

**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.

**Постановка задачи.** Рассматриваются пластины с геометрическими

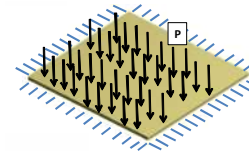


Рисунок 1 – Нагружение и закрепление

размерами 1x1 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 2E7-2E11, его толщина варьируется в пределах 2-50 мм

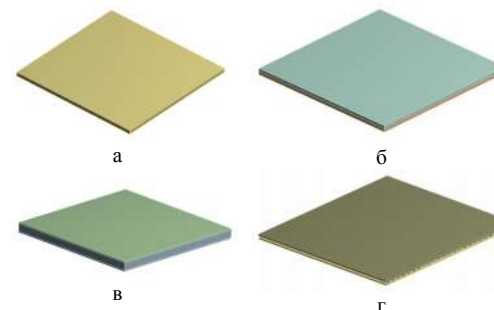


Рисунок 2 – Варианты исполнений:

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

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)).

**Задача исследований** – проанализировав поведение

параметрических моделей под действием описанного варианта нагружения, определить для сэндвич-панелей аналогичные с точки зрения жесткости гомогенизиро-

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 сэндвич-панелей по сравнению с аналогичными гомогенизированными. Анализируется характер изменения основных характеристик от параметров конструкции. Показано, что 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%. 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

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 объемных КЭ. В связи с тем, что в задачах происходит варьирование множества параметров в широких пределах, имеет смысл перечислить все рассчитанные варианты.

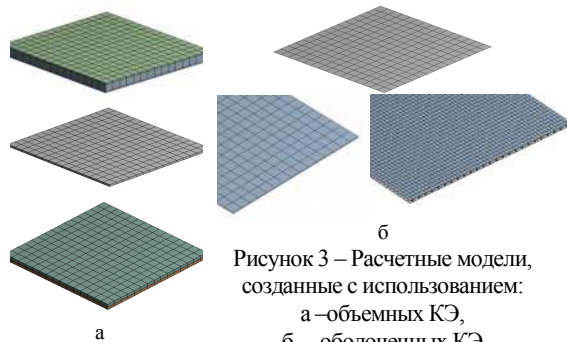


Рисунок 3 – Расчетные модели, созданные с использованием:  
а – объемных КЭ,  
б – оболочечных КЭ

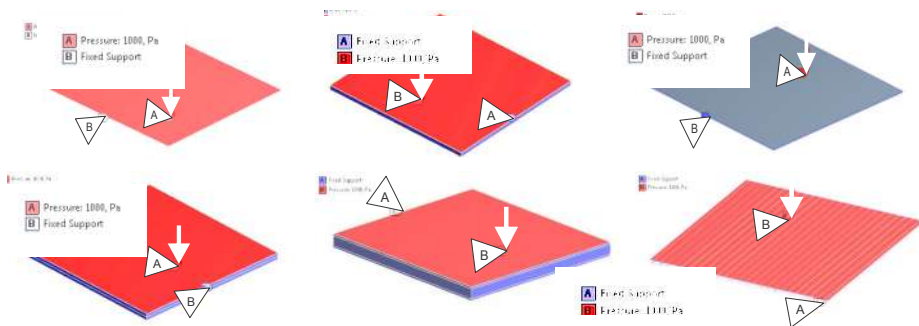


Рисунок 4 – Способ задания граничных условий

**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).

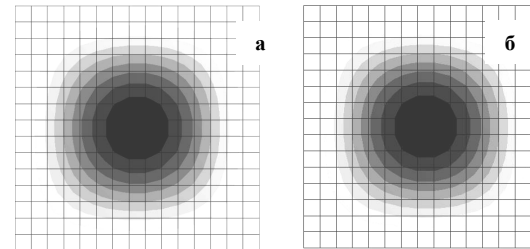


Рисунок 5 – Сравнение картин распределения перемещений для различных вариантов постановки:  
а – деформации в твердотельной постановке;  
б – деформации в оболочечной постановке

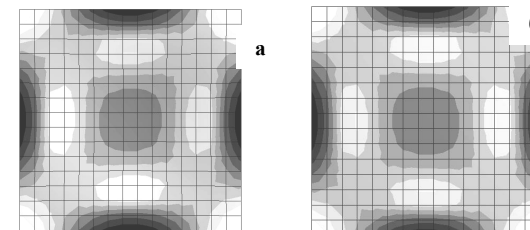
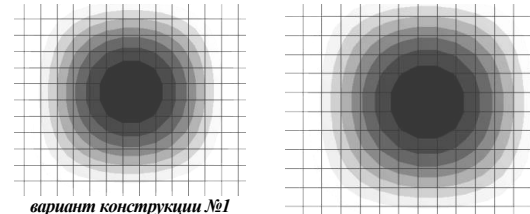
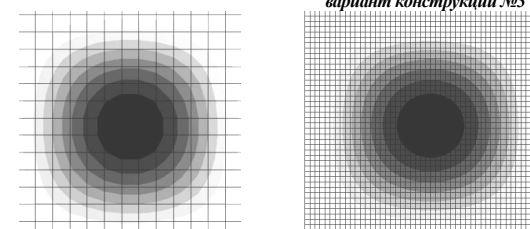


Рисунок 6 – Сравнение картин распределения напряжений для различных вариантов постановки:  
а – напряжения в твердотельной постановке;  
б – напряжения в оболочечной постановке



вариант конструкции №1



вариант конструкции №3

вариант конструкции №2

вариант конструкции №4

Рисунок 7 – Картины распределения перемещений для разных типов конструкции

использование в качестве прослойки материалов со следующими характеристиками: мат.1 – модуль упругости –  $2 \times 10^7$  Па; плотность –  $1200 \text{ кг/м}^3$  (пенопласт); мат.2 –

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:  $w_{\text{max}}$  – максимальный прогиб (мкм),  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$  – 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:

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

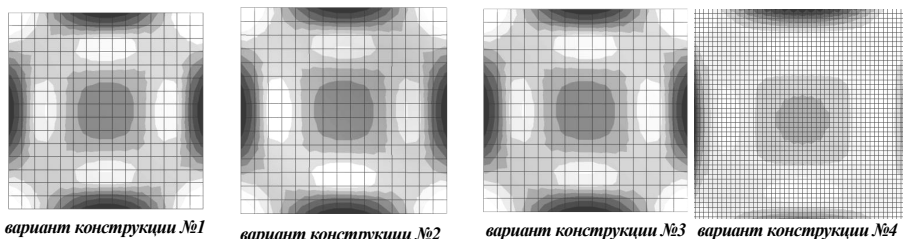


Рисунок 8 – Картины распределения напряжений для разных типов конструкции

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

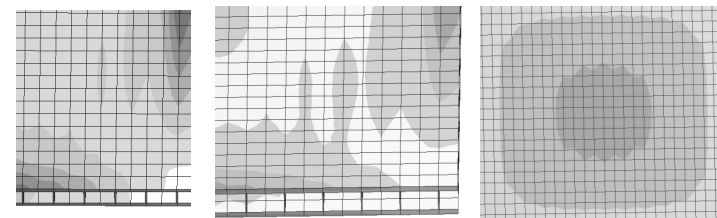


Таблица 3 – Результаты НДС для 3-го типа конструкции

| 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 |
| 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 | $\sigma_{экр}^{max}$ , 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 | $\sigma_{экр}$ , 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  |

Окончание табл. 5

| Номер варианта | Экв. толщина, мм | Экв. масса, кг | $\sigma_{экр}$ , 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 4-го типа конструкции

| Номер варианта | Экв. толщина, мм | Экв. масса, кг | $\sigma_{экр}$ , 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.

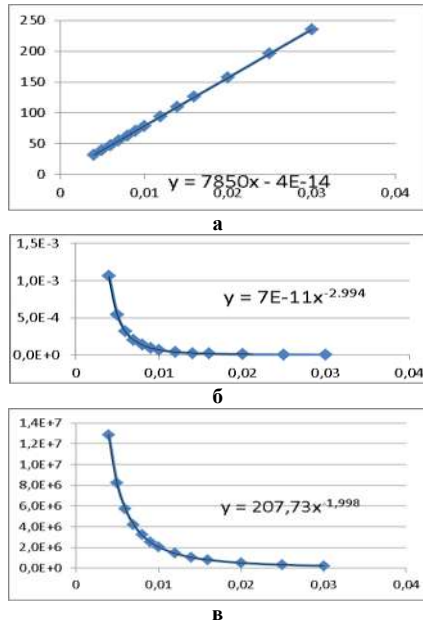


Рисунок 10 – Зависимость контрольных величин от толщины:  
а – вес конструкции; б – максимальный прогиб; в – напряжения

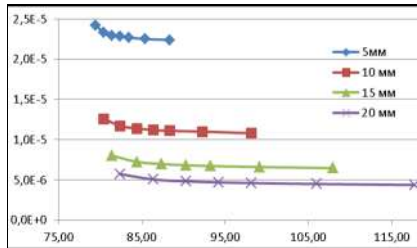


Рисунок 11 – Изменение максимального прогиба в зависимости от веса конструкции при разных значениях высот ребер для варианта №4

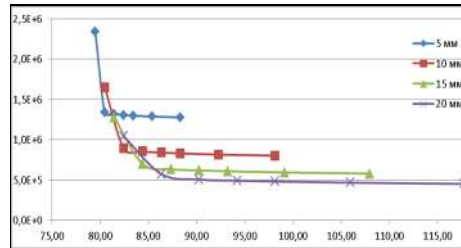


Рисунок 12 – Изменение максимальных эквивалентных напряжений в зависимости от веса конструкции при разных значениях высот ребер для варианта №4

**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.,

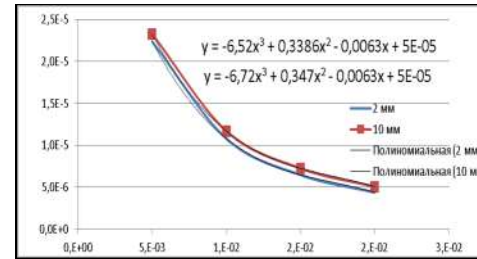


Рисунок 13 – Изменение максимальных эквивалентных напряжений в зависимости от высоты ребер конструкции при разных значениях толщин ребер для варианта №4

Ткачук Н.А. Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных систем // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2003. – № 1. – С.3-7. 5. Сабонад'єр Ж. Кулон Ж. Метод конечных элементов и САПР. – М.: Мир, 1989. –190 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Petrochenko V.V., Pospelov V.E. Puti ekonomii 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 obobshhenno-parametricheskogo podhoda k analizu korpusov transportnyh sredstv special'nogo

Postynula (received) 09.06.2015