

УДК 629.114.5

МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПАНЕЛИ АВТОБУСНОГО КУЗОВА

О.В. Воронков, соискатель ученой степени к.т.н. / В.И. Песков, к.т.н., профессор кафедры «Автомобили и тракторы» Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева



В настоящее время трехслойные панели получили широкое применение в авиакосмической, судостроительной и строительной промышленности развитых стран по всему миру. Высокая весовая эффективность данного типа конструкций доказана в ходе длительного опыта их производства и эксплуатации. В последнее время наблюдается возрастающий интерес зарубежных автобусостроителей к эффективным способам внедрения трехслойных панелей в процесс производства автобусных кузовов, что подтверждается периодическим появлением все новых образцов автобусов-прототипов, использующих в своей конструкции так называемые панели типа «сэндвич». Указанный интерес оправдан, т.к. на данный момент наиболее эффективным способом повышения производительности автобуса в соответствии с его основной функцией является уменьшение его снаряженной массы, что достигается, главным образом, за счет снижения собственной массы несущих частей. В свою

очередь, создание легковесной несущей конструкции автобусного кузова возможно путем коренного пересмотра номенклатуры применяемых материалов и замены давно устаревшего стального или алюминиевого каркаса основных несущих элементов на более эффективные структуры из сэндвич-панелей. В качестве одного из наиболее оправданных решений в данном случае предлагается применение трехслойных панелей с «ребристым» средним слоем (рис. 1).

В сложившейся ситуации существует реальная потребность в методике выбора рациональных параметров трехслойных панелей, используемых в качестве несущих частей автобусного кузова, т.к. не любая сэндвич-панель может служить эффективной заменой каркасной конструкции. Первым шагом в такой методике является выбор рационального сочетания материалов для конструктивных элементов панели.

В соответствии со сказанным, целью данной научной работы является разработка последовательности действий и расчетных зависимостей, которые позволяли бы на ранней стадии проектирования трехслойной панели автобусного кузова про-

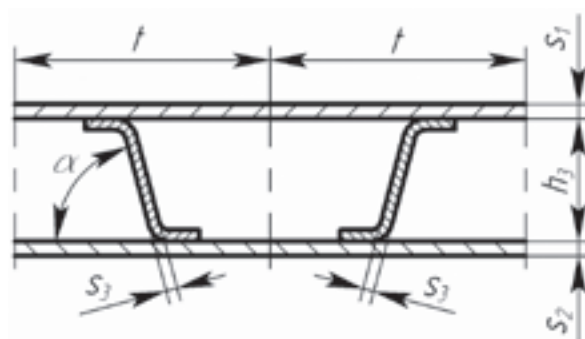


Рисунок 1. Поперечное сечение панели

изводить количественную оценку эффективности принятых для ее составных частей материалов.

Степень рациональности применения того или иного конструкционного материала существенно зависит от конкретных конструктивных особенностей рассматриваемой несущей системы, величин и характера действующих нагрузок. В случае, если рассматривается группа аналогичных по своей конструкции и применению несущих систем, подвергаемых одним и тем же нагрузкам, вопрос рациональности применения того или иного материала обычно сводится к вопросу минимизации собственной массы или стоимости конструкции. Также данный вопрос можно свести к возможности сравнения двух аналогичных конструкций, выполненных из различных материалов. При этом необходимо учитывать, что в данном случае должны сравниваться между собой конструкции, рациональные с точки зрения своих геометрических параметров при имеющихся свойствах каждой комбинации выбранных материалов. Для определения такого состояния конструкции на ранней стадии ее проектирования предлагаются специально выработанные для данной цели критерии. Будем считать трехслойную панель рациональной с точки зрения геометрических параметров, если выполняются следующие условия:

- 1) действительные коэффициенты запаса прочности/жесткости равны минимально допустимым;
- 2) основные силовые элементы конструкции равнопрочны;
- 3) силовые элементы конструкции главным образом выполняют только свою основную функцию.

Для простоты получаемых расчетных формул все рассматриваемые в данной работе материалы условно считаются изотропными, что вполне соответствует существующей на данный момент инженерной практике расчета автобусных конструкций.

Для удобства записи приводимых в дальнейшем зависимостей предлагается ввести понятия приведенных механических характеристик материалов, смысл которых исходит из разности механики работы материала для силовых элементов, имеющих форму балок и пластин.

$$\text{Для балок: } E^* = E; [\sigma]_{RC}^* = [\sigma]_{RC}; \quad (1)$$

Для пластин: $E^* = E/(1 - \mu^2)$; $[\sigma]_{RC}^* = [\sigma]_{RC}/(1 - \mu)$, (2)
 где E — модуль упругости 1-го рода; $[\sigma]_{RC} = [\sigma]_{TRC}/k_3$ — допустимое напряжение при растяжении (сжатии) для пластичного материала; $[\sigma]_{RC} = [\sigma]_{BR C}/k_3$ — для хрупкого материала; σ_{TRC} — предел текучести мате-

риала при растяжении/сжатии; $\sigma_{BR C}$ — предел прочности материала при растяжении (сжатии); k_3 — коэффициент запаса. Символ «*» указывает на то, что данная механическая характеристика является приведенной.

Использование приведенных характеристик позволит в дальнейшем использовать одни и те же расчетные зависимости для силовых элементов, работающих по типу балок и пластин.

Далее предлагаются зависимости для определения безразмерных сравнительных коэффициентов свойств материалов. Данные коэффициенты будут использоваться в дальнейшем при записи формул для безразмерных сравнительных коэффициентов эффективности материалов.

1. Индекс жесткости материала

$$v = E^*/[\sigma]^* \quad (3.1)$$

$$v = G/[\tau]^* \quad (3.2)$$

$$v = E^*/[\sigma]^* \quad (3.3)$$

Указанный коэффициент предлагается впервые в данной работе. В формулировке (3.1) он используется для большинства нагрузочных ситуаций, в том числе для сложного напряженного состояния материала. В формулировке (3.2) — для нагрузочной ситуации чистого сдвига; в формулировке (3.3) — для нагрузочной ситуации одноосного сжатия.

Важность данного коэффициента заключается в том, что он позволяет математически описать пункт (3) предложенных критериев рациональности параметров трехслойной панели. Иллюстрация к указанному положению приведена на рис. 2, на котором изображен элементарный участок панели, подверженный чистому изгибу. Т.к. основным нагрузочным режимом для панели основания или крыши автобусного кузова является изгиб на пролете между боковинами, то для обеспечения требований пункта (3) указанных критериев необходимо, чтобы индекс жесткости материала среднего слоя был ниже, чем индекс жесткости материалов обшивок.

2. Относительная плотность

$$\chi = \rho_1 / \rho_2, \quad (4)$$

где ρ_1 — плотность базового материала; ρ_2 — плотность рассматриваемого материала.

Далее по тексту при рассмотрении безразмерных сравнительных коэффициентов свойств материалов индекс «1» будет обозначать принадлежность к базовому материалу, т.е. некоему материалу, взятому за базу для сравнения всех прочих материалов, а индекс «2» — к рассматриваемому материалу.

3. Относительная прочность

$$\gamma_{P,C,И} = [\sigma]_{P,C,И1}^* / [\sigma]_{P,C,И2}^* \quad (5.1)$$

$$\gamma_{сдв} = [\tau]_1 / [\tau]_2 \quad (5.2)$$

где $[\sigma]_{P,C,И}^*$ — приведенные допускаемые нормальные напряжения при растяжении, сжатии, изгибе; $[\tau]$ — допускаемые касательные напряжения.

Формулировка (5.1) используется при растяжении, сжатии, изгибе материала, формулировка (5.2) — при сдвиге.

4. Относительная жесткость

$$\beta_{P,C} = E_1^* / E_2^* \quad (6.1)$$

$$\beta_{сдв} = G_1 / G_2 \quad (6.2)$$

где E^* — приведенный модуль упругости 1-го рода материала; G — модуль упругости 2-го рода материала.

Формулировка (6.1) используется при растяжении/сжатии материала, формулировка (6.2) — при сдвиге.

5. Относительная стоимость

$$c = C_1 / C_2, \quad (7)$$

где C — удельная стоимость или стоимость 1 кг материала.

6. Относительная адаптивность по толщине

$$\delta = \delta_{s1} / \delta_{s2}, \quad (8)$$

где δ_s — средний шаг толщин стандартного (технологически получаемого) листа из материала в окрестности рационального решения.

Далее предлагаются формулы для безразмерных сравнительных коэффициентов эффективности материалов, полученные на основе рассмотрения элементарных силовых элементов в виде тонких листов единичной ширины. Данный подход оправдан ввиду того, что все конструктивные элементы трехслойной панели с «ребристым» средним слоем представляют собой тонколистовые конструкции.

Сравнительный коэффициент эффективности материала по своей сути есть следующее:

$$K = M_1 / M_2 \text{ или } K = C_1 / C_2 \quad (9)$$

при выполнении некоторого условия (9), где M_1 , C_1 и M_2 , C_2 — масса и стоимость конструкции из базового и рассматриваемого материала соответственно.

От выбранного условия сравнения зависит тип коэффициента эффективности. Таким условием может быть равная прочность конструкций (для коэффициента эффективности по прочности) или равная жесткость конструкций (для коэффициента эффективности по жесткости). В качестве основных будем рассматривать коэффициенты,

учитывающие массу конструкций. Для коэффициентов эффективности по прочности будем указывать индекс «П», по жесткости — индекс «Ж». Для аналогичных коэффициентов, учитывающих стоимость конструкций (только стоимость материалов), будем указывать индекс «С».

В соответствии со сказанным можно записать:

- для растяжения (сжатия) материала: $K_{П} = \chi / \gamma \quad (10.1)$

- для изгиба материала: $K_{Ж} = \chi / \beta \quad (10.2)$

- для сдвига материала: $K_{П} = \chi / \sqrt{\gamma} \quad (11.1)$

- для сдвига материала: $K_{Ж} = \chi / \sqrt[3]{\beta} \quad (11.2)$

- для всех перечисленных нагрузочных режимов: $K_{П} = \chi^* / \gamma^* \quad (12.1)$

- для всех перечисленных нагрузочных режимов: $K_{Ж} = \chi^* / \beta^* \quad (12.2)$

- для всех перечисленных нагрузочных режимов: $K_{СП} = c \cdot K_{П} \quad (13.1)$

- для всех перечисленных нагрузочных режимов: $K_{СЖ} = c \cdot K_{Ж} \quad (13.2)$

В формулах (12.1) и (12.2) знак «*» у безразмерных сравнительных коэффициентов свойств материалов означает, что данные коэффициенты вычислены по соответствующим расчетным формулам с использованием приведенных характеристик материала, которые получаются в результате приведения «ребристого» среднего слоя к условному сплошному. Указанные приведенные характеристики материалов определяются по следующим расчетным зависимостям:

$$\rho^* = \rho \cdot s_3 \cdot (2c_3 / h_3 + 1 / (t \cdot \sin \alpha)) \quad (14.1)$$

$$G^* = G \cdot s_3 / t \quad (14.2)$$

$$[\tau]^* = \tau \cdot s_3 / t \quad (14.3)$$

где, в соответствии с рис. 3, s_3 — толщина ребра среднего слоя; $c_3 = (t_1 + t_2) / (2t)$ — средняя скважность полков ребра; t — шаг ребер среднего слоя; $t_{1,2}$ — ширина полки ребра со стороны верхней или нижней обшивки соответственно; h_3 — высота среднего слоя.

Безразмерные сравнительные коэффициенты эффективности материала, определяемые по зависимостям (10.1–13.2), показывают теоретически возможный выигрыш от введения нового материала без учета неизбежных отклонений размеров реальной конструкции от расчетных рациональных. Главным образом указанное отклонение возникает в результате наличия только некоторого определенного ряда толщин листов из рассматриваемого материала ввиду ограничений существующего технологического процесса изготовления листов или ввиду доступности только некоторого стандартного ряда толщин листов.

Для того, чтобы обеспечить возможность прогнозирования выигрыша от применения нового материала, с учетом стандартного ряда толщин листов на ранних этапах проектирования конструкции, в данной работе предлагается безразмерный сравнительный коэффициент эффективности материалов по массе, который позволяет решать поставленную задачу.

Предварительно рассмотрим некоторые вспомогательные коэффициенты.

1. Безразмерный сравнительный коэффициент эффективности материалов по шагу толщин

$$K_{шт} = \delta M_1 / \delta M_2 = \chi \cdot \delta, \quad (15)$$

где $\delta M = \rho \cdot \delta s$ — шаг по массе конструкции в виде тонкого листа при переходе между соседними значениями стандартной толщины листа.

2. Относительное отклонение массы конструкции

$$m = \delta M / (2M) = \delta s / (2s), \quad (16)$$

где s — предварительное целевое значение геометрического параметра по толщине листа.

Предлагается следующее определение. Относительное отклонение массы конструкции есть безразмерная величина, которая показывает — какую долю собственной массы может составлять половина шага по массе данной конструкции. На практике это означает следующее: какую долю собственной массы конструкции может составлять ее максимальное отклонение по массе от рационального значения. Необходимо отметить, что такая формулировка (подмена понятий) не гарантирует жесткой зависимости, а носит скорее вероятностный характер, подразумевается случай наибольшего возможного отклонения.

С учетом сказанного, рассмотрим реальные конструкции из базового и рассматриваемого материалов, подразумевая, что для каждой из них реализовался худший случай с позиций отклонения от рациональной толщины листа.

$$M_{p1} = M_1 + \delta M_1 / 2 \quad (17.1)$$

$$M_{p2} = M_2 + \delta M_2 / 2 \quad (17.2)$$

где M_{p1} , M_{p2} — масса реальной конструкции из базового материала и рассматриваемого материала соответственно, с учетом отклонения геометрических размеров от рациональных значений вследствие дискретности толщин листов.

Сравнительный коэффициент эффективности материалов по массе по своей сути есть следующее:

$$K_M = M_{p1} / M_{p2} = (M_1 + \delta M_1 / 2) / (M_2 + \delta M_2 / 2) = (1 + \delta M_1 / (2M_1)) / (M_2 / M_1 + \delta M_2 / (2M_1)) \text{ при выполнении некоторого условия;}$$

Таблица 1. Характеристики сравниваемых материалов

Параметры	Базовый материал	Рассматриваемый материал
Марка материала	Сталь 08пс	Nitronic 30 (03X17Г9Н3С2АД)
$[\sigma]_p^*$, МПа	205,4	1246,5
ρ , кг/м ³	7846	7900
δ_s , мм	0,3	0,3
S, мм	1,8	Не известно

$$K_M = (1 + m_1) / (1 / K_{п(ж)} + m_1 / K_{шт}) \quad (18)$$

Здесь индекс «1» указывает на то, что относительное отклонение массы рассчитывается для базовой конструкции. Используемый безразмерный сравнительный коэффициент эффективности материала (по прочности или по жесткости) определяет тип безразмерного сравнительного коэффициента эффективности по массе материала.

Коэффициент эффективности материала по массе дает более приближенную к реальности сравнительную характеристику базового и рассматриваемого материалов, по сравнению с приведенными ранее коэффициентами, которые не учитывали технологические ограничения.

Рассмотрим реальный пример.

Необходимо оценить потенциальную возможность выигрыша по массе в результате применения высокопрочной холоднотянутой стали вместо конструкционной низкоуглеродистой. Характеристики сравниваемых материалов приведены в табл. 1. Конструкция работает исключительно на прочность. Для низкоуглеродистой стали имеется разработанная и оптимизированная по своим геометрическим размерам конструкция трехслойной панели — известна толщина обшивок (рассматриваемого в данном случае конструктивного элемента панели).

1. Рассчитываем безразмерные сравнительные коэффициенты

$$\gamma_p = 205,4 / 1246,5 = 0,165$$

$$\chi = 7846 / 7900 = 0,993$$

$$\delta = 0,3 / 0,3 = 1$$

$$m_1 = 0,3 / (2 \cdot 1,8) = 0,0833.$$

2. Рассчитываем безразмерные коэффициенты эффективности

$$K_{п} = \chi / \gamma = 0,993 / 0,165 = 6,018$$

$$K_{шт} = \chi \cdot \delta = 0,993;$$

$$K_M = (1 + m_1) / (1 / K_{п} + m_1 / K_{шт}) = (1 + 0,0833) / (1 / 6,018 + 0,0833 / 0,993) = 4,335.$$

Из приведенного расчета видно следующее: теоретически конструкция из рассматриваемой высоко-

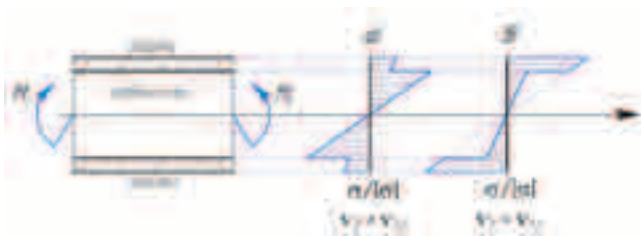


Рисунок 2. Участок панели, подверженный чистому изгибу

копровой стали может быть в 6,018 раз легче, чем конструкция из базовой малоуглеродистой стали. На практике, вследствие дискретности имеющих толщин листов, выигрыш может составить 4,335 раза.

В случае, если необходимо провести сравнение по стоимости с учетом дискретности толщин листов, то используется формула, аналогичная приведенным ранее (13.1-13.2):

$$K_{CM} = c \cdot K_M \quad (19)$$

Основываясь на сказанном, можно сформулировать основные положения методики выбора рационального сочетания материалов для конструктивных элементов трехслойной панели. Были приведены формулы для определения коэффициентов эффективности применения того или иного материала при конкретной нагрузочной ситуации для отдельного конструктивного элемента панели, каковыми являются обшивки и средний слой. Используя данные сравнительные коэффициенты, можно гарантированно подобрать сочетание материалов для конструктивных элементов трехслойной панели, обеспечивающее высокую эффективность как с позиций механики работы панели, так и стоимости.

Предлагается следующая последовательность действий.

1. Составить базу данных рассматриваемых материалов, включающую механические и стоимостные характеристики материалов.
2. Для каждого конструктивного элемента трехслойной панели (верхняя обшивка / нижняя обшивка / средний слой) выбрать базовый материал, относительно которого будет производиться сравнение.
3. Назначить предварительные геометрические размеры трехслойной панели из базового сочетания материалов путем проведения соответствующих расчетов или конструктивно, основываясь

на практическом опыте. Всегда лучше, когда конструкция разрабатывается на основании уже имеющейся.

4. Рассчитать необходимые для дальнейших вычислений безразмерные сравнительные коэффициенты для каждого материала из базы данных.

5. Рассчитать безразмерные коэффициенты эффективности для интересующих нагрузочных ситуаций для каждого материала из базы данных.

При этом следует учитывать, что:

- для верхней обшивки трехслойной панели основания автобуса важными являются нагрузочные ситуации сжатия и изгиба;
- для верхней обшивки трехслойной панели крыши автобуса важной является нагрузочная ситуация сжатия, в редких случаях изгиба;
- для нижней обшивки трехслойной панели основания и крыши автобуса важной является нагрузочная ситуация растяжения;
- для среднего слоя важной является нагрузочная ситуация сдвига.

При выборе коэффициентов эффективности следует придерживаться следующих рекомендаций:

5.1. При выборе коэффициента эффективности необходимо принимать во внимание значение индекса жесткости материала: для материалов с высоким значением индекса жесткости ограничивающим параметром будет являться прочность конструкции (следует из определения индекса жесткости) — в первую очередь рассматривать коэффициент эффективности по прочности; для материалов с низким значением индекса жесткости ограничивающим параметром будет являться жесткость конструкции (для панели основания автобуса) — в первую очередь рассматривать коэффициент эффективности по жесткости.

5.2. При выборе материала среднего слоя необходимо обеспечить, чтобы его индекс жесткости был ниже, чем индекс жесткости материалов об-

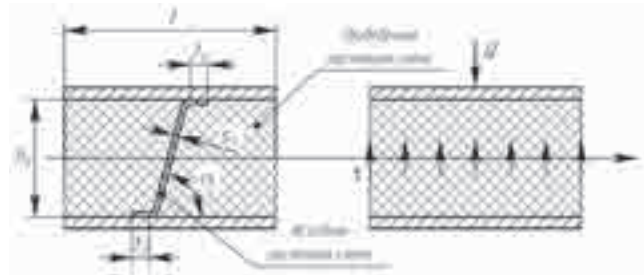


Рисунок 3. Приведение ребристого среднего слоя к условному сплошному

шивок. Это обеспечит правильную механику работы всех элементов конструкции.

5.3. Предпочтительнее является рассмотрение коэффициентов эффективности по массе материала, т.к. они дополнительно учитывают технологическое ограничение по толщинам листов.

5.4. В случае, если первоочередной задачей является обеспечение низкой стоимости, а не низкой собственной массы трехслойной панели, тогда необходимо рассматривать соответствующие описанным нагрузочным ситуациям коэффициенты эффективности по стоимости.

6. Отдельно для каждого конструктивного элемента трехслойной панели выбрать из базы данных материал с наилучшим значением рассматриваемого коэффициента эффективности.

Такая методика гарантирует повышение показателей конструкции по сравнению с базовой только в том случае, если для всех конструктивных элементов были приняты материалы с лучшими значениями коэффициентов эффективности. Если для одних конструктивных элементов были приняты материалы с лучшими значениями коэффициентов эффективности, а для других — с худшими, то в этом случае произвести сравнительную оценку эффективности можно будет только после определения геометрических размеров основных элементов трехслойной панели, когда станут известны массовые доли всех конструктивных элементов в общей массе панели, или же массовые доли отдельных конструктивных элементов могут назначаться на основании практического опыта проектирования подобных конструкций.

Итоговую оценку выбранной комбинации материалов для отдельных конструктивных элементов панели можно провести с использованием итогового безразмерного сравнительного коэффициента эффективности:

$$K = M_{12}/M_{22} = (M_{11} + M_{12} + M_{13}) / (M_{21} + M_{22} + M_{23}) \quad (20.1)$$

$$K = C_{12}/C_{22} = (C_{11} + C_{12} + C_{13}) / (C_{21} + C_{22} + C_{23}) \quad (20.2)$$

где K — итоговый коэффициент эффективности конструкции по массе или стоимости при рассматриваемых условиях (равная прочность или жесткость) в зависимости от входящих в формулу коэффициентов; M_{Σ} — масса панели из базового или рассматриваемого сочетания материалов при оптимизированных геометрических размерах; C_{Σ} — стоимость панели из базового или рассматриваемого сочетания материалов при оптимизированных геометрических размерах; M_1, M_2, M_3 — масса верхней обшивки, нижней обшивки, среднего слоя соответственно; C_1, C_2, C_3 — стоимость

верхней обшивки, нижней обшивки, среднего слоя соответственно.

Формулировка (20.1) подразумевает сравнение по массе, (20.2) — по стоимости.

$$M_{11} = K_1 \cdot M_{21}, M_{12} = K_2 \cdot M_{22}, M_{13} = K_3 \cdot M_{23} \quad (21)$$

где K_1, K_2, K_3 — сравнительные коэффициенты эффективности для верхней обшивки, нижней обшивки, среднего слоя соответственно. Это могут быть коэффициенты $K_{П}, K_{Ж}$ или K_M . Если K является коэффициентом эффективности по стоимости, то в него должны входить коэффициенты $K_{СП}, K_{СЖ}$ или $K_{СМ}$. Все коэффициенты, входящие в формулы (21), должны быть однородны по своему физическому смыслу.

$$M_{21} = \lambda_1 \cdot M_{22}, M_{22} = \lambda_2 \cdot M_{22}, M_{23} = \lambda_3 \cdot M_{22} \quad (22)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — массовые доли соответствующих конструктивных элементов в общей массе панели из рассматриваемой комбинации материалов.

Тогда выражение (20.1) можно переписать следующим образом:

$$K = (K_1 \cdot M_{21} + K_2 \cdot M_{22} + K_3 \cdot M_{23}) / (M_{21} + M_{22} + M_{23}) = M_{22} / M_{22} \cdot (K_1 \cdot \lambda_1 + K_2 \cdot \lambda_2 + K_3 \cdot \lambda_3) \text{ или} \\ K = K_1 \cdot \lambda_1 + K_2 \cdot \lambda_2 + K_3 \cdot \lambda_3 \quad (23)$$

Для итогового коэффициента эффективности по стоимости форма записи будет такой же.

Физический смысл итогового коэффициента эффективности конструкции идентичен физическому смыслу входящих в него коэффициентов за тем исключением, что он относится не к отдельному конструктивному элементу, а к трехслойной панели целиком.

Выводы. В данной работе предложена методика, включающая порядок действий и расчетные зависимости, которая гарантированно позволяет улучшать весовые или стоимостные характеристики несущей трехслойной панели основания или крыши автобусного кузова по сравнению с базовым вариантом. Также обеспечивается возможность итоговой проверки выбранной комбинации материалов на эффективность. Все предложенные сравнительные коэффициенты эффективности имеют количественный характер [1], что позволяет на ранних этапах проектирования прогнозировать, на сколько процентов изменятся весовые или стоимостные характеристики конструкции при использовании новых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронков О.В., Песков В.И., Хорычев А.А. Новое в конструкции и проектировании автобусных кузовов. — Нижний Новгород: НГТУ, 2009. — 186 с.