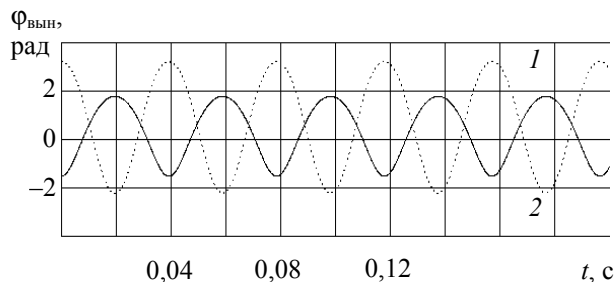


Рис. 5. Работа инструмента с изменяемыми углами резания:
 $m_c = 0,15$ кг; $R = 0,0625$ м; $r = 0,03$ м; $r_c = 0,02$ м;
 $I_0 = 0,00015$ кг·м²; $\omega = 160$ с⁻¹; $M_{\max} = 7,7$ Нм;
 $c = 15\,000$ Н/м ($k = 195$ с⁻¹) (кривая 1);
 $c = 10\,000$ Н/м ($k = 135$ с⁻¹) (кривая 2)

Максимальные по модулю отклонения от положения равновесия согласно выражению (2), соответствующие моменту времени $t = \pi/\omega$, показаны на рис. 6.

Для колебаний сектора в фазе с возникающей нагрузкой необходимо обеспечить положительное значение отклонения. Этого можно добиться путем изменения частоты собственных колебаний системы сектор – инструмент. В свою очередь, частота собственных колебаний зависит от различных характеристик подвижной системы, из которых наиболее удобно изменять массу сектора m_c .

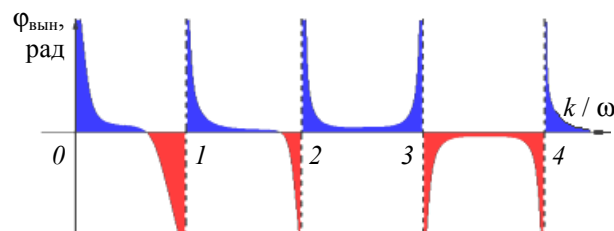


Рис. 6. Зависимость максимальных отклонений сектора от отношения частоты собственных колебаний к частоте вращения фрезы

Параметры базирования сектора, обеспечивающие его работу в фазе с возникающей нагрузкой, можно представить неравенством

$$\omega \leq k. \quad (3)$$

Основное влияние на изменение угла $\varphi_{\text{вын}}$ оказывают те члены правой части уравнения (2), которые при резонансе стремятся к бесконечности.

На основании анализа соотношений (2), (3) и рис. 6 можно утверждать, что для обеспечения стабильной амплитуды колебаний сектора и достаточно большой угловой скорости вра-

щения фрезы необходимо стремиться к использованию максимально возможной жесткости пружины и частоты собственных колебаний, позволяющих при незначительных изменениях параметров инструмента во время его работы сохранять необходимую амплитуду колебаний.

При произвольном значении u , используя свойство ортогональности гармонических функций, для любого из коэффициентов ряда

$$\varphi_{\text{вын}}^{(u)} = \frac{M_{\max}}{I_0 \omega^2} \sum_{m=0}^u B_m^{(u)} \cos(m\omega t) / \left[(k/\omega)^2 - m^2 \right] \quad (4)$$

можно получить аналитические выражения коэффициентов:

$$\begin{aligned} B_0^{(u)} &= \frac{\omega}{\pi 2^{u+1}} \int_0^{2\pi/\omega} [1 - \cos(\omega t)]^u dt = \\ &= \frac{1}{\pi 2^{u+1}} \int_0^{2\pi} [1 - \cos \mu]^u d\mu; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} B_m^{(u)} &= \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \cos(m\omega t) \sin^{2u} \left(\frac{\omega t}{2} \right) dt = \\ &= \frac{1}{\pi 2^u} \int_0^{2\pi} \cos(m\mu) [1 - \cos \mu]^u d\mu, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\mu = \omega t$, рад; $m = 1, 2, \dots, u$.

Используя далее формулу бинома Ньютона и вычисляя элементарные интегралы, находим окончательно для интересующих нас в первую очередь первых двух коэффициентов ряда:

$$B_0^{(u)} = \frac{1}{2^u} \left[1 + \sum_{m=1}^{[u/2]} \frac{1}{2^{2k}} C_u^{2m} C_{2m}^m \right], \quad (7)$$

$$B_1^{(u)} = -\frac{1}{2^{u-1}} \left[\sum_{m=1}^{[(u+1)/2]} \frac{1}{2^{2k}} C_u^{2m-1} C_{2m}^m \right], \quad (8)$$

где C_u^m – биномиальные коэффициенты.

Расчеты показывают, что изменение угла резания на дуге контакта можно регулировать как величиной момента сил резания и дополнительными воздействиями на сектор, так и отношением частоты собственных колебаний сектора и угловой скорости вращения инструмента при его различных конструктивных характеристиках. Например, при $D = 125$ мм, $l_0 = 0,015$ м, $I_0 = 0,00015$ кг·м², $m_c = 0,15$ кг, $r_k = 0,025$ м, $L = 0,04$ м, $r_c = 0,02$ м:

а) $c = 12\,000$ Н/м – увеличение угла резания на дуге контакта;

б) $c = 14\,000$ Н/м – уменьшение угла резания на дуге контакта.

Можно показать, что при учете асимметрии действующего на нож момента сил резания и при работе инструмента в области второй резонансной частоты при прочих равных условиях наблюдается большее запаздывание по фазе ϑ_1 угла поворота сектора φ по сравнению с углом поворота инструмента μ . Это позволяет рассчитывать на увеличение изменения угла резания на дуге контакта. Однако условия работы фрезы $k/\omega > 2$ требуют использования пружин большей жесткости, что затрудняет процесс проектирования инструмента для промышленных режимов его эксплуатации. Возникает необходимость использовать облегченные материалы для изготовления сектора (титан, алюминиевые сплавы и др.), что может привести к повышению стоимости фрезерного инструмента или к снижению надежности его эксплуатации.

Отметим, что при использовании третьей резонансной частоты вместо условия (3) для обеспечения синфазных колебаний сектора следует использовать

$$3\omega \geq k, \quad (9)$$

что, в свою очередь, требует еще более жестких пружин.

Стремление повысить частоту вращения дереворежущего инструмента при фрезеровании вызвано необходимостью повышения производительности или качества обработанной поверхности, что является обоснованным при эксплуатации фрезерного инструмента с постоянными параметрами. Качество обработанной поверхности при эксплуатации инструмента с переменными параметрами не всегда находится в жесткой связи со скоростью подачи материала и угловой скоростью вращения инструмента, поскольку существует возможность изменять траекторию формирования обработанной поверхности (не по циклоиде) без ущерба производительности оборудования.

Таким образом, проектирование и эксплуатация инструмента с изменяемыми углами резания выполняется под определенную угловую скорость вращения шпинделя инструмента. Влияние скорости подачи материала V_s , а также параметров обработки материала (ширина обработки b , припуск на обработку h , средняя толщина стружки e и др.) на поведение ножа будет отражаться только на изменении амплитуды вынужденных колебаний. Уменьшение амплитуды колебаний ножа снижает экономию энергии за счет деформирования стружки. Чрезмерный рост амплитуды колебаний ножа может вызвать дополнительные затраты энергии на трение задней поверхности лезвия ножа по материалу. Поэтому в конструкции

инструмента необходимо предусматривать ограничительные элементы, исключающие такое явление.

Заключение. Использование синусоидальной зависимости для моделирования момента в расчетной части позволило определить приемлемые режимы работы инструмента.

Требуемый режим вынужденных колебаний устанавливается путем подбора частоты собственных колебаний сектора, близкой к угловой скорости вращения инструмента ω , например, варьированием его массы. Для обеспечения необходимых изменений угла резания на дуге контакта следует обеспечить угловую скорость вращения инструмента несколько ниже частоты колебаний сектора фрезы, что

будет соответствовать его работе в первой резонансной области.

Литература

1. Бершадский, А. Л. Резание древесины / А. Л. Бершадский, Н. И. Цветкова. – Минск, 1975. – 303 с.
2. Цилиндрическая фреза: а. с. 666080 СССР, МПК В 27 G 13/02 / А. П. Клубков; Белорус. технол. ин-т им. С. М. Кирова. – № 4839921; заявл. 09.08.76; опубл. 09.06.79 // Открытия. Изобрет. – 1979. – № 21. – С. 16.
3. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.

Поступила 24.03.2011