

## Влияние скорости перемещения ножа при резании сотоблока на его виброустойчивость и точность реза

М.В. Брунгардт<sup>a</sup>, М.В. Сарамуд<sup>b</sup>, А.В. Тололо<sup>c</sup>, Я.Ю. Пикалов<sup>d</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

<sup>a</sup> maxbrung@gmail.com, <sup>b</sup> msaramud@gmail.com, <sup>c</sup> 8350474@mail.ru, <sup>d</sup> yapibest@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4288-2550>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0344-9842>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0005-8567-8666>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7171-8154>

Статья поступила 08.02.2024, принята 20.02.2024

*Раскрой заготовок из сотового полотна — одна из важных составляющих при выпуске изделий в аэрокосмической и других отраслях промышленности. Такая задача сопряжена с трудностями обработки заготовок из листового сотового полотна, требует выполнения раскроя по сложной траектории и усложняется разрезанием стенок без повреждения узловых точек, сохраняя прямолинейность реза, а на это в значительной степени влияет способ резания. К примеру, при фрезеровании происходит деформация сотовой структуры, что приводит к неисправимому браку дорогостоящих изделий. Применение ультразвуковых колебаний ножа, движущегося в горизонтальной плоскости относительно стенки, также не позволяет производить раскрой без смещения заготовки и тем самым затрудняет отслеживание правильности траектории движения режущей кромки. Использование технологии, когда нож перемещается вдоль стенки в вертикальной плоскости по нормали к поверхности стола, на которой расположена заготовка, является предпочтительным, но и в этом случае при движении из-за упругих деформаций как в теле ножа, так и стенках сотового полотна возникают силы, отклоняющие лезвие от прямолинейного движения, что влияет на качество реза. Непрямолинейная траектория движения ножа является следствием вибрации режущей кромки в процессе движения в сторону разрезания. В данной статье для совершенствования такого способа раскроя сотового полотна предлагается определение оптимальной скорости резания, оцениваемой по коэффициенту близости к резонансу, и сравнение его с предложенным нормативным значением, что обеспечит прямолинейность реза стенки сотоблока.*

**Ключевые слова:** нож; сотоблок; форма режущей кромки; спектр частот; формы колебаний; критическая скорость.

## The influence of the speed of the knife movement on its vibration resistance and cutting accuracy while cutting honeycomb block

M.V. Brungardt<sup>a</sup>, M.V. Saramud<sup>b</sup>, A.V. Tololo<sup>c</sup>, Ya.Yu. Pikalov<sup>d</sup>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochoy Ave., Krasnoyarsk, Russia

<sup>a</sup> maxbrung@gmail.com, <sup>b</sup> msaramud@gmail.com, <sup>c</sup> 8350474@mail.ru, <sup>d</sup> yapibest@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4288-2550>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0344-9842>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0005-8567-8666>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7171-8154>

Received 08.02.2024, accepted 20.02.2024

*Cutting blanks from honeycomb fabric is one of the important components when making products in aerospace and other industries. This task is associated with difficulties in processing workpieces made of sheet honeycomb fabric, which requires cutting along a complex trajectory and is made difficult by cutting the walls without damaging the nodal points while maintaining the straightness of the cut, and this is largely influenced by the cutting method. For example, during milling, deformation of the honeycomb structure occurs, which leads to irreparable defects of expensive products. The proposed methods use an ultrasonic knife moving in a horizontal plane relative to the wall, preventing cutting without displacing the workpiece and thereby complicating tracking the correct trajectory of the cutting edge. The use of technology when the knife moves along the wall in a vertical plane normal to the table surface on which the workpiece is located is preferable, but even in this case, when the knife moves due to elastic deformations, forces arise both in the body of the knife and in the sidewalls of the honeycomb fabric, deflecting the knife blade from straight-line movement, which affects the quality of the cut. The non-linear trajectory of the knife is a consequence of the vibration of the cutting edge during the movement towards cutting. The determining factor for improving this method of cutting honeycomb fabric can be the determination of the optimal cutting speed at which the blade and the wall of the honeycomb sheet will not be in the resonance band.*

**Keywords:** cutting tool; honeycomb block; cutting edge shape; spectrum frequencies; waveforms; critical speed.

**Введение.** Способ раскроя заготовок из сотового полотна заключается в том, что нож, выполненный в виде тонкого лезвия, совершает движение к заготовке, при

этом ось ножа расположена перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Врезание кромки ножа в заготовку вызывает удар режущей кромки о стенку ячейки соты,

что затрудняет прямолинейность движения ножа вследствие возникающих вибраций [1–4], порождаемых упругими деформациями в теле ножа и стенке ячейки сотоблока. Под действием силы резания вершина лезвия ножа смещается в двух плоскостях — как по направлению движения, так и перпендикулярно ему [5; 6]. Режущая кромка ножа при врезании испытывает всестороннее сжатие, кроме касательных. При движении ножа в перпендикулярном направлении сопротивление резанию возможно определить через реакции со стороны стенок сотоблока, которые действуют вблизи режущей кромки ножа возле ее вершины [7]. Разрушение стенки в момент врезания приводит к исчезновению реакций со стороны ножа и стенки сотоблока и нарушению равновесия действующих сил, в результате вершина занимает новое положение равновесия не в тангенциальном направлении, а по сложной траектории, смещенной по нормали к поверхности резания. Потенциальная энергия к моменту сдвига будет зависеть от условий резания, износа режущей кромки ножа, жесткости упругой системы и т. п. Амплитуда колебаний тем больше, чем больше израсходуется энергии при сдвиге. Часть энергии, что накопилась за счет деформаций упругой системы вдоль нормали к поверхности резания, стремится вызвать отклонение режущей кромки от тангенциального направления. Результатом такого эффекта являются существенная погрешность геометрической формы и волнистость кромок стенки сотоблока на поверхности реза.

**Постановка и аналитическое решение задачи.** С целью получения прямолинейности реза необходимо исключить отклонение при вхождении лезвия ножа в разрезаемый материал, что влияет на качество и производительность процесса резания при обработке сотоблока.

Большая скорость ножа вызывает ударные нагрузки, и можно предположить, что, согласно теореме сохранения импульса силы резания, скорость реза обратно пропорциональна объему деформации. Удельная же энергия деформации в единице деформируемого объема разрезаемой стенки сотоблока должна быть постоянна.

Величину деформации  $\Delta$  при разрезании стенки в направлении вектора скорости резания  $V_{рез}$  можно записать:

$$\Delta = V_{рез} \cdot t, \quad (1)$$

тогда время деформации можно определить соотношением:

$$t = \frac{\Delta}{V_{рез}}. \quad (2)$$

Как можно отметить, время воздействия режущей кромки ножа на разрезаемую стенку сотоблока обратно пропорционально скорости резания, при этом сила, воздействующая на стенку, будет определяться силой резания  $F_{рез}$ . Предполагается, что при заглублинии ножа время воздействия на стенку сотоблока уменьшается с отдалением режущей кромки от начала врезания для одного и того же вида линейной деформации. Количество движения, сообщаемое стенке сотоблока при силе резания постоянной величины, аналогично уменьшается, а

деформация стенки обратно пропорциональна линейной скорости ножа, и величина вектора скорости преобладает над его направлением.

Скорость врезания ножа в стенку сотоблока можно описать двумя критическими скоростями.

Первая критическая скорость обуславливает такую частоту ножа, которая совпадает с собственной частотой колебаний стенки сотоблока, деформируемой в процессе врезания.

Если скорость меньше первой критической, то наблюдается процесс, близкий к статической деформации стенки сотоблока. Если скорость превышает первую критическую, то имеет место ударное врезание ножа в стенку сотоблока. Такой процесс легче описать применительно к теории удара для упрощения решаемой задачи, в том числе при математическом моделировании процесса резания. Известно, что величиной всех конечных сил, оказывающих ударное воздействие на стенку сотоблока в течение одного и того же промежутка времени, можно пренебречь [8]. Теорема Кельвина [9] применима к определению работы сил резания, равной скалярному произведению импульса силы на  $1/2$  суммы начальной и конечной скорости точки режущей кромки ножа.

Вторая критическая скорость не является актуальной, так как характеризуется скоростью распространения звука в материале при возникновении ударных волн.

Первая критическая скорость учитывает, что частота собственных колебаний деформируемой при резании массы материала определяется по известным зависимостям [10–12], при этом частота собственных колебаний массы  $m$  стенки сотоблока определяется соотношением:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{m}}. \quad (3)$$

Для оценки жесткости  $C$  используем закон Гука в скалярной форме для упругой силы, деформирующей материал на величину линейного перемещения  $x$  [5; 7]:

$$F = C \cdot x. \quad (4)$$

В системе «напряжение – деформация» уравнение (4) имеет вид:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_d, \quad (5)$$

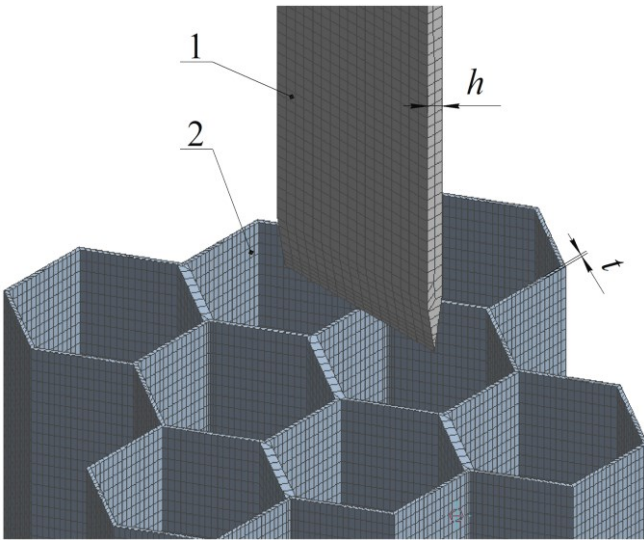
где  $\sigma$  — внутреннее напряжение;  $\varepsilon_d$  — относительная деформация;  $E$  — модуль упругости 1-го рода для деформируемого материала.

Учитывая, что  $\sigma = \frac{F}{S}$ , а  $\varepsilon_d = \frac{x}{L}$ , получим для жесткости  $C$  выражение:

$$C = \frac{E \cdot S_d}{L}, \quad (6)$$

где  $S_d$  — площадь деформируемого поперечного сечения материала;  $L$  — высота сотоблока.

На рис. 1. представлена модель начального состояния процесса врезания ножа 1 в стенку сотоблока 2.



**Рис. 1.** Геометрические параметры ножа  $l$  и толщина разрезаемой стенки  $2$

Для режущей кромки лезвия ножа (рис. 1) площадь  $S$  деформируемого поперечного сечения материала можно записать:

$$S_d = h \cdot t_s, \quad (7)$$

где  $h$  — толщина лезвия ножа;  $t_s$  — толщина стенки соотблка.

Параметры  $h$  и  $t_s$  приняты согласно [13]. Тогда выражение (6) преобразуется:

$$C = \frac{E \cdot h \cdot t_s}{L}. \quad (8)$$

Процесс резания стенки соотблка сопровождается деформацией, масса деформированного материала определяется следующим образом:

$$m_d = \rho \cdot V, \quad (9)$$

где  $\rho$  — плотность материала соотблка;  $V$  — объем деформированного материала соотблка.

Объем  $V$  деформируемого материала стенки соотблка определяется по величине его площади контакта:

$$V = L \cdot S. \quad (10)$$

Зависимость для частоты собственных колебаний массы разрезаемой стенки соотблка лезвием ножа примет вид [14]:

$$\omega_{01} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (11)$$

Для материала, используемого для изготовления стенки соотблка  $E = 70 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ,  $\rho = 2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  и длине стенки  $L = 0,02 \text{ м}$ :

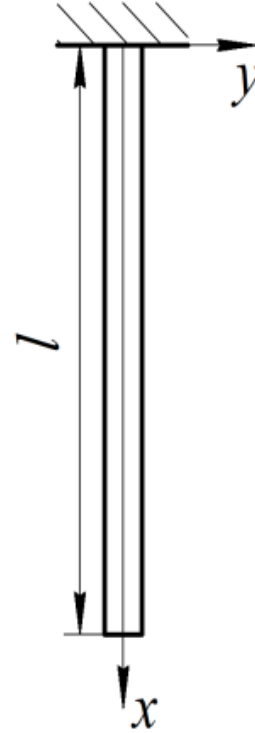
$$\omega_{01} = 254587 \text{ с}^{-1} = 40519 \text{ Гц}.$$

Для второй критической скорости величина скорости распространения ударных волн (звука) в стенке соотблка определяется [15] по соотношению:

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (12)$$

но для конкретного случая вторая критическая скорость неактуальна в связи с тем, что она намного больше величины скорости резания

Определяются собственные колебания ножа. Представлена расчетная схема (рис. 2) для анализа колебания ножа в виде балки, один конец которой защемлен, а второй свободен.



**Рис. 2.** Расчетная схема

В лезвии ножа при разрезании стенки соотблка присутствуют два вида колебаний — продольные и поперечные.

Для продольных колебаний при определении собственных частот колебаний лезвия ножа используется волновое уравнение:

$$\frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}. \quad (13)$$

Собственные частоты для данного случая закрепления определяются по зависимости [16; 17]:

$$\omega_{\text{ножи}} = \frac{(2n-1)\pi}{2l} \sqrt{\frac{EA}{m_0}}, \quad (14)$$

где  $A$  — площадь поперечного сечения ножа;  $m_0$  — масса ножа;  $l$  — длина лезвия ножа.

Учитывая, что масса ножа  $m_0 = h \cdot b \cdot l \cdot \rho_1$  и  $A = h \cdot b$ , выражение (13) преобразуется к виду:

$$\omega_{\text{ножи}} = \frac{(2n-1)\pi}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho_1}}, \quad (15)$$

где  $\rho_1$  — плотность материала лезвия ножа.

Для форм колебаний имеет место зависимость:

$$u_n(x) = \text{sinsin} \frac{(2n-1)\pi n}{2l} x, \quad (16)$$

первые три формы которой представлены на рис. 3.

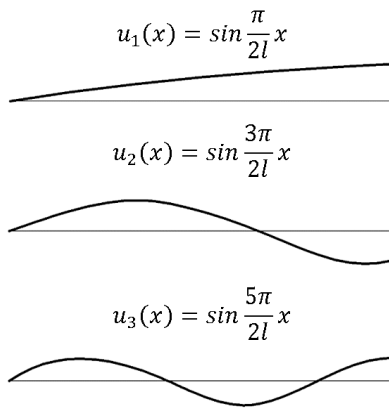


Рис. 3. Формы колебаний лезвия ножа

Первая (низшая) частота при  $n = 1$ :

$$\omega_{\text{нож1}} = \frac{\pi c}{2l} = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (17)$$

Вторая частота при  $n = 2$ :

$$\omega_{\text{нож2}} = \frac{3\pi}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (18)$$

и т. д.

Для лезвия ножа, выполненного из стали с характеристиками  $E = 2.1 \cdot 10^{11}$  Па,  $\rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , получен график (рис. 4) зависимости собственных частот колебаний  $\omega_1$  и  $\omega_2$  от его длины  $l = 0.02 - 0.07$  м.

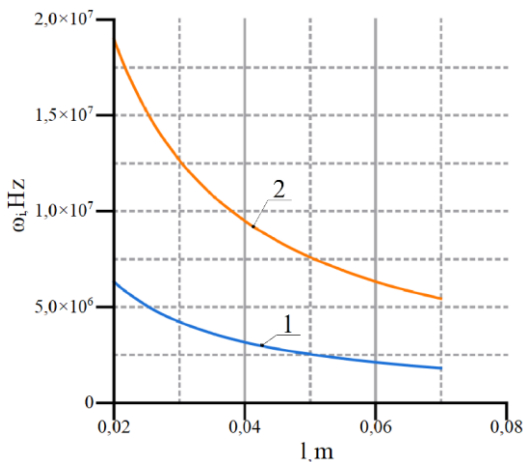


Рис. 4. График зависимости первой  $\omega_1$  и второй  $\omega_2$  собственных частот ножа от его длины

Для поперечных колебаний [16; 17] при отсутствии возмущающих сил используется дифференциальное уравнение:

$$m_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ_z \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} = 0. \quad (19)$$

С учетом граничных условий собственные частоты поперечных колебаний:

$$\omega_{\text{опои}} = \frac{\lambda_i}{2\pi \cdot l^2} \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho \cdot h \cdot b}} = \frac{\lambda_i}{2\pi \cdot l^2} \sqrt{\frac{E \cdot h^2}{12 \cdot \rho}}, \quad (20)$$

где моды колебаний для первой, второй и третьей формы равны соответственно:

$$\lambda_1 = 3,52; \lambda_2 = 22,04; \lambda_3 = 61,17.$$

На рис. 5 представлен график собственных частот поперечных колебаний для трех значений первых поперечных собственных частот,  $\Gamma y$ :  $\omega_{\text{опои1}} = 85,7$ ;  $\omega_{\text{опои2}} = 536,4$ ;  $\omega_{\text{опои3}} = 1488,8$ .

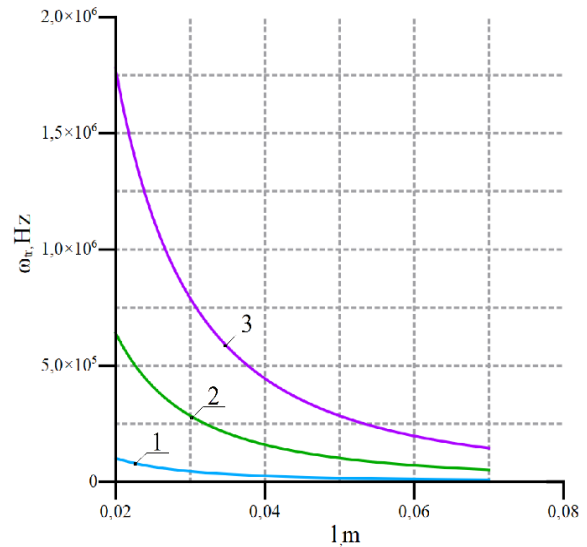


Рис. 5. График собственных частот поперечных колебаний  $\omega_{\text{опои}}$  при длине лезвия ножа от 0,02 до 0,07 м

**Натурные испытания.** Для проведения натурных испытаний подготовлен стенд, принципиальная схема которого изображена на рис. 6. Стенд состоит из основания 1, закрепленного на опорах 2, в которых расположена направляющая 3 лезвия ножа 4, к его торцу прикреплены пята 5, груз 6 с направляющими 7, указатель 8, подключенный к датчику 9, и разрезаемый образец 10. Принцип работы заключается в создании расчетной силы ударного действия за счет груза 6, перемещающегося по направляющим 7 под действием силы тяжести, который, ударяясь о боек 5, передает движение через боек 5 ножу 4, перемещающемуся в собственной направляющей 3, жестко связанной опорами 2 с основанием 1. Режущая кромка ножа, врезаясь в стенку соты, передает ударную волну, воздействие которой на стенку сотового блока фиксируется датчиком 9 и записывается в виброметр 8.

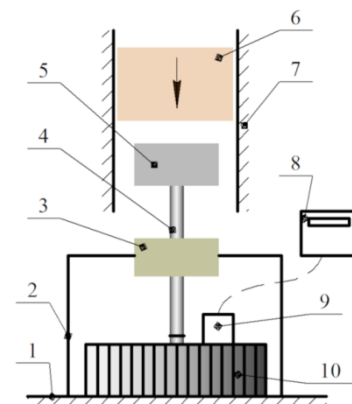


Рис. 6. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 — основание; 2 — опора; 3 — направляющая ножа; 4 — лезвие ножа; 5 — пята; 6 — ударник; 7 — направляющая ударника; 8 — указатель; 9 — датчик вибрации; 10 — ячеистая структура

На рис. 7 изображен стенд с результатом реза стенки сотоблока при врезании лезвия ножа с расчетной скоростью 5 м/с, полученной по результатам исследования и являющейся оптимальной для текущей геометрии ножа [13].

По результатам трех испытаний с помощью полученных спектров перемещений с применением метода быстрого преобразования Фурье построены амплитудно-частотные характеристики (рис. 8).

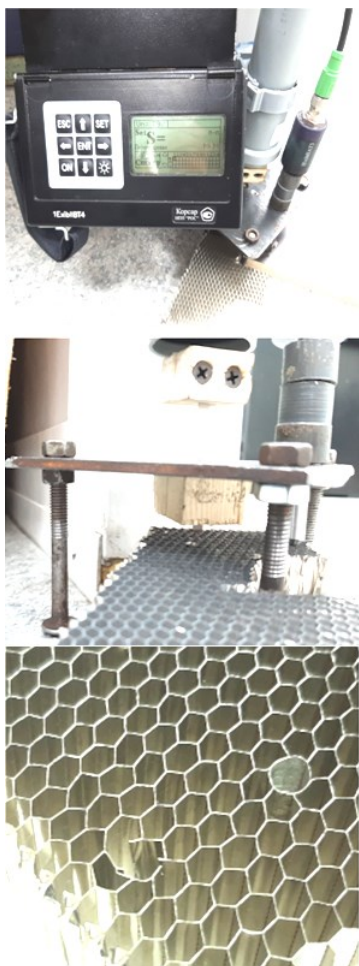


Рис. 7. Экспериментальный стенд и результат

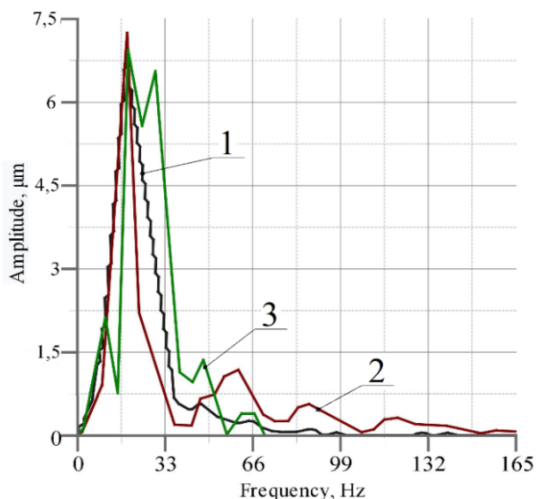


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики 1-го, 2-го и 3-го испытаний

Обработка экспериментальных данных выявила следующий спектр частот, возникающих при разрезании лезвия ножа при ударе о кромку стенки сотоблока: 4,96; 9,93; 10; 10,8; 14,35; 24,7; 31,66; 33,75; 34,6; 46,2; 47,5; 52,5; 64,32; 70; 71,65; 75; 86,37; 96,83; 107,89; 117,36; 130,14; 148,68; 165; 166,25; 167,75; 190; 333,75 Гц.

Мощности в полосах частот для каждого из трех испытаний приведены на рис. 9.

Мощность в полосах частот

Граничные частоты полос			
№	Гнижн (Гц)	Гверхн (Гц)	Амплитуда, м
1	22.0	27.7	0.87330
2	27.7	34.9	0.50002
3	34.9	44.0	0.37455
4	44.0	55.4	0.19150
5	55.4	69.8	0.07818
6	69.8	88.0	0.11056
7	88.0	110.9	
8	110.9	139.7	
9	139.7	176.0	0.33170
10	176.0	221.7	
11	221.7	279.4	
12	279.4	352.0	0.11056
13	352.0	443.5	
14	443.5	558.8	
15	558.8	704.0	

Мощность в полосах частот

Граничные частоты полос			
№	Гнижн (Гц)	Гверхн (Гц)	Амплитуда, м
1	22.0	27.7	41.4909
2	27.7	34.9	73.3210
3	34.9	44.0	44.8029
4	44.0	55.4	38.1510
5	55.4	69.8	21.5147
6	69.8	88.0	15.3188
7	88.0	110.9	12.0937
8	110.9	139.7	10.9723
9	139.7	176.0	8.13594
10	176.0	221.7	5.21540
11	221.7	279.4	2.61501
12	279.4	352.0	1.20146
13	352.0	443.5	1.06375
14	443.5	558.8	0.68627
15	558.8	704.0	0.40638

Мощность в полосах частот

Граничные частоты полос			
№	Гнижн (Гц)	Гверхн (Гц)	Амплитуда, м
1	22.0	27.7	0.74100
2	27.7	34.9	0.22082
3	34.9	44.0	0.15614
4	44.0	55.4	
5	55.4	69.8	
6	69.8	88.0	
7	88.0	110.9	
8	110.9	139.7	
9	139.7	176.0	0.17461
10	176.0	221.7	
11	221.7	279.4	
12	279.4	352.0	
13	352.0	443.5	
14	443.5	558.8	
15	558.8	704.0	

Рис. 9. Результаты измерения мощности в полосах частот

Явление резонанса возникает, когда какая-либо из вынужденных частот  $\omega_{\text{вын}}$  попадает в резонансную полосу [20]:

$$0,7 \cdot \omega_{0i} \leq \omega_{\text{вын}} \leq 1,3 \cdot \omega_{0i} \quad (21)$$

Следовательно, при прорезании лезвием ножа со-тоблока необходимо стремиться к тому, чтобы вынужденная частота ножа находилась либо в дорезонансной, либо в послерезонансной области данного диапазона, и тем самым обеспечивался прямолинейный рез стенки сотоблока.

**Численное моделирование.** На рис. 10 показаны результаты исследования собственных частот и формы колебаний консольно-закрепленного ножа, перемещающегося со скоростью 5 м/с, в ANSYS *Explicit Dynamics* [18; 19].

В результате получен спектр собственных частот: 164,55; 1030,1; 1623,3; 2883; 3098,6; 5648,7; 9332,7; 9741,4; 13945 Гц.

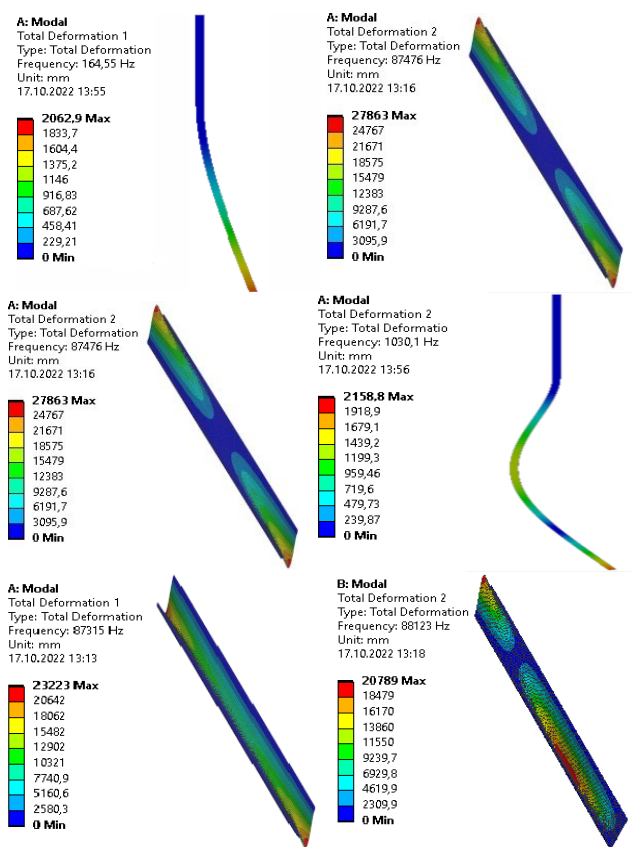


Рис. 10. Результаты численного моделирования для определения собственных частот и форм колебаний ножа

Из диапазона (21) можно выделить критическую собственную частоту и тем самым определить частоту вертикального возвратно-поступательного перемещения лезвия ножа, т. е. необходимую скорость резания, при которой будет обеспечиваться прямолинейность разрезаемых кромок стенки сотоблока.

Для определения вынужденной частоты воздействия лезвия ножа на стенку сотоблока использовалась зависимость:

$$\omega_{\text{вын}} = \frac{V_{\text{рез}}}{2\pi \cdot S_l} \quad (22)$$

где  $S_l$  — перемещение лезвия ножа.

Степень удаления собственных частот от возмущающих можно оценить с помощью резонансных частотных полос воздействий. Резонансной полосой колебательного звена принято считать диапазон частот, лежащих в пределах, определенных по зависимости (20).

В результате можно определить возможную скорость резания, исключая явление резонанса в системе «лезвие ножа — стенка сотоблока».

Так как продольные колебания лезвия ножа  $\omega_{\text{ножи}}$  и стенки сотоблока  $\omega_{01}$  намного превышают вынужденную частоту  $\omega_{\text{вын}}$ , их можно исключить из рассмотрения, оставив только поперечные колебания лезвия ножа.

Если расчетная собственная частота  $\omega_{0i}$  динамической системы «лезвие ножа – стенка сотоблока» попадает в резонансную полосу возмущающей частоты  $\omega_{\text{вын}}$ , то это свидетельствует о том, что рез становится непрямолинейным относительно граней стенки сотоблока. Анализ динамического качества при разрезании стенки сотоблока показывает необходимость исключения попадания  $\omega_{0i}$  в резонансную полосу. Динамическое качество при этом возможно оценить значением коэффициента отношения частот:

$$K_{fi} = \frac{\omega_{0i}}{\omega_{\text{вын}}} \quad (23)$$

Близость к резонансу в пределах 70–100 % может быть оценена с помощью коэффициента [21]:

$$K_{Di} = (1 - |1 - K_{fi}|) \cdot 100\% \quad (24)$$

Динамическое качество реза по этому показателю может быть оценено сравнением коэффициента  $K_{Di}$  с нормативными значениями, выбранными согласно таблице.

Таблица. Значения коэффициента близости к резонансу

Значение $K_{Di}$	Оценка качества
$K_{Di} < 0,75$	удовлетворительное
$0,75 < K_{Di} < 0,8$	плохое
$K_{Di} > 0,8$	недопустимое

По данному критерию определяется вынужденная частота воздействия лезвия ножа на разрезаемую стенку сотоблока, исключая попадание в резонансную полосу, и, из формулы (22), соответствующая ей скорость резания. Тем самым получена прямолинейность разрезаемых граней стенки сотоблока при постоянной силе резания.

**Заключение.** Исследование показало, что на прямолинейность, а, следовательно, точность реза влияет виброустойчивость лезвия ножа при разрезании стенки сотоблока. Необходимость учитывать для ножа поперечные и продольные колебания, а для стенки сотоблока — первую критическую скорость, что исключает попадание в резонанс системы «нож — стенка сотоблока». Предложено для оценки точности реза использовать коэффициент близости к резонансу и сравнение его с нормативным значением.

## Литература

1. Krenke T., Frybort S., Müller U. Cutting force analysis of a linear cutting process of spruce // *Wood Material Science & Engineering*. 2018. V. 13, № 5. P. 279-285.
2. Vibrating knife // *Meat science*. 1997. V. 46, № 4. P. 387-399.
3. Wójcik K. The influence of the cutting attachment on vibrations emitted by brush cutters and grass trimmers, 2015. URL: <https://depot.ceon.pl/bitstream/handle/123456789/10833/DOI-10.1515-frp-2015-0032%20en.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 20.02.2024).
4. Fukushima T. Collision vibration characteristics with interspace in knife driving system of combine harvester // *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2012. V. 5, № 3. P. 115-120.
5. Zhu L., Shi S., Jones N. Dynamic response of stiffened plates under repeated impacts // *International Journal of Impact Engineering*. 2018. V. 117. P. 113-122.
6. Ige M.T., Finner M.F. Forage harvester knife response to cutting force // *Transactions of the ASAE*. 1976. V. 19, № 3. P. 451-454.
7. King M.J. Knife and impact cutting of lamb bone // *Meat science*. 1999. V. 52, № 1. P. 29-38.
8. Бауков Ю.Н. О физике процессов изгибных колебаний пластин при ударном воздействии различной длительности // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 10. С. 151-156.
9. Пеленко В.В. Фундаментальные особенности процесса резания пищевых продуктов лезвийным инструментом // *Науч. журнал НИУ ИТМО. Сер. Процессы и аппараты пищевых производств*. 2008. № 1. С. 40-42.
10. Казачек Ю.Н. Собственные колебания прямоугольных пластин, ослабленных вырезами // *Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 4-2. С. 165-166.
11. Ye G.G. Critical cutting speed for onset of serrated chip flow in high speed machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2014. V. 86. P. 18-33.
12. Wang B. Investigations of critical cutting speed and ductile-to-brittle transition mechanism for workpiece material in ultra-high speed machining // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. V. 104. P. 44-59.
13. Pikalov I.I. Cutting of Complex-Contour Parts Made From Cellular Thin-Walled Honeycomb Structures and Determination of Their Optimal Tool Parameters and Processing Conditions, 2024. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/152581?ysclid=lsu3v31u1b876051357> (дата обращения: 20.02.2024).
14. Zhang Z. Free vibration analysis of sandwich beams with honeycomb-corrugation hybrid cores // *Composite Structures*. 2017. V. 171. P. 335-344.
15. Пеленко В.В. Оптимизация параметров оборудования для переработки мясного сырья // *Изв. высш. учеб. заведений. Пищевая технология*. 2008. № 5-6. С. 84-86.
16. Никитина Т.Ю. Динамика поперечных колебаний вертикальной зашпеленной балки // *Вестн. гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова*. 2013. № 3 (22). С. 79-88.
17. Базиль С.А. Моделирование поперечных движений бурового долота для понимания технологических процессов // *Точное машиностроение*. 1993. V. 15, № 4. С. 258-265.
18. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А., Каракозова В.А. Автоматизированная оценка динамического качества шлифовальных станков при изготовлении деталей подшипников // *Инженерный вестн. Дона*. 2021. № 11 (83). С. 181-192.
19. Mespoulet J. Experimental study of hypervelocity impacts on space shields above 8 km/s // *Procedia engineering*. 2017. V. 204. P. 508-515.
20. Chen H. Effect of honeycomb core under hypervelocity impact: Numerical simulation and engineering model // *Procedia engineering*. 2017. V. 204. P. 83-91.
21. Щепин А.Н. Оценка динамических характеристик измельчителя на основе оригинальной зубчатой передачи // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2012. № 3 (43). С. 92-96.

## References

1. Krenke T., Frybort S., Müller U. Cutting force analysis of a linear cutting process of spruce // *Wood Material Science & Engineering*. 2018. V. 13, № 5. P. 279-285.
2. Vibrating knife // *Meat science*. 1997. V. 46, № 4. P. 387-399.
3. Wójcik K. The influence of the cutting attachment on vibrations emitted by brush cutters and grass trimmers, 2015. URL: <https://depot.ceon.pl/bitstream/handle/123456789/10833/DOI-10.1515-frp-2015-0032%20en.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (data obrashcheniya: 20.02.2024).
4. Fukushima T. Collision vibration characteristics with interspace in knife driving system of combine harvester // *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2012. V. 5, № 3. P. 115-120.
5. Zhu L., Shi S., Jones N. Dynamic response of stiffened plates under repeated impacts // *International Journal of Impact Engineering*. 2018. V. 117. P. 113-122.
6. Ige M.T., Finner M.F. Forage harvester knife response to cutting force // *Transactions of the ASAE*. 1976. V. 19, № 3. P. 451-454.
7. King M.J. Knife and impact cutting of lamb bone // *Meat science*. 1999. V. 52, № 1. P. 29-38.
8. Baukov YU.N. On the physics of the processes of bending oscillations of plates under impact action of various durations // *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009. № 10. P. 151-156.
9. Pelenko V.V. Fundamental features of the process of cutting foodstuffs with a blade tool // *St. Petersburg University of Refrigeration and Food Technology Scientific Journal. Processes and Food Production Equipment*. 2008. № 1. P. 40-42.
10. Kazachek YU.N. Natural oscillations of rectangular plates weakened by cutouts // *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011. № 4-2. P. 165-166.
11. Ye G.G. Critical cutting speed for onset of serrated chip flow in high speed machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2014. V. 86. P. 18-33.
12. Wang B. Investigations of critical cutting speed and ductile-to-brittle transition mechanism for workpiece material in ultra-high speed machining // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. V. 104. P. 44-59.
13. Pikalov I.I. Cutting of Complex-Contour Parts Made From Cellular Thin-Walled Honeycomb Structures and Determination of Their Optimal Tool Parameters and Processing Conditions, 2024. URL: <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/152581?ysclid=lsu3v31u1b876051357> (data obrashcheniya: 20.02.2024).
14. Zhang Z. Free vibration analysis of sandwich beams with honeycomb-corrugation hybrid cores // *Composite Structures*. 2017. V. 171. P. 335-344.
15. Pelenko V.V. Optimization of parameters of equipment for processing meat raw materials // *Izvestia vuzov. Pishhevaya tekhnologiya*. 2008. № 5-6. P. 84-86.
16. Nikitina T.YU. Dinamika poperechnykh kolebanij vertikal'noj zashchemlennoj balki // *Vestn. gos. un-ta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova*. 2013. № 3 (22). P. 79-88.
17. Bazil' S.A. Modeling transverse motions of a drill bit for process understanding // *Tochnoe mashinostroenie*. 1993. V. 15, № 4. P. 258-265.
18. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A., Karakozova V.A. Automated assessment of the dynamic quality of grinding machines in the manufacture of bearing parts // *Engineering journal of Don. E-journal*. 2021. № 11 (83). P. 181-192.
19. Mespoulet J. Experimental study of hypervelocity impacts on space shields above 8 km/s // *Procedia engineering*. 2017. V. 204. P. 508-515.
20. Chen H. Effect of honeycomb core under hypervelocity impact: Numerical simulation and engineering model // *Procedia engineering*. 2017. V. 204. P. 83-91.
21. SHCHepin A.N. Evaluation of the dynamic characteristics of the grinder based on the original gear // *Siberian Aerospace Journal*. 2012. № 3 (43). P. 92-96.