

УДК 519.2:621.658.512

А.Ю. ВАСИЛЬЕВ, к.т.н, ст.н.с. каф. ТММ и САПР НТУ "ХПИ";
М.Н. БЕРЕЗИН, ст. гр. ТМ-80БС НТУ "ХПИ";
Ю.К. ВАСИЛЬЕВ, ст. препод. каф. физ. воспитания НТУ "ХПИ"

СОЗДАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СЕНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В статье рассматривается вопрос соотношения весовых, жесткостных и прочностных характеристик различных типов сендвич-панелей по сравнению с аналогичными гомогенизированными. Анализируется характер изменения основных характеристик от параметров конструкции. Показано, что использование сендвич-панелей может привести к существенной экономии массы и снижению материалоемкости по сравнению с гомогенными пластинами при сохранении того же уровня жесткости. Экономия массы может достигать 60%. Для рациональных вариантов понижение уровня напряжений колеблется в пределах 25-65% для эквивалентных по весу конструкций, и повышение – на 25-35% для эквивалентных по жесткости.

© А.Ю. Васильев, М.Н. Березин, Ю.К. Васильев, 2015

Ключевые слова: метод конечных элементов, сэндвич-панели, анализ напряженно-деформированного состояния, эквивалентная толщина, эквивалентная жесткость, гомогенная пластина

Введение. Перед конструкторами различного оборудования и изделий все чаще и чаще стоит вопрос об уменьшении проектной массы изделия. Особенно остро данный вопрос стоит в случае, если разрабатываемые конструкции не являются стационарными. Абсолютное большинство транспортных средств специального назначения: железнодорожный транспорт (тепловозы, электровозы, вагоны), морской транспорт (сухогрузы, суда), авиация (самолеты, цистерны аэродромных заправщиков), военные машины (легкобронированная техника) имеет большое количество тонкостенных пластин и оболочек, которые являются элементами несущей конструкции или обшивки. Вопрос уменьшения их массы неоднократно поднимался во многих работах [1-4]. Одним из вариантов решения задачи уменьшения массы без ухудшения жесткостных и прочностных характеристик является замена гомогенизированных пластин на различные сэндвич-панели. Исследованию возможности подобной замены и посвящена данная статья.

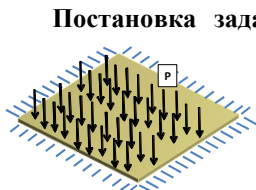


Рисунок 1 – Нагружение и закрепление

Рассматриваются пластины с геометрическими размерами 1×1 м, жестко закрепленные по контуру под действием распределенного давления (рисунок 1) величиной 1000 Па. В статье рассмотрены следующие пластины: гомогенизированная стальная пластина толщиной 4-30 мм (рисунок 2, а); сэндвич-панель, составленная из двух гомогенизированных стальных пластин, расположенных одна над другой без зазора с толщинами 2-20 мм каждая (рисунок 2, б); сэндвич-панель, составленная из двух гомогенизированных стальных пластин с толщинами 2-10 мм и промежуточным слоем (промежуточный слой может выполняться из различных материалов с модулем упругости 2Е7-2Е11, его толщина варьируется в пределах 2-50 мм (рисунок 2, в); сэндвич-панель, составленная из двух гомогенизированных стальных пластин с толщинами 2-10 мм, соединенных вертикальными ребрами, расстояние между пластинами 5-20 мм, толщина ребер 1-10 мм (ребра выполнены из стали с теми же характеристиками, что и основные пластины (рисунок 2, г).

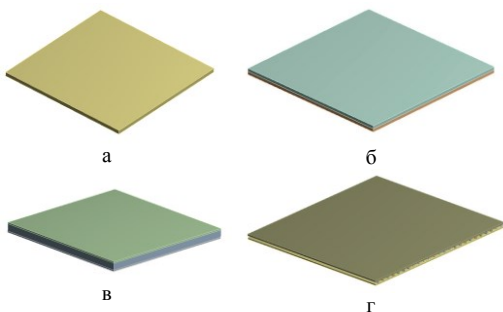


Рисунок 2 – Варианты исполнений:

а – одна пластина; б – две пластины;
в – трехслойный сэндвич; г – пластины с ребрами

Задача исследований – проанализировав поведение параметрических моделей под действием описанного варианта нагружения, определить для сэндвич-панелей аналогичные с точки зрения жесткости гомогенизиро-

ванные пластины и возможную эффективность с точки зрения снижения массы. Также необходимо определить коэффициент концентрации напряжений – изменение уровня напряжений по сравнению с эквивалентными.

Метод решения. Для получения напряженно-деформированного состояния (НДС) был использован метод конечных элементов (МКЭ) [5]. Ввиду простоты геометрических моделей было принято строить их непосредственно в той же системе, в которой будет производиться дальнейший расчет – Ansys Workbench 15. Геометрические модели строили в твердотельной постановке для разбишки на объемные конечные элементы (КЭ) типа Solid-shell, и в поверхностной постановке для разбиения на оболочечные КЭ типа Shell. Расчетные модели показаны на рисунке 3. Использование элементов типа Solid-shell позволяет существенно уменьшить размерность задачи по сравнению с обычными Solid-элементами за счет отсутствия необходимости мельчить КЭ сетку для достижения нужного количества элементов по толщине (2-4).

Варианты фиксации боковых поверхностей пластин показаны на рисунке 4. Давление прикладывалось только к верхней грани сэндвич-пластины, закрепление осуществлялось по всем боковым кромкам для пластинчато-оболочечных конструкций и по всем боковым граням для конструкций, разбитых на объемные КЭ. В связи с тем, что в задачах происходит варьирование множества параметров в широких пределах, имеет смысл перечислить все рассчитанные варианты.

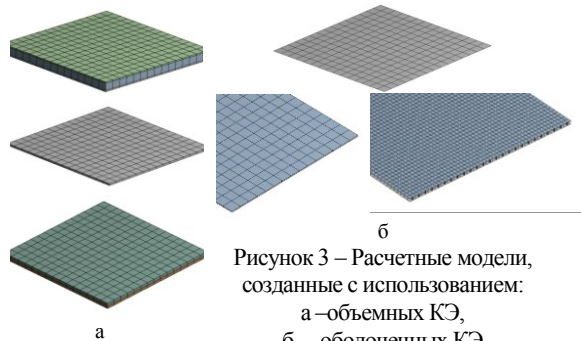


Рисунок 3 – Расчетные модели, созданные с использованием:

- а – объемных КЭ,
- б – оболочечных КЭ

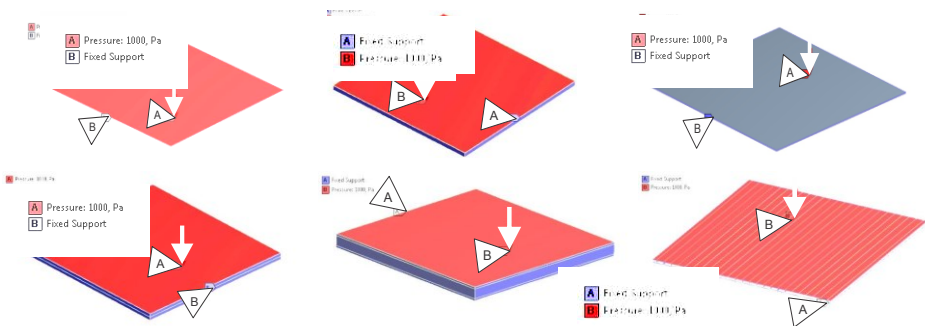


Рисунок 4 – Способ задания граничных условий

Результаты. По результатам проведения многовариантных расчетов на параметрических моделях были получены картины распределения напряжений и деформаций. Для варианта сэндвич-панели, описанного в варианте № 2, были также

получены распределения контактных давлений. Можно отметить, что:

- общий характер НДС похож для обоих вариантов постановки с использованием объемных и пластинчато-оболочечных элементов (рисунки 5, 6);
- общий характер НДС качественно похож для всех типов конструкций (рисунки 7, 8), хотя и имеет ряд особенностей, наиболее выраженных в варианте №4, за счет наличия локальных скачков жесткости в местах расположения ребер (рисунк 9).

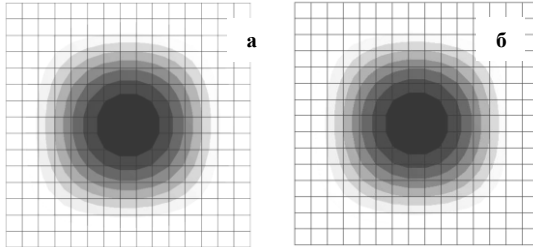


Рисунок 5 – Сравнение картин распределения перемещений для различных вариантов постановки:

- а – деформации в твердотельной постановке;
- б – деформации в оболочечной постановке

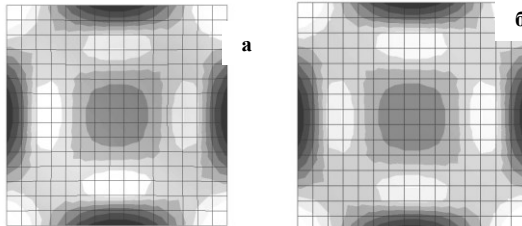
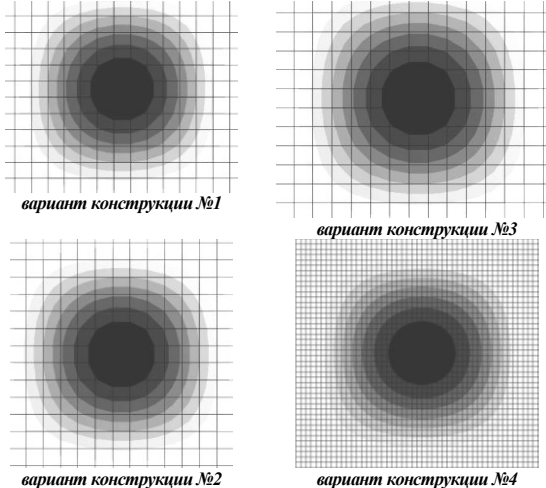


Рисунок 6 – Сравнение картин распределения напряжений для различных вариантов постановки:

- а – напряжения в твердотельной постановке;
- б – напряжения в оболочечной постановке



вариант конструкции №1

вариант конструкции №3

вариант конструкции №2

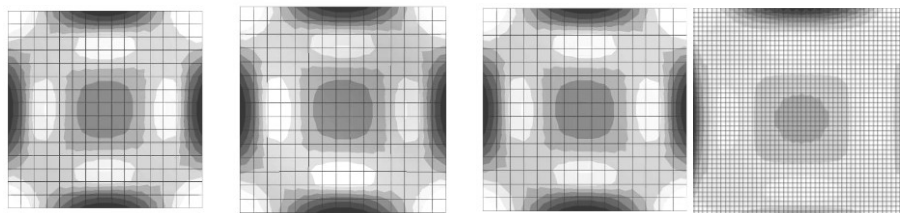
вариант конструкции №4

Рисунок 7 – Картины распределения перемещений для разных типов конструкции

В связи с этим при демонстрации картин распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) можно ограничиться картинками, показанными на рисунках 6-10, а основные результаты представить в табличном виде (таблицы 1-4, принятые обозначения: w_{\max} – максимальный прогиб (мкм), $\sigma_{\text{экв}}^{\max}$ – максимальные эквивалентные напряжения (МПа), t – толщина пластины). В таблице 3 обозначения "мат.1", "мат.2" и "мат.3" подразумевают использование в качестве прослойки материалов со следующими характеристиками:

мат.1 – модуль упругости – 2×10^7 Па; плотность – 1200 кг/м^3 (пенопласт); мат.2 –

модуль упругости – $3,2 \times 10^9$ Па; плотность – 1060 кг/м^3 (полистирол); мат.3 – модуль упругости – 2×10^{11} Па; плотность – 7800 кг/м^3 (сталь).



вариант конструкции №1

вариант конструкции №2

вариант конструкции №3

вариант конструкции №4

Рисунок 8 – Картины распределения напряжений для разных типов конструкции

Таблица 1 – Результаты НДС для 1-го типа конструкции

t , м	w_{\max} , мкм	$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\max}$, МПа	Масса конструкции, кг	Толщина, м	w_{\max} , мкм	$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\max}$, МПа	Масса конструкции, кг
0.004	1060	12,88	31,4	0,012	39,3	1,43	94,2
0.005	543	8,24	39,25	0,014	24,8	1,05	109,9
0.006	314	5,72	47,1	0,016	16,6	0,81	125,6
0.007	198	4,21	54,95	0,02	8,53	0,52	157
0.008	133	3,22	62,8	0,025	4,38	0,33	196,25
0.009	93,1	2,54	70,65	0,03	2,55	0,23	235,5
0.01	67,9	2,06	78,5				

Таблица 2 – Результаты НДС для 2-го типа конструкции

Номер варианта	t , м		w_{\max} , м	$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\max}$, МПа	Масса конструкции, кг
	нижней	верхней			
1	0,002	0,002	4240	25,76	31,4
2	0,002	0,005	510	7,75	54,95
3	0,002	0,01	67,4	2,04	94,2
4	0,002	0,02	8,52	0,52	172,7
5	0,005	0,002	510	7,75	54,95
6	0,005	0,005	271	4,12	78,5
7	0,005	0,01	60,3	1,83	117,75
8	0,005	0,02	8,4	0,51	196,25
9	0,01	0,002	67,4	2,04	94,2
10	0,01	0,005	60,3	1,83	117,75
11	0,01	0,01	33,9	1,03	157
12	0,01	0,02	7,58	0,46	235,5
13	0,02	0,002	8,52	0,52	172,7
14	0,02	0,005	8,4	0,51	196,25
15	0,02	0,01	7,58	0,46	235,5
16	0,02	0,02	4,26	0,26	314

Анализ результатов. Сводные результаты для конструкции из одной стальной пластины показаны на рисунке 10, для массы (рисунок 11, а), величины макси-

мальных прогибов (рисунок 11, б), величины максимальных напряжений (рисунок 11, в). Также на графиках приведены уравнения, которые описывают зависимость веса и НДС от толщины пластины. Эти же уравнения приведены ниже:

$$f(x) = 7 \cdot 10^{-11} x^{-2.994}; f(x) = 7850x; f(x) = 207.73 \cdot x^{-1.998}.$$

Рисунок 9 – Картины локальных концентраций напряжений для сэндвич-панелей с промежуточными ребрами

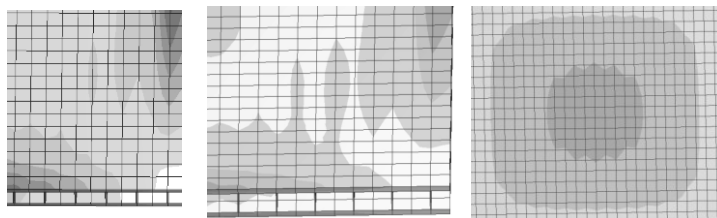


Таблица 3 – Результаты НДС для 3-го типа конструкции

Номер варианта	t , мм	W_{\max} , мкм			$\sigma_{\text{экв}}^{\max}$, МПа			Масса конструкции, кг		
	Нижняя/Верхняя/Средняя	Мат. 1	Мат. 2	Мат. 3	Мат. 1	Мат. 2	Мат. 3	Мат. 1	Мат. 2	Мат. 3
1	2/2/2	1060	852	944	10,6	8,9	9,4	14,96	33,52	47
2	2/2/3	1060	685	746	10,5	7,6	7,4	16,16	34,58	54,8
3	2/2/4	4020	574	847	24,8	6,7	10,3	17,36	35,64	62,6
4	2/2/5	3950	438	481	24,5	5,4	7,3	18,56	36,7	70,4
5	2/2//10	3490	159	66,8	22,3	2,4	2,0	24,56	42	109,4
6	2/2//20	2460	47,4	8,51	17,0	0,9	0,5	36,56	52,6	187,4
7	2/2/30	1670	22	2,55	12,6	0,5	0,2	48,56	63,2	265,4
8	2/2/40	1160	12,6	1,09	9,5	0,3	0,1	60,56	73,8	343,4
9	2/2/50	840	8,12	0,565	7,3	0,2	0,1	72,56	84,4	421,4
10	5/5/2	70,5	69,1	69,9	1,8	1,7	1,7	33,8	80,62	94,1
11	5/5/3	70,5	67,6	68,6	1,8	1,7	1,7	35	81,68	101,9
12	5/5/4	269	130	216	4,1	2,5	3,3	36,2	82,74	109,7
13	5/5/5	269	116	181	4,1	2,3	2,7	37,4	83,8	117,5
14	5/5/10	266	67,8	54,3	4,1	1,6	1,6	43,4	89,1	156,5
15	5/5/20	257	29	8,27	4,0	0,8	0,5	55,4	99,7	234,5
16	5/5/30	244	15,5	2,52	3,8	0,5	0,2	67,4	110,3	312,5
17	5/5/40	228	9,55	1,08	3,7	0,3	0,1	79,4	120,9	390,5
18	5/5/50	212	6,45	0,564	3,5	0,2	0,1	91,4	131,5	468,5
19	10/10/2	9,29	9,25	9,28	0,5	0,5	0,5	65,2	159,12	172,6
20	10/10/3	9,29	9,21	9,26	0,5	0,5	0,5	66,4	160,18	180,4
21	10/10/4	34	25,2	32,9	1,1	0,8	1,0	67,6	161,24	188,2
22	10/10/5	34	24,3	31,9	1,1	0,8	1,0	68,8	162,3	196
23	10/10/10	34	20	22,6	1,1	0,7	0,7	74,8	167,6	235
24	10/10/20	33,9	13,2	6,82	1,1	0,5	0,4	86,8	178,2	313
25	10/10/30	33,8	8,93	2,37	1,1	0,4	0,2	98,8	188,8	391
26	10/10/40	33,6	6,31	1,05	1,1	0,3	0,1	110,8	199,4	469
27	10/10/50	33,4	4,65	0,555	1,1	0,2	0,1	122,8	210	547

Нахождение приведенных выше аналитических зависимостей позволит про-

водить сравнение конструкций № 2-4 с гомогенной пластиной, выбирая эквивалентную пластину по весу или жесткости и сравнивая остальные контрольные параметры с эквивалентной. В таблицах 5-6 приведены результаты подобного сравнения. Некоторые из данных отражены на рисунках 11-13.

Таблица 4 – Результаты НДС для 4-го типа конструкции

Вариант	t , мм		Высота ребер, мм	Толщина ребер, мм	w_{\max} , м	$\sigma_{\text{экв}}^{\max}$, МПа	Масса конструкции, кг
	нижней	верхней					
1	5	5	5	1	2.42E-05	2.34	79.48
2	5	5	5	2	2.33E-05	1.34	80.46
3	5	5	5	3	2.29E-05	1.32	81.44
4	5	5	5	4	2.28E-05	1.31	82.42
5	5	5	5	5	2.27E-05	1.30	83.41
6	5	5	5	7	2.25E-05	1.29	85.37
7	5	5	5	10	2.24E-05	1.28	88.31
8	5	5	10	1	1.26E-05	1.65	80.46
9	5	5	10	2	1.17E-05	0.90	82.42
10	5	5	10	3	1.14E-05	0.86	84.39
11	5	5	10	4	1.12E-05	0.84	86.35
12	5	5	10	5	1.11E-05	0.83	88.31
13	5	5	10	7	1.10E-05	0.82	92.24
14	5	5	10	10	1.08E-05	0.80	98.12
15	5	5	20	1	8.01E-06	1,28	81,44
16	5	5	20	2	7.25E-06	0,70	84,39
17	5	5	20	3	6.97E-06	0,64	87,33
18	5	5	20	4	6.83E-06	0,62	90,27
19	5	5	20	5	6.73E-06	0,61	93,22
20	5	5	20	7	6.60E-06	0,60	99,11
21	5	5	20	10	6.47E-06	0,58	107,94
22	5	5	20	1	5.72E-06	1,04	82,42
23	5	5	20	2	5.06E-06	0,57	86,35
24	5	5	20	3	4.82E-06	0,51	90,27
25	5	5	20	4	4.69E-06	0,49	94,20
26	5	5	20	5	4.61E-06	0,48	98,12
27	5	5	20	7	4.49E-06	0,47	105,97
28	5	5	20	10	4.37E-06	0,45	117,75

Таблица 5 – Результаты НДС для 2-го типа конструкции

Номер варианта	Экв. толщина, мм	Экв. масса, кг	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	Экономия массы, кг	Экономия массы, в %	Запас
1	2.48	19.47	33.36	-11.93	-61%	0.77
2	5.03	39.50	8.12	-15.45	-39%	0.95
3	9.89	77.65	2.10	-16.55	-21%	0.97
4	19.74	154.94	0.53	-17.76	-11%	0.97
5	5.03	39.50	8.12	-15.45	-39%	0.95
6	6.22	48.79	5.32	-29.71	-61%	0.77

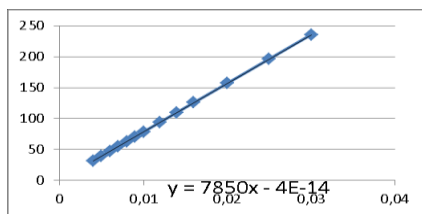
Номер варианта	Экв. толщина, мм	Экв. масса, кг	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	Экономия массы, кг	Экономия массы, в %	Запас
7	10.27	80.59	1.95	-37.16	-46%	0.94
8	19.83	155.68	0.52	-40.57	-26%	0.97
9	9.89	77.65	2.10	-16.55	-21%	0.97
10	10.27	80.59	1.95	-37.16	-46%	0.94
11	12.44	97.69	1.33	-59.31	-61%	0.78
12	20.52	161.11	0.49	-74.39	-46%	0.94
13	19.74	154.94	0.53	-17.76	-11%	0.97
14	19.83	155.68	0.52	-40.57	-26%	0.97
15	20.52	161.11	0.49	-74.39	-46%	0.94
16	24.88	195.30	0.33	-118.70	-61%	0.77

Таблица 6 – Результаты НДС для 4го типа конструкции

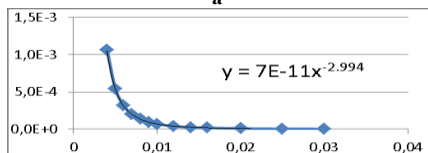
Номер варианта	Экв. толщина, мм	Экв. масса, кг	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	Экономия массы, кг	Экономия массы, %	Коэф. концентрации
1	13.93	109.33	1.06	29.85	27%	2.21
2	14.10	110.72	1.04	30.26	27%	1.30
3	14.19	111.36	1.02	29.92	27%	1.29
4	14.21	111.53	1.02	29.11	26%	1.28
5	14.23	111.69	1.02	28.28	25%	1.28
6	14.27	112.02	1.01	26.65	24%	1.27
7	14.29	112.19	1.01	23.88	21%	1.27
8	17.32	135.96	0.69	55.50	41%	2.41
9	17.75	139.37	0.65	56.95	41%	1.37
10	17.91	140.58	0.64	56.19	40%	1.33
11	18.01	141.41	0.63	55.06	39%	1.33
12	18.07	141.84	0.63	53.53	38%	1.32
13	18.12	142.27	0.63	50.03	35%	1.30
14	18.23	143.14	0.62	45.02	31%	1.30
15	20.15	158.17	0.51	76.73	49%	2.52
16	20.83	163.52	0.48	79.13	48%	1.48
17	21.11	165.69	0.46	78.36	47%	1.37
18	21.25	166.81	0.46	76.54	46%	1.36
19	21.36	167.64	0.45	74.42	44%	1.35
20	21.49	168.73	0.45	69.62	41%	1.34
21	21.64	169.86	0.44	61.92	36%	1.32
22	22.55	176.99	0.41	94.57	53%	2.58
23	23.49	184.39	0.37	98.04	53%	1.54
24	23.87	187.41	0.36	97.14	52%	1.40
25	24.09	189.13	0.36	94.93	50%	1.39
26	24.23	190.22	0.35	92.10	48%	1.38
27	24.45	191.90	0.35	85.93	45%	1.36
28	24.67	193.65	0.34	75.90	39%	1.34

Выводы. Как и предполагалось, использование сэндвич-панелей может привести к существенной экономии массы и снижению материалоемкости по сравнению с гомогенными пластинами при сохранении того же уровня жесткости. Экономия массы может достигать 60%. При этом следует отметить, что обратной стороной снижения веса нередко является повышение уровня напряжений в конструкции. Для рациональных вариантов понижение уровня напряжений колеблется в пределах 25-65% для эквивалентных по весу конструкций и повышение на 25-35% - для эквивалентных по жесткости. Вариант №2 с двумя пластинами, к сожалению, является менее жестким по сравнению с пластиной суммарной толщины, зато приводит к снижению уровня напряжений до 23%.

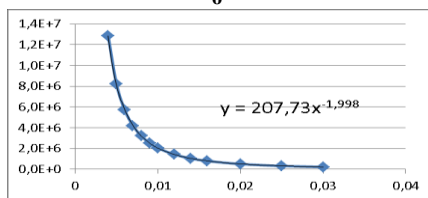
Следует отметить, что для большей адекватности подобных выводов необходимо провести более детальные исследования с различными типами нагружения и закрепления. Это и является направлением дальнейших исследований.



а



б



в

Рисунок 10 – Зависимость контрольных величин от толщины:
а – вес конструкции; б – максимальный прогиб; в – напряжения

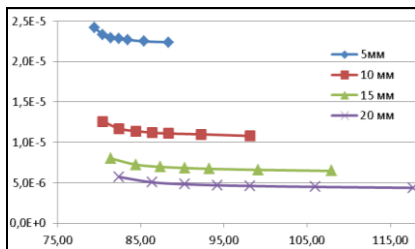


Рисунок 11 – Изменение максимального прогиба в зависимости от веса конструкции при разных значениях высот ребер для варианта №4

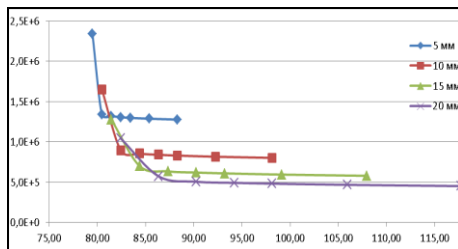


Рисунок 12 – Изменение максимальных эквивалентных напряжений в зависимости от веса конструкции при разных значениях высот ребер для варианта №4

Список литературы. 1. *Петроченко В.В., Поспелов В.Е.* Пути экономии черных металлов в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1983. – 160 с. 2. *Еременко С. Ю.* Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. – Х.: Основа, 1991. – 272 с. 3. *Пелешко Е.В.* Применение обобщенно-параметрического подхода к анализу корпусов транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2005. – №1. – С.83-87.4. *Веретельник Ю.В., Миргородский Ю.Я., Пелешко Е.В.,*

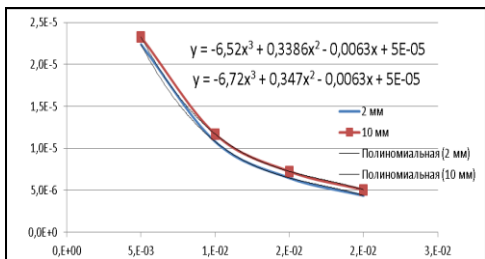


Рисунок 13 – Изменение максимальных эквивалентных напряжений в зависимости от высоты ребер конструкции при разных значениях толщин ребер для варианта №4

naznachenija // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2005. – No 1. – P. 83-87. **4.** *Veretel'nik Ju.V., Mirgorodskij Ju.Ja., Peleshko E.V., Tkachuk N.A.* Parametricheskie modeli jelementov slozhnyh sistem kak osnova postroenija specializirovannyh raschetnyh sistem // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2003. – No 1. – P.3-7. **5.** *Sabona'd'er Zh. Kulon Zh.* Metod konechnyh jelementov i SAPR. – Moscow: Mir, 1989. –190 p.

Tkachuk N.A. Parametricheskie modeli jelementov slozhnyh sistem kak osnova postroenija specializirovannyh raschetnyh sistem // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – Kharkiv: NTU „XPI“, 2003. – № 1. – С.3-7. **5.** *Sabona'd'ьer Zh. Kulon Zh.* Metod konechnyh jelementov i SAPR. – M.: Мир, 1989. –190 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Petrochenko V.V., Pospelov V.E.* Puti jekonomii chernyh metallov v mashinostroenii. – Moscow: Mashinostroenie, 1983. – 160 p. **2.** *Eremenko S. Ju.* Metody konechnyh jelementov v mehanike deformiruemyh tel. – Kharkov: Osнова, 1991. – 272 p. **3.** *Peleshko E.V.* Primenenie obobshhhenno-parametricheskogo podhoda k analizu korpusov transportnyh sredstv special'nogo

Postynula (received) 09.06.2015