

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОСБОРОК, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков

Введение

Одной из важнейших задач развития научных основ конструирования и технологии изготовления изделий различного назначения является создание адекватных математических моделей, описывающих состояние конструкций и их отдельных элементов в процессе их производства, испытаний, транспортировки, хранения и эксплуатации. Анализ отказов изделий и их составных частей позволяет утверждать, что основными являются статические, динамические и тепловые воздействия, возникающие на всех стадиях жизненного цикла изделия [1, 2].

Анализ конструктивных особенностей современных изделий приборостроения и их составных частей показывает, что большинство из них предоставляет собой гетерогенные структуры, сочетающие в себе материалы с различными физико-механическими свойствами, обеспечивающими требуемую надежность и безопасность изделия в заданных режимах эксплуатации. Для исследования процессов, происходящих в структурах этих изделий под действием внешних факторов, необходима разработка математических моделей и комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов, позволяющих адекватно описывать процессы и напряженно-деформированное состояние (НДС) на всех этапах их жизненного цикла [3].

Модель для исследования НДС

Рассмотрим микросборку прямоугольного типа, имеющую широкое практическое применение в приборостроении и изделиях радиоэлектроники. На одной или нескольких гранях внутри микросборки размещаются платы с резистивными элементами, обеспечивающие требуемые выходные параметры микросборки. Эти микросборки представляют собой многослойные гетерогенные системы, которые в процессе их изготовления и эксплуатации подвергаются тепловым и механическим воздействиям.

Для анализа НДС таких микросборок и их элементов предложены различные модели, позволяющие исследовать их состояние при технологической опрессовке корпусов и научно обоснованно определять предельно допустимое давление с учетом их конструктивных особенностей [4, 5]. Аналогичные исследования проведены и при тепловых технологических и эксплуатационных воздействиях на платы микросборок [6]. Вопросы моделирования и исследования динамических процессов, происходящих в микросборках при вибрационном воздействии, в настоящее время исследованы недостаточно [7].

Типовая конструкция микросборки прямоугольного типа показана на рис. 1. Микросборка крепится к изделию винтами в четырех точках и имеет габаритные размеры корпуса по осям x , y , z соответственно $a \times b \times H$, где $a \times b$ – размеры в плане; H – высота корпуса. На основании корпуса (рис. 1, б) расположена плата, имеющая толщину h и размеры в плане $a_n \times b_n$. Плата крепится к основанию паяным или клеевым швом толщиной $h_{ш}$. Материал платы характеризуется модулем E_n и коэффициентом Пуассона ν_n , а материал шва – модулем сдвига $G_{ш}$ и коэффициентом Пуассона $\nu_{ш}$.

В общем случае считается, что грани корпуса микросборки изготовлены из различных материалов, механические свойства которых характеризуются модулями упругости E_j и имеют толщины h_j , где $j = 1, 2, \dots, 6$ – номер грани. Для определенности будем считать, что $j = 6$ соответствует крышке корпуса, $j = 1$ – основанию с платой, $j = 2 \dots 5$ – боковым стенкам корпуса.

На микросборку со стороны корпуса изделия в направлении оси z действует гармоническая вибрация, при которой в процессе эксплуатации возможны резонансные явления, возникающие в элементах микросборки (крышка, боковые стенки, основание, плата).

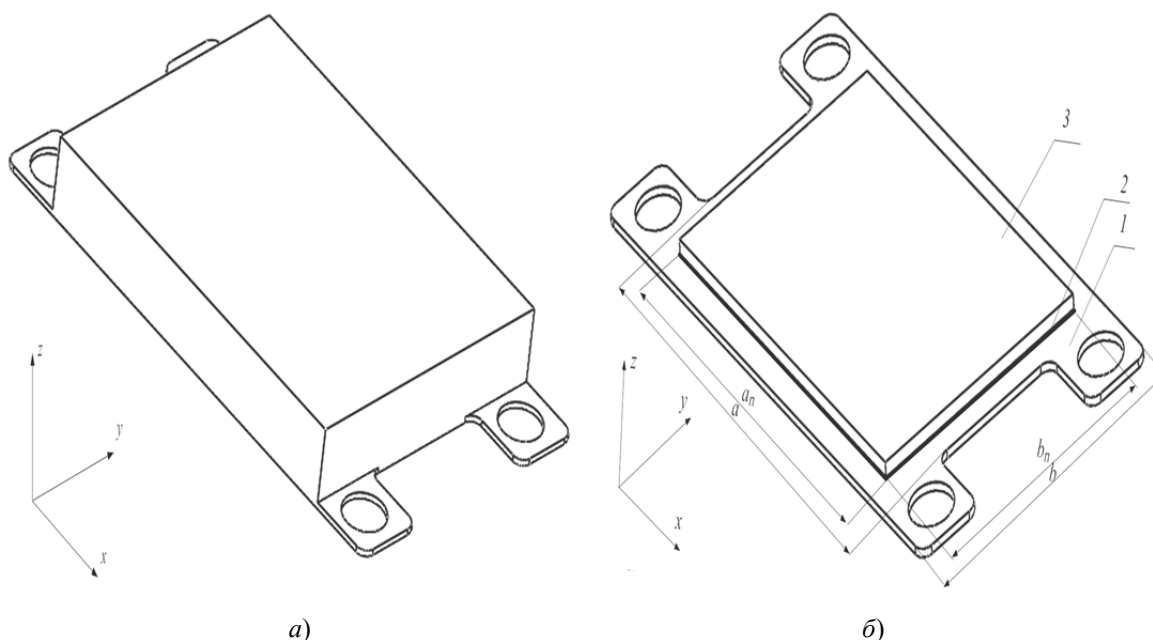


Рис. 1. Конструкция микросборки:
 а – общий вид; б – основание с платой; 1 – основание; 2 – шов; 3 – плата

В качестве адекватной модели, позволяющей исследовать динамические процессы в элементах микросборки, используется пространственная модель микросборки в виде гетерогенной структуры с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе ANSYS аналогично [5]. Такая модель позволяет учитывать взаимное влияние граней корпуса, реальные размеры плат и их места расположения на гранях, а также влияние физико-механических характеристик применяемых материалов плат, шва и граней корпуса. Модель позволяет учитывать наличие внутри корпуса нескольких многослойных плат, в том числе расположенных на разных гранях корпуса, что может приводить к отсутствию симметрии в конструкции микросборки и усложнению ее НДС. Предложенная модель является пространственной и наиболее общей по сравнению с моделями, представленными в [2].

Результаты численных исследований

На основании предложенной модели исследованы динамические характеристики различных типоразмеров микросборок. Установлено, что формы колебаний микросборок, их собственные частоты и места расположения наиболее нагруженных зон их элементов, где возможно возникновение и развитие дефектов, существенно зависят от массогабаритных размеров микросборок и особенностей их конструктивного исполнения: количества и размеров плат, высоты микросборки. В частности, при увеличении высоты микросборки проявляются изгибно-крутильные формы собственных колебаний, при которых наиболее нагруженными являются зоны, расположенные на проушинах, через которые микросборка крепится к изделию. Это связано со смещением центра масс микросборки при увеличении ее высоты.

В качестве примера приведем некоторые результаты численного моделирования динамических характеристик для микросборки, имеющей следующие размеры: $a \times b \times H = (36 \times 24 \times 5)$ мм. Плата расположена в центре основания и крепится к нему клеем ВК-9. Корпус изготовлен из сплава 29НК ($E_j = 1,4 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_j = 0,3$ при $j = 1, 2, \dots, 6$); плата – из ситалла ($E_n = 9,693 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_n = 0,25$), а свойства шва характеризуются модулем сдвига $G_{ш} = 1000$ МПа. Толщины элементов микросборки приняты следующими: $h_j = 0,4$ мм (при $j = 1, 2, \dots, 6$); $h = 0,6$ мм; $h_{ш} = 0,1$ мм.

Рассмотрены три варианта микросборки:

- I вариант: плата имеет размеры $a_n \times b_n = (30 \times 20)$ мм;
- II вариант: плата имеет размеры $a_n \times b_n = (15 \times 10)$ мм;
- III вариант: на основании расположены две одинаковые платы, каждая из которых имеет размеры $a_n \times b_n = (15 \times 20)$ мм, расстояние между платами равно 1 мм.

Анализ напряженно-деформированного состояния микросборок

Анализ НДС элементов микросборок показал, что наиболее нагруженными являются крышка микросборки, основание и платы, расположенные на основании на резонансных частотах, соответствующих собственным формам колебаний этих элементов [7]. На рис. 2 в качестве примера для микросборки I представлено распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ по элементам микросборок на первых пяти резонансных частотах. Эквивалентные напряжения рассчитаны по третьему критерию прочности. Боковые стенки корпуса микросборки на рисунках условно не показаны. Флажками показаны точки, в которых напряжения принимают максимальные значения. Моделирование НДС элементов микросборки на резонансных частотах выполнено при действии ускорения в направлении оси z равного 10g. Значение логарифмического декремента затухания для микросборки принято равным $\delta = 0,133$.

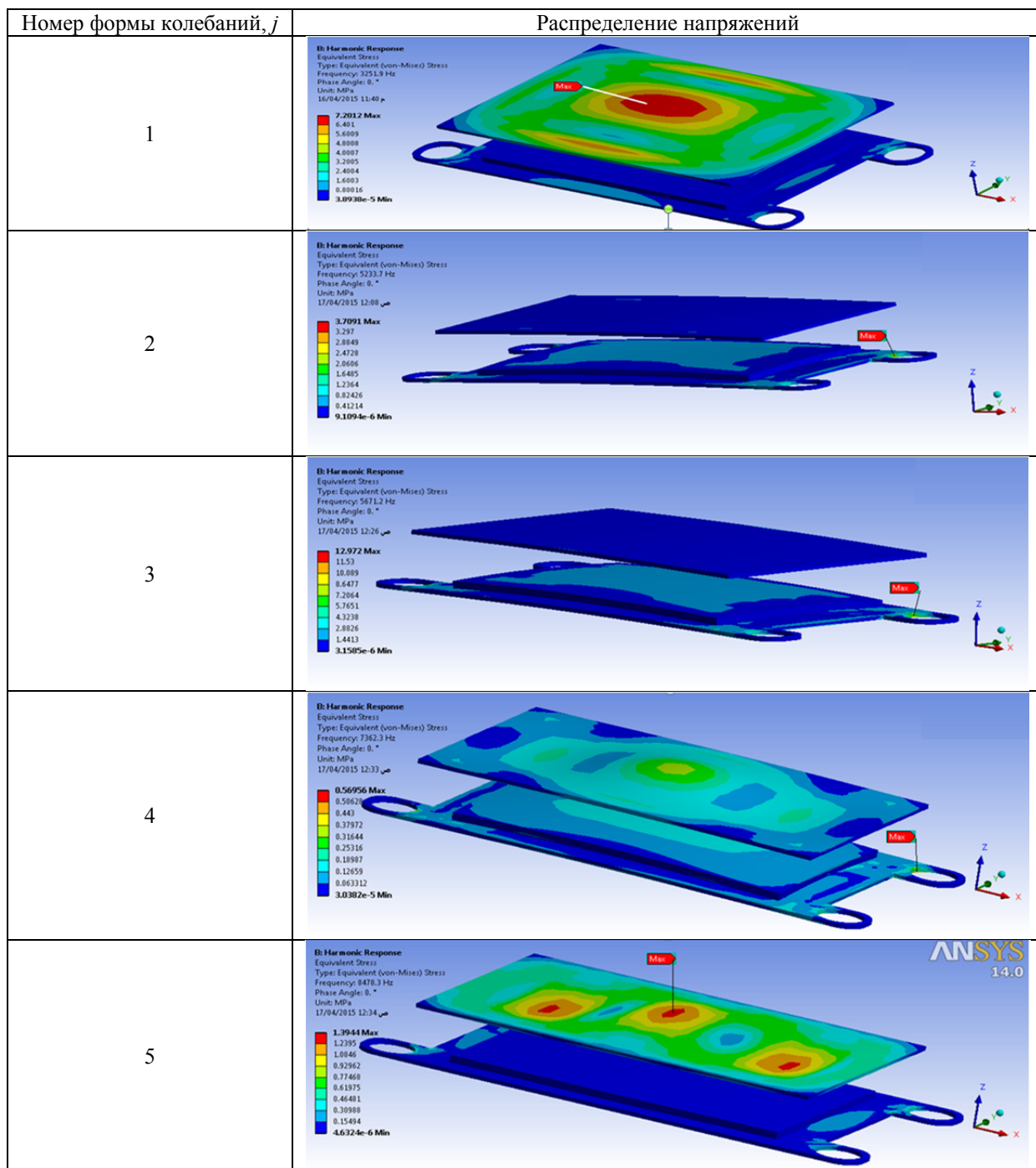


Рис. 2. Распределение напряжений для микросборки I

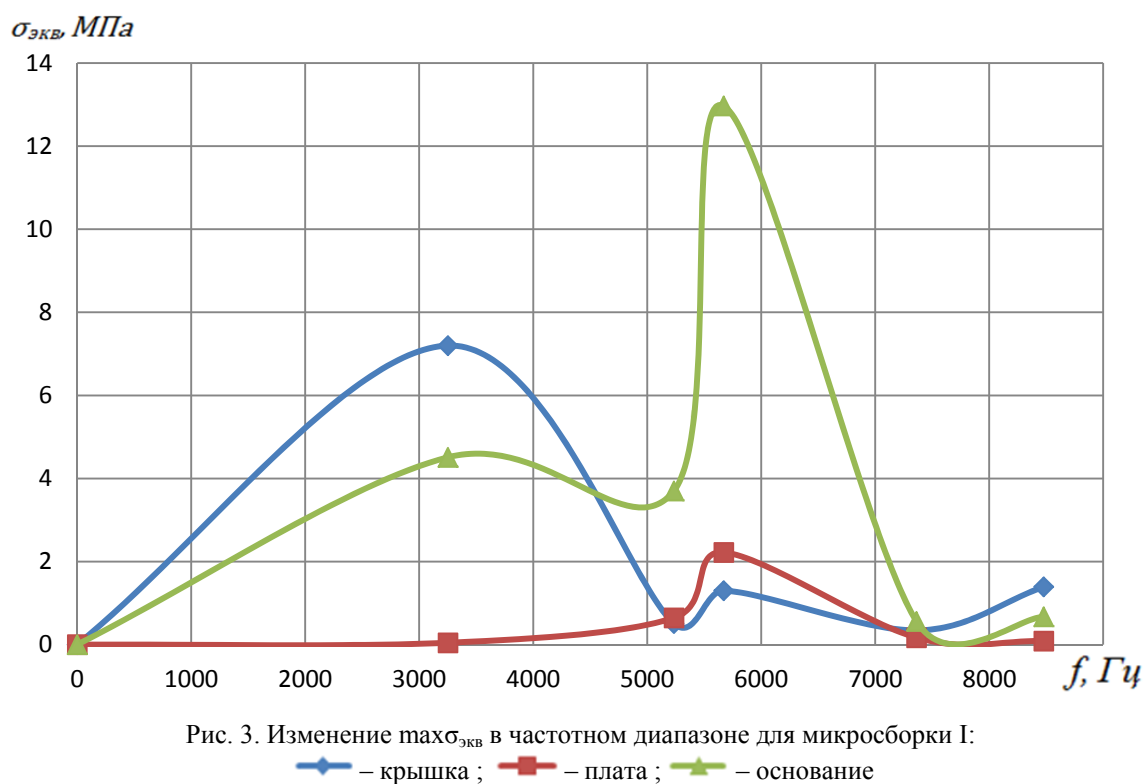
В табл. 1 приведены значения максимальных напряжений в крышке платы и основании микросборок на резонансных частотах f_j для различных вариантов микросборок.

Таблица 1

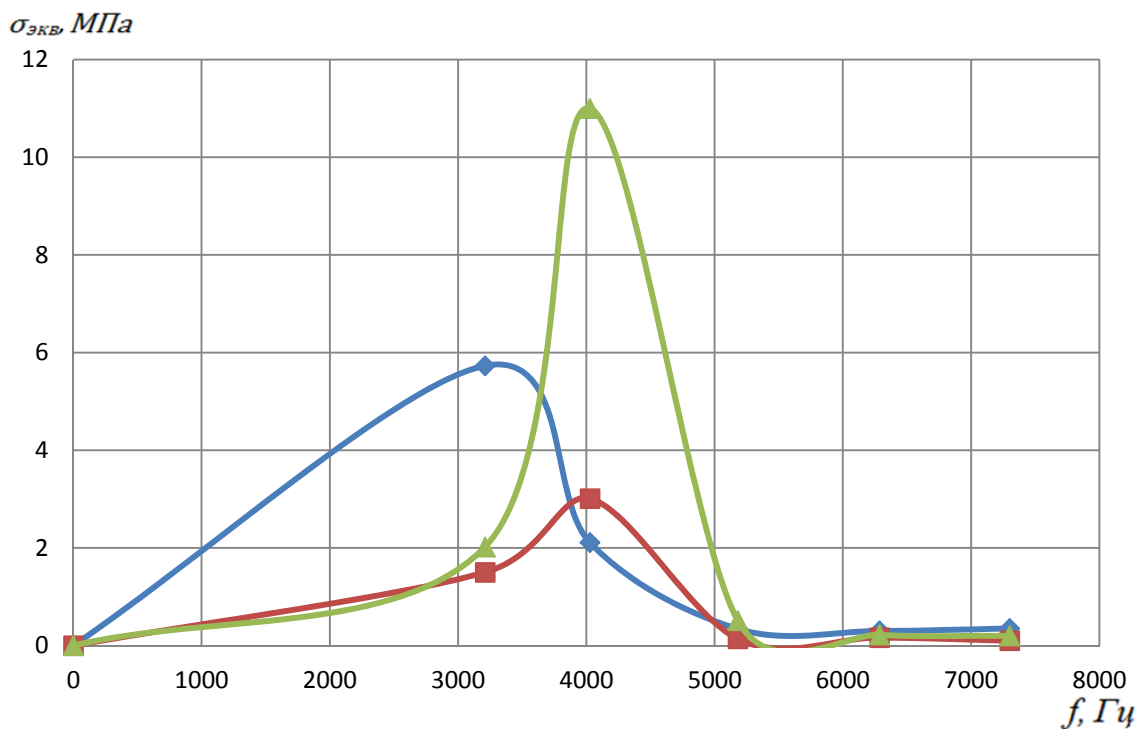
Максимальные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ (МПа) в элементах микросборок

Вариант микросборки	Номер частоты, j	$\max \sigma_{\text{экв}}$, МПа			
		f_j , Гц	крышка	плата	основание
I	1	3252	7,2	0,044	4,51
	2	5234	0,511	0,645	3,70
	3	5671	1,3	2,22	12,97
	4	7362	0,342	0,168	0,56
	5	8478	1,39	0,086	0,67
II	1	3210	5,73	1,5	2,02
	2	4028	2,11	3,01	11,0
	3	5181	0,342	0,14	0,51
	4	6286	0,30	0,163	0,22
	5	7301	0,35	0,10	0,199
III	1	3249	7,15	0,0431	2,91
	2	5234	1,45	1,81	8,86
	3	5343	2,01	3,57	11,56
	4	7344	0,339	0,18	0,263
	5	8479	1,34	0,13	0,342

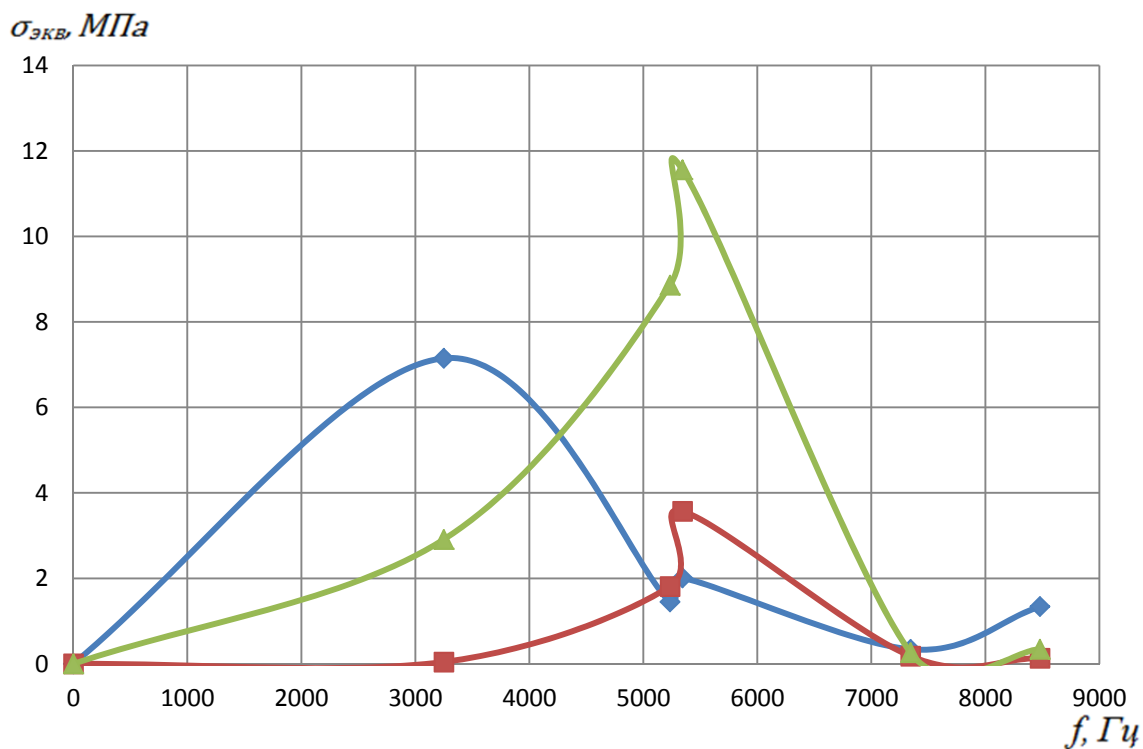
На рис. 3–5 показано изменение значений максимальных напряжений $\max \sigma_{\text{экв}}$ в элементах рассматриваемых микросборок в исследуемом частотном диапазоне.



Анализ результатов численного моделирования НДС микросборок показал, что распределение напряжений по крышке, основанию и платам существенно определяется частотами и формами их колебаний, которые реализуются при динамическом нагружении (см. рис. 2).

Рис. 4. Изменение $\max \sigma_{ЭКВ}$ в частотном диапазоне для микросборки II:

— крышка ; — плата ; — основание

Рис. 5. Изменение $\max \sigma_{ЭКВ}$ в частотном диапазоне для микросборки III:

— крышка ; — плата ; — основание

Наибольшие напряжения в крышке микросборок достигаются на низших частотах (рис. 6). Для платы и основания наибольшие напряжения достигаются на более высоких частотах (см. рис. 3–5), где имеют место резонансы этих элементов. Существенной особенностью является то, что в основании наиболее нагруженными зонами, как правило, являются зоны проушин, где осуществляется крепление микросборки к несущей конструкции и имеет место ослабление сечения за счет отверстий

под винты крепления. При этом величина максимальных напряжений достигается на различных резонансных частотах в зависимости от конструктивных особенностей микросборки (см. табл. 1):

- для микросборки I: $\max \sigma_{\text{экв}} = 12,97$ МПа на частоте $f_3 = 5671$ Гц;
- для микросборки II: $\max \sigma_{\text{экв}} = 11$ МПа на частоте $f_2 = 4028$ Гц;
- для микросборки III: $\max \sigma_{\text{экв}} = 11,56$ МПа на частоте $f_3 = 5343$ Гц.

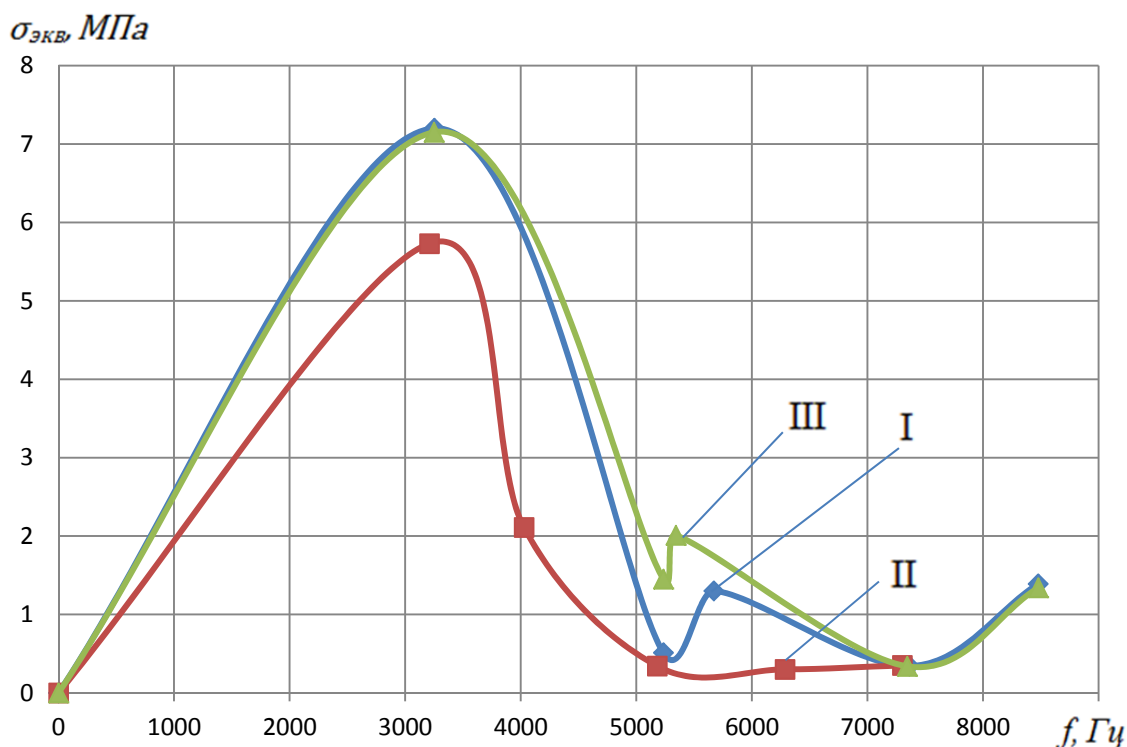


Рис. 6. Изменение $\max \sigma_{\text{экв}}$ в частотном диапазоне для крышки у микросборок I, II, III

Таким образом, в зонах проушин при динамическом нагружении возможно образование и развитие микротрещин.

Анализ НДС платы показывает, что распределение напряжений по ее поверхности и значения максимальных напряжений также зависят от частоты внешнего воздействия и конструктивных особенностей микросборки.

Численное моделирование НДС, проведенное для различных типоразмеров микросборок, показало:

- наиболее нагруженными элементами микросборки в зависимости от внешнего частотного воздействия являются крышка, основание, плата и шов, соединяющий плату с основанием;
- НДС существенно зависит от геометрических размеров корпуса и платы, а также частоты внешнего воздействия;
- положение наиболее нагруженной зоны конструкции существенным образом определяется формой колебаний, реализуемой в элементах конструкции при динамическом воздействии, а также размерами плат и корпуса микросборки.

С точки зрения обеспечения надежности микросборки при эксплуатационных динамических воздействиях наибольший интерес представляет анализ НДС платы, шва и основания микросборки, который позволяет определить зоны возможного образования латентных дефектов уже на ранних этапах конструкторской разработки микросборок и принять соответствующие конструкторско-технологические решения, обеспечивающие вибропрочность конструктивных элементов и микросборки в целом.

Анализ НДС платы микросборки позволяет определять наименее деформируемые зоны на поверхности платы, в которых рекомендуется размещать тензорезистивные элементы для уменьшения метрологической погрешности микросборки при внешнем динамическом воздействии.

Выводы

Обобщая проведенный анализ, укажем на то, что разработка и применение математических моделей и программно-ориентированных вычислительных комплексов позволяют на ранних этапах конструирования и разработки технологических процессов изготовления обеспечивать требуемую надежность и виброустойчивость проектируемых конструкций. Выбор расчетной математической модели и ее уровня сложности (одномерная, двумерная, трехмерная, учет гетерогенности и других конструктивных особенностей) определяется свойствами и требуемой точностью анализа НДС проектируемой конструкции.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Hadi, A. Sh. Study of layer structures in the devices of instrument engineering for increasing safety in the process of their operational lifetime / A. Sh. Hadi, A. N. Litvinov // ISJ theoretical & applied Science. – 2015. – № 04 (24). – P. 101–107.
2. Литвинов, А. Н. Моделирование динамических процессов в изделиях приборостроения : моногр. / А. Н. Литвинов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – 196 с.
3. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учеб. / Н. К. Юрков. – СПб. : Лань, 2014. – 480 с.
4. Хади, О. Ш. Моделирование напряженно-деформированного состояния корпусов микросборок в процессе их изготовления и эксплуатации / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Динамика и прочность (глава 1) : избр. тр. Всерос. науч. конф. по проблемам науки и технологий. – М. : РАН, 2013. – С. 3–26.
5. Хади, О. Ш. Исследование НДС микросборок при технологической опрессовке в программном комплексе ANSYS / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Инженерные исследования и достижения – основа инновационного развития : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. – Рубцовск : Рубцовский индустриальный ин-т, 2014. – С. 87–94.
6. Литвинов, А. Н. Исследование состояния плат РЭС при тепловых воздействиях / А. Н. Литвинов, О. Ш. Хади, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 2. – С. 182–191.
7. Хади, О. Ш. Исследование динамических характеристик микросборок приборных устройств при вибрационных воздействиях / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 134–143.

Хади Одей Шакер

ассистент,
Технологический университет (г. Багдад, Ирак),
аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: aodayshaker@mail.ru

Литвинов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной механики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: aleksletvinov@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Hadi Auday Shaker

assistant,
University of Technology (Baghdad, Iraq),
postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Litvinov Aleksandr Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of theoretical and applied mechanics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Аннотация. *Актуальность и цель.* Математическое моделирование динамических процессов элементов микросборок приборных устройств является актуальной проблемой, позволяющей на ранних этапах проектирования принимать конструкторско-технологические решения для обеспечения требуемого уровня вибропрочности и виброустойчивости микросборок в эксплуатационных режимах. Целью работы является повышение надежности и обеспечение тактико-технических характеристик приборных устройств, подверженных динамическому воздействию, конструкторско-технологическими способами. *Материалы и методы.* В статье рассматриваются микросборки замкнутого типа, имеющие прямоугольную форму и подверженные действию внешней гармонической вибрации. Выполнено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) микросборки и ее элементов с использованием метода конечных элементов, реализованных в пакете ANSYS с учетом того, что микросборки представляют собой гетерогенные структуры. Даны рекомендации по проектированию микросборок рассматриваемого типа. *Результаты.* Разработан комплекс моделирующих программ и выполнено численное исследование спектра собственных частот и НДС элементов микросборки при вибрационном нагружении. Исследованы формы колебаний и спектр собственных частот, а также положение наиболее нагруженных зон элементов микросборок, в которых возможно возникновение и развитие латентных дефектов. *Выводы.* Проведенные численные исследования показали, что для обеспечения виброустойчивости и стабильности метрологических характеристик микросборок необходимо на этапе их проектирования проводить математическое моделирование состояния элементов микросборок при реальных эксплуатационных воздействиях.

Ключевые слова: микросборка, гетерогенная структура, собственные частоты, форма колебаний, напряженно-деформированное состояние, виброустойчивость, вибропрочность, приборные устройства.

Abstract. *Background.* Mathematical modeling of dynamic processes elements microassemblages instrument devices is an actual problem, allowing the early stages of the design to make design and technological solutions to ensure the required level of vibration strength and stability microassemblages in operating conditions. The aim of this work is to improve reliability and performance characteristics of devices instrument, subject to dynamic action, design and technological methods. *Materials and methods.* The article deals with micro assemblies closed type, having a rectangular shape and is subject to the action of an external harmonic vibration. Mathematical modeling of stress-strain state (SSS) micro assemblies and its elements are achieved with use of finite element method, implemented in ANSYS package, in view of the fact that micro-structures are heterogeneous. Recommendations are given for the design of these type microassemblies. *Results.* The developed complex modeling software and the numerical study of the spectrum of the natural frequencies and the SSS of the elements with micro vibration loading. Investigated waveform and spectrum of natural frequencies, as well as the position of the most loaded zones microassemblages elements, in which it is possible the emergence and development of latent defects. *Conclusions.* The numerical studies have shown that for vibration resistance and stability of metrological characteristics microassembly necessary at the design stage to carry out mathematical modeling of elements microassembly under real operational impacts.

Key words: micro assembly, heterogeneous structure, natural frequencies, mode shape, the stress-strain state, vibration resistance, vibration strength, instrument device.

УДК 531.3:681.2.08

Хади, О. Ш.

Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 41–48. DOI 10.21685/2307-4205-2016-3-7.