

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов

Проблема обеспечения безопасности является одной из приоритетных в настоящее время, так как тесно связана с проектированием современных изделий, представляющих сложные технические объекты, и обеспечением требуемых тактико-технических характеристик (ТТХ) изделий [1].

Одной из важнейших задач развития научных основ конструирования и технологии изготовления изделий различного назначения является создание адекватных математических моделей, описывающих поведение и состояние конструкций и их отдельных элементов в процессе их производства, испытаний, транспортировки, хранения и эксплуатации.

Нарастающая сложность конструкций изделий различного назначения приводит к серьезным экономическим потерям в производстве и эксплуатации, а в ряде случаев приводит к катастрофам и человеческим жертвам [2]. Анализ отказов изделий и их составных частей позволяет утверждать, что одной из основных причин снижения их надежности, полных или частичных отказов являются процессы, происходящие в соединениях разнородных материалов под действием внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. При этом основными являются статические, динамические и тепловые воздействия, возникающие на всех стадиях жизненного цикла изделия (технологические операции в производстве, испытания, хранение, транспортировка, эксплуатация) [3].

Анализ конструктивных особенностей современных изделий и их составных частей показывает, что большинство из них предоставляет собой гетерогенные структуры, сочетающие в себе материалы с различными физико-механическими свойствами, обеспечивающими требуемую прочность, надежность и безопасность изделия в заданных режимах эксплуатации [4]. К таким изделиям относятся конструкции радиоэлектронной аппаратуры, систем и блоков автоматики, аппаратуры связи, датчиков различного назначения, конструктивных элементов в авиа-, судо- и ракетостроении, а также изделия специального назначения.

Для исследования процессов, происходящих в структурах этих изделий под действиями внешних факторов, необходима разработка математических моделей и комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов, позволяющих адекватно описывать процессы и их напряженно-деформированное состояние (НДС) на всех этапах жизненного цикла. При этом желательно, чтобы эти модели и комплексы программ обладали свойствами формализации, что позволяло бы применять их к широкому кругу конструктивных элементов и конструкций в целом. Такой подход использован в работах [3–6]. В частности, в [3] рассмотрены прикладные математические модели, основанные на механике многослойных конструкций в виде пластин и оболочек различной конфигурации, подверженных динамическим и тепловым воздействиям. Эти модели можно рассматривать как обобщенные в рамках принятых гипотез, так как они позволяют исследовать НДС достаточно широкого круга изделий, содержащих слоистые структуры.

В работе [5] разработаны математические модели и программное обеспечение для исследования динамических процессов контактных систем с целью обеспечения виброустойчивости приборных устройств, содержащих контактные пластины, находящиеся как в замкнутом, так и в разомкнутом состоянии. Предложенная математическая модель и разработанное программное обеспечение являются достаточно формализованными, так как позволяют исследовать динамические характеристики контактных пластин широкого класса: пластин постоянного и переменного

поперечных сечений, находящихся в замкнутом или разомкнутом состоянии и имеющих промежуточные упругие опоры. При этом взаимное расположение упругих опор и массы контакта является произвольным. Моделирование позволяет определить резонансные частоты и предельные значения виброперегрузок, вызывающие замыкание разомкнутых и размыкание замкнутых контактных пластин, что приводит к несанкционированному срабатыванию приборных устройств, существенному снижению надежности или полному отказу изделий. Для формализации математической модели все численные исследования выполняются с использованием безразмерных параметров, что позволяет распространять результаты численного моделирования и рекомендации по повышению виброустойчивости на широкий класс контактных систем приборов различного назначения, подверженных воздействию вибрационных нагрузок.

В работе [6] предложена математическая модель, позволяющая исследовать НДС корпусов микросборок в процессе их изготовления и эксплуатации при воздействии на них избыточного внешнего давления. Математическое моделирование НДС таких корпусов позволило дать практические рекомендации по их проектированию, а также предложить достаточно простую инженерную методику определения предельно допустимого давления технологической опрессовки корпусов микросхем в процессе их производства. Проведенные исследования позволили дать практические рекомендации по проектированию термостабильных микросхем [7, 8].

Бурное развитие техники приводит к конструкторско-технологическому усложнению изделий при условии повышения их надежности и ТТХ в сложных условиях эксплуатации. Это приводит к необходимости дальнейшей формализации и усложнения математических моделей, позволяющих адекватно описывать поведение и состояние элементов и конструкций изделий в целом на всех этапах их жизненного цикла.

Рассмотрим это на примере микросборок прямоугольного типа, имеющих широкое практическое применение в приборостроении, радиоэлектронных системах и изделиях специального назначения. На одной или нескольких гранях внутри микросборки размещаются платы и резистивные элементы, обеспечивающие требуемые выходные параметры и метрологические характеристики микросборки.

Эти микросборки представляют собой многослойные системы, которые в процессе их изготовления и эксплуатации подвергаются различным тепловым и механическим воздействиям. Для проверки герметичности при изготовлении они подвергаются технологической опрессовке внешним избыточным давлением, под действием которого происходит деформация граней корпуса и плат с резистивными элементами, что вызывает изменение их выходных электропараметров. Величина этого давления устанавливается в КД либо назначается технологической службой, причем очень часто без предварительного анализа НДС микросборки и ее элементов. Это в ряде случаев приводит к возникновению пластических деформаций граней корпуса, его короблению, а также растрескиванию плат уже на стадии изготовления микросборки. Наличие пластических деформаций в дальнейшем приводит к отказам или нарушению работоспособности микросборок в процессе воздействия на них внешних эксплуатационных нагрузок.

Моделирование НДС таких структур является достаточно сложной задачей, поэтому для анализа их НДС часто используют приближенные методы, например, в работе [6] расчетная модель основана на анализе НДС развертки корпуса. Наличие платы на одной или нескольких гранях корпуса учитывается введением приведенных характеристик для грани, которая является многослойной структурой. Взаимное влияние граней корпуса на НДС платы, как правило, не учитывается, что не позволяет адекватно моделировать состояние изделия.

На рис. 1 показана типовая конструкция полый микросборки прямоугольного типа с платой, которая связана с основанием клеевым или паяным швом.

Замкнутый прямоугольный корпус с размерами $2a \times 2b \times H$ подвергается воздействию внешнего избыточного давления p . 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; $2a_n \times 2b_n$ – размеры платы в плане, h_n – ее толщина. Шов имеет толщину $h_{ш}$. Начало координат расположено в центре основания корпуса микросборки. Материал платы характеризу-

ется модулем упругости E_n коэффициентом Пуассона ν_n , а материал шва – модулем сдвига $G_{ш}$ и коэффициентом Пуассона $\nu_{ш}$.

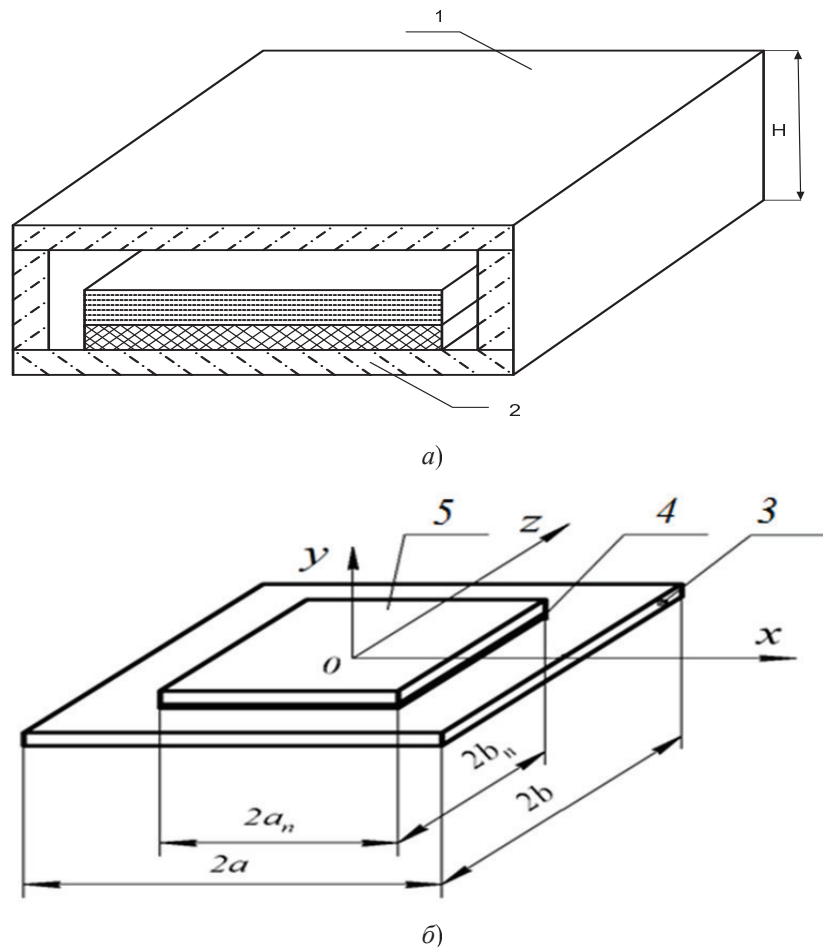


Рис. 1. Микросборка:
 а – общий вид: 1 – корпус; 2 – основание с платой;
 б – основание с платой: 3 – основание; 4 – шов; 5 – плата

Для построения адекватной пространственной модели, позволяющей анализировать НДС элементов гетерогенной структуры микросборки, используем метод конечных элементов, реализованных в пакете ANSYS. Такая модель позволяет учитывать взаимное влияние граней корпуса, реальные размеры платы и ее места расположения на основании, а также влияние физико-механических характеристик применяемых материалов платы, шва и граней корпуса. Кроме этого, 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. Разбиение гетерогенной структуры на конечные элементы осуществляется автоматически для каждого элемента (грани корпуса, шов, плата и т.д.) трехмерной модели микросборки с учетом заданной погрешности расчета.

В качестве примера приведем некоторые результаты численного моделирования НДС элементов микросборки при действии избыточного внешнего давления p . 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 $G_{ш} = (10-10^3)$ МПа. Низкие значения модуля сдвига $G_{ш}$ соответствуют применению «мягких» клеев типа герметиков «Виксинт У 2–28», а высокие значения соответствуют «жестким» клеям типа ВК-9 или паяным швам.

Плата расположена в центре основания и является симметричной при $a = b$; $a_n = b_n$ и $\frac{a_n}{a} = 0,5$. Геометрические размеры приняты следующими: $2a = 2b = 20$ мм; $h_j = 0,8$ мм;

$h_{ш} = 0,6$ мм. Высота корпуса H , модуль сдвига материала шва G и толщина шва $h_{ш}$ варьировались в пределах, соответствующих реальным микросборкам.

В качестве основных выходных параметров, характеризующих НДС исследуемой конструкции, приняты прогибы w элементов микросборки (платы, основания, шва, крышки, боковых граней), эквивалентные напряжения $\sigma_{эkv}$, рассчитанные по критерию Мизеса, и интенсивность относительных деформаций ϵ_i . Программный комплекс позволяет также выводить на печать перемещения, напряжения и относительные деформации по осям x, y, z (см. рис. 1) для любого элемента конструкции микросборки.

Для удобства анализа и обобщения результатов моделирования НДС элементов конструкции результаты исследований представлены в относительных параметрах:

$\bar{\sigma}_{эkv} = \sigma_{эkv} / p$ – безразмерные эквивалентные напряжения;

$\bar{w} = w / p$ – прогиб, отнесенный к величине действующего давления (мм/МПа).

На рис. 2 представлено НДС в элементах микросборки, которое позволяет визуально оценить НДС всех элементов исследуемой конструкции, представленное в трехмерном изображении.

В табл. 1 и 2 представлены значения максимального прогиба $\max \bar{w} \cdot 10^2$ и эквивалентного напряжения $\bar{\sigma}_{эkv}$ в центральной точке платы при различных значениях модуля сдвига G материала шва и его толщины $h_{ш}$ для корпусов различной высоты H .

Таблица 1

Максимальные прогибы $\max \bar{w} \cdot 10^2 \left(\frac{\text{мм}}{\text{МПа}} \right)$ в центре платы

$G, \text{МПа}$	$h_{ш}, \text{мм}$	Высота микросборки $H, \text{мм}$				
		20	15	10	5	3
10	0,1	2,07	2,38	3,02	3,16	2,82
	0,3	1,97	2,27	2,89	3,03	2,69
10^3	0,1	1,29	1,53	2,01	2,14	1,88
	0,3	1,30	1,53	2,02	2,15	1,89

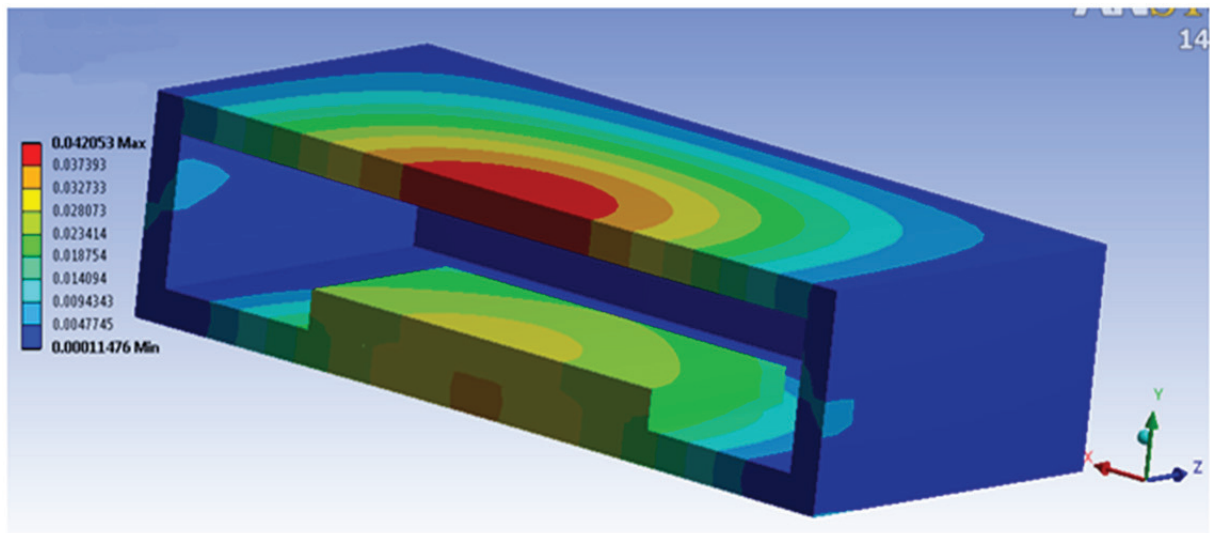
Таблица 2

Напряжения $\bar{\sigma}_{эkv}^n$ в центре платы

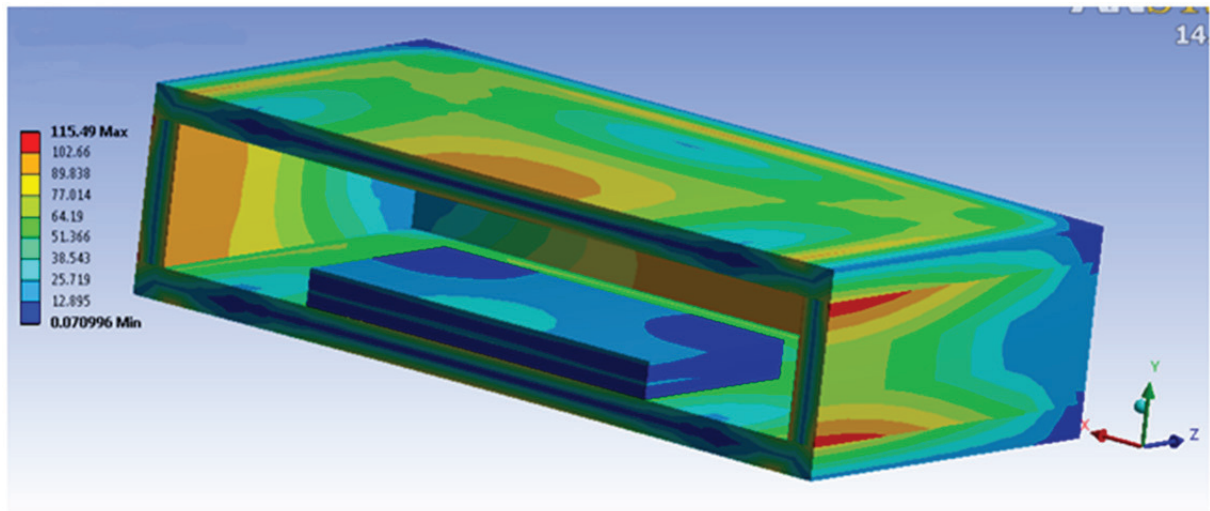
$G, \text{МПа}$	$h_{ш}, \text{мм}$	Высота микросборки $H, \text{мм}$				
		20	15	10	5	3
10	0,1	30,19	32,98	37,73	39,28	36,45
	0,3	23,34	25,38	29,48	30,34	27,81
10^3	0,1	28,18	30,39	34,88	36,40	34,04
	0,3	24,7	26,60	30,32	31,47	29,40

Зависимости $\max \bar{w}$ и $\bar{\sigma}_{эkv}$ для центральной точки платы от толщины и жесткости шва представлены на рис. 3, 4 для корпуса с $H = 20$ мм при различных значениях модуля сдвига материала шва G (МПа). Аналогичные численные исследования были проведены для различных типов размеров микросборок.

Моделирование НДС микросборок рассматриваемого типа показало, что увеличение толщины клеевого шва приводит к снижению эквивалентных напряжений и их более равномерно распределению по поверхности платы. В зависимости от толщины шва увеличение модуля сдвига материала шва может приводить как к увеличению, так и к снижению напряжений в плате (см. рис. 4). Существенной особенностью является то, что величина напряжений на поверхности платы зависит от высоты микросборки, что объясняется взаимным влиянием граней корпуса на НДС платы, которое существенно влияет на выходные метрологические характеристики микросборки и его обязательно надо учитывать при моделировании состояния исследуемой конструкции.



а)



б)

Рис. 2. НДС микросборки:

а – распределение прогибов $\bar{w}$; б – напряжения $\bar{\sigma}_{\text{экв}}$

Для большинства реальных микросборок выполняется условие $H/a < 1$, при котором наиболее нагруженными оказываются плата и крышка микросборки. Так как при опрессовке в элементах конструкции не допускается появление пластических деформации, то предельно допустимое значение давления опрессовки p_* для микросборки рассматриваемого типа следует рассчитывать как наименьшее значение из p_k и p_{π} :

$$p_* = \min(p_k; p_{\pi}), \quad (1)$$

где p_k и p_{π} – допускаемые давления, рассчитанные из анализа НДС крышки и платы соответственно:

$$p_k = \frac{\sigma_y^k}{\max \bar{\sigma}_{\text{экв}}^k}; \quad p_{\pi} = \frac{\sigma_y^{\pi}}{\max \bar{\sigma}_{\text{экв}}^{\pi}}. \quad (2)$$

Здесь σ_y^k и σ_y^{π} – пределы упругости для материалов крышки и платы; $\max \bar{\sigma}_{\text{экв}}^k$; $\max \bar{\sigma}_{\text{экв}}^{\pi}$ – максимальные безразмерные эквивалентные напряжения для крышки и платы соответственно, полученные в результате анализа их НДС с использованием данного моделирующего комплекса.

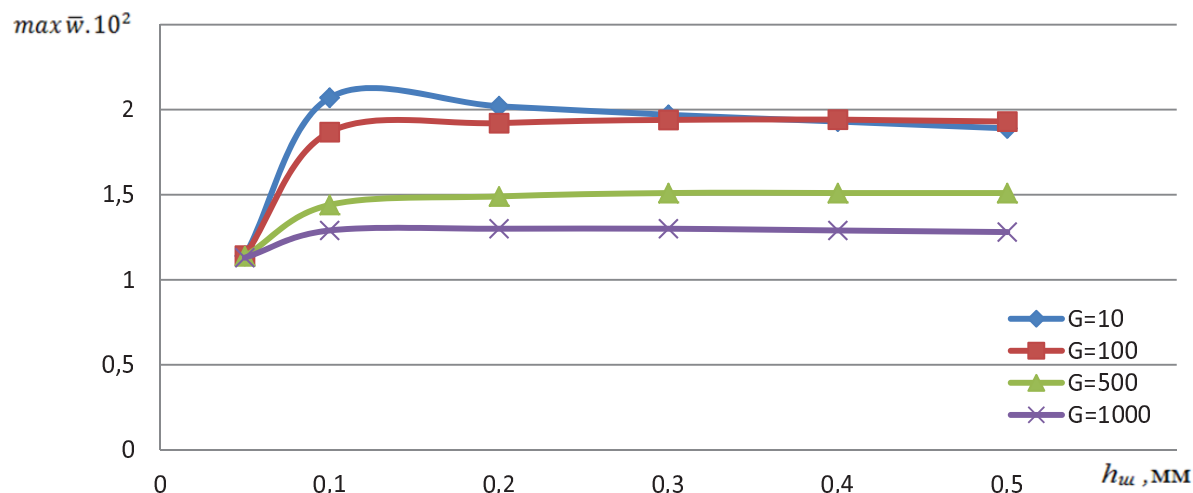
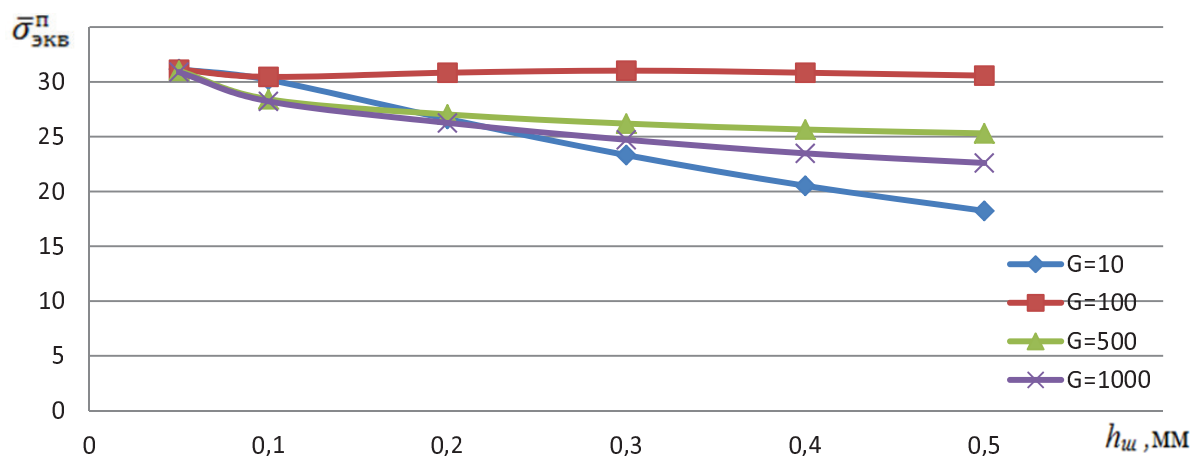


Рис. 3. Максимальные прогибы в центре платы

Рис. 4. Напряжения $\bar{\sigma}_{\text{экв}}^{\pi}$ в центре платы

Предложенный подход является наиболее общим, позволяет создать трехмерную адекватную модель, описывающую НДС всех элементов микросборки с учетом ее конструктивных особенностей. Это позволяет оптимизировать конструкцию в соответствии с заданными эксплуатационными воздействиями, а также научно обоснованно назначать режим технологической операции опрессовки при производстве микросборки конкретного типоразмера с учетом расположения одной или нескольких плат на его гранях [9, 10].

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

Список литературы

- Северцев, Н. А. Системный анализ теории безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецов. – М. : Изд-во МГУ «Теис», 2009. – 452 с.
- Гладкий, С. Л. Интеллектуальное моделирование физических проблем / С. Л. Гладкий, Н. А. Степанов, Л. Н. Ясницкий ; под общ. ред. А. Н. Ясницкого. – М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. – 200 с.

3. Литвинов, А. Н. Прикладные модели механики гетерогенных структур изделий приборостроения : моногр. / А. Н. Литвинов, М. А. Литвинов, В. В. Смогунов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – 320 с.
4. Литвинов, А. Н. Моделирование процессов в слоистых структурах для повышения безопасности сложных технических систем / А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Фундаментальные проблемы системной безопасности и устойчивости : материалы IV Междунар. науч. конф. – Тверь, 2013. – С. 32–35.
5. Хади, О. Ш. Моделирование динамических процессов контактных систем для обеспечения виброустойчивости приборных устройств / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Фундаментальные проблемы системной безопасности : материалы V Междунар. науч. конф. – Елец : Елецкий гос. ун-т, 2014. – С. 230–235.
6. Хади, О. Ш. Моделирование напряженно-деформированного состояния корпусов микросборок в процессе их изготовления и эксплуатации / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Избранные труды Всероссийской научной конференции по проблемам науки и технологий. – М. : РАН, 2013. – С. 3–26.
7. Литвинов, А. Н. К вопросу о проектировании термостабильных интегральных микросхем / А. Н. Литвинов // Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве : материалы II Всерос. науч. техн. конф. : в 2 ч. – Н. Новгород : Изд-во НГГУ, 2000. – Ч. 1. – С. 15.
8. Патент 2129741 RU 6H01C7/06, H01427/01. Термостабильная тонкопленочная микросхема / А. Н. Лугин, А. Н. Литвинов, Г. С. Власов. – Бюл. № 12 ; Опубл. 27.04.1999.
9. Литвинов, А. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния в слоистых структурах РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях / А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 25–31.
10. Применение слоистых структур для повышения виброустойчивости конструкций различного назначения / Д. В. Артамонов, М. А. Литвинов, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 149–151.

УДК 621.396.6.001:004.4

Хади, О. Ш.

Моделирование состояния гетерогенных структур для повышения безопасности сложных технических систем в процессе их жизненного цикла / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 8–15.

Хади Одей Шакер

ассистент, Технологический университет
(г. Багдад, Ирак),
аспирант, кафедра теоретической
и прикладной механики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
8-(412)-56-35-39
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)
8-(412)-56-35-39
E-mail: aleksletvinov@mail.24

Аннотация. Рассмотрена проблема обеспечения безопасности в процессе жизненного цикла изделий, содержащих гетерогенные структуры. Для микросборок прямоугольного типа, представляющих собой гетерогенную структуру, выполнено математическое моделирование НДС его элементов при опрессовке внешним избыточным давлением. При построении математической модели использован метод конечных элементов, реализованный в пакете ANSYS в трехмерной постановке. Выполнено численное моделирование НДС микросборок и даны практические рекомендации по определению допустимого

Hadi Shaker Auday

assistant lecturer, University of technology
(Baghdad, Iraq),
postgraduate student,
sub-department of theoretical and applied mechanics,
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)

Abstract. The problem of ensure the safety of products containing a heterogeneous structure in the process of their life cycle was considered. For microassemblies of rectangular type, that represent a heterogeneous structure mathematical modeling of the stress-strain state of its elements when crimping the outer overpressure was fulfilled. To build the mathematical model methadone finite element package implemented in ANSYS in three-dimensional formulation was used. Numerical modeling for the stress-strain state microassemblies was done and practical recommendations for the definition of admissible pressure molding design were given, taking into

давления опрессовки с учетом конструкторско-технологических особенностей проектируемой микросборки и результатов моделирования.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, гетерогенная структура, микросборка, плата, опрессовка, программный комплекс.

account technological features of designed microassemblies and modeling results.

Key words: three-dimensional modeling, the state heterogeneous structure, microassembly, board, crimping, software package.