

0-798147

На правах рукописи



ХАЙРУЛЛИН ЛЕНАР РАВИЛЕВИЧ

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С
МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОБШИВКАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
СТЫКАМИ СРЕДНЕГО СЛОЯ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Казань – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кузнецов Иван Леонидович

Официальные
оппоненты: **Холопов Игорь Серафимович**
- доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный
архитектурно-строительный университет»,
заведующий кафедрой «Металлических и
деревянных конструкций»

Столбов Александр Васильевич
- кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Камская государственная
инженерно-экономическая академия»,
заведующий кафедрой «Строительные
конструкции»

Ведущая организация: ГУП «Татинвестгражданпроект»

Защита состоится «03» декабря 2012 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.077.01 при Казанском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, ауд. 3-203 (зал заседаний Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного архитектурно-строительного университета

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ

Автореферат разослан «01» ноября 2012 г.



0000785595

Ученый секретарь
диссертационного совета

Абдрахманова Л.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Требования рационального использования тепловой энергии в зданиях, сооружениях и объектах транспорта, обеспечения высокого качества строительства, а также строительства в отдаленных и сейсмоопасных районах, создают, в настоящее время, условия для широкого применения легких индустриальных ограждающих конструкций с высокими теплотехническими показателями. Одними из наиболее эффективных конструкций ограждения, отвечающих этим требованиям, являются трехслойные панели с металлическими обшивками и средним слоем из пенопластов и поперечно-ориентированных ламелей минеральной ваты.

В последние годы, в связи с широким внедрением поточного производства трехслойных панелей, повсеместное применение находят панели, изготавливаемые из сплошных металлических тонколистовых обшивок и среднего слоя из отдельных листов или ламелей ограниченной длины. Однако существующими методиками расчета не предусматривается деление среднего слоя на сплошной и имеющий стыки. В связи с этим становятся актуальными работы, направленные на исследование различных конструкций панелей, средний слой которых не сплошной, а состоит из отдельных листов или ламелей, т.е. имеет поперечные стыки.

Очевидно, что по сравнению с уже традиционными трехслойными панелями, имеющими сплошной средний слой, панели, имеющие поперечные стыки, представляют собой измененную конструктивную схему, для которых требуется проведение исследований, направленных на уточнение их действительной работы и методики расчета несущей способности.

Цель работы: Уточнение особенностей действительной работы и характера исчерпания несущей способности трехслойных панелей с металлическими обшивками и поперечными технологическими стыками среднего слоя, с разработкой методики их расчета на поперечный изгиб и новых конструктивных решений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ конструктивных решений существующих трехслойных панелей и методик их расчета на поперечный изгиб;
- исследовать технологию изготовления трехслойных панелей и показать влияние поперечных стыков среднего слоя на образование конструктивных несовершенств, и, как следствие, на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции;
- провести экспериментальные исследования натуральных образцов трехслойных панелей с различными физическими характеристиками и конструктивными особенностями среднего слоя и выявить характер исчерпания несущей способности трехслойных панелей, имеющих поперечные технологические стыки среднего слоя;
- разработать конечно-элементные модели трехслойных панелей и провести численные исследования их НДС;

- разработать методику расчета несущей способности трехслойных панелей с учетом различного расположения поперечных технологических стыков среднего слоя по длине панели;

- предложить новые конструктивные решения трехслойных панелей со стыками среднего слоя, обеспечивающие повышение их несущей способности и эксплуатационных свойств.

Научная новизна:

- определены основные характерные технологические несовершенства панелей с заполнителем из отдельных листов или ламелей, и выявлено их влияние на НДС трехслойных панелей;

- на основе численных и экспериментальных исследований работы трехслойных панелей со стыками среднего слоя, расположенными в средней и опорной частях, исследовано их НДС и выявлен характер истощения их несущей способности, заключающийся в местной потере устойчивости сжатой обшивки в месте стыка и разрушении среднего слоя в локальной зоне у стыка;

- впервые получены аналитические зависимости для определения критических сил потери устойчивости сжатой обшивки, с учетом различного расположения места стыка и величины непрочлея;

- впервые получены аналитические зависимости для определения напряжений в среднем слое в локальной зоне у стыка.

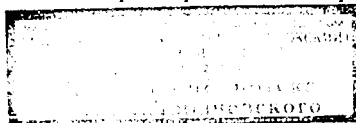
Практическая значимость

Разработана и экспериментально проверена инженерная методика расчета трехслойных панелей с технологическими стыками среднего слоя из листов пенополистирола и ламелей минеральной ваты.

Разработаны и экспериментально исследованы новые конструктивные решения трехслойных панелей со стыком среднего слоя, направленные на повышение эффективности их применения, защищенные 5-ю патентами РФ.

Достоверность результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований, обеспечена использованием научно-обоснованных методик испытаний, тарированных измерительных приборов и сертифицированного оборудования. Достоверность результатов теоретических исследований обеспечена использованием классических методов сопротивления материалов и строительной механики и хорошей сходимостью с результатами расчетов конечно-элементных моделей на ПК "ЛИРА" и с данными экспериментов. Расхождение составляет с данными экспериментальных исследований от 1 до 30%, с численными – до 12%.

Внедрение результатов. По результатам экспериментальных исследований выполнены и переданы научно-технические отчеты о несущей способности и характере работы трехслойных панелей следующим производителям: ОАО «Тимер», ООО «Технострой», ООО «ТЕМ-ПО». Выполнена разработка и внедрение в производство новых конструкций трехслойных панелей с минераловатным средним слоем и армирующими элементами, что расширило область применения конструкций данного типа.



Прилагаются справки о внедрении результатов исследований на производственных предприятиях.

На защиту выносятся:

Результаты численных и экспериментальных исследований НДС трехслойных панелей с технологическими стыками среднего слоя.

Методика расчета местной устойчивости сжатой обшивки в панелях имеющих поперечные стыки среднего слоя.

Методика проверки прочности среднего слоя в локальной зоне у стыка.

Новые конструктивные решения трехслойных панелей.

Апробация работы: Основные результаты выполненных исследований по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава КГАСУ 2001 – 2012 годов, итоговой конференции республиканского конкурса научных работ среди студентов и аспирантов на соискание премии им. Н.И. Лобачевского, г. Казань, 2002, международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов», г. Йошкар-Ола, 2004, международной научно-технической конференции «Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте», г. Самара, 2005.

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 3 научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 5 патентов на изобретение РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 199 листах машинописного текста, содержит 8 таблиц и 110 рисунков. Список литературы включает 126 наименований.

Автор выражает признательность и благодарит д.ф.-м.н., проф. Каюмова Р.А. за ценные советы и помощь в теоретических исследованиях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследования.

В первой главе представлен обзор конструктивных решений трехслойных панелей и опыт их применения в строительстве. Дана их краткая характеристика, отмечены достоинства и недостатки. Наиболее широкое применение в современном строительстве нашли трехслойные панели максимальной заводской готовности с металлическими обшивками и утеплителем на основе пенопластов и минеральной ваты.

Во многих случаях предельное состояние трехслойных панелей определяется потерей общей устойчивости конструкции в целом и местной устойчивости сжатой обшивки. В связи с этим вопросы разработки теории устойчивости составляют одно из главных направлений научных исследований.

Одни из первых основополагающих результатов в теории трехслойных конструкций были получены Э. Рейсснером и А.П. Прусаковым для пластин, и

А.Л. Рабиновичем для стержней. Дальнейшее развитие исследований заключалось в учете моментной работы несущих слоев в рамках классической гипотезы прямых нормалей. На базе этой модели, уточненные варианты теории для пологих трехслойных оболочек с учетом и без учета тангенциальных компонентов напряжений в заполнителе построены в работах Э.И. Григolloка и Л.М. Куршина. Такие задачи рассматривались также Л. Э. Брюккером и А.А. Уманским. Общая теория расчета трехслойных пластин и оболочек с конструкционным средним слоем разрабатывалась также в трудах П.П. Чулкова, Х.М. Муштари, А.Я. Александрова, Хоффа, Моутнера, Гордона и др. Влияние сдвига заполнителя на устойчивость трехслойных стержней и пластин от внешних нагрузок и температурных воздействий представлены в работах А.А. Уманского, им получена формула для определения критических нагрузок потери общей устойчивости.

Особую группу составляют задачи расчета панелей со сплошным средним слоем на местную устойчивость. Решения данных задач базируются на классических работах по устойчивости стержней и пластинок на упругом основании, принадлежащих С.П. Тимошенко, и А.П. Диннику. Хофф и Маутнер выявили характер симметричной формы потери устойчивости и получили простые выражения для критических напряжений, применив энергетический метод.

По мнению некоторых авторов, потеря местной устойчивости основных несущих элементов трехслойных панелей связана с наличием начальной погиби обшивки. В этом случае предельное состояние в трехслойной конструкции может быть определено по напряжениям в обшивке и заполнителе. Напряженное состояние таких трехслойных конструкций с начальной погибью и волнистостью обшивки исследовал А.П. Воронович. А.Я. Александров разработал методику расчета на прочность легкого заполнителя трехслойных пластин с учетом напряжений сдвига и отрыва, возникающих по поверхности склейки слоев. Этот вопрос рассматривается и в работах Л.М. Куршина, А.П. Прусакова, В.И. Королева, Вэна, Юсуфа, Норриса и Уильямса. Местную устойчивость обшивок в панелях со сплошным заполнителем исследовал также А.Л. Рабинович.

Необходимо отметить, что большинство вышеприведенных работ были выполнены применительно к расчету авиационных и судовых трехслойных конструкций, однако строительные конструкции имеют свои особенности.

В отечественной практике теоретическими и экспериментальными исследованиями строительных трехслойных конструкций занимались, прежде всего, в ЦНИИСК им В.А. Кучеренко, ЦНИИПСК им Н.П. Мельникова, ЦНИИПромзданий, ЦНИИЭПсельстрой и др. организациях – А.Б. Губенко, С.Б. Ермолов, А.Б. Брусиловский, А.М. Чистяков, С.М. Гликин, Ю.А. Муравьев, П.В. Годилов, Ф.В. Расс, С.А. Аскеров, О.Б. Тюзнева, Ф.Ф. Тамплон, Ю.А. Веселев, В.Н. Кобелев, С.И. Тимофеев, В.И. Мартымянов.

Анализ результатов вышеуказанных исследований показал, что исследования работы трехслойных панелей с металлическими обшивками, заполнитель которых имеет поперечные стыки, произвольно расположенные по длине панели не проводилось.

Состояние вопроса по рассматриваемой проблеме позволило определить основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе описываются экспериментальные исследования несущей способности и деформативности трехслойных панелей без стыков среднего слоя-заполнителя, целью которых являлась отработка методики испытания таких конструкций и получение контрольных данных, для дальнейшего сравнения с панелями со стыками среднего слоя. Описано экспериментальное и измерительное оборудование, а также методика проведения испытаний трехслойных панелей на изгиб при кратковременном действии равномерно распределенной статической нагрузки. Приведены результаты испытаний трехслойных панелей с различными заполнителями из пенополиуретана (далее ППУ) и пенополистрола (ППС).

Для проведения испытаний, были использованы опытные образцы в виде серийных трехслойных панелей, с реальными размерами и конструктивными особенностями, применяемые в строительстве в качестве ограждающих конструкций, что позволило избежать влияния масштабного фактора. Это особенно важно для выявления влияния начальных технологических несовершенств, вызванных наличием поперечных стыков, на несущую способность трехслойных панелей. Толщины панелей от 50 до 220 мм, со стальными обшивками толщиной от 0,5 до 0,7 мм.

Для данного исследования необходимо было создать приближенное к практике напряженное состояние поперечного изгиба. При этом граничные условия и пролеты панелей были приняты одинаковыми, опирание испытываемых образцов осуществлялось шарнирными линейными опорами, нагрузка на испытываемые образцы прикладывалась равномерно-распределенной по всей площади панели с помощью мерных грузов, через деревянные подкладки.

В ходе проведения испытаний фиксировались следующие данные: значение нагрузки, деформации и напряжения в обшивках, значение максимального прогиба в середине пролета на каждом этапе нагружения; численное значение напряжения на этапе перед разрушением; значение разрушающей нагрузки; место и характер разрушения.

Для измерения деформаций и соответственно напряжений в обшивках, были применены тензодатчики ПКБ-20 с сопротивлением 200 Ом, подключенные или к тензометрическому мосту (автоматическому измерителю деформаций) АИД-4, или к электронной тензометрической станции ММТС-64.01. Измерение прогибов проводилось на половине пролета, при помощи контрольных линеек с ценой деления 1 мм, по наружным кромкам, и при помощи стрелочного индикатора (прогибомера БПАО), с ценой деления 0,01 мм, в центре панели. Схема стенда для испытания представлена на рис. 1, образцы различных серийных типов панелей в процессе испытания – на рис. 2.

Характер прогибов для всех панелей с заполнителем без стыка из ППУ и ППС качественно одинаков, а их величины с большой точностью совпадают с теоретическими значениями.

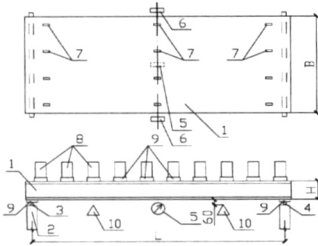


Рис. 1. Схема стелла для испытания:

1- панель; 2- база стелла; 3- неподвижная опора; 4- катковая опора; 5- прогибомер; 6- контрольные линейки; 7- тензодатчики; 8- тарированные грузы; 9- деревянные прокладки; 10- ограничитель прогиба панели на момент разрушения.

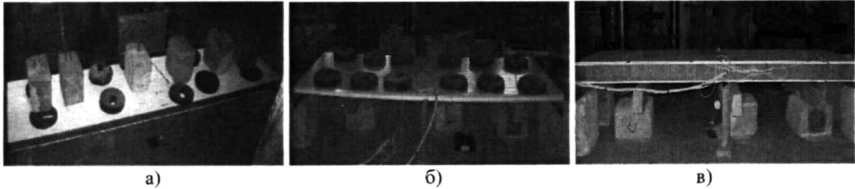


Рис. 2. Испытание серийных типов панелей:

а) с наполнителем из ППУ, б) с наполнителем из ППС, в) с наполнителем из минваты.

По результатам исследований выявлены формы истощения несущей способности панелей без стыка. Физическое разрушение панели с наполнителем из ППУ произошло в приопорной части, от разрушения наполнителя по наклонному сечению, с дальнейшим отрывом и проскальзыванием стальных обшивок (рис. 3а). Разрушение всех трехслойных панелей с наполнителем из ППС происходило в средней трети пролета, от потери устойчивости сжатой обшивки (рис. 3б, 3в).

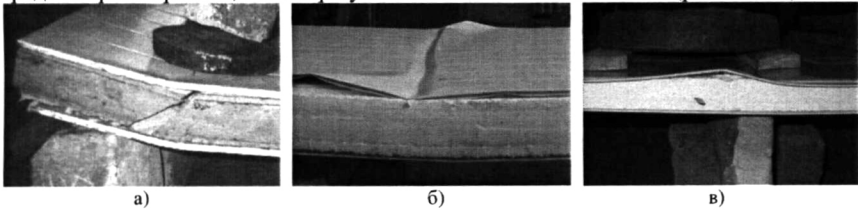


Рис. 3. Истощение несущей способности: а – разрушение наполнителя из ППУ, б и в – потеря устойчивости обшивки в панели с наполнителем из ППС.

Отрыв обшивки от пенопластового наполнителя происходил не по клевоому соединению, а по материалу наполнителя. Зона разрушения панелей с наполнителем из ППС соответствует сечению с максимальными изгибающими моментами и соответственно с максимальными нормальными напряжениями в обшивках. Однако, на этапе перед разрушением, максимальные нормальные напряжения в обшивке, как согласно показаниям тензодатчиков (уровень напряжений составлял в середине пролета $378\text{--}626\text{ кг/см}^2$), так и вычисленные теоретически, были значительно ниже, чем предельные, и они находились в зоне линейной работы материала обшивок. При этом максимальные напряжения в наполнителе не достигли своего предельного значения (рис. 4). Такой характер потери несущей способно-

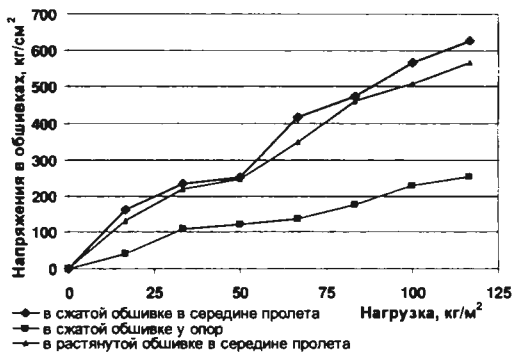


Рис. 4. Зависимость напряжений в обшивках от нагрузок (образец № 3), с заполнителем из ППС

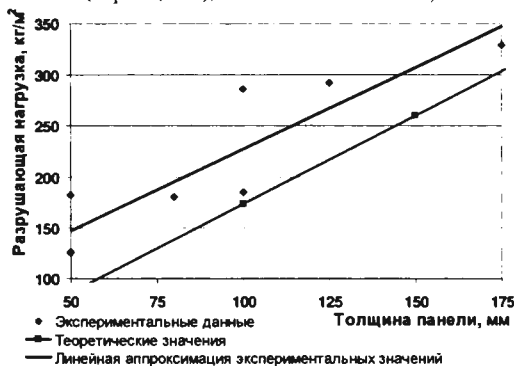


Рис. 5. Экспериментальная и теоретическая зависимость разрушающей нагрузки от толщины панели.

шей способности и деформативности трехслойных панелей с технологическими стыками среднего слоя. Изучен характер исчерпания несущей способности панелей и их поведение в предельных состояниях.

Особенностями исследуемых трехслойных конструкций является то, что их средний слой состоит из отдельных листов ППС или ламелей минеральной ваты с вертикально ориентированными волокнами. Исследование технологии производства таких трехслойных панелей по непрерывной или стеновой технологии показало, что данная технология уже предполагает наличие поперечных технологических стыков среднего слоя, произвольно расположенных по длине панелей. Кроме этого технологический процесс также допускает наличие дефектов уже при изготовлении листов или ламелей среднего слоя.

Основным и наиболее сильно влияющим на ее работу дефектом, является разность толщин листов или ламелей среднего слоя в месте стыка (рис. 6), что в свою очередь, при окончательном склеивании обшивки и заполнителя, вызывает

сти трехслойной панели показывает, что физическое разрушение панели произошло именно в результате местной потери устойчивости сжатой обшивки от действия нормальных напряжений. Таким образом, приведенные на рис. 5, экспериментальные значения разрушающих нагрузок, оказались выше соответствующих им теоретических значений на величину от 7 до 78%. В целом полученные результаты испытаний образцов панелей без стыков среднего слоя, в достаточной степени соответствовали существующей методике расчета трехслойных панелей.

В третьей главе описываются особенности конструктивных решений, технология изготовления, причины возникновения технологических дефектов, а также результаты экспериментальных исследований несущей способности и деформативности трехслойных панелей с технологическими стыками среднего слоя.

непроклей – область расслоения обшивки и среднего слоя. И эти дефекты не являются браком, а допустимы ГОСТами и техническими условиями производителей.

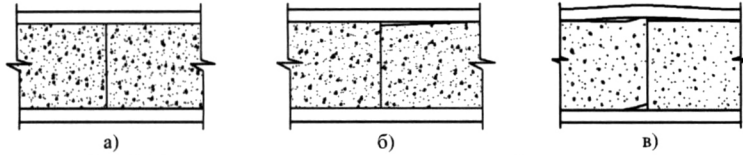


Рис. 6. Стыки листов заполнителя, а – в идеале, б и в – реальные.

Показано что при изготовлении панелей на непрерывных линиях, со стороны валков на панель будут действовать дополнительные силы:

$$P = P_1 - \frac{2\pi^2 v^2 m \eta_{\max}}{l^2} \cos \frac{2\pi v t}{l} + \delta \left(1 - \frac{L}{v} \right) \frac{4\Delta h \mu v^2}{\sqrt{4\Delta h^2 + l_1^2}} ; \quad (1)$$

P_1 – сжимающая сила от валков.

Появление этих дополнительных сил также является причиной появления непрочья.

В панелях с заполнителем из ППС со сплошным поперечным стыком (рис. 7 а), зона непрочья представляет собой воздушную прослойку прямоугольной формы, шириной равной ширине панели. В панелях с заполнителем из минваты с шахматным расположением ламелей (рис. 7 б), непрочья возникает в виде полосы расположенной поперек панели, но с неровными, краями, из-за того, что стык перекрывается смещением ламелей смежных рядов. В панелях с заполнителем из минваты с расположением ламелей в виде «лесенки» (рис. 7 в), форма непрочья близка к полосе прямоугольной формы расположенной под определенным углом к краю панели, зависящим от величины смещения ламелей.

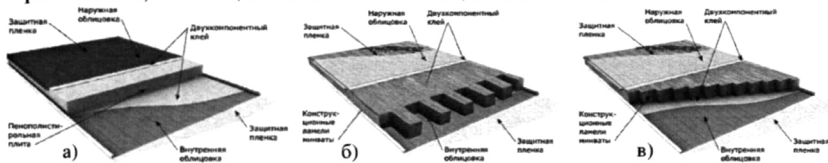


Рис. 7. Конструкция трехслойной панели с технологическими стыками:

а – с заполнителем из листов ППС, б, в – с заполнителем из ламелей минваты.

Экспериментальное и измерительное оборудование, а также методика проведения испытаний трехслойных панелей с технологическими стыками заполнителя аналогична панелям без стыков.

В результате испытаний получена картина действительной работы на поперечный изгиб различных видов трехслойных панелей, со стыками заполнителя, несущая способность и предельное состояние которых, меняются в зависимости от вида и материала среднего слоя, толщины панелей, а также расположения стыков по длине панели.

Зависимость экспериментальных прогибов от нагрузки для всех панелей качественно имеет одинаковую форму и носит линейный характер до определенной

величины (пример панели со средним слоем из ППС, толщиной 50 мм – рис. 8). При нагрузках близких к предельным, наблюдалось небольшое увеличение интенсивности нарастания прогибов. Однако, сравнивая экспериментальный прогиб панелей с теоретическим, можно видеть, что экспериментальная зависимость прогибов носит более деформативный характер. Это говорит о том, что расчеты прогибов панелей, основанные на существующих теоретических предпосылках не подходят для расчета панелей, имеющих технологические стыки среднего слоя.

На этапе перед разрушением, нормальные напряжения в сжатой обшивке были равны 441–556 кг/см². Очевидно, что величина предельных нормальных напряжений значительно ниже, предела прочности материала обшивки. Теоретическая величина предельных напряжений, полученная согласно существующим расчетным положениям, превышает на 60 % максимальные экспериментальные значения. Такие значения напряжений нельзя связывать только с влиянием начальной технологической погиби обшивки (как в случае с заполнителем без стыка). Необходимо сделать вывод именно о наличии в месте стыка, зоны (полосы) с не-

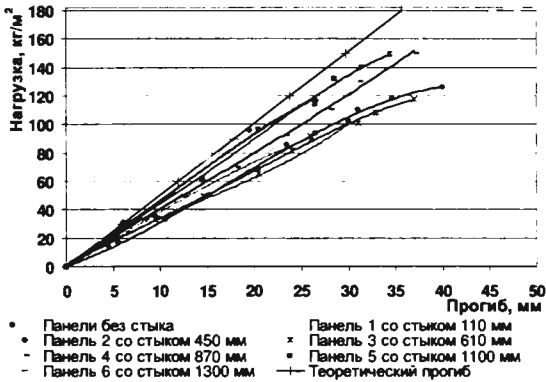


Рис. 8. Экспериментальные и теоретические зависимости между нагрузкой и прогибами панелей со средним слоем из ППС, толщиной – 50 мм.

несущей способности наблюдается у панелей, стык заполнителя в которых располагается или ближе к опоре, или в середине пролета. Т.е. наиболее неблагоприятным, для несущей способности панелей, согласно экспериментальным данным, является расположение стыка заполнителя на расстоянии $(0-0,2)l$ и $(0,4-0,6)l$ от опоры (где l – пролет панели).

По результатам испытаний трехслойных панелей выявлены их основные предельные состояния. Прежде всего, отметим, что места разрушения панелей не всегда соответствовали зоне с максимальными нормальными напряжениями в обшивках. Разрушение всех образцов с ортотропным заполнителем (из ППС), имеющих технологический стык (за исключением одной), произошло в месте

проклеем, спровоцированной именно наличием стыка. Эта полоса для сжатой обшивки является участком, неподкрепленным в этом месте упругим основанием. Несущая способность трехслойных панелей с технологическим стыком заполнителя во всех случаях ниже, чем аналогичных панелей без стыка. Картина распределения разрушающей нагрузки, в зависимости от расположения стыка по длине панели (рис. 9) для

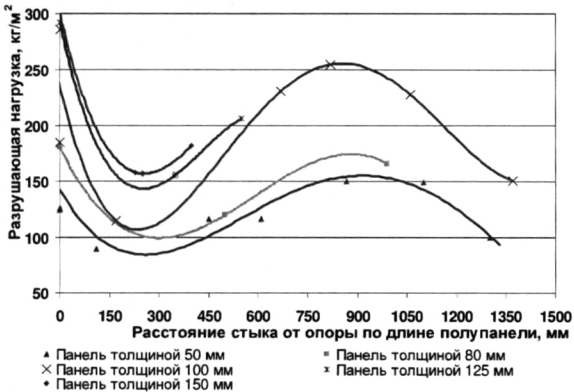


Рис. 9. Зависимость разрушающей нагрузки от расположения стыка по длине панелей, толщиной 50, 80, 100 и 125 мм.

расположения поперечных стыков заполнителя. Разрушение панелей с анизотропным заполнителем (из ламелей минеральной ваты, расположенных в шахматном порядке), происходило как на опоре, так и в местах поперечных стыков.

Было установлено, что характер исчерпания несущей способности панелей с заполнителем, имеющим поперечный стык, зависит от физико-

механических свойств заполнителя и самое главное от расположения стыка по длине панели. Разрушение панели со стыком, расположенным в средней части панели, происходило от местной потери устойчивости сжатой обшивки от действия нормальных напряжений (рис. 10 а, г). Если стык заполнителя находился в приопорной зоне, то разрушение панели происходило от разрушения заполнителя со сдвигом по стыку (рис. 10 б, в) или разрушение заполнителя, от действия касательных напряжений (рис. 10 д, е). При этом после вскрытия образца, вблизи стыка, как в растянутой обшивке, так и в сжатой, наблюдалась зона, длиной около 10-40 мм с признаками непрочности. Т.е. на несущую способность панелей большое влияние оказывает наличие и величина технологических несовершенств, а именно наличие стыка заполнителя и непрочности обшивок в месте расположения стыка.

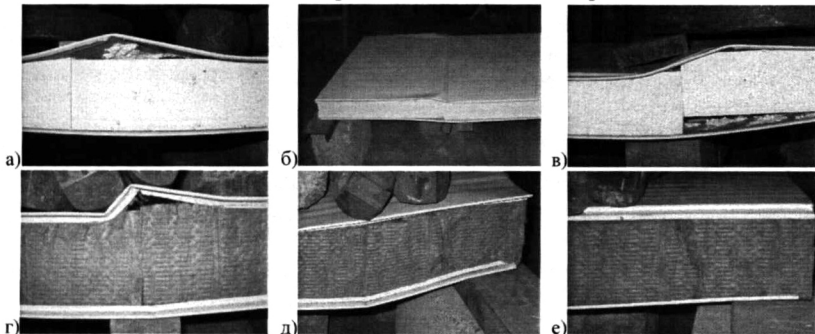


Рис. 10. Характер исчерпания несущей способности панелей с заполнителем из ППС и минваты: а, г — местная потеря устойчивости сжатой обшивки в месте стыка; б, в, д, е — разрушение среднего слоя от действия поперечных сил.

Сравнение минимальных и максимальных разрушающих нагрузок для различных толщин панелей (рис. 11) показывает, что значения минимальных разрушающих нагрузок для испытанных панелей, расположены ниже теоретических разрушающих нагрузок. Таким образом, можно сделать вывод о том, что существующие методики расчета для трехслойных панелей могут использоваться только для расчета панелей с континуальным заполнителем, а у панелей имеющих стык среднего слоя, экспериментальные разрушающие нагрузки ниже расчетных. Для расчета таких панелей существующие методики расчета должны быть дополнены, исходя из учета прочности панели в месте стыка.

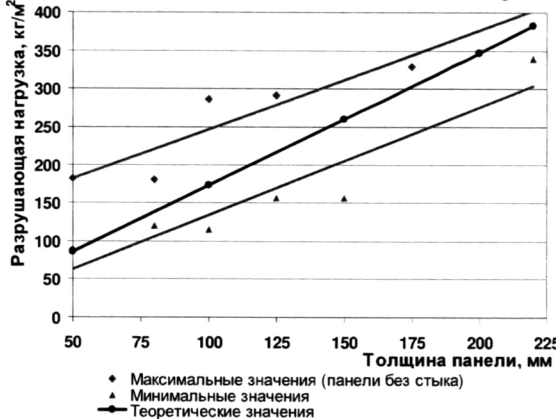


Рис. 11. Максимальные и минимальные значения разрушающих нагрузок для различных толщин панелей.

В четвертой главе представлены результаты аналитических и численных исследований трехслойных панелей с технологическими стыками заполнителя. Рассмотрены теоретические проблемы определения напряженно-деформированного состояния заполнителя и потери местной устойчивости обшивки в месте стыка.

Численные исследования выполнены методом конечных элементов на вычислительном комплексе «ЛИРА-Windows». В панелях со сплошным стыком (с заполнителем из ППС) рассматривалась плоская задача, а со стыками перекрытыми смещением соседних участков заполнителя (из ламелей минваты) – объемная. При моделировании также было учтено наличие у стыка непрочная величина до 40 мм.

Численные исследования также как и экспериментальные, выявили два предельных состояния – местная потеря устойчивости сжатой обшивки (рис. 12) и достижение заполнителем предела прочности.

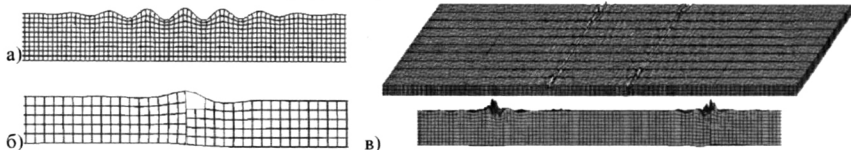


Рис. 12. Предельные состояния в виде местной потери устойчивости обшивки: а – в середине пролета, панели из ППС без стыка; б – в месте стыка, панели из ППС; в – в месте стыков, панели из ламелей минваты.

Выявлено, что несущая способность трехслойных панелей, определяемая местной потерей устойчивости сжатой обшивки, со стыком в среднем слое меньше, чем панелей без стыка той же толщины. И чем ближе расположен стык к центру панели, тем меньше ее несущая способность (рис. 17). В наиболее неблагоприятном случае, т.е. в случае панели со стыком заполнителя расположенным в центре, несущая способность ниже на величину от 11-23% (для панелей без непрочлея) до 53% (для панелей с непрочлеем 40 мм). Так же было выявлено, что напряжения в заполнителе в месте стыка существенно выше напряжений в тех же местах панелей без стыка и несущая способность панелей, определяемая прочностью заполнителя тем меньше, чем ближе стык располагается к опоре. При этом величина напряжений в заполнителе у стыка (и соответственно несущая способность панели) от толщины панели зависит не существенно, а максимальные напряжения возникают в месте соединения обшивки и заполнителя, непосредственно в месте стыка.

Итак, численные исследования показали, что наличие и расположение стыка, а также наличие и величина непрочлея, существенным образом влияют на несущую способность трехслойной панели, а также подтвердили возникновение предельных состояний в виде местной потери устойчивости сжатой обшивки и достижения заполнителем предела прочности в месте стыка.

Таким образом, необходимо аналитически решить две задачи о нахождении критической силы (напряжения) для обшивки с непрочлеем и определения максимальных напряжений, возникающих в среднем слое в локальной зоне у стыка.

В области без непрочлея принимается гипотеза прямой нормали:

$$w = w_0(z) \cdot y; \quad v = v_0(z). \quad (2)$$

Здесь w , v – перемещения вдоль и поперек панели, z , y – продольная и поперечная координаты. Нормальные напряжения в сечении будут равны:

$$\sigma_z^{(i)} = E_{(i)} \frac{dw_0}{dz} \cdot y; \quad (3)$$

Связь момента M_x и напряжений записывается в виде (A – площадь сечения):

$$M_x = \int_A \sigma_z^{(i)} y \cdot dA; \quad (4)$$

Из (3) и (4) вытекают выражения для напряжений в обшивке и заполнителе:

$$\sigma_z^i = E_i \frac{M_x}{(EI_x)^*} \cdot y \quad (5)$$

$$\frac{dw_0}{dz} = \frac{M_x}{(EI_x)^*}; \quad (EI_x)^* \cong b[3E_1 H^2 h_1 + E_2 H^3] \cdot \frac{2}{3}; \quad (6)$$

$$\text{Тогда сжимающие силы в обшивке } P = \sigma_z^1 \cdot (h_1 \cdot b) \quad (7)$$

Далее рассмотрена трехслойная панель с непрочлеем сжатой обшивки. Поведение обшивки в зоне без непрочлея описывается моделью балки на упругом основании. Поведение основания описывается моделью Винклера, т.е. принимается, что на балку действует реакция: $q = k \cdot v$ (8)

Для элементов проклеенной части обшивки из системы, содержащей уравнение изогнутой оси балки:

$$EI_x \frac{d^2 v}{dz^2} = M_x \quad (9)$$

и уравнений равновесия:

$$\frac{dQ_x}{dz} = b \cdot k^* \cdot v, \quad \frac{dM_x}{dz} = Q_x - P \cdot \frac{dv}{dz}, \quad (10)$$

получено уравнение в виде:

$$EI_x \frac{d^4 v}{dz^4} + bk^* v + P_{кр} \frac{d^2 v}{dz^2} = 0; \quad (11)$$

Для не проклеенной части:

$$EI_x \frac{d^4 v}{dz^4} + P_{кр} \frac{d^2 v}{dz^2} = 0. \quad (12)$$

Решение ищется в виде (начало координат – в центре непрочья, ввиду симметрии рассматривается только правая половина панели):

$$v_{np} = A_{np} e^{-nc} \cos(mz) + B_{np} e^{-nc} \sin(mz); \quad v_s = A_{sc} \cos(az) + B_{sc} \sin(az) + C_{sc} z + D_{sc} \quad (13)$$

Решение содержит 6 констант интегрирования. Они находятся из граничных условий. Это условия стыковки и условия затухания решения при больших z :

$$Q_x^{sc} - Q_x^{np} = 0; \quad M_x^{sc} - M_x^{np} = 0; \quad v_{sc}' - v_{np}' = 0; \quad v_{sc} - v_{np} = 0; \quad Q_x(0) = 0; \quad v'(0) = 0. \quad (14)$$

Система уравнений (14) однородная, поэтому чтобы найти $v \neq 0$, приравняем нулю ее детерминант:

$$\det \left\| \cdot \right\| = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) содержит неограниченное количество корней $P_{кр}$. Из них выбирается действительное и минимальное значение $P_{кр}$. В данной работе, с целью возможности использовать традиционную формулу Эйлера, в качестве неизвестной вводится коэффициент приведенной длины μ :

$$P_{кр} = \frac{P_{кр}^{эи}}{\mu^2} = \frac{\pi^2 EI_x}{(\mu \cdot l)^2} \quad (16)$$

Для этого в формулу Эйлера [16] подставляется $P_{кр}$, найденное из (15), и вычисляется μ . Здесь μ зависит только от одного параметра – приведенной жесткости основания:

$$k_{прис} = k^* \frac{bl^4}{EI_x}. \quad (17)$$

Эта задача решалась также численно методом конечных разностей для конечных значений длины обшивки. Сравнение с численными решениями показало, что аналитическое решение для обшивки бесконечной длины справедливо для реальных размеров непрочья. По результатам расчетов получен ряд значений μ при разных $k_{прис}$. Для удобства использования в практических вычислениях построена регрессионная функция:

$$\mu^* = \begin{cases} \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{k_{прис}}}; & \text{при } k_{прис} < 1 \\ \frac{1}{\sqrt[3]{\mu \cdot \arctg[b \cdot \lg(k_{прис}) - c] + d}}; & \text{при } k_{прис} \geq 1 \end{cases}$$

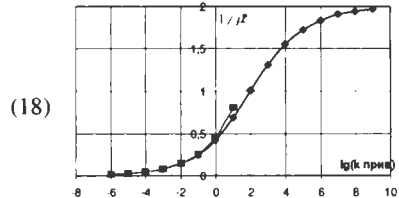


Рис. 13. График зависимости коэффициента μ^* от $k_{прис}$

Для проверки прочности заполнителя в области стыка рассмотрен случай, когда стык расположен в приопорной зоне. Обшивка у стыка рассматривается в виде полубесконечной балки на упругом Винклеровском основании (рис. 14).



Рис. 14. Обшивка как полубесконечная балка на упругом основании

Решением дифференциального уравнения балки на упругом основании

$$EI_x v'''' = k^* v \quad (19)$$

$$\text{получено: } EI_x v = C_1 e^{-\lambda z} \cos \lambda z + C_2 e^{-\lambda z} \sin \lambda z + C_3 e^{\lambda z} \cos \lambda z + C_4 e^{\lambda z} \sin \lambda z; \quad (20)$$

$$\text{где } \lambda = \sqrt[4]{\frac{k^*}{4EI_x}}, \quad C_3 = C_4 = 0. \quad (21)$$

$$\text{Из граничных условий: } EI_x v'' = M \approx 0; \quad EI_x v' = Q/2, \quad (22)$$

$$\text{определены константы интегрирования: } C_1 = \frac{Q}{4\lambda^3}; \quad C_2 = 0. \quad (23)$$

$$\text{Тогда прогиб обшивки определяется из уравнения: } EI_x v = \frac{Q}{4\lambda^3} e^{-\lambda z} \cos \lambda z. \quad (24)$$

А напряжение в упругом основании (среднем слое) равно (эпюра напряжений представлена на рис. 15):

$$\sigma_{осн} = v \cdot k^* = \frac{k^*}{EI_x} \left(\frac{Q}{4\lambda^3} e^{-\lambda z} \cos \lambda z \right), \quad (25)$$

где коэффициент упругого основания для большой толщины среднего слоя (для нашего случая) $k^* = 0,282 \cdot E_{осн} \sqrt[3]{\frac{E_{осн}}{D_{обш}}}$; $D_{обш} = \frac{E_{обш} \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$.

Таким образом, условие прочности заполнителя:

$$\sigma_{осн}^{\max} = \frac{k^*}{EI_x} \left(\frac{Q}{4\lambda^3} \right) \leq \sigma_{раст} \cdot \sigma_{сж}. \quad (27)$$

Далее определена предельная нагрузка по теории предельного равновесия:

$$Q_{прео}^{нарн} = \sigma_{раст} \cdot a \cdot b - \sigma_{сж} \cdot c \cdot b; \quad Q_{прео}^{нлж} = \sigma_{сж} \cdot a \cdot b - \sigma_{раст} \cdot c \cdot b. \quad (28)$$

Величина областей растяжения a и сжатия c , определена из упругой постановки. Получено: $a/c=0,49$.

Предельная нагрузка, полученная по теории предельного равновесия, определяется в зависимости от координаты расположения стыка по длине панели l , по формуле:

$$q_{прео} = Q_{прео} / \left(\frac{l}{2} - l \right). \quad (29)$$

Таким образом, при расчете несущей способности трехслойных панелей с технологическими стыками среднего слоя, помимо выполнения требований действующих норм, также необходимо проверять местную устойчивость обшивки у стыка, с учетом непрочлея по формулам [16], [18] и прочность среднего слоя в локальной зоне у стыка по формуле [27].

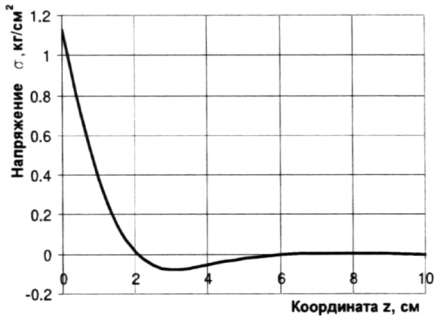


Рис. 15. Эпюра напряжений в припорной зоне заполнителя, примыкающего к стыку, от нагрузки 100 кг/м^2 для панели $3 \times 1 \text{ м}$.

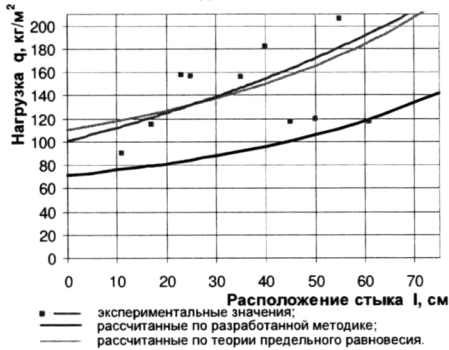


Рис. 16. Изменение величины нагрузки q панели $3 \times 1 \text{ м}$ с заполнителем из пенополистирола, в зависимости от расположения стыка.

В связи с этим разработаны и защищены патентом технические решения с использованием армирующих элементов, устанавливаемых при сборке конструкции трехслойной панели. Одним из способов армирования является установка вертикальных плоских армирующих элементов между рядами ламелей заполнителя по всей длине панели или только в припорных участках. Для повышения эффективности их работы, армирующие элементы могут быть перфорированы, а на их боковых поверхностях при выполнении перфорации могут быть образованы шипы (рис. 18 а). Другим техническим решением является применение в качестве армирующего элемента сетки из синтетического материала (рис. 18 б).

Эксперименты показали (рис. 19 а), что установка вертикальных плоских армирующих элементов, в зависимости от их количества, позволяет повысить несущую способность панелей от 21% (3 элемента) до 33% (5 элементов), установка сетки из синтетического материала – от 4% (с одной стороны) до 17% (с двух сторон). Более эффективным и экономически целесообразным является полосовое

Результаты аналитических решений по расчету местной устойчивости обшивки и прочности среднего слоя по предложенной методике, приведенные на графике на рис. 16 и 17, хорошо согласуются с результатами экспериментальных и численных исследований. Расхождение составляет с данными экспериментальных исследований от 1 до 30%, с численными – до 12%.

В пятой главе представлены результаты разработки новых конструктивных решений трехслойных панелей, повышающих их несущую способность, надежность и эксплуатационные качества. Одним из путей повышения несущей способности трехслойных панелей является увеличение прочности заполнителя. Однако увеличение прочности заполнителя возможно только одновременно с увеличением его плотности, что неизбежно скажется на ухудшении теплотехнических характеристик. К наиболее оптимальным способам, повышающим прочность заполнителя, без существенного изменения его плотности, относится армирование заполнителя.

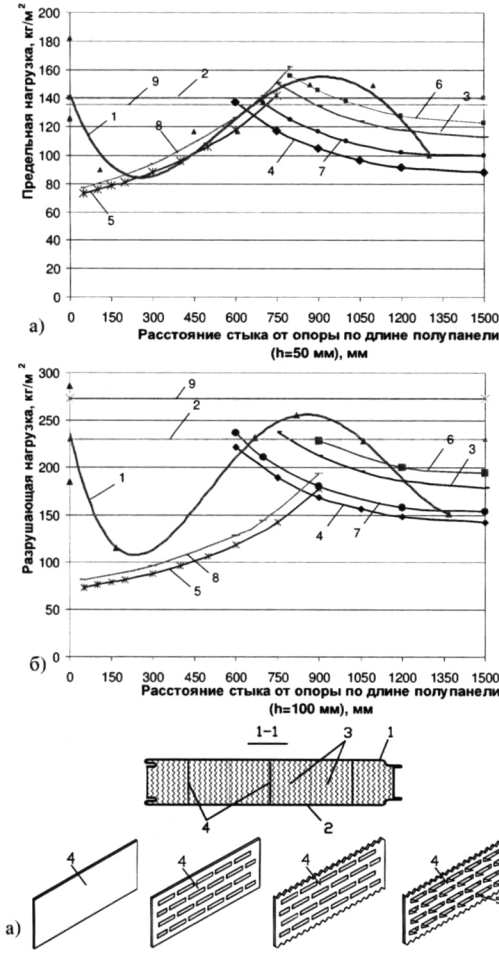


Рис. 17. Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований с аналитическими решениями: 1 – Разрушающая нагрузка согласно экспериментальным исследованиям; 2 – Несущая способность определенная по существующим отечественным методикам расчета; 3 – Пределная нагрузка по устойчивости обшивки - аналитическое решение (непроклей 2 см); 4 – Пределная нагрузка по устойчивости обшивки - аналитическое решение (непроклей 3 см); 5 – Пределная нагрузка по прочности среднего слоя - аналитическое решение; 6 – Пределная нагрузка по устойчивости обшивки - численное решение (непроклей 2 см); 7 – Пределная нагрузка по устойчивости обшивки - численное решение (непроклей 3 см); 8 – Пределная нагрузка по прочности среднего слоя - численное решение; 9 – Несущая способность определенная по EN 14509: 2006.

Рис. 18. Конструкция трехслойных панелей: а) с вертикальными армирующими элементами, б) с армирующими элементами в виде сетки из синтетического материала. 1, 2 – обшивки, 3 – ламели минваты, 4 – армирующие элементы, 5 – клеящая прослойка.

армирование, в качестве материала для которого целесообразно использовать обрезки рулонной стали для обшивок. Численные исследования так же подтвердили большую эффективность полосового армирования (рис. 19, б).

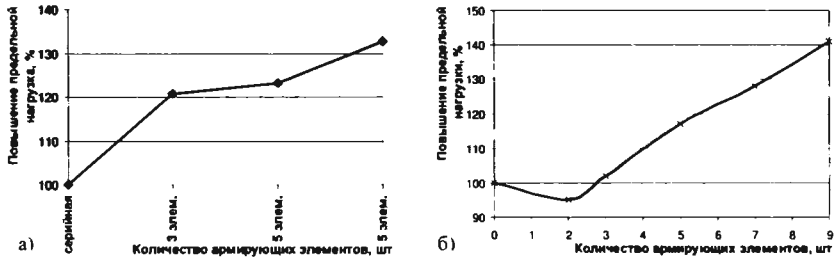


Рис. 19. Зависимость предельной нагрузки от количества армирующих элементов: а) экспериментальные данные, б) результаты численного расчета.

Помимо перечисленного также был разработан способ повышения несущей способности трехслойных панелей с заполнителем со сплошным стыком (из ППС). В трехслойной панели, заполнитель которой состоит из отдельных по длине листов, их соединение выполнено при помощи отрезка профилированного листа, вдавленного в торцы стыкуемых листов пенополистирола.

Указанное решение было проверено при помощи численного эксперимента, результаты которого показали, что применение жесткой вставки существенно уменьшает напряжений отрыва обшивки и соответственно увеличивает несущую способность (на отрыв обшивки у стыка), до 140%, при применении вставки длиной 4 см (рис. 20).

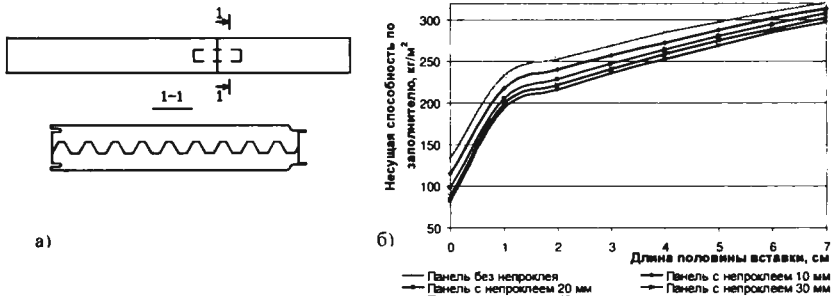


Рис. 20. Способ повышения несущей способности трехслойных панелей с заполнителем со сплошным стыком (из ППС) при помощи жесткой вставки: а) конструкция узла; б) зависимость повышения несущей способности от длины жесткой вставки.

Основные выводы и результаты

1. Анализ опыта применения трехслойных панелей показал, что современная технология изготовления панелей предусматривает использование в качестве среднего слоя отдельных листов или ламелей утеплителя. Данная технология приводит к появлению одного или нескольких поперечных стыков и конструктивных несовершенств.

2. Для панелей со средним слоем из пенополистирола, изготавливаемых по непрерывной технологии получены данные об образовании некроклея в месте стыка

листов среднего слоя и аналитические выражения, объясняющие причину их образования.

3. По результатам натурных испытаний 40-ка образцов трехслойных панелей, отличающихся материалом среднего слоя и наличием и расположением стыка по их длине, получены новые экспериментальные данные о характере исчерпания несущей способности и о влиянии наличия и места расположения стыков на НДС панели в ее характерных точках. При этом несущая способность панелей со стыком среднего слоя ниже аналогичных панелей без стыка на величину до 60%.

4. Составлены конечно-элементные модели трехслойных панелей со стыками среднего слоя и проведены численные исследования НДС, которые показали, что несущая способность панелей определяется, в зависимости от расположения стыка по длине панели, как потерей устойчивости сжатой обшивки, так и потерей прочности заполнителя в месте стыка. При этом несущая способность панелей со стыком до 53% ниже аналогичных панелей без стыка.

5. Разработана методика расчета несущей способности панелей со стыком среднего слоя. Напряжения местной потери устойчивости обшивки рассчитываются как для пластинки, подкрепленной сплошным упругим основанием и на основе решения уравнений равновесия, с учетом граничных условий, получены зависимости (16), (18) для определения критической силы местной потери устойчивости сжатой обшивки в зависимости от расположения стыка по длине панели и величины непрочлея.

6. В рамках разработанной методики решена задача о прочности среднего слоя от действия поперечных сил в области стыка. Для этого обшивка в области стыка листов среднего слоя представлена в виде полубесконечной балки, лежащей на упругом винклеровском основании, нагруженной внешней нагрузкой, роль которой выполняет поперечная сила. Решением дифференциального уравнения изогнутой оси балки и граничных условий получены формулы (27), (29) для определения величины напряжений в заполнителе, в зоне прилегающей к стыку и величины предельной нагрузки.

7. Результаты расчета местной устойчивости обшивки и прочности среднего слоя по предложенной методике хорошо согласуются с результатами экспериментальных и численных исследований. Расхождение составляет с данными экспериментальных исследований от 1 до 30%, с численными – до 12%.

8. Разработаны новые конструктивные решения трехслойных панелей, в которых обеспечивается повышение несущей способности при армировании полосами до 33% (в зависимости от количества армирующих элементов), при армировании сеткой до 17%, что подтверждаются численными и экспериментальными исследованиями.

Основное содержание диссертации опубликовано в 18 работах:

- в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Хайруллин, Л.Р. Экспериментальная проверка значений критических сил потери устойчивости сжатой обшивки трехслойных панелей с технологическим

стыком среднего слоя / Л.Р. Хайруллин, И.Л. Кузнецов // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. –2007. –№3(31). –С. 83–85.

2. Хайруллин, Л.Р. Результаты численных исследований трехслойных панелей с технологическим стыком среднего слоя / Л.Р. Хайруллин // Известия КазГАСУ. –2009, –№ 1(11). –С. 139–142.

3. Хайруллин, Л.Р. Исследование прочности трехслойных панелей с технологическими стыками среднего слоя вблизи опоры / Л.Р. Хайруллин, Р.А. Каюмов // Известия КазГАСУ. –2011, –№ 2(16). –С. 116–120.

- в других изданиях:

4. Хайруллин, Л.Р. Результаты исследования действительной работы трехслойных панелей / Л.Р. Хайруллин // Материалы 53 республиканской научной конференции. Сборник научных трудов аспирантов. / КГАСА. –Казань, 2001. –С. 60–63.

5. Хайруллин, Л.Р. Исследование влияния стыка утеплителя трехслойной панели на её несущую способность / Л.Р. Хайруллин // Материалы 54 республиканской научной конференции. Сборник научных трудов аспирантов. / КГАСА. –Казань, 2002. –С. 73–77.

6. Хайруллин, Л.Р. Критическая сила для обшивки трехслойной панели, как балки на упругом основании / Л.Р. Хайруллин // Материалы 55 республиканской научной конференции. Сборник научных трудов аспирантов. / КГАСА. –Казань, 2003. –С. 45–50.

7. Каюмов, Р.А. Критическая сила для балки на упругом основании при наличии непрочкля / Р.А. Каюмов, Л.Р. Хайруллин // Материалы конференции «Наука и практика. Диалоги нового века». Ч.2 / –Наб. Челны, 2003. –С. 281–283.

8. Хайруллин, Л.Р. О некоторых процессах, возникающих при изготовлении трехслойных панелей / Л.Р. Хайруллин, А.З. Камалов // Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов» Ч.2 / МарГТУ. –Йошкар-Ола, 2004. –С. 188–191.

9. Хайруллин, Л.Р. Причины появления дефектов в трехслойных панелях и влияние их на несущую способность / Л.Р. Хайруллин // Материалы 56 республиканской научной конференции. Сборник научных трудов докторантов и аспирантов. / КГАСА. –Казань, 2004. –С. 85–89.

10. Кузнецов, И.Л. Расчет трехслойных панелей с технологическим стыком среднего слоя / И.Л. Кузнецов, Л.Р. Хайруллин // Сборник научных трудов III международной научно-технической конференции «Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте». / –Самара, 2005. –С. 176.

11. Хайруллин, Л.Р. Результаты натуральных испытаний трехслойных панелей с заполнителем из минеральной ваты на основе базальтового волокна / Л.Р. Хайруллин // Материалы 57 республиканской научной конференции. Сборник научных трудов докторантов и аспирантов. / КГАСУ. –Казань, 2005. –С. 111–117.

12. Хайруллин, Л.Р. Результаты разработки и экспериментальных исследований трехслойных панелей с армирующими элементами с заполнителем из минеральной ваты / Л.Р. Хайруллин // Материалы 58 республиканской научной конферен-

ции. Сборник научных трудов докторантов и аспирантов. / КГАСУ. –Казань, 2006. –С. 200–204.

13. Хайруллин, Л.Р. Оценка достоверности численных результатов расчета трехслойных панелей с технологическим стыком заполнителя / Л.Р. Хайруллин // Материалы 59 республиканской научной конференции. Сборник научных трудов докторантов и аспирантов. / КГАСУ. –Казань, 2007. –С. 88–92.

-патенты РФ:

14. Пат. 2191872 Российская Федерация, М. Кл. 7 Е 04 В 1/61, 2/74. Узел опирания трехслойной панели / Кузнецов И.Л., Хайруллин Л.Р. ; заявитель и патентообладатель КазГАСА. –№2001101703/03 ; заявл. 17.01.01 ; опубл. 27.10.02, Бюл. №30. –3 с.

15. Пат. 2204666 Российская Федерация, М. Кл. 7 Е 04 С 2/26. Трехслойная панель / Кузнецов И.Л., Хайруллин Л.Р., Соколов И.И., Давлетшина Ф. И. ; заявитель и патентообладатель КазГАСА. –№2001108554/03 ; заявл. 30.03.01 ; опубл. 20.05.03, Бюл. №14. –3 с.

16. Пат. 2212503 Российская Федерация, М. Кл. 7 Е 04 В 1/61, 1/38. Узел крепления трехслойных панелей / Кузнецов И.Л., Шмелев Г.Н., Хайруллин Л.Р., Чапаев А.Ф., Давлетбаева Ф.И. ; заявитель и патентообладатель КазГАСА. – №2001108553/03 ; заявл. 30.03.2001 ; опубл. 20.09.03, Бюл. № 26. –4 с.

17. Пат. 2295614 Российская Федерация, МПК Е04С 2/26. Трехслойная панель / Кузнецов И.Л., Хайруллин Л.Р., Каюмов Р.А. ; заявитель и патентообладатель КазГАСА. –№2005114335/03 ; заявл. 28.04.05 ; опубл. 20.03.07, Бюл. № 8. –4 с.

18. Пат. 2315156 Российская Федерация, МПК Е04С 2/26. Трехслойная панель / Кузнецов И.Л., Хайруллин Л.Р., Коктыш В.В. ; заявитель и патентообладатель ООО «Технологии Строительства» ООО «ТехноСтрой». –№2005141824/03 ; заявл. 29.12.05 ; опубл. 20.01.08, Бюл. №2. –4 с.

Подписано к печати 31.10.2012г.
Объем 1,0 п.л.

Формат 60х84/16
Заказ № 482

Печать RISO
Тираж 100 экз.

Отпечатано в полиграфическом секторе
Издательства КГАСУ
420043, Казань, ул. Зеленая, д.1

