

УДК 629.113.001

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ЗАГОТОВКИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ЕЕ КРЕПЛЕНИЯ

© П.Н. Костин¹, А.В. Лукьянов², Д.П. Алейников³Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Приведены результаты определения частот собственных колебаний заготовки, зажатой в тисах, при различных длинах ее вылета. Определение собственных частот проводилось экспериментально, в процессе аналитического расчета и с применением конечно-элементного моделирования. Проведено сравнение результатов, полученных различными способами, а также объяснено наличие незначительных отклонений в полученных результатах. Данные результаты могут найти применение при изучении точности конечно-элементного моделирования и разработке методик закрепления заготовок при их последующей обработке.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование колебаний, аналитический расчет колебаний, собственные частоты колебаний заготовки.

DETERMINATION OF THE WORKPIECE OSCILLATION FREQUENCIES WITH THE ACCOUNT OF FIXING SPECIFICITY

© P.N. Kostin, A.V. Lukyanov, D.P. Aleynikov

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk 664074, Russian Federation

The article presents the results of the determination of the frequencies of natural vibrations of the workpiece clamped in the yew with different lengths of its overhang. The determination of natural frequencies was carried out experimentally, in the process of analytical calculation and using finite element modelling. The article provides the comparison of the results obtained by different methods and explains the presence of minor deviations in the obtained results. These results can be used in the study of the accuracy of finite element modelling and the development of techniques for fixing blanks during their subsequent processing.

Keywords: finite element simulation of oscillations, analytical calculation of oscillations, natural frequencies of workpiece oscillations

При любом способе механической обработки возникают колебания, влияющие на динамику процесса и результирующее качество детали, период стойкости инструмента, степень износа технологического оборудования и оснастки.

При механической обработке резанием станок можно рассматривать как замкнутую упругую динамическую систему «станок – приспособление – инструмент – деталь», на которую воздействуют технологические процессы и сопутствующие явления, такие как резание, трение и т. д. [1]. Положение о замкнутости динамической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» было сформулировано В.А. Кудиновым. По этому положению при анализе собственной устойчивости и характеристик элементов динамической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» предлагается рассматривать каждый элемент системы отдельно.

Важным фактором, влияющим на жесткость системы «станок – приспособление – инструмент – деталь», является длина вылета режущего инструмента и заготовки при их креплении. Она тем выше, чем меньше вылет инструмента и заготовки относительно элементов крепления и приспособлений. Под жесткостью при этом понимается способность элементов сопротивляться деформациям при возникновении внешнего воздействия.

При значительных длинах вылета инструмента и заготовки относительно элементов крепления жесткость каждого элемента динамической системы падает, упругие деформации и колебания возрастают, что может привести к опасным резонансным колебаниям элементов. При высокоскорост-

¹ Костин Павел Николаевич, магистрант Института авиационного машиностроения и транспорта, e-mail: kostin95pavel@mail.ru

Pavel N. Kostin, a postgraduate student of Aircraft and Machine Building and Transport Institute, e-mail: kostin95pavel@mail.ru

² Лукьянов Анатолий Валерианович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиационного машиностроения и транспорта, e-mail: loukian@inbox.ru
Anatoly V. Lukyanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Aircraft and Machine Building and Transport Institute, e-mail: loukian@inbox.ru

³ Алейников Дмитрий Павлович, младший научный сотрудник кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиационного машиностроения и транспорта, e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru
Dmitri P. Aleynikov, Scientific Assistant, Aircraft and Machine Building and Transport Institute, e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru

ной обработке недостаточная жесткость одного из элементов системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» может привести как к браку, так и к выходу дорогостоящего инструмента и оборудования из строя.

Для оптимального выбора режимов резания необходимо рассматривать жесткость всех элементов системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» в совокупности. Жесткость оказывает существенное влияние на показатели качества обрабатываемой поверхности, износ инструмента и срок службы основного и вспомогательного технологического оборудования. Также в случае, если система «станок – приспособление – инструмент – деталь» испытывает вибрации, появляется шум, который утомляет обслуживающий персонал и ухудшает условия труда.

Рассмотрим прикладную задачу определения зависимости частоты собственных колебаний заготовки, зажатой в машинных тисках, с учетом специфики ее крепления (изменения длины вылета и применения специального приспособления для крепления цилиндрических заготовок).

Объектом исследования и анализа собственных частот колебаний выбрана цилиндрическая балка (заготовка) длиной $l = 200$ мм и диаметром $d = 36$ мм. Материал – сталь 45.

Для проведения эксперимента использовано оборудование:

- шасси NI cDAQ-9174 (рисунке 1, а), предназначенное для создания небольших портативных, измерительных систем для измерения аналоговых и цифровых сигналов от датчиков вибрации;
- модуль АЦП National Instruments 9234 (рис. 1, б), предназначенный для сбора вибросигналов с датчиков;
- контроллер виброметра модели Polytec OFV-5000 (рис. 1, в), предназначенный для измерения частоты, виброскорости и виброперемещений в режиме реального времени;
- сенсорная головка OFV-505 односточечного лазерного виброметра (рис. 1, г), предназначенная для определения виброскорости и виброперемещений различных конструкций;
- персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением, служащим для отображения в режиме реального времени процессов эксперимента и дальнейшей обработки данных;
- машинные тисы, предназначенные для зажима балки;
- призматическое приспособление, использованное для закрепления цилиндрической балки в тисках;
- молоток для нанесения серии ударов по заготовке с целью возбуждения в ней колебаний;
- отражающая пленка (фольга) (рис. 1, д), предназначенная для полного отражения лазерного луча, испускаемого сенсорной головкой.



Рис. 1. Использованное оборудование

Использованное программное обеспечение – National Instruments LabVIEW, модуль Sound and Vibration.

Методика проведения эксперимента следующая: при изменении длины вылета балки из тисов со 180 до 40 мм с шагом 10 мм проводилось несколько одиночных ударов молотком в направлении, противоположном падению лазерного луча, как это показано на рис. 2.

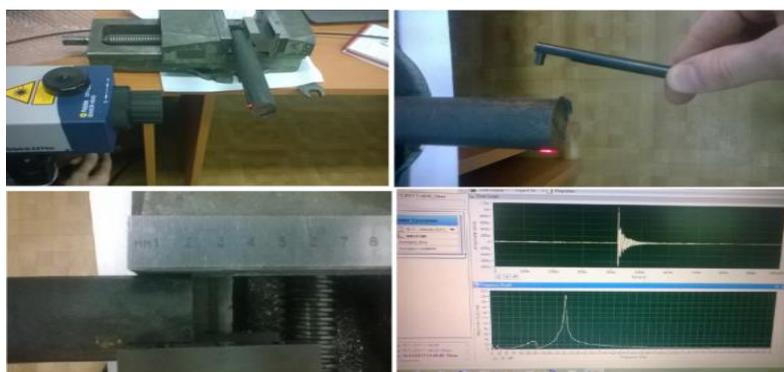


Рис. 2. Проведение эксперимента

Полученные в ходе ударов по заготовке временные и частотные сигналы изображены на рис. 3 и 4. Результаты исследования сигналов сведены в таблице.

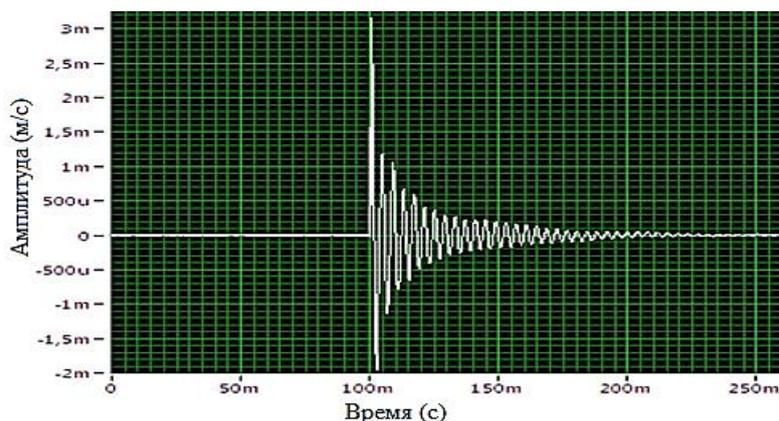


Рис. 3. Временной сигнал (длина вылета 180 мм)

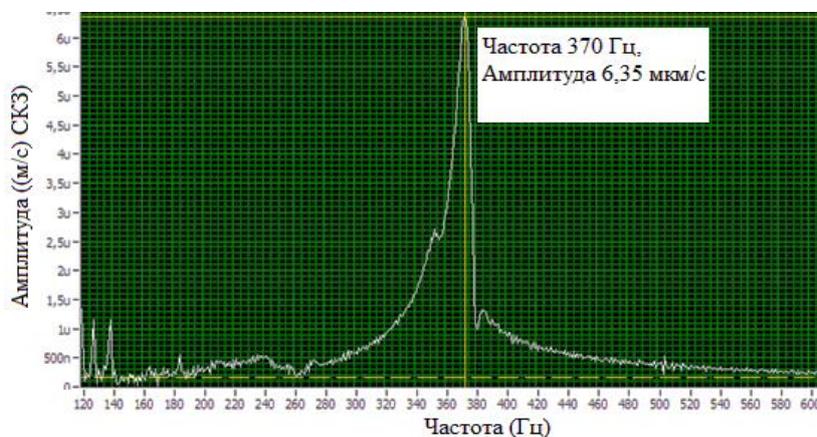


Рис. 4. Частотный сигнал (длина вылета 180 мм)

Сравнения частот колебаний заготовки, полученных различными путями

Длина вылета, мм	Частоты, полученные аналитическим путем, Гц	Частоты, полученные в ходе эксперимента, Гц	Частоты, полученные при конечно-элементном моделировании, Гц	Сравнения расчетных и экспериментальных частот, %	Сравнения расчетных и конечно-элементных частот, %	Сравнения экспериментальных и конечно-элементных частот, %
180	345,6	370,0	334,8	6,6	-3,2	-10,5
170	387,5	395,0	423,3	1,9	8,5	6,7
160	437,4	466,0	447,7	6,1	2,3	-4,1
150	497,7	516,0	586,0	3,5	15,1	11,9
140	571,4	591,0	672,0	3,3	15,0	12,1
130	662,6	719,0	764,0	7,8	13,3	5,9
120	777,7	730,0	851,0	-6,5	8,6	14,2
110	925,5	862,0	961,8	-7,4	3,8	10,4
100	1119,9	1001,0	1079,3	-11,9	-3,8	7,3
90	1382,5	1177,0	1208,0	-17,5	-14,4	2,6
80	1749,8	1473,0	1476,8	-18,8	-18,5	0,3
70	2285,4	1989,0	1927,0	-14,9	-18,6	-3,2
60	3110,7	2329,0	2673,7	-33,6	-16,3	12,9
50	4479,4	3475,0	3712,4	-28,9	-20,7	6,4
40	6999,1	5250,0	5906,0	-33,3	-18,5	11,1

Расчетная формула для определения частот (Гц) изгибных колебаний балок имеет следующий вид:

$$f_i = \frac{a^2}{2 \cdot \pi \cdot l_i^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_{xi}}{m_i}} \quad [2], \quad (1)$$

где $a^2 = 3,515$ – расчетный коэффициент для первой формы колебаний при жестко закрепленной балке; $E = 200000$ МПа – модуль Юнга для стали 45; I_{xi} – осевой момент инерции цилиндрической балки, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, определяемый по формуле

$$I_{xi} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i r^2}{2}, \quad (2)$$

где $r = 0,018 \text{ м}^2$ – радиус цилиндрической балки; m_i – масса i -й точки, погонная масса балки, то есть масса балки, находящаяся вне крепления (заделки), кг, определяемая по формуле

$$m_i = \sum_{i=1}^n V_i \cdot \rho = \pi \cdot r^2 \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \rho, \quad (3)$$

где $\rho = 7826 \text{ кг/м}^3$ – плотность стали 45; l_i – длина балки от i -й точки (длина незакрепленной части балки, м); V_i – объем балки в i -й точке (объем балки, находящейся вне крепления (заделки), м^3).

Аналитический расчет выполнен в системе автоматизированного расчета Mathcad, результаты расчета приведены в табл. 1.

Для конечно-элементного моделирования была использована САЕ-система FEMAP 11.1.2. Создана конечно-элементная модель заготовки, изображенная на рис. 5.

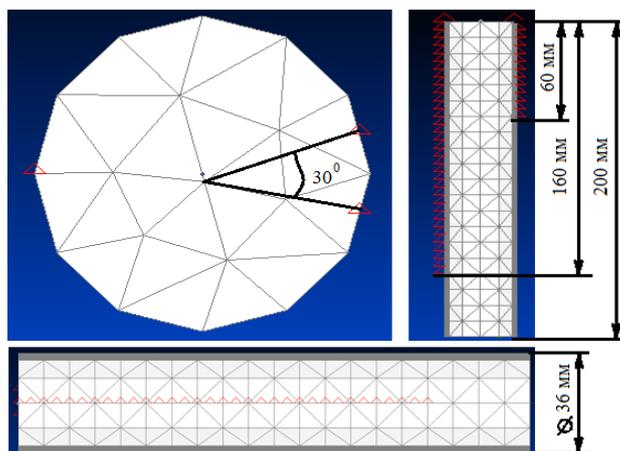


Рис. 5. Конечно-элементная модель заготовки с заделкой

Для определения частоты колебаний методом конечно-элементного моделирования заданы геометрические размеры заготовки и физико-механические свойства материала – сталь 45, необходимые для определения частот колебаний заготовки:

- модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$;
- плотность $\rho = 7826 \text{ кг/м}^3$.

При разбиении модели на конечные элементы установлен квадратный тип сетки со стороной 10 мм с последующей автоматической триангуляцией.

Как видно из рис. 2 и 5, заготовка имеет три линии контакта. Две линии образуют точки контакта заготовки и приспособления для удержания цилиндрических заготовок, и еще одну линию образуют заготовка и стенка тисов. Поэтому моделирование зажима заготовки в тисках осуществлено установлением жесткой заделки на модели с учетом координат линии контакта заготовки с тисками и линий контакта заготовки с приспособлением.

Максимальная длина приспособления для крепления цилиндрических заготовок – 60 мм. Угол сектора под цилиндрическую заготовку – 30° .

Для возбуждения колебаний в заготовке к ней прикладывался единичный вектор силы. В результате моделирования получены частоты колебаний. Форма колебаний при максимальном вылете в 180 мм заготовки приведена на рис. 6, а, а при минимальном вылете в 40 мм – на рисунке 6, б. Частоты, полученные в ходе моделирования, также сведены в табл. 1.

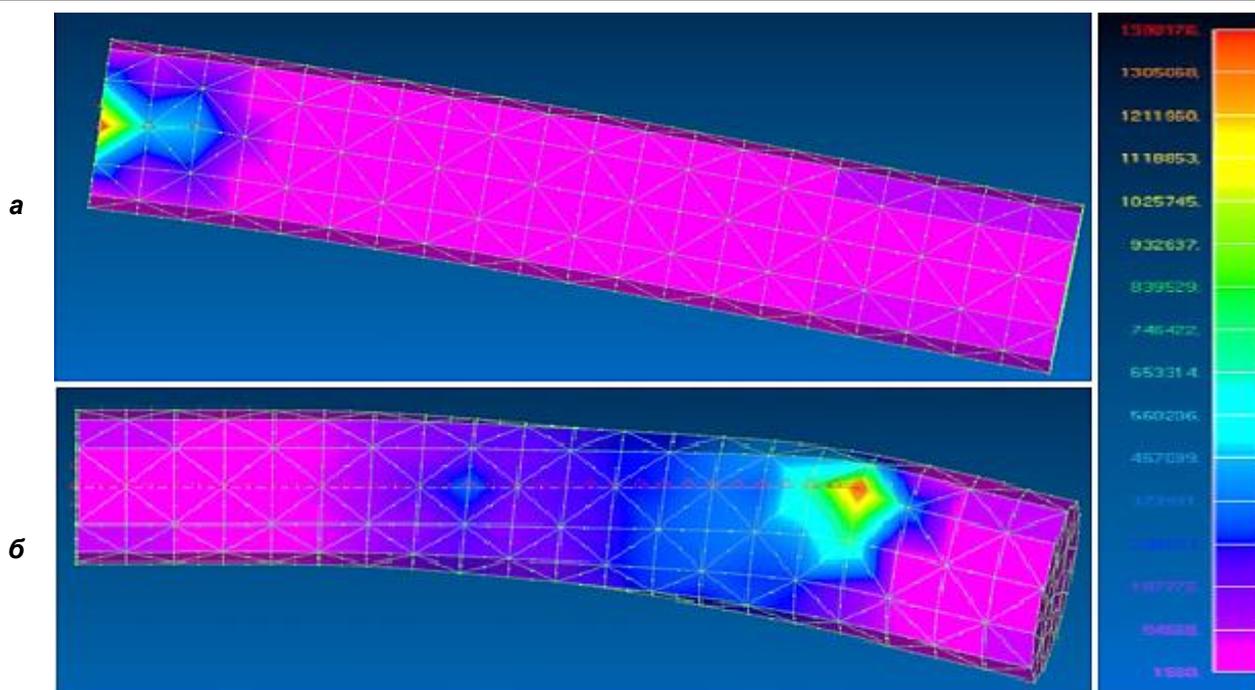


Рис. 6. Формы и частоты колебаний заготовки при конечно-элементном моделировании:
 а – форма колебаний заготовки при вылете 180 мм (334,8 Гц);
 б – форма колебаний заготовки при вылете 40 мм (5906 Гц)

Для оценки адекватности модели необходимо провести сравнение результатов, полученных при натурном эксперименте, аналитическом расчете и конечно-элементном моделировании. Для этого построен график зависимостей частот колебаний заготовки от длины ее вылета из тисов, приведенный на рис. 7, и построена табл. 1 с отклонениями полученных значений.

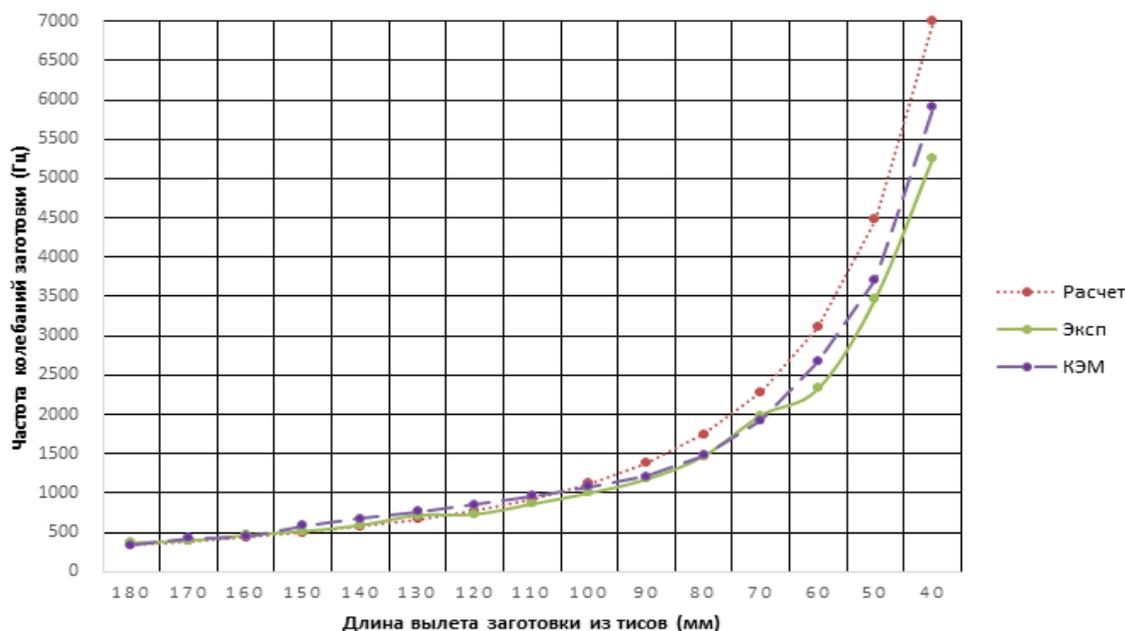


Рис. 7. Результаты определения частот, полученных экспериментально, аналитически и методом конечно-элементного моделирования

Таким образом, анализируя полученные в ходе проведения натурального эксперимента, аналитического расчета и конечно-элементного моделирования данные, можно сделать вывод о том, что при увеличении длины вылета заготовки уменьшается частота собственных колебаний, то есть снижается жесткость. При этом частота колебаний для одного и того же объекта является величиной постоянной и не зависит от силы, ее возбуждающей. Сила влияет лишь на величину амплитуды колебаний.

Анализируя частоты собственных колебаний заготовки при разных длинах вылета, полученные различными методами, можно сделать вывод о том, что все методы дали схожие результаты. Наиболее близкие значения частот получены при конечно-элементном моделировании и натурном эксперименте. Максимальные отклонения при сравнении данных, полученных при аналитическом расчете, с результатами моделирования и натурального эксперимента связаны с допущением при аналитическом расчете того, что длина жесткой заделки по сечению балки равная. А при натурном эксперименте и моделировании в результате использования приспособления для закрепления цилиндрической заготовки эта длина закрепления различна в силу того, что приспособление имеет ограничение по длине в 60 мм. Это не дает возможности закрепить абсолютно жестко заготовку по всей длине сечения при длинах вылета от 90 до 40 мм. В результате при малых длинах вылета наблюдаются максимальные отклонения значений частот колебаний, полученных экспериментальным путем, от значений, полученных расчетным способом. Эти отклонения также объясняются тем, что при аналитическом расчете жесткая заделка принимается по всему профилю заготовки, а при натурном эксперименте и моделировании жесткая заделка лежит лишь на линиях контакта заготовки с приспособлениями крепления.

Незначительные отклонения значений, полученных при натурном эксперименте, от значений, полученных при моделировании и аналитическом расчете, можно объяснить также тем, что при натурном эксперименте на определение частот колебаний влияли элементы жесткости и демпфирования (тисы, приспособление, стол, пол), а при моделировании и аналитическом расчете во внимание принимались только геометрия и физико-механические свойства заготовки.

Библиографический список

1. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
2. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.