

**АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В ЭЛЕМЕНТАХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН  
THERMAL STRESSES ANALYSIS IN THE ELEMENTS OF SONAR  
ANTENN.**

**М.В. Богуш, О.М. Богуш, Э.М. Пикалев  
Bogush M, Bogush O, Pikalev E.**

Аннотация

Исследованы температурные напряжения в деталях антенны с помощью конечно-элементного математического моделирования. Даны конструктивные и технологические рекомендации по улучшению термостойкости антенны.

Annotation

The temperature stresses in detail antenna using finite element mathematical modeling. Given the design and technological advice for improve thermal stability antenna.

Ключевые слова:

Пьезокерамика, гидроакустика, антенна, температурные напряжения, прочность, метод конечных элементов, испытания, термостойкость, расчет.

Keywords:

Piezoelectric ceramics, underwater acoustics, antenna, thermal stress, strength, finite element method, testing, heat calculation.

Настоящая статья написана для того, чтобы напомнить разработчикам пьезоэлектрических преобразователей насколько важно учитывать температурные напряжения в элементах конструкции [1] при оценке надежности и технологичности проектируемых устройств.

Года 3 назад к нам обратился представитель одного из солидных заводов, выпускающего гидроакустические антенны с вопросом: можем ли мы поставить достаточно прочную пьезокерамику для их изделий?! Далее из разговора выяснилось, что для изготовления антенн используются

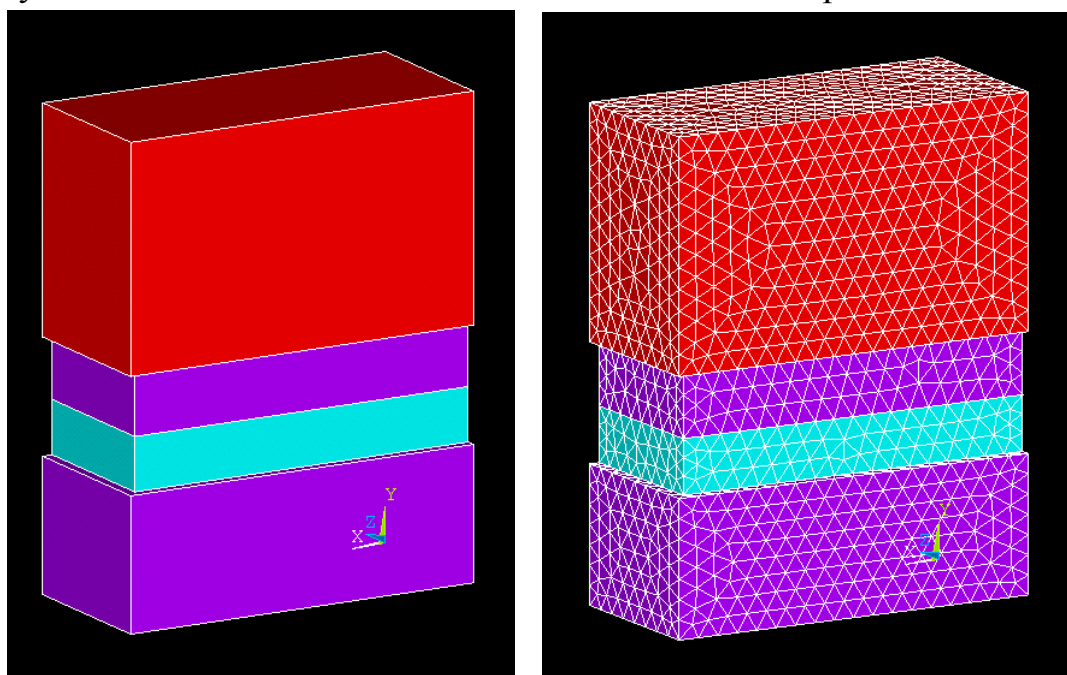
пьезоэлементы из пьезокерамики ЦТБС-3 и при испытании антенн происходит их разрушение. Естественное предположение, что во всем виновна пьезокерамика!

Мы задали уточняющий вопрос: на какой стадии происходит разрушение? Оказалось, что изделия не выдерживают испытания на транспортирование при температурах  $\pm 50^{\circ}\text{C}$  и разрушение происходит при минус  $30\text{--}40^{\circ}\text{C}$ .

Антенна представляет собой пакет, содержащий пьезоэлемент из керамики ЦТБС-3, размещенный между двумя прокладками из стали, плюс дополнительно протектор из алюминия. Причем сборка пакета происходит с помощью клея с температурой полимеризации  $65^{\circ}\text{C}$ .

Нами было проведено исследование температурных напряжений в деталях антенны с помощью математического моделирования методом конечных элементов (МКЭ) и программного пакета ANSYS [2-4].

Геометрическая модель антенны показана на рис.1. Поскольку модель имеет две плоскости симметрии, задача решается для  $\frac{1}{4}$  объема антенны. Конечноэлементная модель содержит около 26300 элементов. Считаем антенну механически свободной от внешних сил и не закрепленной.



*Рис. 1. Геометрическая и конечноэлементная модели преобразователя П<sub>100</sub>.  
Голубой цвет – пьезокерамика ЦТБС-3, фиолетовый – сталь 35, красный –  
алюминиевый сплав Д16.*

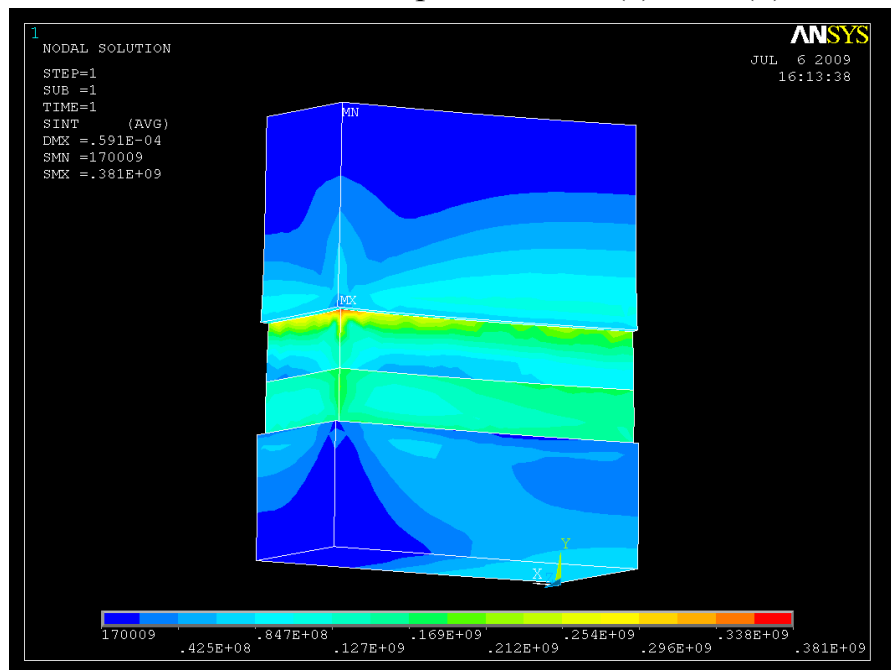
Температура сборки антенны принимается равной  $65^{\circ}\text{C}$ , поскольку детали соединяются между собой с помощью клея при этой температуре. При более низких температурах возникают термические напряжения, качественно

описываемые приведенными ниже иллюстрациями, на которых цветовая шкала показывает распределение напряжений от максимальных отрицательных (синий цвет) до максимальных положительных (красный цвет) значений. Поскольку ни в справочной, ни в научной литературе нет сведений о тепловом расширении (ТР) пьезокерамики ЦТБС-3, то мы в расчетах использовали значения коэффициентов ТР для другого материала системы цирконата-титаната свинца ЦТС-83Г [4], предполагая, что различие коэффициентов ТР между ними незначительно.

Целью последующих расчетов была оценка действующих температурных напряжений в элементах конструкции антенны и сравнение их с пределами прочности соответствующих материалов.

Прочность металлов определяется интенсивностью механических напряжений  $S_{int}$ . Прочность керамических материалов определяется главными значениями напряжений: наибольшим по абсолютной величине сжимающим и наибольшим растягивающим напряжениями [5].

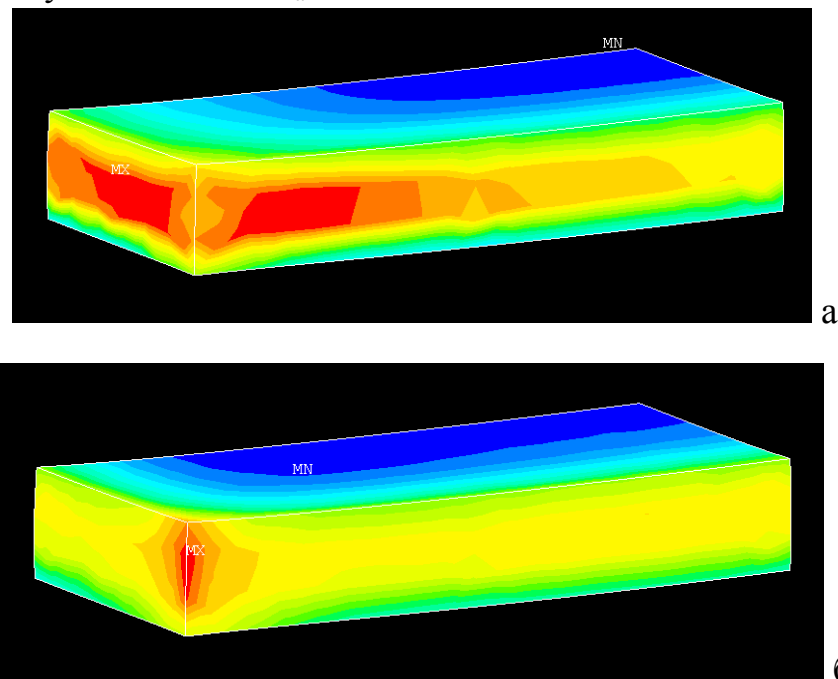
На рис. 2 показано распределение интенсивности механических напряжений в деталях антенны при изменении температуры, а на рис 3 - *распределение* главных значений напряжений  $S_3$  (а) и  $S_1$  (б) в пьезокерамике.



*Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений при  $T = -50^{\circ}\text{C}$*

Наибольшая интенсивность напряжений в деталях из металлов достигается в слое стали на границе с алюминиевым сплавом, в углу. При  $T = -50^{\circ}\text{C}$  максимальное значение  $S_{int} = 381$  МПа, что лежит в допустимых пределах для металлов.

Для оценки распределения напряжений в керамике этот слой иллюстрируется отдельно (рис. 3). На рис. 3а показано распределение главного значения осевой компоненты  $S_3$  в деталях из металла. При этом достигается минимальное (наибольшее по величине отрицательное) значение сжимающего напряжения  $-157$  МПа при  $T = -50^\circ\text{C}$  (синяя зона в центральной части слоя). Красные области на рис. 3а соответствуют максимальному положительному значению  $S_{3\text{max}} = 23.1$  МПа.



*Рис. 3. Распределение главных значений напряжений  $S_3$  (а) и  $S_1$  (б) в пьезокерамике*

Главное значение планарной компоненты напряжений в керамике  $S_1$  (б) содержит максимальное растягивающее напряжение  $S_{1\text{max}} = S^+ = 181$  МПа. Это достигается, как видно из рисунка, на вертикальном ребре пьезокерамического слоя. Последнее значение почти на порядок превышает предел прочности керамики на растяжение ( $21.6$  МПа).

Далее аналогичным путем исследовались модели антенны, в которой введены два слоя из титанового сплава ВТ1-0 с двух сторон пьезокерамического слоя. Титановый сплав имеет промежуточные значения КЛТР между пьезокерамикой и сталью и, казалось бы, должен снизить термические напряжения. Расчет, однако, показывает, что введение титановых слоев приводит лишь к очень незначительному снижению максимального растягивающего напряжения – от  $181$  до  $179$  МПа, а максимальное сжимающее напряжение  $144$  МПа остаются практически неизменными.

Самым слабым местом конструкции является концентратор напряжений на вертикальном ребре пьезокерамического слоя. Термические

напряжения, возникающие при понижении температуры, должны приводить к растрескиванию напряженной области ребра, к «размытию» концентратора и тем самым к снижению максимальных растягивающих напряжений.

Сделано предположение, что растягивающие напряжения удастся снизить, скруглив ребра пьезокерамического слоя. Однако, как показали расчеты, зона максимальных растягивающих напряжений при этом «размазывается» по цилиндрической поверхности, но величины этих напряжений существенно не снижаются.

Рассматривалось влияние разрезов в слое алюминиевого сплава (протектора) на величину термические напряжения. Верхний слой толщиной 11 мм разрезался на 5 равных частей сверху или снизу. Лишь при глубинах более 8 мм начинается понижение напряжений, достигающее при предельной глубине 10.9 мм величины около 15%. При разрезах снизу происходит монотонное снижение  $S^+$  с ростом глубины разреза, однако предельное снижение не превышает 10 %. Таким образом, разрезы не приводят к радикальному снижению напряжений в керамике.

Исследовалось также влияние тонких клеевых прослоек между деталями. Им присваивались свойства эпоксидного компаунда: плотность 1200 кг/м<sup>3</sup>, модуль Юнга 2.1 ГПа, рис. 4.

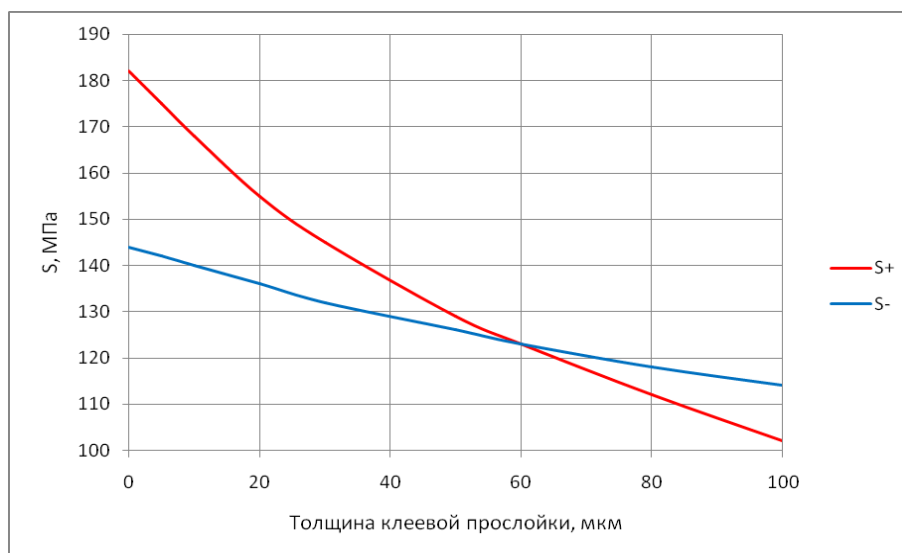


Рис. 4. Снижение максимальных растягивающих ( $S^+$ ) и сжимающих ( $S^-$ ) напряжений в керамике за счет клеевых прослоек.

Расчет показал, что напряжения  $S^+$  примерно линейно снижаются с ростом толщины прослойки, причем это снижение более значительно для растягивающих напряжений  $S^+$ . При толщине клея 100 мкм растягивающие

напряжения в керамике снижаются почти вдвое. Однако, этого еще не достаточно для обеспечения прочности конструкции при температуре минус 50°C.

Отметим, что в расчетах не учитывались нелинейные явления и пластические деформации в клеевой слое, которые могут снижать механические напряжения в деталях и одновременно быть причиной ухудшения надежности и долговечности изделия в целом.

Как показал анализ, косметическими решениями не удастся обеспечить термостойкость антенны. Необходимы радикальные изменения конструкции или технологии изделия.

В соответствии с работами [4,6] возможным диапазоном рабочих температур неоднородного преобразователя является такой, в котором температурные напряжения в пьезоэлементе не превышают разрушающие. При этом на верхней  $T_B$  и нижней  $T_H$  границе рабочего диапазона температур должны выполняться следующие соотношения [6]:

$$\sigma_{\text{пр}} = L_T (T_B - T_C) \leq \frac{1}{\eta} \sigma^{\pm} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{пр}} = L_T (T_H - T_C) \leq \frac{1}{\eta} \sigma^{\pm} \quad (2)$$

где  $L_T$  - коэффициент пропорциональности между температурными напряжениями и изменением температуры, зависящий от разности коэффициентов теплового расширения контактирующих материалов, упругих модулей и геометрии деталей;  $\eta$  - коэффициент запаса, зависящий от требований к надёжности конструкции. При  $\sigma_{\text{пр}} < 0$  справа в формулах (1, 2) подставляется  $\sigma^-$ , при  $\sigma_{\text{пр}} > 0$  -  $\sigma^+$ ,  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$  - пределы механической прочности пьезокерамики на растяжение и сжатие.

Из формул (1,2) следует, что задача может быть решена путем выбора материалов деталей или температуры сборки антенны.

Очевидно, что главной причиной, порождающей высокие термические напряжения, является высокий КЛТР алюминиевого сплава.

Была рассчитана модель, в которой протектор изготовлен из титанового сплава. Также рассмотрены модели, в которых стальные детали заменены на титановые. Эти модели будем обозначать по начальным буквам слоев металла, снизу вверх (см.рис.1).

Исходная модель ССА (сталь-сталь-алюминий) дает расчетное значение  $S^+ = 182$  МПа. Замена алюминиевого сплава титановым (модель ССТ) снижает  $S^+$  до 97 МПа, т.е., на 47%. При этом толщины слоев берутся те же, что в

исходной модели. Частота рабочей моды при этом понижается с 105.8 кГц до 100.9 кГц. Амплитуда смещения поверхности протектора в его центральной точке  $U_0$  на резонансе снижается с 50,3 нм/В до 46,4 нм/В, но максимальная амплитуда смещения  $U_{\max}$ , остается прежней – 85.3 нм/В. Поэтому можно полагать, что с титановым протектором антенна будет работать на излучение примерно также, как и с алюминиевым.

Снижение напряжения  $S^+$  на 47% означает и смещение низкотемпературной границы от минус 10°C до минус 50°C.

Результаты расчетов для моделей СТТ и ТТТ, в которых слои стали соответственно заменяются титановым сплавом, приведены в таблице.

Таблица

Материалы (снизу вверх)	Толщины	Частота Гц	$K_q$ пКл/В	$U_0$ нм/В	$U_{\max}$ нм/В	$S^+$ МПа	$S^-$ МПа
ССА	6,5/3/11	105815	90,983	50,286	85,3	182	144
ССТ	6,5/3/11	100903	107,687	46,416	85,3	97	154
СТТ	6,5/3/9	101625	122,525	55,481	71,9	87,4	193
ТТТ	6,5/3/11	100708	114,393	52,862	70,1	59	51,3

Как видно из таблицы, модель СТТ дает снижение напряжений  $S^+$  более чем в 2 раза, а модель ТТТ – более чем в 3 раза по сравнению с исходной моделью.

Другая возможность уменьшения температурных напряжений – снижение температуры сборки антенны (полимеризации клея) на 20-30°C. Именно столько не хватало базовой конструкции антенны для соответствия транспортным испытаниям при минус 50°C.

Естественно, мы поделились вышеприведенным анализом с заводчанами, и проблема прочности пьезокерамики была решена! Оказалось, что во всем виноваты температурные напряжения в элементах конструкции. Хотя, казалось бы, их и не должно быть, если температура в мировом океане не выходит за пределы от 0 до 30°C.

Но в процессе производства антенны подвергаются сборке при температуре 65°C и испытаниям при минус 50°C. А этого при соединении деталей из материалов с различными свойствами вполне достаточно для разрушения слабого звена.

## Литература

1. Белейчева Т.Г. Термоупругие напряжения в кусочно-однородных структурах. – Прикладная механика и техническая физика, 1978, № 5, с. 135-143.
2. Г. Стренг, Дж. Фикс. Теория метода конечных элементов. М., Мир, 1977, с. 349
3. Наседкин.А.В. Моделирование некоторых типов задач термоэлектроупругости в ANSYS. Сборник трудов четвертой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBL, М. 2004, с311-315.
4. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах Т.3.Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону. Издательство СКНЦ ВШ, 2006, 346 с: ил.
5. Писаренко Г.С. и др. Сопротивление материалов. – Киев: Виша школа, 1979. – 694 с.
6. Богуш М.В. Исследование неоднородных чувствительных элементов пьезоэлектрических датчиков //Датчики и системы – 2008.- № 2.- с.2-8.

### Сведения об авторах

Богуш Михаил Валерьевич, д.т.н., зам. директора НКТБ «Пьезоприбор» Южного Федерального университета, тел.863 299-50-80, piezo-boss@inbox.ru  
344090 Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10.

Богуш Ольга Михайловна, аспирант Южного Федерального университета, адрес и тел. тот же

Пикалев Эдуард Михайлович, к.ф-м.н., математик программист ООО «Пьезоэлектрик», 344090 Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10, тел. и эл. адрес тот же.