

СССР—МПС—ГУУЗ

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Аспирант В. П. ЛОЗБИНЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДИННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ПОДОКОННОЙ ЧАСТИ КУЗОВА
ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С ОБШИВКОЙ
ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА ИЛИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ГОФРИРОВАННЫХ ЛИСТОВ

(Анализ напряженного состояния
с учетом анизотропии обшивки)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1967

НТБ
ДНУЖТ

Публичная защита диссертации состоится на заседании Ученого Совета
24 июня 1967 г.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать свои отзывы о работе по адресу: г. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2, Институт инженеров железнодорожного транспорта,

Дата отправки автореферата 27 мая 1967 г.

НТБ
ДНУЖТ

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Аспирант В. П. ЛОЗБИНЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДИННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ПОДОКОННОЙ ЧАСТИ КУЗОВА
ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С ОБШИВКОЙ
ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА ИЛИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ГОФРИРОВАННЫХ ЛИСТОВ

(Анализ напряженного состояния
с учетом анизотропии обшивки).

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
доктор технических наук,
профессор Е. Н. НИКОЛЬСКИЙ.

Днепропетровск
1967

3055a

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Брянском институте транспортного машиностроения .

НТБ
ДНУЖТ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время для успешного решения задачи по дальнейшему совершенствованию конструкции кузова вагона новые возможности открывает появление полимерных материалов. Работы по созданию несущей конструкции кузова из стеклопластика ведутся в ряде стран. В нашей стране работу по проектированию несущего кузова пассажирского вагона из стеклопластика выполняет Калининский филиал ВНИИВ. Сейчас изготовлены и испытываются отдельные опытные узлы кузова.

Характерной особенностью обшивки кузова из стеклопластика является анизотропия механических свойств, обусловленная структурой материала.

Различие в упругих свойствах по разным направлениям характерно и для обшивки другого типа, широко применяющейся для кузовов пассажирских вагонов — гофрированной металлической обшивки. В гофрированной обшивке анизотропия обусловлена конструктивными особенностями, т. е. факторами, существенно отличными от тех, которые характерны для обшивки из стеклопластика. Однако при исследовании основных срединных напряжений общие свойства анизотропии позволяют в расчетной схеме отнести обе обшивки к одному и тому же типу — анизотропной обшивке.

Анизотропная обшивка обладает многими достоинствами в отношении возможностей наиболее полного обеспечения требуемых прочностных свойств с учетом различных условий работы отдельных элементов конструкции. В связи с этим можно говорить о перспективности кузовов вагонов с анизотропной обшивкой. Перспективность таких конструкций делает актуальными теоретические и экспериментальные исследования по разработке методики расчета их на прочность.

В настоящей работе содержатся результаты исследований, касающихся построения методики расчета напряженного состояния кузовов пассажирских вагонов с анизотропной обшивкой. Этот вопрос, судя по опубликованным материалам, не подвергался специальному анализу.

В монографии Е. Н. Никольского «Оболочки с вырезами типа вагонных кузовов», на базе обобщенного метода сил и метода чередования основных систем, как точных методов теории упругости изотропного и анизотропного тела показано, что задачу определения напряженного состояния кузова пассажирского вагона можно решить с помощью двух основных систем. В первой основной системе кузов рассматривается как оболочка с неизгибаемым контуром. При этом определяются основные срединные напряжения в обшивке кузова и элементах продольного набора. Во второй основной системе учитывается деформация контура поперечного сечения кузова, что позволяет определить напряжения в поперечном наборе. Последовательное чередование расчета на базе указанных двух основных систем дает в пределах точное напряженное состояние кузова.

Напряженное и деформированное состояние кузова в рамках первой основной системы, в свою очередь, может быть определено с помощью обобщенного метода сил и метода чередования основных систем. Однако значительные математические трудности осложняют пока полное использование указанных точных методов в заводской практике. Более удобным для непосредственного практического применения является обоснованный в отмеченной работе на основе точных методов приближенный практический способ расчета, сущность которого сводится к следующему.

На первом этапе расчета определяются интегральные характеристики внутренних усилий в простенках и поясах кузова. На этом этапе удовлетворительный для практики результат может давать упрощенная расчетная схема кузова в виде стержневой системы (предварительно, однако, в каждом конкретном случае необходимо специальное обоснование применимости упомянутой расчетной схемы).

Второй этап расчета включает в себя определение напряжений в поясах от найденных усилий и внешней нагрузки. Расчетная схема поясов на втором этапе принимается в виде оболочки, для расчета используются зависимости теории упругости, поэтому обеспечивается необходимая точность расчета.

Известно, что в заводской практике расчетная схема в виде стержневой системы используется на обоих этапах.

Имеющиеся экспериментальные данные и теоретический анализ, содержащийся в работах Е. Н. Никольского, свидетельствуют о том, что при расчете напряжений элементарная

теория изгиба, на которой базируется расчетная схема в виде стержневой системы, не обеспечивает во многих участках кузова достаточной для практики точности.

Изложенное выше позволяет выделить упомянутый практический способ расчета как отвечающий одновременно требованиям достаточной простоты (с учетом применения современных вычислительных средств) и точности. Однако, необходимо отметить, что этот способ достаточно обоснован применительно к кузову с изотропной обшивкой. Чтобы обоснованно применить его к кузову с анизотропной обшивкой, необходимы исследования теоретического и экспериментального характера, касающиеся как первого, так и второго этапов расчета.

Для первого этапа (при определении интегральных характеристик внутренних усилий) выяснению подлежит вопрос о применимости расчетной схемы в виде стержневой системы к упомянутому кузову как объекту со спецификой, выражающейся в анизотропии обшивки.

На втором этапе расчета пояса кузова должны рассматриваться как анизотропные оболочки. Для определения их напряженного состояния необходимы соответствующие расчетные зависимости. Имеющиеся в литературе зависимости по расчету анизотропных оболочек не применимы к кузову вагона, так как учитывают не все составляющие деформации срединной поверхности. Между тем для определения с достаточной точностью напряженного состояния срединной поверхности поясов кузова вблизи от сил, действующих на пояса, необходимо учитывать все три составляющие деформации срединной поверхности оболочки (продольные удлинения, поперечные удлинения и деформации сдвига).

Построение уточненных расчетных зависимостей применительно к нижнему поясу кузова с учетом анизотропии является также необходимым этапом для уточненного определения интегральных характеристик внутренних усилий на основе обобщенного метода сил.

С учетом изложенного поставленной в диссертации задачей предусматривалось решение следующих вопросов: проверить применимость расчетной схемы в виде стержневой системы для определения интегральных характеристик внутренних усилий в простенках и поясах кузова пассажирского вагона с обшивкой из стеклопластика и кузова с гофрированным металлическим полом; построить зависимости для расчета основных срединных напряжений в обшивке подоконного поя-

са кузова как в анизотропной оболочке; проверить построение зависимости экспериментально; применительно к подоконному поясу кузова провести сравнительный анализ срединных напряжений — экспериментальных и рассчитанных по построенным зависимостям с учетом анизотропии обшивки, по зависимостям теории упругости без учета анизотропии и по формулам сопротивления материалов; на основе указанного анализа дать практические рекомендации по расчету основных срединных напряжений в подоконном поясе кузова пассажирского вагона с анизотропной обшивкой, в частности, с обшивкой из стеклопластика и с обшивкой из металлических гофрированных листов.

Напряжения, связанные с изгибом контура поперечного сечения, в настоящей работе не рассматриваются (расчет упомянутых напряжений, как отмечено выше, может быть выделен в самостоятельный этап). Ввиду сложности задача ограничена исследованием напряженного состояния подоконного пояса кузова как одного из наиболее напряженных элементов.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ В ВИДЕ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ В КУЗОВЕ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С АНИЗОТРОПНОЙ ОБШИВКОЙ

Исследования проводились на модели кузова пассажирского вагона из стеклопластика и модели кузова пассажирского вагона с гофрированным полом. Расчетная схема для обеих моделей при определении интегральных характеристик внутренних усилий принималась в виде безраскосной фермы и базировалась на допущении, что деформации простенков кузова являются антисимметричными.

Приемлемость этого допущения для упомянутых моделей была проверена экспериментальным путем. Расчет усилий в простенках моделей производился в соответствии с порядком, применяемым в заводской практике. Особенность расчета состояла лишь в том, что при определении коэффициентов канонических уравнений учитывалась анизотропия обшивки путем введения в формулы для коэффициентов приведенных упругих констант для соответствующего направления.

Формулы для коэффициентов канонических уравнений принимались в виде:

$$\delta_{i,i+1} = - \frac{c_i^3}{12 E_2 J_{i,i+1}} - \frac{c_i}{G_{1-2} F_{i,i+1}}$$

$$\delta_{i,i} = \frac{1}{E_i} \left(\frac{l_i h_i^2}{J_{i,nn}} + \frac{l_i}{F_{i,n}} + \frac{l_i}{F_{i,s}} \right) - \delta_{i,i+1} - \delta_{i,i-1} \quad (1)$$

$$\Delta_{lp} = \frac{\omega_i h_i}{E_i J_{i,nn}}$$

Здесь E_1 , E_2 — приведенные модули нормальной упругости обшивки в направлении соответственно вдоль модели и поперек.

G_{1-2} — приведенный модуль сдвига для обшивки простенков при сдвиге в продольном направлении.

Для оценки погрешности расчетных усилий был проведен эксперимент. Модели загружались нагрузкой, которая была принята в расчете. При эксперименте измерялись деформации во всех простенках и в ряде сечений. Замер деформаций в простенках модели из стеклопластика производился с помощью тензодатчиков сопротивления и для большей надежности дублировался с помощью специальных тензометрических скоб, позволявших получить общую картину деформации простенка. Последнее обстоятельство давало возможность устранить влияние местной неоднородности структуры стеклопластика на результаты измерений. Для замера деформаций в каждой точке применялся отдельный цикл «нагрузка — разгрузка». Индивидуальный способ замеров в сочетании с высокочувствительными приборами обеспечил высокую точность измерений.

Проведение замеров на модели из стеклопластика потребовало выполнения предварительного анализа целесообразного способа наклейки тензодатчиков и обработки результатов замеров. В связи с этим в диссертации для ортотропного тела при плоском напряженном состоянии получена следующая зависимость угла между произвольной осью и направлением главной деформации (угла φ) от угла α между той же осью и направлением главного напряжения:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{E_1}{2 G_{1-2}} \cdot \left(\frac{\sin 2\alpha}{\nu_{12} \cdot \cos 2\alpha + \frac{E_1}{E_2} \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right) \quad (2)$$

где: E_1 ; E_2 ; G_{12} ; ν_{12} — упругие константы.

Анализ формулы (2) показывает, что совпадение направлений главных деформаций и главных напряжений, которое характерно для изотропного тела, в общем случае для ортотропного тела не будет иметь места. Отсюда следует вывод, что обычно применяемый для металлических конструкций порядок тензометрирования, основанный на использовании факта совпадения направлений главных напряжений и главных деформаций, для стеклопластика в общем случае не применим. В связи с этим, в диссертации предложен целесообразный порядок тензометрирования для кузова из стеклопластика. Сделан вывод о нецелесообразности для кузова из стеклопластика определять, как это обычно делается для конструкций из изотропного материала, величины главных деформаций. По результатам измерений определяются напряжения в произвольной координатной системе, которые затем используются для определения главных напряжений.

Усилия в простенках моделей кузовов, полученные путем обработки результатов замеров, были сопоставлены с расчетными.

Сопоставление показывает, что для обеих моделей совпадение расчетных и экспериментальных усилий в простенках является удовлетворительным для большинства простенков, исключая концевые участки.

При исследовании модели кузова с гофрированным полом особая задача заключалась в том, чтобы определить влияние поперечных балочек гофрированного пола на величины внутренних усилий. С этой целью замеры на модели производились дважды: вначале на модели с поперечными балочками пола, затем балочки были удалены путем среза заклепок, крепивших их к полу, и замеры повторены вновь. При этом модель не снималась со стенда, неизменными оставались схема загрузки и способ опирания модели. Результаты эксперимента показали, что поперечные балочки гофрированного пола несмотря на то, что они существенно изменяют осредненные показатели анизотропии, практически не оказывают влияния на величины интегральных характеристик внутренних усилий. Этот вывод имеет непосредственное практическое значение. Помимо усилий в простенках моделей, экспериментальным путем были определены срединные напряжения в двух сечениях: посередине модели и вблизи шкворневой балки. Сопоставление экспериментальных напряжений и расчетных, полученных по формулам сопротивления материалов, по-

казывает их удовлетворительное совпадение в среднем сечении модели из стеклопластика. Для сечения у шкворневой балки, а также в обоих сечениях модели кузова с гофрированным полом в точках на угловых и средних образующих и в точках вблизи оконных вырезов элементарные формулы не обеспечивают достаточной точности.

Уточнение расчета в указанных местах можно получить, если рассматривать пояса кузовов как анизотропные оболочки.

III. ПОСТРОЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ СРЕДИННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОДОКОННОЙ ЧАСТИ КУЗОВА С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ

В уточненной расчетной схеме подоконный пояс кузова можно рассматривать как совокупность прямоугольных пластин и стержней, поэтому в первую очередь было уделено внимание построению зависимостей для расчета напряжений в прямоугольной ортотропной пластинке. Для прямоугольной ортотропной пластинки Лехницким С. Г. предложено решение типа Файлона, в котором постоянные интегрирования основного дифференциального уравнения плоской задачи находятся из системы алгебраических уравнений, отдельной для каждого члена ряда. Это решение приводит к сравнительно громоздкому вычислительному процессу, особенно в контактных задачах, когда рассматриваются сопряжения нескольких пластин. С целью упрощения вычислений в диссертации для прямоугольной ортотропной пластинки на основе функции напряжений, предложенной Файлоном, построено видоизмененное решение плоской задачи, аналогично тому, как это сделано применительно к изотропной пластинке М. М. Филоненко-Бородичем и Е. Н. Никольским.

Решение основного дифференциального уравнения плоской задачи для ортотропной пластинки

$$\frac{1}{E_2} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + \left(\frac{1}{G_{1-2}} - \frac{2\nu_1}{E_1} \right) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{1}{E_1} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \dots \quad (3)$$

$$\text{принималось в виде: } F(x_1, y) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(y) \sin \frac{n\pi}{l} x \dots \quad (4)$$

В (4) l — длина пластинки

$n=1, 2, 3...$

Вид функции $f_n(y)$ зависит от корней характеристического уравнения $\frac{1}{E_1} r^4 - \left(\frac{1}{G_{1-2}} - \frac{2\nu_1}{E_1} \right) \alpha^2 r^2 + \frac{1}{E_2} \alpha^4 = 0...$

(5)

где $\alpha = n\pi/l$

Например, в случае комплексных корней $r_{1,2} = s \pm ki$; $r_{3,4} = -s \pm ki$, характерных для гофрированной обшивки и обшивки из стеклопластика, функция $f_n(y)$ имеет следующий вид:

$$f_n(y) = (C_1 \operatorname{Chs} \alpha y + C_2 \operatorname{Shs} \alpha y) \operatorname{Cos} k \alpha y + (C_3 \operatorname{Chs} \alpha y + C_4 \operatorname{Shs} \alpha y) \operatorname{Sin} \alpha y \dots$$

(6)

Здесь C_1, C_2, C_3, C_4 — постоянные интегрирования.

Путем использования граничных условий постоянные C_i можно выразить через коэффициенты разложения краевой нагрузки в ряд Фурье и функция $f_n(y)$ для любых корней уравнения (5) приводится к виду:

$$f_n(y) = -\frac{1}{\alpha^2} (a_n \psi_1 + b_n \psi_2 + c_n \psi_3 + q_n \psi_4)$$

(7)

где a_n, b_n, c_n, q_n — коэффициенты разложения в ряд Фурье краевой нагрузки.

ψ_i — функции y .

Представление $f_n(y)$ в виде (7) позволяет избавиться от решения большого числа систем алгебраических уравнений для определения постоянных интегрирования.

Выражения для функций $\psi_i(y)$ приведены в главе 1 диссертации. Эти функции учитывают размеры пластинки и анизотропию ее механических свойств. Например, для краевой образующей $y = \frac{b}{2}$ (b — ширина пластинки) в случае комплексных корней уравнения (5) $\psi_i(y)$ имеют вид:

$$\frac{z}{2\alpha^2(s^2 + k^2)ks} \psi_1'' \left(\frac{b}{2} \right) = \operatorname{Sh} 2su_n \operatorname{Sin} 2ku_n$$

$$\frac{z}{\alpha^2(s^2 + k^2)} \psi_2'' \left(\frac{b}{2} \right) = (k^2 \operatorname{Sh}^2 su_n + s^2 \operatorname{Sin}^2 ku_n)$$

$$\begin{aligned} \frac{z}{2\alpha^2 ks} \psi_2'' \left(\frac{b}{2} \right) = & -k \operatorname{Sh} 2su_n \operatorname{Cos} 2ku_n + \\ & + s \operatorname{Ch} 2su_n \operatorname{Sin} 2ku_n \\ \frac{z}{\alpha^2 ks} \psi_1'' \left(\frac{b}{2} \right) = & k \operatorname{Sh} 4su_n - s \operatorname{Sin} 4ku_n \end{aligned}$$

Здесь $z = k^2 \operatorname{Sh}^2 2su_n - s^2 \operatorname{Sin}^2 2ku_n$

$$u_n = n\pi b/2l$$

Формула для напряжений вдоль пластины принимает с учетом выражения (7) вид:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \sum_{n=1}^{\infty} -\frac{1}{\alpha^2} (a_n \psi_1'' + b_n \psi_2'' + c_n \psi_3'' + d_n \psi_4'') \operatorname{Sin} \alpha x \dots$$

Применимость построенных зависимостей для расчета пластинки из стеклопластика и гофрированной пластинки с мелким гофром была проверена экспериментальным путем. Пластины загружались нагрузкой, характерной для несущего пола кузова пассажирского вагона. В ряде точек пластин на основе построенных зависимостей были рассчитаны напряжения, которые сопоставлялись с напряжениями, полученными экспериментально. Для сравнения расчет напряжений производился также по формулам сопротивления материалов.

Расчетные и экспериментальные напряжения в пластинках приведены в главе I диссертации. Сопоставление их свидетельствует о практической пригодности построенных расчетных зависимостей как для пластин из стеклопластика, так и для гофрированных пластин с мелким гофром (здесь имеется в виду такой тип гофрированных пластин, у которых шаг гофров значительно меньше размера пластины в плане, измеренного перпендикулярно направлению гофров).

Для пластин этого типа осредненные величины срединных напряжений, получаемые на основе расчетной схемы в виде однородной ортотропной пластинки будут близки к действительным срединным напряжениям). Следует заметить, что для гофрированных пластин определение срединных напряжений важно в практическом отношении. Напряжения в отдельных точках гофров, даже достаточно высокие, могут не оказывать заметного влияния на работоспособность пластинки ввиду их перераспределения из-за текучести материала. Зна-

ние срединных напряжений имеет большое значение при оценке потери устойчивости пластинки, а также при использовании современных методов расчета на прочность по предельному состоянию.

Эксперимент показывает, что расчет на основе построенных зависимостей позволяет получить качественно верную картину напряженного состояния. В количественном отношении погрешность расчета оказывается приемлемой для практики. Расчет по формулам сопротивления материалов, напротив, не отражает действительного характера напряженного состояния, а в количественном отношении дает погрешность, превосходящую для точек вблизи нагрузки фактические величины напряжений.

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНИЗОТРОПНОЙ ОБШИВКИ КУЗОВА ПАССАЖИРСОГО ВАГОНА

Для практического расчета по формулам (5), (7), (8), (9) необходимо знать величины приведенных упругих констант анизотропной обшивки. В диссертации показано, что в большинстве случаев определение упомянутых величин можно производить достаточно надежно расчетом. Для конструктивно-анизотропной обшивки (гофрированная обшивка, плоская обшивка, подкрепленная большим числом равноотстоящих ребер и т.д.) приведенные упругие константы определяются из условия равенства жесткостей фактической обшивки и ортотропной обшивки, заменяющей фактическую в расчетной схеме. Помимо систематизации имеющихся в литературе сведений по расчетному определению упругих характеристик конструктивно-анизотропных пластин, применимых к обшивке кузова, в работе даны некоторые новые рекомендации.

Для обшивки из стеклопластика на основе стеклоткани марки АСТТ(б) — C_2O и смолы ПН-1, перспективного для кузова вагона, в диссертации предложен способ расчетного определения упругих констант.

Способ базируется на использовании имеющихся в литературе экспериментальных упругих характеристик, полученных для упомянутого стеклопластика при параллельной укладке полотнищ стеклоткани. Экспериментальная проверка на образцах показала практическую пригодность предложенного способа.

V. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДОКОННОГО ПОЯСА КУЗОВА С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ОБШИВКИ

Зависимости, полученные применительно к отдельным ортотропным пластинкам, были использованы при построении аналитического аппарата для определения напряженного состояния подоконного пояса кузова. Расчет пояса, представляющего собой совокупность взаимно перпендикулярных пластин и стержней, осуществлялся по методу П. Ф. Папковича. Вначале в местах сопряжения отдельных пластин (или отдельных пластин и стержней) определялись контактные усилия. Незвестная функция контактных усилий находилась из условия равенства перемещений по контактным кромкам, при этом использовалось указанное выше измененное решение плоской задачи для прямоугольной ортотропной пластинки. После отыскания контактных усилий напряженное состояние каждой пластины определялось отдельно. Для случая подоконного пояса кузова пассажирского вагона с гофрированным полом без хребтовой балки получено следующее выражение функции контактных усилий между участком боковой стены и угловой обвязкой рамы:

$$q_{n_1}' = - \frac{\frac{F_1 E_2}{E_1 \delta_2 \alpha} \left[a^{\circ}_{n_1} \psi''_{11} \left(\frac{b_1}{2} \right) + C^{\circ}_{n_1} \psi''_{31} \left(\frac{b_1}{2} \right) \right] \left\{ \left[\psi''_{31} \left(-\frac{b_1}{2} \right) - \right. \right.}{\left[\psi''_{32} \left(-\frac{b_2}{2} \right) - \psi''_{42} \left(-\frac{b_2}{2} \right) \right] \left[\frac{\alpha \delta_1}{\delta_2} + \frac{E_2}{E_3} \frac{F_1}{\alpha \delta_2} \psi_{41}'' \left(\frac{b_1}{2} \right) \right] -}$$

$$\left. \left. - \psi''_{42} \left(-\frac{b_2}{2} \right) \right] - \frac{E_3 \alpha \delta_2}{E_1 F_1} \right\}}{- \frac{E_3}{E_1} \psi''_{41} \left(\frac{b_1}{2} \right)}$$
..(10)

Здесь индексы 1, 2, 3 относятся соответственно к угловой обвязке, пластине боковой стены и к пластине пола.

δ — толщина пластины.

F — площадь поперечного сечения.

E_i — приведенные модули нормальной упругости.

ψ_{ki} — функции, определяемые по формулам (8).

Экспериментальная проверка построенного аналитического аппарата была осуществлена на модели подоконного пояса

кузова пассажирского вагона с гофрированным полом. Подоконный пояс был отделен от модели кузова путем разрезания модели посередине простенков, Благодаря этому появилась возможность для анализа напряженного состояния пояса с учетом влияния усилий в отдельных простенках. Расчет и эксперимент производились для случая нагружения пояса отдельно каждой группой равнодействующих внутренних усилий — M_i , T_i , Q_i — в двух противолежащих простенках. Рассчитывались напряжения в ряде сечений пояса. Для сравнения расчет выполнялся по формулам сопротивления материалов, по зависимостям теории упругости без учета анизотропии пола и на основе построенных уточненных зависимостей с учетом анизотропии пола.

Сопоставление расчетных и экспериментальных напряжений показывает удовлетворительное совпадение результатов эксперимента и расчета по уточненным зависимостям с учетом анизотропии для всех случаев нагружения. Расчет по зависимостям теории упругости без учета анизотропии пола отражает фактический характер распределения напряжений, но в количественном отношении дает погрешность, превышающую вблизи нагруженного участка 80%. Расчет по элементарным формулам не отражает фактического характера распределения напряжений и для зоны, равной трем поперечным размерам кузова, по обе стороны от середины нагруженного участка дает неудовлетворительный результат. Из сказанного следует, что построенный аналитический аппарат, позволяющий учесть анизотропию обшивки, является предпочтительным для расчета срединных напряжений в подоконном поясе кузова с гофрированной обшивкой.

Особое внимание было уделено выяснению вопроса о влиянии на срединные напряжения в поясе поперечных балок гофрированного пола. Все замеры при эксперименте производились дважды: в первом случае пол не имел поперечных балок, во втором случае балки были укреплены на полу с помощью болтов. В момент установки балок модель со стенда не снималась, благодаря этому условия нагружения и опорные поверхности не менялись.

Тщательные измерения показали, что влияние поперечных балок гофрированного пола кузова вагона на величины основных срединных напряжений в подоконном поясе невелико и в практических расчетах может не учитываться.

Исследования, проведенные на модели кузова пассажирского вагона с гофрированным полом, помимо основной зада-

чи (проверки аналитического аппарата) были использованы для выяснения некоторых особенностей напряженного состояния подоконного пояса в системе кузова. С этой целью рассчитывались напряжения в гофрированном полу не только от отдельных компонентов равнодействующих внутренних усилий, но и суммарные напряжения с учетом всех сил. Суммарные напряжения сравнивались с экспериментальными, замеренными на модели до отделения подоконного пояса. Установлено, что элементарные формулы при вертикальной нагрузке могут давать удовлетворительную точность в частных случаях для узкой зоны на участке между шкворневой балкой и серединой кузова. В общем случае при определении напряжений в произвольном сечении необходимо, помимо напряжений по элементарным формулам, вычислять добавочные напряжения, определяющие погрешность элементарных формул.

Результаты исследований на модели кузова были использованы на заключительном этапе работы для анализа напряженного состояния подоконного пояса натурной конструкции кузова с гофрированным полом от эксплуатационной нагрузки. Построенные в диссертации, расчетные зависимости положены в основу составленного алгоритма и программы расчета на электронной вычислительной машине «Минск-1».

Вначале с помощью ЭВМ «Минск-1» были рассчитаны напряжения в подоконном поясе от единичных усилий в отдельных простенках. По результатам расчетов построены графики, срединных напряжений, приведенные в главе V диссертации.

Анализ графиков показывает, что элементарный закон распределения напряжений в поясе не устанавливается на достаточно большом участке, протяженность которого сравнима с длиной кузова. Наибольшее расхождение напряжений, подсчитанных по уточненным зависимостям с учетом анизотропии гофрированного пола, и напряжений по формулам сопротивления материалов наблюдается вблизи нагрузки и достигает 200%. Для проверки надежности отладки программы результаты расчета на машине сопоставлялись на частных примерах с результатами ручного счета.

Использование машинного счета позволило достаточно легко проанализировать влияние различной степени анизотропии гофрированного пола на напряженное состояние подоконного пояса. С этой целью были просчитаны напряжения для нескольких вариантов, отличающихся друг от друга лишь

показателями анизотропии пола. Аналогичным образом проанализировано влияние длины участка нагружения и других параметров. Результаты анализа, приведенные в пятой главе диссертации, свидетельствуют, в частности, что увеличение степени анизотропии гофрированного пола (под степенью анизотропии здесь понимается отношение приведенных модулей Юнга обшивки в направлении вдоль вагона и поперек) приводит к возрастанию напряжений по угловой образующей и к уменьшению напряжений по средней образующей пола. При этом отклонение от элементарного закона в распределении напряжений по сечению пола увеличивается. Результаты анализа напряжений в поясе кузова от единичных усилий со стороны отдельных простенков были использованы для определения напряжений с учетом всех сил от эксплуатационных нагрузок — вертикальной, статической и продольной. Коэффициенты разложения нагрузки a_n , c_n в (9) с учетом усилий во всех простенках получены в виде:

$$a_n = \frac{4}{\pi z_0^2 \delta_1} \frac{1}{n} (\cos \alpha z_0 - 1) \sum_{l=1}^{19} M_l \cos \alpha b_l$$

$$c_n = \frac{2}{\pi z_0 \delta_1} \frac{1}{n} \sin \alpha z_0 \sum_{l=1}^{19} T_l \cos \alpha b_l \quad (11)$$

Здесь $2z_0$ — ширина простенка;
 b_l — расстояние от торца кузова до середины простенка.

Величины равнодействующих M_l , T_l определялись из расчета кузова как стержневой системы, но при этом точные законы распределения усилий, передаваемых простенками на пояса, неизвестны. Получение упомянутых точных законов представляет собой самостоятельную, довольно сложную задачу. Практически удовлетворительная точность может быть получена, если выбрать произвольный закон при сохранении статической эквивалентности усилий. В этом случае из принципа Сен-Венана вытекает, что достаточная точность расчета напряжений будет обеспечена по всему поясу, за исключением участков вблизи простенков. В диссертации задача ограничена рассмотрением напряженного состояния основного участка пояса, исключая области, непосредственно прилегаю-

шие к простенкам. С учетом изложенного был принят приближенный закон распределения усилий — в виде распределенной нагрузки постоянной интенсивности.

На основе формул (11) были внесены необходимые изменения в программу расчета.

Расчет суммарных напряжений производился по построенным зависимостям с учетом анизотропии, по зависимостям теории упругости, без учета анизотропии и по формулам сопротивления материалов.

С помощью машины получены напряжения в срединной поверхности пояса для достаточно большого числа точек. Анализ результатов показывает, что применимость формул сопротивления материалов при расчете срединных напряжений в большинстве сечений гофрированного пола кузова является ограниченной.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Расчет интегральных характеристик внутренних усилий в простенках и поясах кузова пассажирского вагона с ортотропной обшивкой, равнозначный раскрытию статической неопределимости кузова как системы в целом, можно производить на базе расчетной схемы в виде стержневой системы (безраскосной фермы). Удовлетворительный для практики результат обеспечивается при этом для основного участка кузова типовой конструкции, исключая концевые простенки.

2. При вычислении коэффициентов канонических уравнений, соответствующих указанной в предыдущем пункте расчетной схеме, следует учитывать анизотропию обшивки путем введения в формулы для коэффициентов приведенных упругих констант.

3. Определение приведенных упругих характеристик ортотропной обшивки можно производить в большинстве случаев расчетным путем. С этой целью могут быть использованы зависимости, построенные в главе II диссертации. Экспериментальная проверка предложенных зависимостей, проведенная для стеклопластика, перспективного в вагоностроении, показывает их практическую приемлемость для расчета осредненных упругих констант.

4. Теоретический анализ напряженного состояния подоконного пояса кузова с ортотропной обшивкой, выполненный

в работе на примере кузова пассажирского вагона с гофрированным полом, показал, что на втором этапе расчета (при определении напряжений в поясах) в большинстве сечений кузова для получения удовлетворительных результатов необходимо использовать уточненные зависимости теории упругости. Эксперимент, проведенный на модели кузова с гофрированным полом и на отделенном от модели подоконном поясе, подтверждает результаты упомянутого теоретического анализа.

5. Расчетную схему подоконного пояса при уточненном расчете напряжений необходимо принимать в виде оболочки, состоящей из ортотропных пластин и стержней. Определение напряженного состояния каждой ортотропной пластины производится отдельно после отыскания контактных усилий в местах сопряжения пластин. Контактные усилия рассчитываются по методу П. Ф. Папковича (путем использования условий совместности перемещений по контактным кромкам).

6. Для определения функций контактных усилий и напряженного состояния отдельных пластин можно рекомендовать построенные в главе I диссертации зависимости измененного решения Файлона для прямоугольной ортотропной пластинки (решение плоской задачи в тригонометрических рядах), а также расчетные зависимости, приведенные в главе IV. Эти зависимости, по сравнению с известным решением для ортотропной пластинки, позволяют значительно уменьшить объем вычислительных работ.

7. Экспериментальная проверка, проведенная на отдельных пластинках и на модели кузова пассажирского вагона, показывает практическую пригодность построенных в диссертации зависимостей для расчета напряжений как в кузове из стеклопластика, так и в кузове с гофрированной обшивкой.

8. С увеличением степени анизотропии расхождение между элементарным расчетом напряжений, базирующимся на расчетной схеме в виде стержневой системы, и уточненным расчетом с учетом анизотропии увеличивается. Зона кузова, где элементарный расчет дает удовлетворительный результат, различная для каждой конкретной степени анизотропии обшивки, может быть установлена с помощью расчетных зависимостей, построенных в диссертации.

9. Для кузова из стеклопластика на основе стеклоткани АСТТ(б)-СО и смолы ПН-1 (ПН-3), аналогичного по конструкции типовым кузовам современных пассажирских вагонов, элементарные формулы обеспечивают удовлетворительные результаты при расчете напряжений в среднем сечении кузова.

Для сечений вблизи шкворневых балок необходимо определять напряжения по уточненным зависимостям с учетом анизотропии обшивки в соответствии с порядком, изложенным в главе IV диссертации.

10. При определении напряжений по уточненным зависимостям в виде тригонометрических рядов, построенным в диссертации, с целью улучшения сходимости рядов может быть использован прием уменьшения расчетной длины оболочки, предложенный в упомянутой выше работе Е. Н. Никольского. При этом расчетную длину подоконного пояса кузова из стеклопластика следует выбирать равной не менее трех поперечных размеров кузова.

11. При экспериментальном определении напряжений в кузове из стеклопластика целесообразно использовать предложенный в главе III диссертации порядок тензометрирования, в котором учтено, что для стеклопластика направления главных деформаций и главных напряжений могут не совпадать.

12. В диссертации выяснено, что для типовой конструкции кузова пассажирского вагона с гофрированным полом элементарный расчет напряжений в сечениях, удаленных от середины, а при вертикальной нагрузке и в среднем сечении, не обеспечивает достаточной для практики точности. В среднем сечении кузова при вертикальной нагрузке расхождение между напряжениями по элементарному расчету и уточненному расчету с учетом анизотропии достигает в ряде точек пола 200%.

13. Для уточненного расчета напряжений в подоконном поясе кузова с гофрированным полом можно рекомендовать расчетную схему пояса в виде оболочки, состоящей из двух изотропных пластин, соответствующих участкам боковых стен, и ортотропной пластины, эквивалентной по приведенным упругим характеристикам гофрированному полу. Расчетную длину оболочки следует принимать равной всей длине кузова.

14. При определении приведенных упругих характеристик ортотропной пластины, соответствующей в расчетной схеме гофрированному полу, следует принимать модуль Юнга пластины в продольном направлении кузова равным модулю материала, а наличие гофров учитывать путем выбора приведенной толщины. Эксперимент подтверждает эффективность указанного представления гофрированного пола в расчетной схеме.

15. Путем специально поставленных экспериментов в диссертации установлено, что поперечные балочки пола не оказывают существенного влияния на интегральные характеристики внутренних усилий и на основные срединные напряжения в подоконном поясе, поэтому в расчетной схеме кузова при определении упомянутых величин поперечные балочки пола можно не учитывать.

16. Построенный в диссертации алгоритм расчета основных срединных напряжений в подоконном поясе кузова с ортотропной обшивкой является удобным для выполнения расчета с помощью современных вычислительных средств. В частности, может быть использована составленная применительно к электронной вычислительной машине «Минск-1» программа, основные элементы которой приведены в главе V диссертации.

17. Выполненные с помощью ЭВМ «Минск-1» расчеты напряженного состояния подоконного пояса натурной конструкции кузова при действии эксплуатационной нагрузки позволяют отметить широкие возможности составленной программы. Удастся оценить влияние на срединные напряжения параметров гофрировки, структуры стекло-пластика, изменения каких-либо отдельных параметров конструкции и т. д. При проектировании вагона с помощью упомянутой программы можно за достаточно короткий срок произвести уточненный расчет для нескольких вариантов исходных параметров и выбрать оптимальный вариант.

НТБ
ДНУЖТ

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих статьях:

1. В. П. Л о з б и н е в. Расчет прочности кузова пассажирского вагона из стеклопластика. Транспортное машиностроение, № 7, 1965.
2. В. П. Л о з б и н е в. Расчет на прочность кузова пассажирского вагона из стеклопластика при вертикальной нагрузке. Транспортное машиностроение, № 2, 1966.
3. В. П. Л о з б и н е в. Методика определения напряжений по замерам деформаций в конструкциях кузовов вагонов и локомотивов из стеклопластика. Транспортное машиностроение, № 3, 1966.
4. В. П. Л о з б и н е в. Напряженное состояние ортотропной пластинки. Известия вузов. Машиностроение, № 9, 1966.
5. В. П. Л о з б и н е в. Влияние гофрировки пола на напряженное состояние нижнего пояса кузова пассажирского вагона. Транспортное машиностроение, № 7, 1966.

Материалы диссертации доложены на

- Научно-технической конференции Брянского института транспортно-го машиностроения, 1964 г.
 - Заседании научно-технического семинара Калининского филиала ВНИИВ, 1966 г.
 - Расширенном заседании кафедры «Вагоностроение» Брянского института транспортного машиностроения, 1966 г.
 - Совещании расчетчиков конструкторских бюро вагоностроения, Калинин, 1967 г.
 - Заседании семинара по механике Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, 1967 г.
-

НТБ
ДНУЖТ

БТ 08725. Областная книжная типография
Днепропетровского областного управления по печати,
г. Днепропетровск, ул. Серова, 7.
Заказ № 991-м. Тираж 200. Объем 1,5 п. л. Подписано к печати 11.IV-67 г.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ