



(06)-0125-1

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОКРІВЕЛЬНИХ ПАНЕЛЕЙ З УТЕПЛЮВАЧЕМ З БАЗАЛЬТОВОЇ ВАТИ

І.С. Холопов, М.Д. Мосесов, Є.В. Ільдияров, С.М. Петров

*Самарський державний архітектурно-будівельний університет,
194, вул. Молодогвардійська, 443001, м. Самара, Росія.
E-mail: Ildevgeni@rambler.ru*

Отримана 12 вересня 2006; прийнята 18 жовтня 2006

Анотація. Описується методика та результати експериментальних досліджень тришарових покрівельних панелей з утеплювачем з базальтової вати. Досліджувався напружено-деформований стан конструкцій. Отримані дані про характер розподілу напруг в обшивках та про роботу мінераловатного заповнювача. Визначена несуча здатність панелей різної товщини. Визначені фізико-механічні властивості матеріалів панелі. Створена розрахункова модель на основі методу скінчених елементів.

Ключові слова: експериментальні дослідження, тришарові панелі, базальтовий утеплювач, несуча здатність.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРОВЕЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ С УТЕПЛИТЕЛЕМ ИЗ БАЗАЛЬТОВОЙ ВАТЫ

И.С. Холопов, М.Д. Мосесов, Е.В. Ильдияров, С.М. Петров

*Самарский государственный архитектурно-строительный университет,
194, ул. Молодогвардейская, 443001, г. Самара, Россия.
E-mail: Ildevgeni@rambler.ru*

Получена 12 сентября 2006; принята 18 октября 2006

Аннотация. Описываются методика и результаты экспериментальных исследований трехслойных кровельных панелей с утеплителем из базальтовой ваты. Исследовалось напряженно-деформированное состояние конструкций. Получены данные о характере распределения напряжений в обшивках и работе минераловатного заполнителя. Определена несущая способность панелей различной толщины. Определены физико-механические свойства материалов панели. Создана расчетная модель на основе МКЭ.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, трехслойные панели, базальтовый утеплитель, несущая способность.

INVESTIGATION OF A STRESS-DEFORMED STATE OF ROOFING PANELS WITH A BASALT FIBER LAGGING

I.S. Kholopov, M.D. Mosesov, E.V. Il'dyyarov, S.M. Petrov

Samara State Architecture and Civil Engineering University,

194, Molodogvardyis'ka str., 443001 Samara, Russia.

E-mail: Ildevgeni@rambler.ru

Received 12 September 2006; accepted 18 October 2006

Abstract. Methods and results of the experimental researches of three-layer roofing panels with a basalt fiber lagging are described in the article. A stress-deformed state of structures was studied. There were obtained data on the character of stress allocation in lags and on a mineral fiber filler operation. Carrying capacities of panels with different thickness, as well as physical and mechanical properties of panel materials were determined. On the basis of the FEM (finite element method) there was created a design model.

Keywords: experimental investigations, three-layer panels, a basalt fiber lagging, a carrying capacity.

В строительной практике используются новые технические решения, позволяющих существенно уменьшить вес конструктивных элементов и при этом значительно улучшить теплотехнические характеристики. К таким элементам относятся: трехслойные кровельные и стеновые панели [1, 2, 3, 4]. Они имеют наружные обшивки из металлических листов и внутренний теплоизоляционный слой из вспененных полимерных материалов.

В последнее время в этих конструкциях в качестве утеплителя используют базальтовую вату. Самарские предприятия «Электроцит» и «Термостепс-МТЛ» освоили выпуск подобных конструкций. Они имеют верхний слой из профилированного оцинкованного стального листа толщиной 0.7 – 0.8 мм, покрытого защитным составом, нижний слой из такого же листа, но гладкого профиля и уложенный между ними утеплитель из базальтовой ваты, волокна которой ориентированы в поперечном направлении нормально к поверхностям обшивок.

Эти панели являются законченными конструктивными элементами, обеспечивающими восприятие внешних нагрузок, тепло- и гидроизоляцию, они обладают собственным весом, в десять раз меньше по сравнению с железобетонным. Кроме того, их монтаж значительно проще. В мировой практике подобные конструкции получили весьма широкое распространение [1, 2, 3, 5, 6].

Вследствие того, что базальтовая вата обладает ярко выраженной анизотропией и нелинейностью физико-механических свойств, работа таких конструкций существенно отличается от работы панелей с более однородным наполнителем и пока недостаточно изучена.

Предлагаемая работа направлена на исследование напряженно-деформированного состояния кровельных панелей при равномерном нагружении, имитирующем снеговую нагрузку, определение физико – механических свойств элементов панели и создание расчетной модели с применением МКЭ.

Исследуемые плиты представляют собой трехслойную конструкцию с металлическими гофрированными обшивками и минераловатным средним слоем.

Верхняя обшивка представляет собой профилированный лист из оцинкованной стали толщиной 0.7 – 0.9 мм (для разных экземпляров). Размеры гофра 60 x 40 мм, шаг 250 мм. Один из гофров (на рисунке слева) выступает за контуры панели. Это обеспечивает монтажное соединение.

Нижний лист, выполненный из оцинкованной стали толщиной 0,5 мм или имеет гофры высотой 1 мм, или гладкий.

Ширина панели – 1000 мм

Утеплителем служит базальтовая вата с поперечной ориентацией волокон нормально к обшивкам. Слой утеплителя смонтирован из

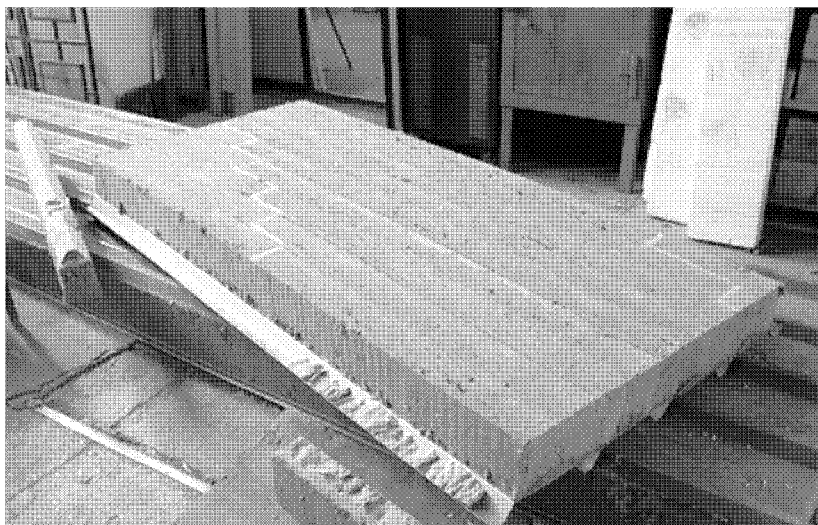


Рис. 1. Схема раскладки ламелей.

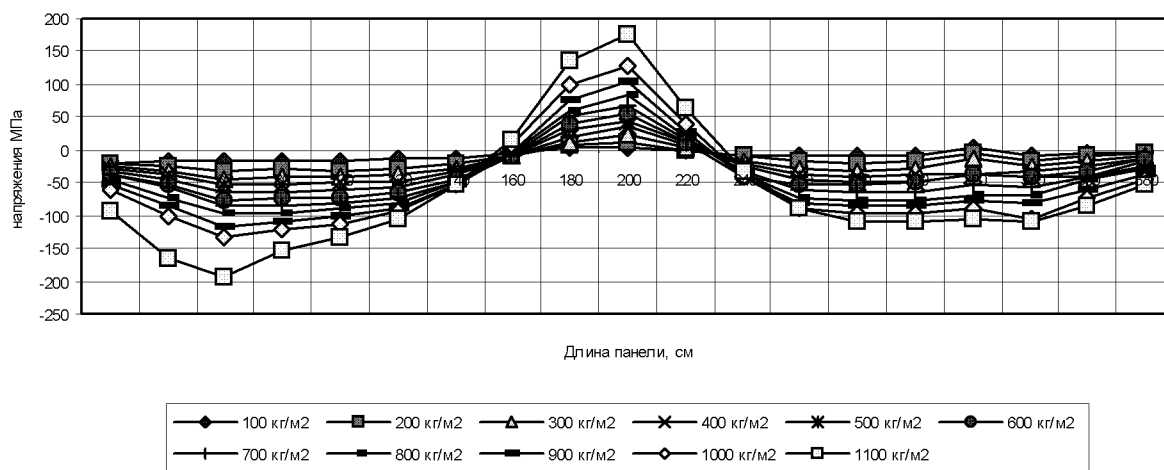


Рис. 2. График распределения напряжений в верхней обшивке.

отдельных блоков (ламелей) шириной 102 мм и длиной 1400 мм. Высота блока определяется толщиной панели (100, 150, 200 мм). Блоки между собой не склеены. Верхние гофры изнутри заполнены вставкой из такой же ваты, но с продольной ориентацией волокон. Вставки с основной массой утеплителя практически не склеены. На рисунке 2 показана раскладка ламелей (нижний, гладкий лист снят).

Для проведения испытаний была разработана и изготовлена специальная установка, позволяющая осуществлять равномерное нагружение, контролировать величину нагрузки и моделировать различный шаг и величину

пролетов, а также размещать комплекс измерительной аппаратуры.

Всего было испытано три партии панелей с толщиной утеплителя 100, 150 и 200 мм по 4 штуки в каждой.

Нагружение производилось ступенями по 100 кг/м² с выдержкой между ними по 10 минут, либо до полной стабилизации прогибов. Нагружение производилось до разрушения, при этом каждую четвертую панель в серии после достижения нагрузки 800 кг/м² подвергали циклическому нагружению такой же интенсивности с выдержкой под нагрузкой по 40 минут в каждом цикле и 20-и минутной выдержкой в

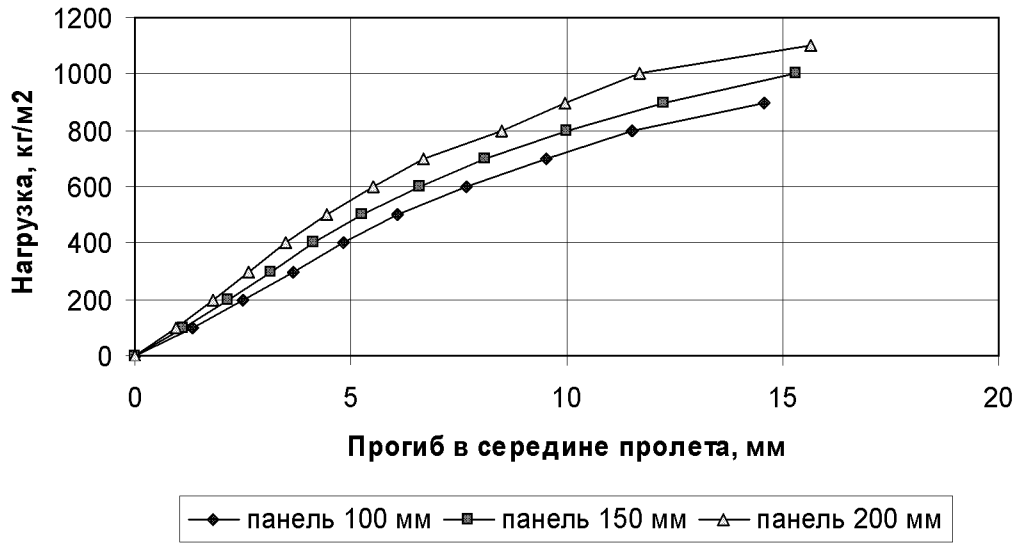


Рис. 3. График зависимости прогибов от нагрузок.

разгруженном состоянии. На каждом этапе нагружения регистрировались относительные деформации обшивок, перемещения (прогибы) в центре и на опорах.

По осредненным значениям напряжений в обшивках построен график, показанный на рисунке 2.

Нагрузка, при которой происходит разрушение, мало зависит от толщины панели и колеблется в пределах $900 - 1200 \text{ кг/м}^2$. В то же время толщина утеплителя влияет на величину прогибов (рисунок 3).

Во всех случаях, при нагрузках в диапазоне от 0 до 600 кг/м^2 , наблюдается практически линейная зависимость уровня напряжений в обшивках и прогибов от интенсивности нагрузки.

Напряжения в нижней обшивке мало меняются по длине пролета. При нагрузках порядка $700 - 800 \text{ кг/м}^2$ начинает проявляться локальная деформация опорных узлов (обмятие нижней обшивки в зоне опирания на прогон), достигающая $2 - 3 \text{ мм}$. При дальнейшем нагружении она возрастает до $5 - 7 \text{ мм}$.

Характер разрушения всех плит совершенно одинаков и проявляется в потере устойчивости сжатых гофров верхней обшивки на расстоянии $55-60 \text{ см}$ от крайней опоры (рисунок 4). Причем, потеря устойчивости происходит сравнительно плавно, процесс разрушения несколько растянут во времени (десятки секунд).

В конце этого процесса наблюдается отслоение (отрывом) сжатой обшивки от утеплителя на участке от места потери устойчивости до опоры.

Напряжения по высоте гофра распределяются практически по треугольному закону, причем нулевая линия совпадает с нижней гранью (рисунок 5). Проверка условия равновесия, при нагрузках в пределах упругой работы конструкции, показывает, что утеплитель, заполняющий пространство между обшивками, нагружен чрезвычайно слабо. Суммарное усилие сжатия гофра весьма мало отличается от усилия растяжения нижней обшивки.

При переходе в область нелинейной работы наблюдается увеличивающаяся с увеличением нагрузки разница в величине усилий в обшивках, что свидетельствует о том, что в этой области происходит включение в работу материала заполнителя.

Следует отметить и упругое последствие. Оно выражается в том, что у панелей, прошедших полный цикл нагружения до разрушения, зарегистрированные остаточные перемещения (прогибы) с течением времени уменьшаются.

Предельное значение линейной зависимости прогибов от нагрузки для панелей толщиной $100, 150$ и 200 мм составляет $600, 650$ и 700 кг/м^2 соответственно. При интенсивности нагрузки выше указанной наблюдается нелинейность, которая связана с микроразрушениями внутренней структуры утеплителя

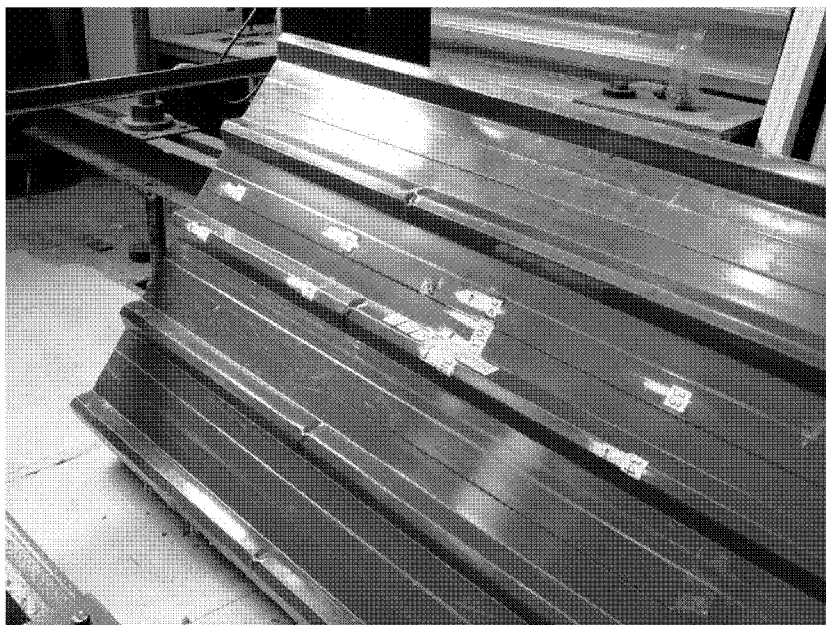


Рис. 4. Потеря устойчивости гофра сжатой обшивки.

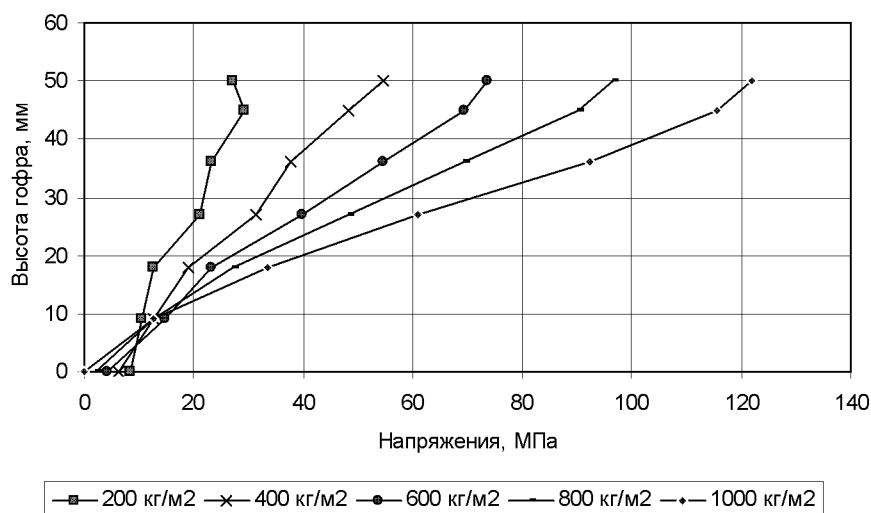


Рис. 5. График распределения напряжений по высоте гофра в середине пролета.

и его контактов с обшивками. При этом уровень напряжений в обшивках не превышает 150 МПа, что меньше расчетного сопротивления стали (245 МПа). Максимальные прогибы при нагрузке, соответствующей пределу линейной работы, составляют примерно 10 мм, что меньше значения регламентируемого нормами.

Для создания расчетной модели нами были проведены дополнительные испытания элемен-

тов панели (обшивок и минераловатного среднего слоя) с целью определения их физико-механических характеристик.

Испытание образцов обшивок проводилось в разрывной машине Р5. Контроль деформаций осуществлялся с помощью тензометрического комплекса ММТС – 64.01.

По осредненным данным была построена диаграмма работы стали обшивок на растяжение (рисунок 6).

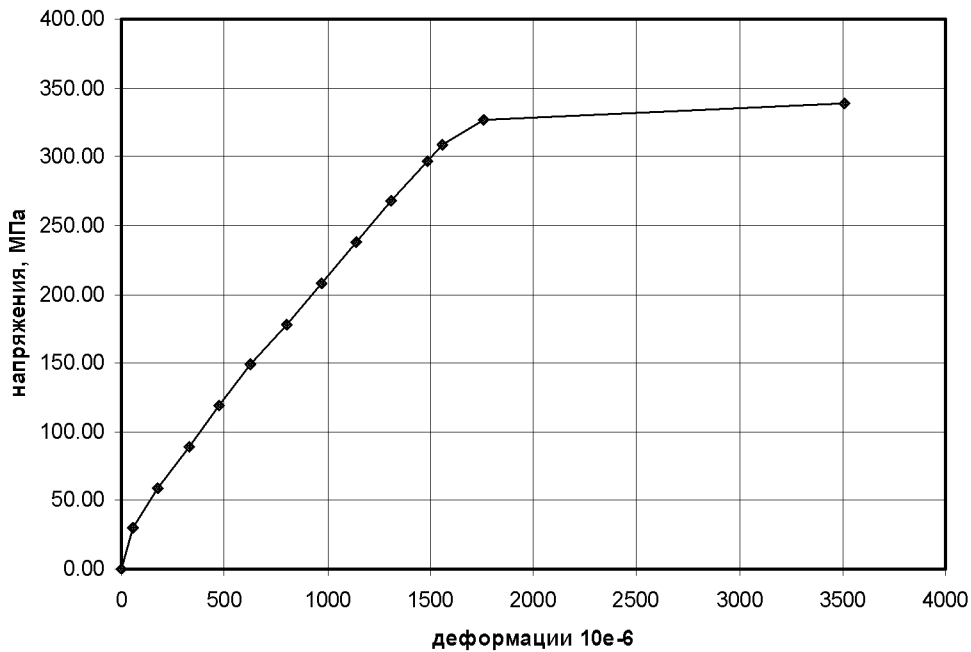


Рис. 6. Диаграмма работы обшивок на растяжение.

Основными параметрами утеплителя, влияющими на работу трехслойной панели, являются модуль деформации на сжатие (растяжение) E_z и модуль сдвига в сечении по длине панели G_{xz} (принята следующая ориентация осей: x – по длине панели, y – по ширине панели, z – по высоте панели).

Модуль деформации на сжатие определялся для образцов минеральной ваты с размерами $100 \times 100 \times 100$ мм и плотностью $130 - 140$ кг/м³. Для проведения испытаний был разработан испытательный стенд (рисунок 9). Перед испытанием стенд был оттарирован с помощью образцового динамометра. Нагрузку прикладывали ступенями – штучными грузами, с выдержкой на каждой ступени до полной стабилизации. Перемещение контролировалось с помощью индикаторов часового типа ИЧ – 10.

По результатам испытаний была построена диаграмма «относительные деформации – напряжения» (рисунок 7).

Модуль сдвига среднего слоя определялся по методике описанной А.В. Губенко [2]. В качестве образцов использовались фрагменты кровельных панелей различной толщины.

Нагрузка прикладывалась ступенями – штучными грузами. На каждой ступени производилась выдержка образца под нагрузкой до

полной стабилизации деформации. Контроль перемещений осуществлялся с помощью индикаторов часового типа ИЧ – 10.

На основании полученных данных нами была создана модель трехслойной панели с помощью программного комплекса «Лира – 9» основанной на МКЭ. Внешние слои были замоделированы пластинками, а средний слой – объемным элементом. Схема нагружения и величины нагрузки были такими же, как и в эксперименте. Характер напряженно деформированного состояния данной модели аналогичен результатам эксперимента, то есть нулевая линия в панели проходит по нижней грани верхней обшивки, величина прогибов в пределах линейной работы вполне сопоставима с экспериментальными (рисунок 8).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- проведенные эксперименты показали, что работа конструкции с минераловатным утеплителем существенно отличается от работы панелей с утеплителем из пенопласта;
- данные, полученные при проведении описанных экспериментов, хорошо коррелируют с данными немецких и финских фирм выпускающих аналогичную конструкцию [5, 6];

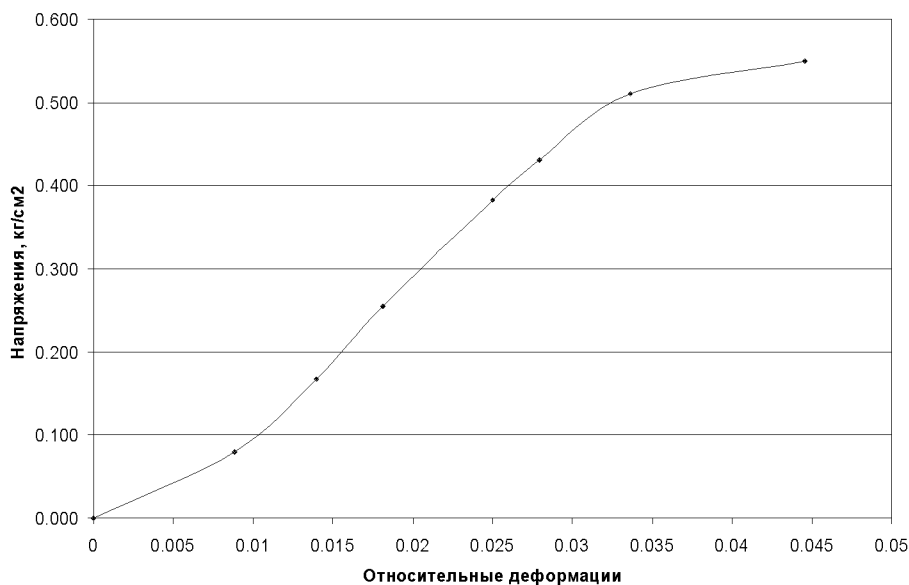


Рис. 7. Диаграмма работы минеральной ваты на сжатие.

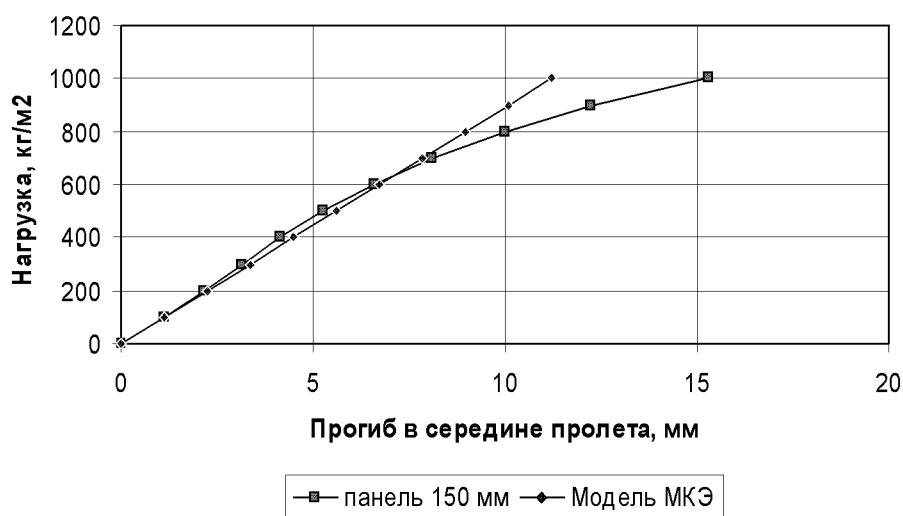


Рис. 8. Сравнение прогибов в середине пролета панели полученных в эксперименте и МКЭ.

- напряженно деформированное состояние панели и его изменение под нагрузкой зависит от реологических свойств материала утеплителя - минеральной ваты. Кроме того, эксплуатационные характеристики панелей существенно зависят от длительности действия и цикличности прилагаемых нагрузок;

- сталь, применяемая в качестве обшивки, имеет следующие характеристики: модуль упругости $E = (1,8-2) \cdot 10^5$ МПа, относительное удлинение $\varepsilon = 23\%$;

- на диаграмме, изображенной на рисунке 9, три характерных участка работы минеральной ваты: на первом участке - при напряжениях до 0,015 МПа, модуль деформации составляет $0,98 \div 1,47$ МПа ($10-15$ кг/см²), а время стабилизации деформаций составляет 5 – 10 мин; на втором - при напряжениях в образце от 0,02 МПа до 0,045 МПа, модуль деформации составляет $1,96 \div 2,45$ МПа ($20-25$ кг/см²), время стабилизации деформаций составляет порядка 20–30 мин; на третьем -

при напряжениях в образце более 0,055 МПа модуль деформации составляет $0,49 \div 0,98$ МПа (5-10 кг/см²), время стабилизации деформаций составляет более 1 часа с последующим разрушением образца;

- модуль сдвига среднего слоя в пределах линейной работы (рисунок 11) при уровне напряжений до 0,25 кг/см² составляет $G_{xz} = 0,61$ МПа (6кг/см²). Дальнейшее повышение нагрузки приводит к увеличению интенсивности сдвиговых деформаций;
- разрушение образцов при испытании на сдвиг во всех случаях происходило по среднему слою у границы клеевого шва. При этом касательные напряжения составили $\tau_{кр} = 0,35-0,5$ кг/см²;
- созданная расчетная модель сопоставима с результатами эксперимента и позволяет более подробно изучить напряженно - дефор-

мированное состояние трехслойных панелей в пределах линейной работы.

Литература

1. Штамм К Витте Г. Многослойные конструкции /Пер. с нем Т Н Орешкиной; М.: Стройиздат. 1983. - 300 с., ил. - Перевод, изд.: Sandwich konstruktionen / K. Stamm, H. Witte. - Wien, New York, 1974.
2. В. Доминчик, О. Корыцки, В. Меуш и др. Легкие ограждающие конструкции в строительстве / Пер. с пол. М.В. Предтеченского; Под ред. С.С. Кармилова. — М.: Стройиздат, 1986. - 376 с.; ил. - Перевод изд.: Lekkie przegrody w budownictwie Arkady 1982.
3. Губенко А.Б. Строительные конструкции с применением пластмасс. — М.: Стройиздат. 1976. — 326 с.
4. Тамплон Ф.Ф. Металлические ограждающие конструкции. Л.;Стройиздат. Ленингр. отд-ние. 1988- 248 с.; ил. ISBN 5-274-00155-6.

Холопов Игорь Серафимович є завідувачем кафедри «Металевих і дерев'яних конструкцій». Наукові інтереси: оптимальне проектування будівельних конструкцій, визначення вітрових навантажень на пакети з труб.

Мосесов Марат Давидович є доцентом кафедри металевих і дерев'яних конструкцій. Наукові інтереси: випробування будівельних конструкцій, механіка руйнування будівельних конструкцій.

Ільдіяров Євген Вікторович є аспірантом кафедри «Металевих і дерев'яних конструкцій». Наукові інтереси: випробування будівельних конструкцій, дослідження тришарових панелей з середнім мінераловатним шаром.

Петров Станіслав Михайлович є аспірантом кафедри металевих та дерев'яних конструкцій. Наукові інтереси: дослідження тришарових панелей з середнім мінераловатним шаром.

Холопов Игорь Серафимович заведующий кафедры металлических и деревянных конструкций. Научные интересы: оптимальное проектирование строительных конструкций, определение ветровых нагрузок на пакеты труб.

Мосесов Марат Давыдович доцент кафедры металлических и деревянных конструкций. Научные интересы: испытание строительных конструкций, механика разрушения строительных конструкций.

Ильдияров Евгений Викторович является аспирантом кафедры «Металлических и Деревянных конструкций». Научные интересы: испытание строительных конструкций, исследование трехслойных панелей с минераловатным средним слоем.

Петров Станислав Михайлович является аспирантом кафедры «Металлических и Деревянных конструкций». Научные интересы: исследование трехслойных панелей с минераловатным средним слоем.

Kholopov Igor Serafymovych is head of the department of metal and wooden structures. His scientific interests are: the optimal designing of building structures, determination of wind loads on the packet of pipes.

Mosesov Marat Davydovich is an associated professor of the Department of Metal and Wooden Structures. His scientific interests are testing of building structures, mechanics of structure failure.

I'l'diyarov Evgen Victorovych is a post-graduate student of the Department of Metal and Wooden Structures. His scientific interests are testing of building structures, investigation of three-layer panels (sandwiches) with a mineral-wool middle layer.

Petrov Stanislav Mykhailovych is a post-graduate student of the Department of Metal and Wooden Structures. His scientific interests are investigation of three-layer (sandwiches) panels with a mineral-wool middle layer.