

21. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. 480 с.
22. <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book1/index.php>.
23. <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book2/18/trainlm.php>.

С.Е. Квашнин, А.А. Максимов

Исследование влияния нагрева зон пучностей деформации на амплитудно-частотные характеристики ультразвуковой колебательной системы

Аннотация

В результате решения задачи о стационарных продольных колебаниях стержневого волновода-инструмента с учетом внутренней диссипации механической энергии определено распределение внутренних источников нагрева волновода, позволившее рассчитать пространственно-временное распределение температуры на поверхности такого волновода. Экспериментально определены тенденции изменения спектра резонансных частот ультразвуковой колебательной системы (УЗКС), состоящей из пьезопреобразователя и стержневого волновода, в зависимости от нагрева стержневого волновода-концентратора. С учетом экспериментальных зависимостей модуля упругости и коэффициента поглощения от температуры решена задача определения сдвига спектра резонансных частот УЗКС, связанного с нагревом зон пучностей деформаций, при длительной непрерывной работе УЗКС на частоте резонанса.

Эксплуатация ультразвуковых хирургических колебательных систем, совершающих как продольные, так и изгибно-продольные колебания в течение длительного интервала времени (более 1 мин) при высоких амплитудах колебаний стержневого волновода-инструмента обычно связана и с нагревом высокоамплитудной части такого инструмента. Степень нагрева зависит как от амплитуды упругих деформаций материала, так и от таких свойств материала волновода-инструмента, как плотность, скорость звука и коэффициент поглощения. Наибольшее тепловыделение происходит в зонах пучностей деформаций. При этом, по данным [1], величина нагрева поверхности волновода-инструмента продольных колебаний, выполненного из титанового сплава типа ВТЗ-1, за 10 мин работы может достигать 100 °С. Столь существенный нагрев, в свою очередь, приводит к тому, что нельзя считать не зависящими от температуры такие физико-механические характеристики материала, как модуль упругости и коэффициент поглощения. В табл. 1 представ-

лены значения модуля упругости первого рода, скорости звука и коэффициента поглощения от температуры для некоторых титановых сплавов по данным [3]-[5].

Длительная работа ультразвуковых хирургических систем при высоких амплитудах колебаний рабочего окончания и, следовательно, при значительных амплитудах деформаций может вызывать нагрев зон волновода-инструмента [1], [2], расположенных вблизи пучностей деформаций. Исследования влияния нагрева высокоамплитудной части волновода-инструмента (ВИ) представляют также интерес в связи с работами по созданию протяженных по длине ультразвуковых эндохирургических инструментов.

Модуль упругости $E(T)$ титановых сплавов, применяемых в производстве волноводов-инструментов, как видно из данных, представленных в табл. 1, по мере роста температуры T уменьшается. При этом плотность материала также уменьшается, однако в меньшей степени. Несложно оценить уменьшение скорости звука $c(T)$ в материале, рассчитав ее как

Таблица 1

Зависимости модуля упругости, скорости звука и коэффициента поглощения для некоторых титановых сплавов от температуры

Марка материала	Температура, °С	Модуль упругости E , ГПа	Скорость звука, м/с	Средний градиент падения скорости звука от температуры, м/с / °С	Коэффициент поглощения (при 80 МПа), %
ВТЗ-1	20	127,5	5323	-0,77	0,03
ВТЗ-1	100	124,3	5261	-1,01	0,048
ВТЗ-1	200	119,5	5160	-	0,056
ВТ-8	20	126	5303	-0,20	0,025
ВТ-8	100	125	5288	-0,77	0,035
ВТ-8	200	121,3	5210	-	0,045
ВТ-6	20	113	5039	-1,24	-
ВТ-6	250	100	4755	-	-

$$c(T) = \sqrt{\frac{E(T)}{\rho_0 [1 - k(T - T_0)]}},$$

где ρ_0 – плотность при температуре $T_0 = 20$ °С; k – коэффициент объемного расширения. Результаты расчета зависимости скорости звука от температуры представлены в 3-й колонке *табл. 1* и на *рис. 1*. Очевидно, нагрев элементов ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) приводит, ввиду зависимости скорости звука от температуры, и к изменению всего спектра резонансных частот УЗКС.

Абсолютное изменение скорости звука Δc при не слишком большом нагреве можно приближенно выразить соотношением

$$\Delta c = \frac{1}{2} \left(\frac{E_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\Delta E \rho - E_0 k \rho_0}{\rho^2},$$

где E_0 – модуль упругости при температуре 20 °С; ρ_0 – плотность при 20 °С; $\rho = \rho_0(1 - k\Delta T)$ – плотность при температуре T ; $\Delta T = T - T_0$ – разность температур.

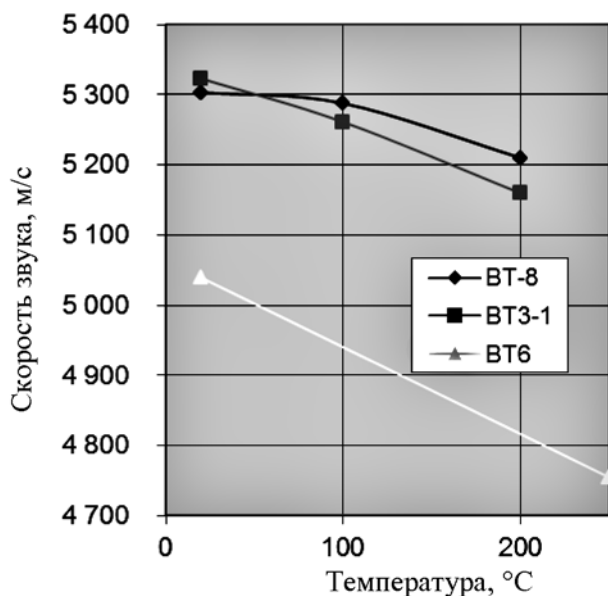


Рис. 1. Зависимость скорости звука в титановых сплавах ВТ-8, ВТ-6 и ВТ3-1 от температуры

Тогда абсолютное изменение резонансной частоты Δf стержневого волновода-инструмента продольных колебаний, связанное с нагревом, можно определить как

$$\Delta f = \frac{\alpha L}{2\pi L} \left(\Delta c - \frac{k}{3} c_0 \Delta T \right),$$

где c_0 – скорость звука при температуре 20 °С; αL – корень частотного уравнения для конкретной геометрии волновода. Для волновода постоянного поперечного сечения со свободными краями $\alpha L = n\pi$, где $n = 1, 2, \dots$, – соответствует номеру резонанса (гармоники).

Как показывают расчеты, равномерный нагрев волновода из титанового сплава ВТ3-1 постоянного поперечного сечения на $\Delta T = 30$ °С приводит к снижению частоты n -го резонанса волновода на $109n$ Гц.

Однако ввиду того, что волновод-инструмент нагревается по длине волновода неодинаково, изменение спектра резонансных частот будет более сложным, как показывают предварительные оценочные расчеты [2].

Исследовали влияние нагрева зон ВИ с большими амплитудами деформаций на спектр резонансных частот УЗКС в целом и возможности селективной идентификации таких влияний.

Энергия, поглощенная в элементах УЗКС в результате механического гистерезиса, переходит в тепловую энергию, а затем рассеивается в среде. Таким образом, происходит постоянный нагрев элементов УЗКС внутренними тепловыми источниками, мощность которых пропорциональна поглощенной энергии. С другой стороны, УЗКС передает свою тепловую энергию окружающей среде путем теплопроводности, конвекции и излучения. Связав эти два процесса уравнением теплопроводности и количественно описав явления теплообразования и теплопереноса, можно определить температурное поле УЗКС в любой момент времени, т. е. решить связанную задачу термоупругости [1].

Здесь рассматривался лишь нагрев части УЗКС – стержневого волновода-инструмента, нагрев остальных элементов УЗКС не рассматривался, а в эксперименте эти элементы УЗКС термостабилизировались. Одномерное уравнение теплопроводности для стержневого волновода-инструмента с распределенным внутренним источником теплоты и боковым теплообменом имеет вид

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \alpha_v T(z, t) - q_v(z, t, \psi), \quad (1)$$

где $T(z, t)$ – текущая температура; t – время; z – текущая координата поперечного сечения УЗКС; c – теплоемкость; ρ – плотность материала; $\lambda(z)$ – коэффициент теплопроводности; $q(z, t, \psi)$ – распределенная по длине волновода плотность источника теплоты; $\alpha_v(z, t)$ – коэффициент конвективной теплоотдачи в единице объема ($\alpha_v = \alpha U / S$, где α – собственно коэффициент конвективной теплоотдачи; U – периметр; S – площадь поперечного сечения).

Граничные условия третьего рода на торцах волновода состоят в том, что плотность теплового потока q_v пропорциональна разности температур окружающей среды и границы

$$\left[\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha_{0,1} T \right]_{z=0,1} = q_{0,1}. \quad (2)$$

Определение мощности внутренних источников теплоты

При амплитудах продольных деформаций ϵ и механических напряжений σ рассеиваемая в единице объема энергия за один цикл деформирования материала волновода определяется как

$$\Delta U = \frac{\Psi_0}{2} \int_z^{z+\Delta z} F(z) \sigma \epsilon dz, \quad (3)$$

где $F(z)$ – площадь поперечного сечения волновода.

Следовательно, удельная мощность, рассеиваемая из-за механического гистерезиса, в единице объема волновода

$$q_v(z) = \frac{f \Psi E \epsilon^2(z)}{2}. \quad (4)$$

Из решения системы уравнений продольных колебаний и уравнения теплопроводности видно, что плотность потока теплопередачи зависит от модуля упругости, в то время как модуль упругости, а также плотность и коэф-

коэффициент поглощения зависит от температуры, и последняя определяется из решения уравнения (1). Зависимость модуля упругости от температуры в диапазоне от 20 до 100 °С взята из [3] для сплава ВТЗ-1; кроме того, были проведены и собственные исследования, подтверждающие данные, представленные в [3].

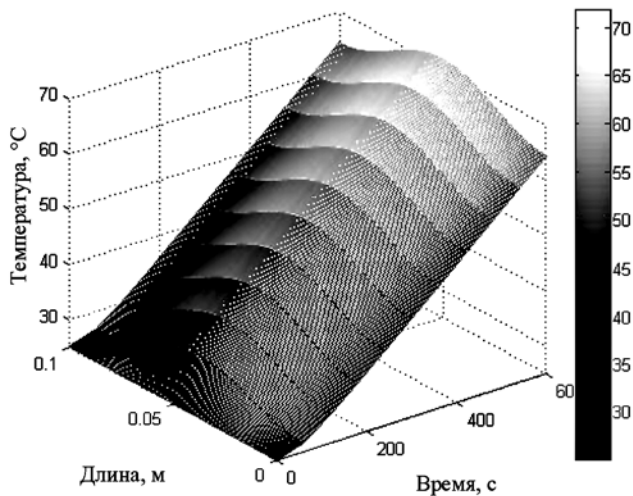


Рис. 2. Расчетное распределение температуры $T(t, z)$ поверхности цилиндрической части волновода вдоль продольной оси z как функция времени непрерывной работы t на частоте резонанса (радиус волновода – 2 мм; материал волновода – титановый сплав ВТЗ-1; коэффициент поглощения – 0,03 %)

Для определения напряженно-деформированного состояния стержневого волновода решалась задача о продольных колебаниях, которая описывается системой волновых уравнений [2], учитывающих внутреннее трение, описываемое условной упруго-вязкой моделью. Решение системы волновых уравнений для стационарных гармонических колебаний может быть сведено к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} \frac{du_1}{dz} = \left[EF(z) \left(1 + \frac{\Psi_0^2}{4\pi^2} \right) \right]^{-1} \left[N_1(z) - \frac{\Psi_0}{2\pi} N_2(z) \right]; \\ \frac{du_2}{dz} = \left[EF(z) \left(1 + \frac{\Psi_0^2}{4\pi^2} \right) \right]^{-1} \left[N_2(z) + \frac{\Psi_0}{2\pi} N_1(z) \right]; \\ \frac{dN_1}{dz} = -\rho\omega^2 F(z)u_1(z); \\ \frac{dN_2}{dz} = -\rho\omega^2 F(z)u_2(z), \end{cases} \quad (5)$$

где $u_1(z)$, $u_2(z)$ – действительная и мнимая составляющие продольного смещения z -го сечения волновода в момент времени t ; $N_1(z)$, $N_2(z)$ – действительная и мнимая составляющие осевого усилия в z -м поперечном сечении; E – модуль упругости; Ψ_0 – коэффициент поглощения в материале волновода.

Используя зависимость модуля упругости и плотности от температуры в системе (5), рассчитывались значения собственных частот для исходной (не нагретой) УЗКС и УЗКС с волноводом, проработавшем на резонансе некоторое время t и нагретом до температуры $T(t, z)$. Результаты математического моделирования сдвига резонансных частот, связанного с нагревом зон максимальных деформаций для каждого i -го резонанса, представлены на рис. 3, а результаты математического моделирования сдвига резонансных частот, связанного

с нагревом РО каждого i -го резонанса, представлены на рис. 4.

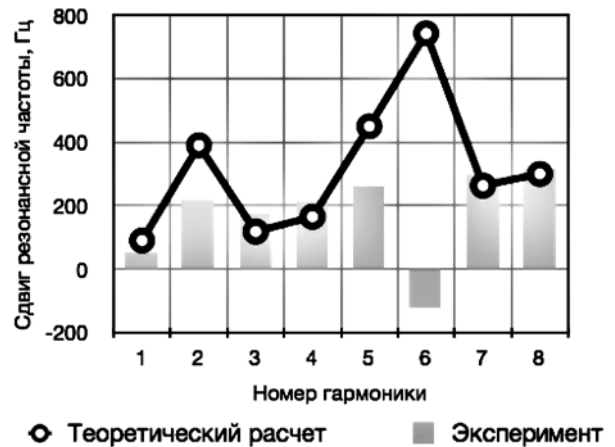


Рис. 3. Результаты экспериментов и теоретического расчета для случая нагрева зоны максимальных деформации волновода-инструмента (по оси абсцисс – номер гармоники, по оси ординат – сдвиг резонансной частоты)

Проводились экспериментальные исследования влияния нагрева зон лучностей деформаций на сдвиг резонансных частот для каждого i -го резонанса. Исследовалась УЗКС с электроакустическим ланжевенным пьезопреобразователем и присоединенным к ней стержневым волноводом, как это описано в [2]. Все исследования проводились на экспериментальном стенде, состоящем из генератора синусоидального сигнала Г4-158 с возможностью внешнего управления по интерфейсу RS-232, усилителя мощности «Брюль и Кьер» 2713 (выходная мощность – 100 Вт, выходное сопротивление – 30 Ом), вольтметра «Keitley 2000» – для измерения среднеквадратичных значений напряжений на частотах 20...30 кГц и возможностью сопряжения с персональным компьютером по интерфейсу RS-232, пирометра – для контроля температуры поверхности волновода, системы стабилизации температуры других элементов УЗКС.

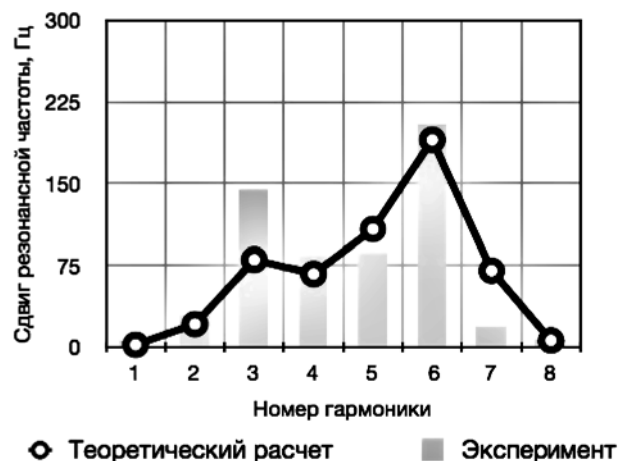


Рис. 4. Результаты экспериментов и расчетов для случая нагрева рабочего окончания волновода-инструмента (по оси абсцисс – номер гармоники, по оси ординат – сдвиг резонансной частоты)

Для синхронного управления и одновременной регистрации параметров УЗКС было разработано специализированное программное обеспечение (ПО) удаленного управления мультиметром и генератором. Программное

управление мультиметром позволило автоматизировать процесс съема АЧХ. Программное управление генератором позволило синхронизировать работу двух приборов и повысить точность регистрации частоты при записи АЧХ.

Скорость сканирования по частоте выбиралась в соответствии с рекомендациями [6] таким образом, чтобы эффект сдвига динамической резонансной частоты не превышал 4 Гц, эта скорость составила 10 Гц/с. Для исключения влияния нагрева ЭАП последний обдувался вентилятором, а температура в зоне пьезоэлементов контролировалась пирометром.

Проводились две серии экспериментов: в первой серии экспериментов амплитуда механических колебаний выбиралась значительной (около 120 мкм на РО), в результате нагрев зон пучностей деформаций был тоже значительным, максимальная температура в зоне пучностей деформаций контролировалась пирометром.

Во второй серии экспериментов амплитуда механических колебаний была небольшой, для того чтобы нагрев зон пучностей деформаций за счет внутренней диссипации механической энергии был незначительным, а нагрев зон пучностей деформаций производился внешним источником тепла (феном) до тех же значений температуры, что и в первой серии экспериментов.

В случае рабочего окончания методика проведения эксперимента предполагала нагрев РО в течении 10 мин на длине в 1 см от края стержневого волновода-концентратора. Для этого рабочее окончание погружалось в подогретую воду. При исследованиях нагрева зон максимальных деформаций нагрев осуществлялся феном.

Контрольные эксперименты для УЗКС с термостабилизированной зоной ЭАП показали, что максимальный сдвиг по любой из гармоник не превышал 15 Гц, тогда как при выключении системы термостабилизации УЗКС максимальный сдвиг по i -й резонансной частоте мог достигать 500...600 Гц.

Было обнаружено, что нагрев рабочего окончания и нагрев области максимальных деформаций приводит к существенно различным распределениям сдвигов резонансных частот по гармоникам (рис. 3 и 4).

Также было установлено, что наиболее чувствительными к нагреву РО являются 3-я и 6-я гармоники. Для УЗКС с однополуволновым стержневым волноводом-концентратором наиболее чувствительной гармоникой к нагреву зон пучностей деформаций являются 2-я и 6-я гармоники. Также было установлено, что сдвиги спектра ре-

зонансных частот в случае внешнего принудительного нагрева зон пучностей деформаций и в случае собственного нагрева, вызванного механической диссипацией энергии, идентичны в области номеров гармоник до 3-й и различаются на 15...25 % на гармониках выше 4-й.

Полученные результаты могут быть использованы для оперативного контроля степени нагрева как РО, так и зон пучностей деформаций. Полученные закономерности справедливы не только для рассмотренной УЗКС, но и для многих других высокочастотных систем. Разработанный аппаратно-программный комплекс может быть использован и для других исследовательских задач, связанных с измерением АЧХ и динамикой изменения параметров УЗКС.

Список литературы:

1. Барбаи Л.И., Квашинин С.Е., Запальский М.Л. Применение тепловизионного метода исследований диссипации механической энергии при продольных колебаниях ультразвуковых медицинских инструментов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 1993. № 4. С. 86-93.
2. Квашинин С.Е., Максимов А.А. Исследование влияния нагрева зон пучностей деформации длинных стержневых волноводов продольных колебаний на амплитудно-частотные характеристики преобразователя / Сб. трудов научной конференции. Сессия научного совета РАН по акустике и XXV сессия Российского акустического общества. Т. II. – М.: ГЕОС, 2012. С. 96-99.
3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Справочник. – Киев: Наукова-Думка, 1971. 376 с.
4. Titanium and Titanium Alloys, 1 June 1974. Department of Defense USA, Washington, DC, MIL-HDBK-69A.
5. Конструкционные материалы. Справочник / Под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. С. 309.
6. Квашинин С.Е., Максимов А.А. Проход через резонанс ультразвукового ланжевенового преобразователя для хирургии // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 10. С. 4-8.

*Сергей Евгеньевич Квашинин,
д-р техн. наук, профессор,
Алексей Алексеевич Максимов,
аспирант,
кафедра БМТ2,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: sek@bmstu.ru*

* * * * *