

УДК 629.113.5

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭКП

О.В. Воронков / В.И. Песков, к.т.н.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Высокая конкуренция в сфере транспортного машиностроения, в частности автобусостроения, заставляет производителей постоянно искать новые пути совершенствования кузовных конструкций, которые, как правило, составляют значительную долю в себестоимости конечного продукта. При рассмотрении в качестве такового пассажирского автобуса указанная доля может составлять 60-70%. Следовательно, разработка новых методов совершенствования автобусного кузова имеет высокую практическую ценность. Одним из таких методов, позволяющих значительно повысить жёсткость и прочность автобусного кузова при одновременной возможности резко снизить собственную массу несущих частей [2], сохраняя при этом стоимость конструкции на прежнем уровне, является построение несущей системы кузова, соответствующей типу «монокок» [1]. Разработанный авторами прототип перспективной несущей системы такого кузова для автобуса I класса показан на рис. 1. Основание и крыша в приведённом примере конструкции выполнены в виде трёхслойных панелей с ребристым средним слоем.

Основополагающим понятием в теории проектирования автобусных кузовов типа «монокок» является ЭКП — двухмерная структурная единица (то есть один из её габаритных размеров много меньше двух других), которая имеет высокую жёсткость при приложении нагрузки в её плоскости. Детально понятие ЭКП и основные принципы построения кузова типа «монокок» изложены в работе [1]. В настоящей статье рассматриваются жёсткостные свойства четырёх различных структурных единиц автобусного кузова, изображённых на рис. 2. На рис. 2, г верхняя обшив-

ка и верхний граничный профиль трёхслойной панели показаны прозрачными для раскрытия внутренней структуры.

Из рассматриваемых конструкций рама может представлять собой две оконные секции боковины автобусного кузова; рама, подкреплённая обочкой, и ферма — подоконную секцию боковины; трёхслойная панель — секцию крыши. Габаритные размеры для всех структурных единиц приняты одинаковыми: 1 850×950 мм (без учёта технологических частей для закрепления на испытательном приспособлении); материал — сталь 10 по ГОСТ 1050-88. Поперечное сечение балочных силовых элементов рам — труба 50×50×2,4 мм; фермы — 50×50×1 мм; толщина обшивки и рёбер трёхслойной панели, а также обшивки подкреплённой рамы — 1 мм. Крепление обшивки к раме производится по периметру.

В качестве методов исследования жёсткостных свойств рассматриваемых структурных единиц были выбраны следующие: 1) расчётное исследование конечно-элементных моделей (КЭМ) как дающее наиболее полную информацию об исследуемом объекте; 2) испытание масштабных макетов, необходимое для подтверждения достоверности расчётных результатов, как позволяющее минимизировать затраты на



Рисунок 1. Прототип перспективной несущей системы

Таблица 1. Основные масштабные соотношения

Масштаб линейных размеров	$M_l = L_M / L_k = s_M^{min} / s_k^{min}$	(1)
Масштаб нагрузки (силы)	$M_n = F_M / F_k = M_y \cdot M_l^2$	(2)
Масштаб упругих характеристик	$M_y = E_M / E_k$	(3)
Масштаб плотности	$M_n = \rho_M / \rho_k$	(4)
Масштаб линейной деформации	$M_l = \Delta_M / \Delta_k = M_n / (M_l^2 \cdot M_y)$	(5)
Масштаб угловой деформации	$M_{yl} = \gamma_M / \gamma_k = M_n / (M_l^2 \cdot M_y)$	(6)
Масштаб массы	$M_m = M_M / M_k = M_n \cdot M_l^3$	(7)



Рисунок 2. Секция

проведение экспериментов.

Методика построения масштабных макетов несущих кузовных конструкций и теоретическое обоснование предлагаемых зависимостей (см. табл. 1) для основных масштабных соотношений изложены в работе [3].

В качестве материала для изготовления макетов была выбрана техническая бумага двух сортов, отличающихся толщиной листа: 0,1 мм (далее — бумага) и 0,24 мм (далее — ватман). Измеренное отклонение листов по толщине находится в пределах 3-7%. Экспериментально определённая плотность материалов: бумага — 0,783 г/см³; ватман — 0,843 г/см³ (погрешность 1-3%). Испытанием тонкостенной балки на трёхточечный изгиб был определён модуль упругости I рода (E) обоих сортов материала: для бумаги $E = 2\,210$ МПа; для ватмана $E = 2\,590$ МПа (погрешность 4-8%). Испытанием образцов техниче-

ской бумаги на чистый сдвиг в специальном устройстве были определены величины модуля упругости II рода (G) для рассматриваемых сортов материала: для бумаги $G = 850$ МПа; для ватмана $G = 990$ МПа. Соответственно, получены значения коэффициента Пуассона $\mu = [E / (2G) - 1]$ для обоих видов материала макетов: $\mu = 0,3-0,31$ (с погрешностью не более 8%). Близость величин коэффициента Пуассона к соответствующему значению для малоуглеродистой стали ($\mu = 0,29$) позволяет обеспечить механическое поведение макета, подобное поведению реальной конструкции в области упругих деформаций.

В табл. 1 обозначено: M — масштаб; M — масса; L — линейный размер; s^{min} — минимальная толщина листа; F — сила; ρ — плотность; Δ — линейная деформация; γ — угловая деформация; индекс «к» означает принадлежность реальной конструкции, индекс «м» — макету; индексы масштабных коэффициентов указаны в соответствии с подписями в 1-м столбце таблицы.

Для обеспечения подобия деформированной формы реальной конструкции и макета необходимо, чтобы при $\mu_M = \mu_k \cdot M_{yl} = 1$, тогда зависимость для M_n принимает вид формулы (2), при этом $M_l = M_k$. Величина $M_l = 0,1$ в соответствии с зависимостью (1), определяемой технологическим ограничением.

Схема закрепления, нагружения и измерения деформации макетов при испытании и соответствующих им КЭМ при численном моделировании на примере структурной единицы в виде стержневой фермы показана на рис. 3. На рис. 3, б обозначены: 1) нить,

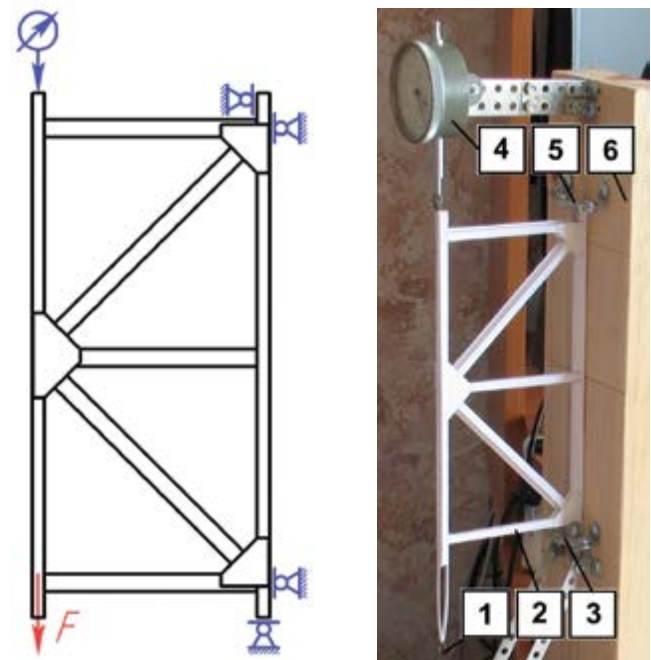


Рисунок 3. Закрепление макета

Таблица 2. Характеристики использованных КЭМ

Структурная единица	№ КЭМ	Тип КЭ	Кол-во узлов	Кол-во КЭ	КТИТЭ*
Рама	1	S8R	40 504	11 080	5
Рама, подкреплённая обшивкой	1	S4	20 579	20 376	5
	2	S4	48 275	48 072	5
	3	S8R	61 533	20 376	5
	4	S4	20 139	20 376	5
	5	S4	15 767	16 168	5
Ферма	1	S4	13 465	13 548	3
Трёхслойная панель	1	S4	31 056	32 640	3

* КТИТЭ — кол-во точек интегрирования по толщине элемента

на которой подвешен груз; 2) макет; 3) нижняя опора; 4) ИЧ 0-10 мм ГОСТ 577-68; 5) верхняя опора; 6) основание приспособления. Статическое нагружение макетов производилось путём ступенчатого приложения весовой нагрузки, измерение величины которой осуществлялось с помощью электронных весов с минимальной ценой деления 1 гс. Отличие измеренной массы макетов от значений, полученных по САД-моделям, находится в пределах 2-6%, что говорит о незначительном влиянии клея, использованного при сборке макетов. Для взвешивания макетов использовались механические весы рычажного типа с минимальной массой гири 10 мг. Характеристики КЭМ, использованных при численном моделировании, указаны в табл. 2. Расчёты производились в упругой области для материала, в линейной и нелинейной (учитывающей геометрическую изменчивость конструкции в процессе деформирования) постановках.

Результаты экспериментальных исследований (треугольники) и численного моделирования

(окружности) приведены на рис. 4 для структурных единиц в виде рамы, фермы и трёхслойной панели. На рис. 4, в красные окружности отражают результаты линейного расчёта, чёрные — нелинейного. Для данных структурных единиц характерно линейное поведение в процессе деформирования в пределах рассмотренных диапазонов нагрузок. Можно отметить удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных результатов, что подтверждает их достоверность.

Результаты испытаний макета рамы, подкреплённой тонкостенной оболочкой, и численных расчётов соответствующих ему КЭМ заслуживают отдельного рассмотрения ввиду выявленного сильного нелинейного поведения в процессе деформирования. Типовая кривая деформирования показана на рис. 5, она может быть схематизирована в виде кусочно-линейной функции, состоящей из двух участков, k_1 и k_2 — жёсткости, соответствующие данным участкам. Некоторые результаты расчётов КЭМ и экспериментов приведены на рис. 6.

В точке А (см. рис. 5) происходит значительное падение жёсткости рассматриваемой структурной единицы ввиду появления волн на обшивке, то есть её локальной потери устойчивости (см. рис. 7). Указанное явление и возможные механизмы его возникновения были описаны в работе [1], ему было дано название «разрушение ЭКП». В настоящей работе существование данного явления подтверждается расчётным и экспериментальным путями.

Для структурной единицы в виде рамы, подкреплённой тонкостенной обшивкой, КЭМ № 1, 2 и 3 отражали геометрически идеальную конструкцию. Наличие трёх КЭМ было необходимо для подтверждения сеточной сходимости решения. Так как кривые деформирования для упомянутых КЭМ практически идентичны, был сделан вывод о том, что сходимость достигнута. КЭМ № 4 и 5 отражали конструкции с небольшими начальными геометрическими несовер-

Таблица 3. Жёсткости структурных единиц под действием сдвигающей нагрузки

	Масса, кг		Жёсткость, кН/мм		Уд. жёсткость, кН/(мм·кг)	
	эсп.	КЭМ	эсп.	КЭМ	эсп.	КЭМ
Рама	32,6	32,1	1,23	1,32	0,038	0,041
Рама с обш. (k_1)	47,3	45,8	84,7	80,8	1,790	1,760
Рама с обш. (k_2)	47,3	45,8	19,1	40,5	0,404	0,883
Ферма	24,2	22,9	46,8	46,7	1,930	2,040
Панель	50,8	49,7	117	129	2,310	2,590

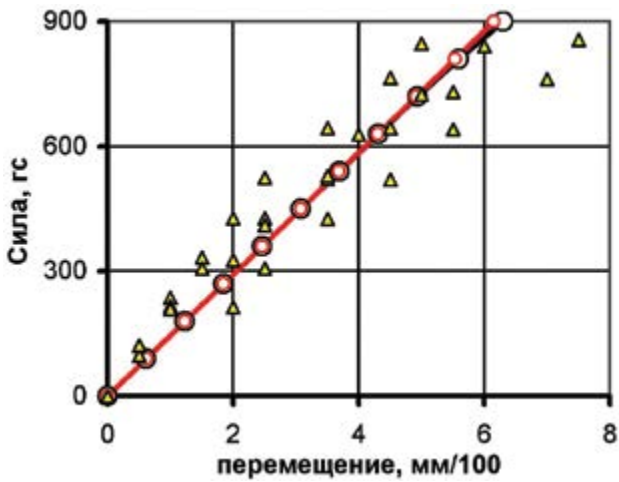
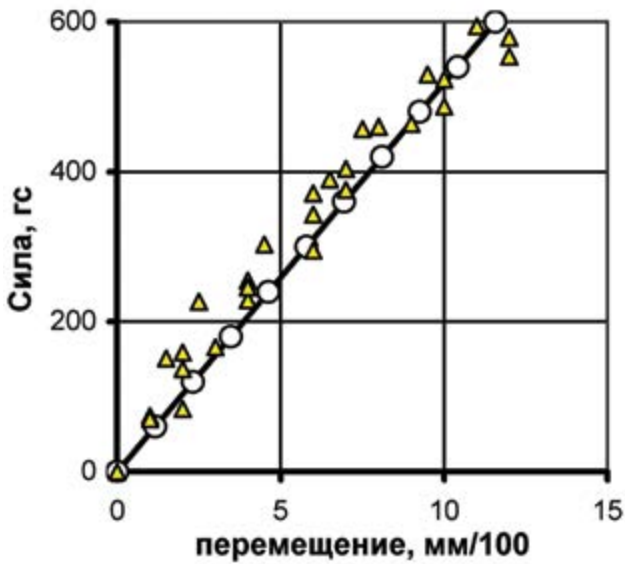
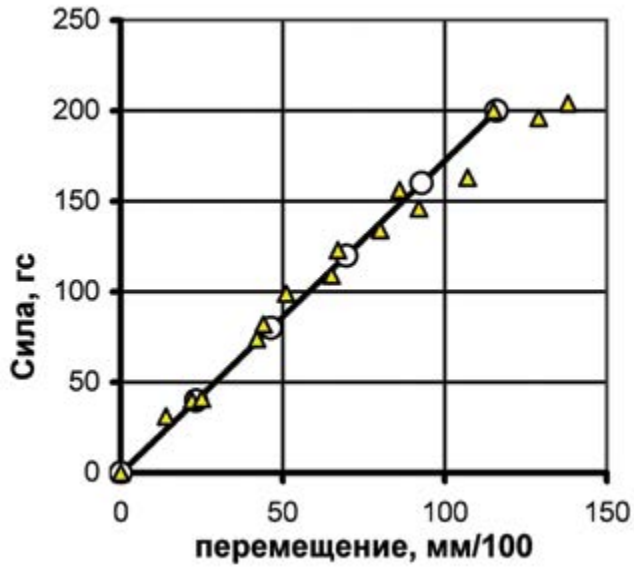


Рисунок 4. Результаты

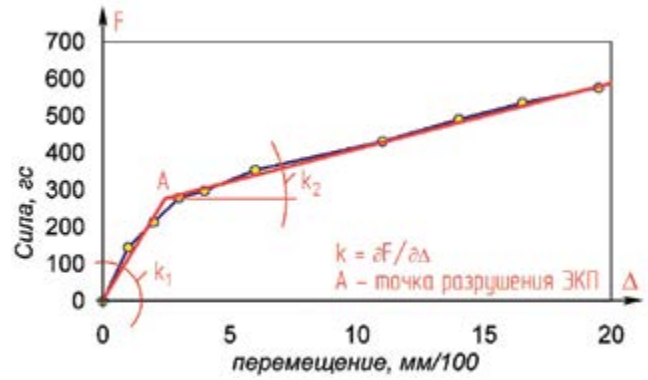
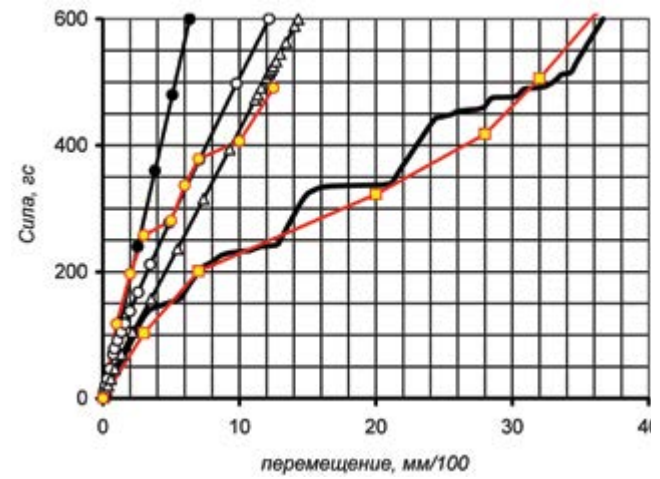


Рисунок 5. Типовая кривая деформирования



- КЭМ №1, лин.
- КЭМ №1, нелин.
- ▲ КЭМ №4, нелин.
- КЭМ №5, нелин.
- Серия 1, эксп. 3
- Серия 1, эксп. 7

Рисунок 6. Результаты: подкрепленная рама

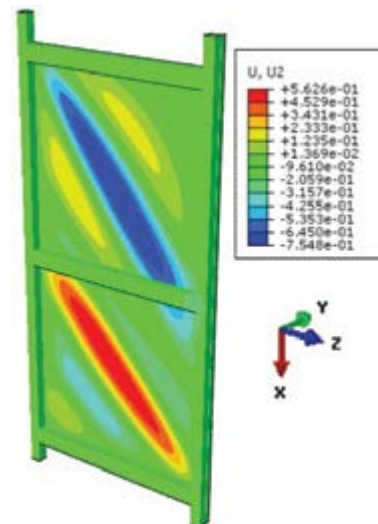


Рисунок 7. Волны на обшивке

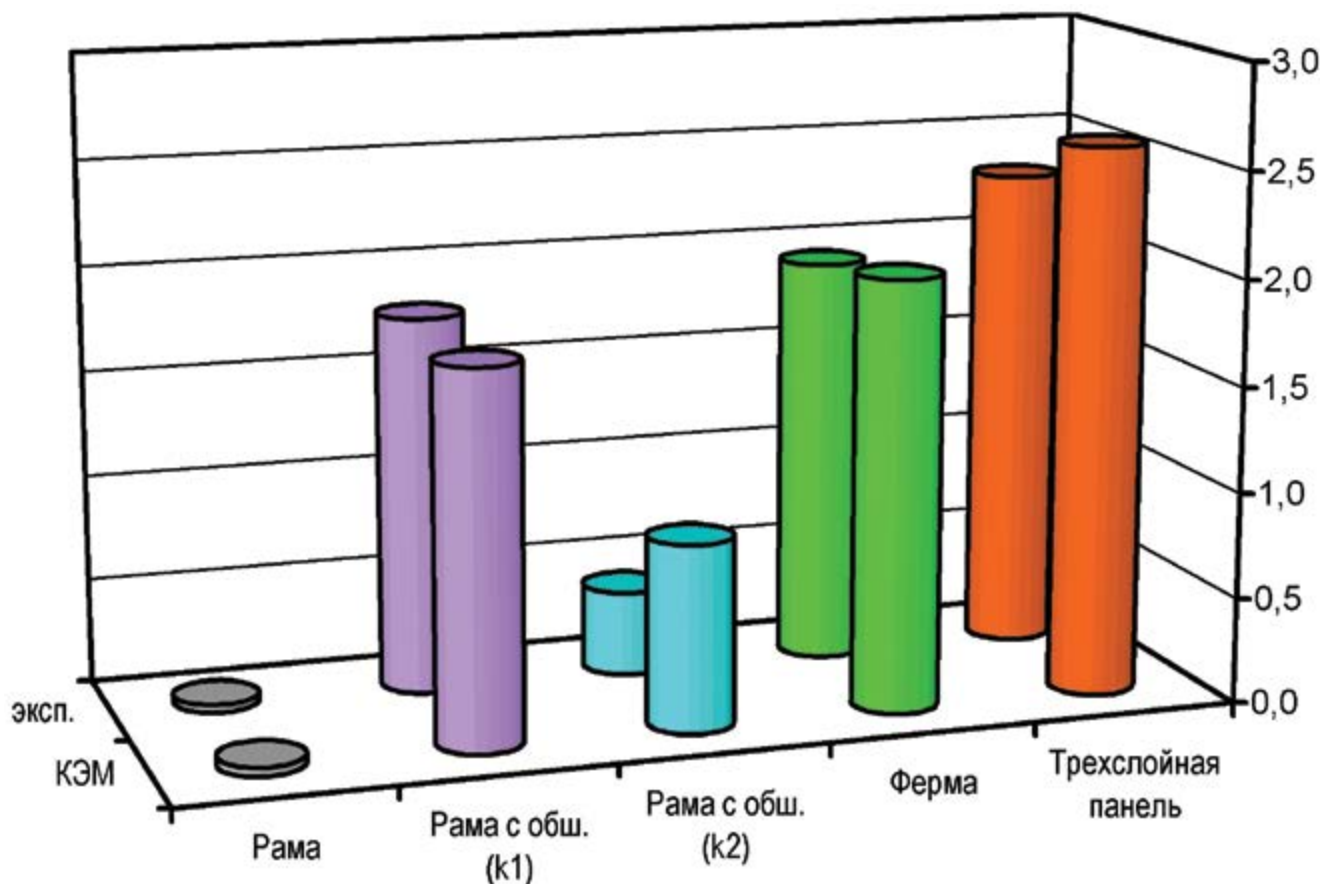


Рисунок 8. Удельные жёсткости

шенствами обшивки — выпуклостью и волнистостью соответственно. Направление волн на обшивке в КЭМ № 5 перпендикулярно направлению волн, образующихся при потере устойчивости обшивкой (см. рис. 7). Высота выпуклости (волны) в обоих случаях одинакова и равна 0,5 мм (для макета).

Ввиду существенного влияния имеющихся начальных геометрических несовершенств обшивки (макета) на момент начала потери устойчивости и жёсткости структурной единицы на втором участке деформирования, наблюдается хорошее совпадение отдельных экспериментальных кривых с одной из расчётных кривых. На рис. 6 красными линиями для примера показаны две характерные экспериментальные кривые, соответствующие сильному и слабому влиянию начальных геометрических несовершенств.

Отношение k_1/k_2 принимает значение 1,4-3,9 по результатам расчётов и 4,4 — по результатам экспериментов. Величина сдвигающей силы, соответствующей точке А (точке разрушения ЭКП), равняется примерно 80 гс по экспериментальным данным и 52-144 гс — по расчётным (для макетов). В пересчёте на реальную конструкцию экспериментально полученная величина критического сдвигающего усилия

соответствует 6,64 кН, а инженерное сдвигающее напряжение в обшивке — 3,7 МПа, что может достигаться в реальности при скручивании автобусного кузова.

Итоговые данные по жёсткостным свойствам рассмотренных структурных единиц в пересчёте от макетов к реальным конструкциям приведены в табл. 3. Наглядно информация по удельным жёсткостям рассмотренных структурных единиц приведена на рис. 8.

Удельные жёсткости структурных единиц характеризуют их жёсткостную эффективность. Из табл. 3 видно, что удельные жёсткости различных структурных единиц могут отличаться в десятки раз, что подтверждает реальность деления структурных единиц на ЭКП и не-ЭКП. В соответствии с определением, данным в работе [1], в рассматриваемом случае можно считать ЭКП трёхслойную панель, ферму и раму, подкреплённую обшивкой, на первом этапе деформирования. Из рис. 8 и табл. 3 хорошо видно, что удельные жёсткости структурных единиц, являющихся ЭКП, имеют значения примерно на одном уровне: $C_n \geq 1,7$ кН/(мм·кг) — пороговое значение удельной жёсткости. Таким образом, если удельная

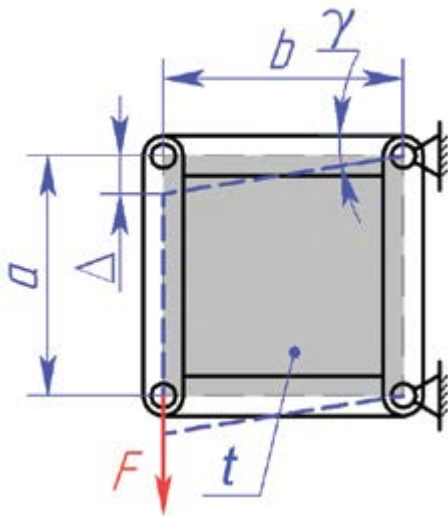


Рисунок 9.
Пластика в услови-
ях чистого сдвига

жѐсткость некоторой структурной единицы высотой 950 мм, выполненной из малоуглеродистой стали, превышает 1,7 кН/(мм·кг), то такую структурную единицу можно считать ЭКП. Для получения критерия, справедливого для структурных единиц любых размеров и из любого материала, необходимо рассмотреть расчѐтную схему, изображѐнную на рис. 9.

$\Delta = \gamma \cdot b$; $\gamma = \tau / G$; $\tau = F / (t \cdot a) \rightarrow \Delta = F / tG \cdot b/a$, (1)
где a , b , t — длина, высота и толщина пластинки соответственно; Δ , γ — деформация линейная и угловая соответственно; F — сдвигающее усилие; G — модуль упругости II рода материала.

$C_{ул} = F / \Delta \cdot m$; $m = \rho a b t \rightarrow C_{ул} = G / \rho b^2$, (2)
где m — масса пластинки; ρ — плотность материала пластинки; $C_{ул}$ — удельная жѐсткость.

Рассмотрим аналогично нагруженную пластинку других размеров (b_1) и из другого материала (G_1, ρ_1). Тогда отношение их удельных жѐсткостей можно представить в виде следующей зависимости:

$C_{ул1} / C_{ул} = G_1 / G \cdot \rho / \rho_1 \cdot (b/b_1)^2 = K_{ж} \cdot (b/b_1)^2$, (3)
где $K_{ж}$ — коэффициент эффективности материала по жѐсткости [4].

Тогда можно записать количественный критерий соответствия структурной единицы автобусного кузова ЭКП:

$C_{ул} \geq 1,7 K_{ж} \cdot (950/b)^2$ кН/(мм·кг) = C_n , (4)
где b (мм) — высота секции, то есть размер, перпендикулярный действию сдвигающей нагрузки; $K_{ж}$ рассчитывается относительно малоуглеродистой стали [4].

Следует отметить, что приведенный критерий носит ориентировочный характер.

ВЫВОДЫ

Из приведѐнных данных можно заключить следующее:

- 1) удельная жѐсткость структурной единицы хорошо характеризует её жѐсткостную эффективность;
- 2) многократное отличие удельных жѐсткостей различных структурных единиц подтверждает реальность их разделения на ЭКП и не ЭКП;
- 3) структурная единица в виде трёхслойной панели является наиболее эффективной ЭКП, так как имеет наивысшее значение удельной жѐсткости;
- 4) существование явления «разрушения ЭКП», описанного в работе [1], подтверждается расчѐтным и экспериментальными методами;
- 5) предложенный количественный критерий позволяет определить соответствие произвольной структурной единицы ЭКП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Воронков О.В., Песков В.И. Элементы механики современного автобусного кузова // Журнал автомобильных инженеров. — 2011. — № 3 (68). — С. 44-52.
2. Воронков О.В., Песков В.И. Снижение массы автобусного кузова за счѐт применения в его конструкции оптимизированных несущих трёхслойных панелей // Журнал автомобильных инженеров. — 2012. — № 2 (73). — С. 24-27.
3. Воронков О.В., Песков В.И. Методика обоснования параметров масштабных макетов для определения деформаций реальных конструкций // Будущее технической науки: тез. докл. X Междунар. молодѐжн. науч.-техн. конф. — Н. Новгород: НГТУ, 2011. — С. 137.
4. Воронков О.В., Песков В.И. Методика выбора рационального сочетания материалов для трёхслойной панели автобусного кузова // Журнал автомобильных инженеров. — 2010. — № 5 (64). — С. 8-13.