

В
перепечат
31.01.2020г.

На правах рукописи

Косик Алексей Борисович



**ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ ПОЛОГИХ
ГИПСОКАРТОННЫХ ОБОЛОЧЕК**

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Макеевка – 2020

Работа выполнена на кафедре технологии и организации строительства Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Бармотин Александр Александрович,
директор Государственного предприятия
«Донецкий проектно-изыскательский институт
железнодорожного транспорта
«Донжелдорпроект»

Официальные оппоненты: Ватин Николай Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»,
профессор Высшей школы промышленного,
гражданского и дорожного строительства
Инженерно-строительного института,
г. Санкт-Петербург;

Псюк Виктор Васильевич,
кандидат технических наук, доцент,
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный
технический университет», заведующий
кафедрой строительных конструкций, г. Алчевск.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Крымский федеральный
университет им. В.И. Вернадского»,
г. Симферополь.

Защита состоится «9» апреля 2020 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний учёного совета. Тел. факс: +38 (062) 343-7033, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 01.006.02

Радионов Тимур Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Криволинейные гипсокартонные (ГК) конструкции широко применяются при оформлении интерьеров зданий различного функционального назначения: вокзалов, терминалов, торговых павильонов, учебных аудиторий, холлов общественных учреждений и др. При внедрении в интерьер сложных оболочек, геометрия которых значительно отличается от типовых, проектировщики сталкиваются с проблемой гарантированной обоснованности применения определенных комплектных систем, предусмотренных технической документацией изготовителя и с необходимостью выбора конструктивной схемы несущего каркаса и жесткости ГК оболочки для обеспечения трещиностойкости, как основополагающего критерия сохранения эстетического вида.

Отдельные примеры монтажа крупноразмерных куполов показывают, что с одной стороны, сохраняя принципиальную схему типового решения, размеры куполов увеличивают в 1,5–2,0 раза без подтверждающих расчетов в предположении потенциально существующих запасов надежности. В другом случае, для снижения рисков, проектировщиками закладывается разрезка на деформационные швы, что снижает эстетическую привлекательность конструкции как основы для фактурных покрытий или художественной росписи.

Для сложных ГК конструкций, эксплуатирующихся в неблагоприятных условиях (температурно-влажностные перепады, существенные эксплуатационные прогибы опорных конструкций, ограниченность мест подвески, деформации здания от различных силовых факторов и т.п.), необходимо выполнять численное моделирование их напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочек по обеспечению надежности в пределах гарантированного срока эксплуатации.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с кафедральными темами: К–2–13–11 «Разработка и усовершенствование ресурсосберегающих и безопасных конструктивных и организационно-технологических решений при строительстве, эксплуатации, реконструкции и ликвидации зданий и сооружений в сложных условиях» (№ 0111U008174, 2011–2015 г.); К–2–13–16 «Инновационные энергоресурсосберегающие организационно-технологические процессы возведения и реконструкции зданий и сооружений» (№ 0117D000268, 2016–2020 г.)

Цель исследования: развитие методики оценки НДС тонкостенных крупноразмерных пологих ГК оболочек при различных условиях эксплуатации и разработка рекомендаций по повышению их трещиностойкости на основании исследований ортотропии упругих характеристик ГКП и закономерностей деформирования составных образцов-моделей с различными вариантами усиления.

Задачи исследований:

- выполнить сравнительный анализ нормативных методов определения регламентируемых физико-механических характеристик ГКП;
- разработать предложения по совершенствованию методики эксперимен–

тальных исследований и получить данные о закономерностях деформирования ГКП при изгибе, одноосном растяжении, чистом сдвиге;

- выполнить экспериментальные исследования прочности, трещиностойкости и деформативности одно– и двухслойных ГК образцов–моделей при стандартном и дополнительном армировании стыков и межэлементных соединениях;

- разработать технологичные варианты конструктивных решений ГК тонкостенной оболочки с повышенным пределом трещиностойкости стыков;

- разработать предложения по развитию методики определения НДС тонкостенных крупноразмерных пологих ГК оболочек при различных условиях эксплуатации и рекомендации по повышению их трещиностойкости;

- апробировать результаты экспериментально–теоретических исследований и разработанные рекомендации при численном анализе, проектировании и монтаже крупноразмерной криволинейной полой ГК оболочки.

Объект исследования - крупноразмерные пологие ГК оболочки.

Предмет исследования – напряженно–деформированное состояние и трещиностойкость крупноразмерных пологих ГК оболочек.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- получены закономерности деформирования ГКП при изгибе с использованием специализированного высокотехнологического оборудования фирмы Zwick Roell; получены упругие и прочностные характеристики с учетом ортотропии в ортогональных направлениях, при этом установлено, что ГКП как конструкционно–отделочные плиты имеют относительно высокий предел упругой работы до перехода в пластическую стадию деформирования, что составляет 50–70 % от стадии разрушения; при этом предел прочности при изгибе до 4 раз превышает аналогичный показатель при осевом растяжении;

- усовершенствована и дополнена методика экспериментальных исследований прочностных и деформативных характеристик ГКП: разработаны лабораторные установки по испытаниям на осевое растяжения и чистый сдвиг в комплекте с адаптированной мобильной тензометрической системой с непрерывной регистрацией быстроменяющихся деформаций и предложена универсальная измерительно–силовая установка с возможностью испытания на трех– и четырехточечный изгиб при различных вариациях пролетов, размеров и прочности опытных образцов с фиксацией прогиба вплоть до разрушения;

- получили дальнейшее развитие результаты исследования закономерностей деформирования цельных и составных ГК образцов–моделей при различных видах нагружений; установлены упругие и прочностные характеристики в главных осях ортотропии ГКП при осевом растяжении, чистом сдвиге и изучено изменение прочности, трещиностойкости и деформативности одно– и двухслойных образцов при стандартном и дополнительном армировании стыков и межэлементных соединениях при изгибе и одноосном растяжении;

- предложена методика расчета и проектирования тонкостенных ГК оболочек, в рамках которой обоснованы технологичные варианты конструктивного решения многослойной ГК оболочки с повышенным пределом трещиностойкости стыков и с использованием структурно–

феноменологического подхода обоснована расчетная модель и критерии трещиностойкости гипсокартона, как плоско армированного материала, который в численных методах расчета представляется в виде сплошного однородного ортотропного тела с эквивалентной жесткостью.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что:

- предложена методика расчета которая позволяет достоверно оценивать НДС и проектировать сложные крупноразмерные пологие ГК оболочки;
- результаты экспериментально–теоретических исследований внедрены при расчете и проектировании крупноразмерной эллипсоидной оболочки, размеры которой в несколько раз превышают диаметры типовых куполов «Берлин» и «Мюнхен» и могут быть использованы при разработке технических нормативов и проектной документации по устройству уникальных пологих ГК оболочек;
- внедрены результаты теоретических и экспериментальных исследований в учебный процесс в форме конспекта лекций по дисциплине «Инновационные технологии строительства с применением новых материалов» при подготовке магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» по программе «Теория и практика организационно-технологических и экономических решений».

Методология и методы исследований.

- экспериментальные исследования образцов–моделей выполнены с использованием специализированного высокотехнологического оборудования фирмы Zwick Roell для испытаний ГКП и ряда опытных силовых установок в комплексе со стандартными механическими приборами и адаптированной мобильной измерительной тензометрической системой для непрерывной регистрации деформаций на всех этапах нагружения;
- статистические методы обработки экспериментальных данных при испытаниях ГК опытных образцов при изгибе, растяжении и сдвиге;
- численный метод конечных элементов (МКЭ) для оценки НДС и проектирования пологих строительных оболочек.

Положения, выносимые на защиту:

- предложения по совершенствованию методики экспериментальных исследований прочности и деформативности ГК элементов при изгибе, одноосном растяжении и чистом сдвиге;
- установленные закономерности деформирования ГКП и результаты экспериментальных исследований упругих и прочностных характеристик в главных осях ортотропии;
- результаты экспериментальных исследований прочности, трещиностойкости и деформативности одно– и двухслойных образцов при стандартном и дополнительном армировании стыков и межэлементных соединениях;
- рекомендации по расчету НДС тонкостенных многослойных пологих ГК оболочек с критериями оценки трещиностойкости стыков;
- результаты численных исследований крупноразмерной эллипсоидной ГК оболочки с повышенным пределом трещиностойкости в условиях ограниченности мест подвески, эксплуатационных прогибов опорной конструкции и температурных перепадов.

Личный вклад соискателя заключается в выполнении экспериментальных исследований, анализе и обработке полученных результатов, разработке и внедрении рекомендаций при проектировании и монтаже крупноразмерной эллипсоидной ГК оболочки в рекреационной зоне Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Основные научные результаты диссертации получены соискателем лично. Отдельные составляющие теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, которые указаны в перечне научных публикаций.

Степень достоверности результатов диссертации.

Достоверность и обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов представленных в работе подтверждаются экспериментально–теоретическими исследованиями с применением современного специализированного оборудования и апробированных вычислительных программных комплексов для численного анализа НДС оболочек, соответствия опытных данных с результатами численного анализа.

Апробация диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях ДонНАСА в 2008-2018 годах, на международном симпозиуме «Инновация в области применения гипса в строительстве» (г. Москва, МГСУ, 31 мая – 1 июня 2012 г.), на международной научно-практической конференции «Сухое строительство: товароведческие аспекты развития отрасли» (1–2 ноября 2012 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором в соавторстве в 10 научных изданиях, в том числе 4 публикации – в рецензируемых научных изданиях, 3 публикации – по материалам научных конференций, 3 публикации – в других изданиях.

Общий объем публикаций – 12,24 п.л., из которых 4,47 п.л. принадлежат лично автору.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти основных разделов, выводов, списка использованных источников (169 наименований) и приложений. Общий объем работы составляет **151** страница, в том числе **112** страниц основного текста, **23** полных страниц с рисунками и таблицами, **14** страниц списка использованных источников, **2** страницы приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическое значение работы.

В первом разделе выполнен критический анализ нормативных требований к ГКП, которые представляют собой листовой материал, полученный по непрерывной конвейерной технологии и формируется из армированного минеральным волокном гипсового сердечника и внешнего армирования в виде высококачественного многослойного картона ($t \geq 0,6$ мм). Физико–механические

характеристики регламентируются европейским стандартом DIN EN 520:2005-03 и межгосударственным ГОСТ 6266-97.

Для изготовления криволинейных конструкций с нулевой и положительной гауссовской кривизной, в зависимости от возрастания радиусов кривизны, используют технологию фрезерования, технологиигиба в увлажненном и воздушно–сухом состояниях. Типовые пологие ($f \leq 0,2d$) ГК купола Кнауф типа «Берлин» и «Мюнхен» ограничены размерами ($d \leq 3,6$ м) и монтируются по ребристо-кольцевой схеме: основной несущий каркас из профильной стальной трубы и второстепенный из тонкостенных прессованных оцинкованных профилей. Сопряжение профилей к основному каркасу выполняется с помощью профильных соединителей на самонарезных винтах.

Учитывая, что ГКП относится к композиционным тонкостенным ($6,5 \leq t \leq 25$ мм) конструкционно-отделочным плитам, был выполнен анализ основных методов определения НДС конструкций из подобных анизотропных композиционных материалов. На уровне микромеханики неоднородность композитов рассматривается как матрица состоящая из волокон и связующего, на макроуровне неоднородность композита обобщается за счет приведенной анизотропной среды и определения эффективных упругих характеристик. Замена композита однородным анизотропным телом целесообразна для решения задач жесткости пластин и оболочек.

Для определения НДС используется теория тонких оболочек, для расчета которых принимаются допущения, что материал подчиняется закону Гука и перемещения точек оболочки малы по сравнению с ее толщиной. Справедлива гипотеза плоских сечений, при которой сечения, нормальные к срединной поверхности, остаются прямолинейными, напряжения, ортогональные к срединной поверхности, пренебрежительно малы. Для геометрически однородных и гладких оболочек, для сокращения числа разрешающих уравнений используют безмоментную теорию, при которой изгибающие моменты и поперечные силы отсутствуют, а нормальные перемещения являются функцией напряжений, направленных вдоль срединной поверхности.

В сопоставлении с классическими методами, приведены преимущества численных методов инженерного анализа конструкций, базируемых на отсутствии значительных затруднений по степени дискретизации континуальных моделей, включая геометрию оболочек любой степени сложности.

Для построения модели деформирования ГКП при плосконапряженном состоянии необходимо получить упругие характеристики в ортогональных направлениях, для изучения которых отсутствуют рекомендации по проведению испытаний и методам регистрации линейных деформаций.

Во втором разделе в соответствии со структурно-логической схемой исследований (рис. 1) приведены методики экспериментальных исследований прочности и деформативности стандартных и трещиностойкости составных ГК элементов при одноосном растяжении, изгибе и чистом сдвиге.

Исследования прочности при изгибе стандартных образцов выполнены по отечественным и европейским стандартам, различия которых заключаются в схемах нагружения и геометрии испытываемых образцов (табл. 1).



Рис. 1 Структурно-логическая схема исследований определения НДС ГК оболочек

Испытания стандартных образцов $t=12,5$ мм выполнено на трехточечный изгиб по ГОСТ 6266-97 и по DIN EN 520. Образцы вырезались из ГКП в продольном и поперечном направлениях (тип А, тип Б). Испытания выполнено на специализированном оборудовании Zwick Roell.

Сравнение методик испытания ГКП

Таблица 1.

| ГОСТ 6266-97 | Нормируемая разрушающая нагрузка при изгибе | DIN EN 520:2005 |
|---|---|---|
| Тип А/ Тип Б =600/180 Н | | Тип А/ Тип Б =550/210 Н |
| $a=(40t+100+5)$; $b=(400+5)$ | Размеры образцов, мм | $a=(400\pm 5)$; $b=(300\pm 5)$ |
|  |  |  |

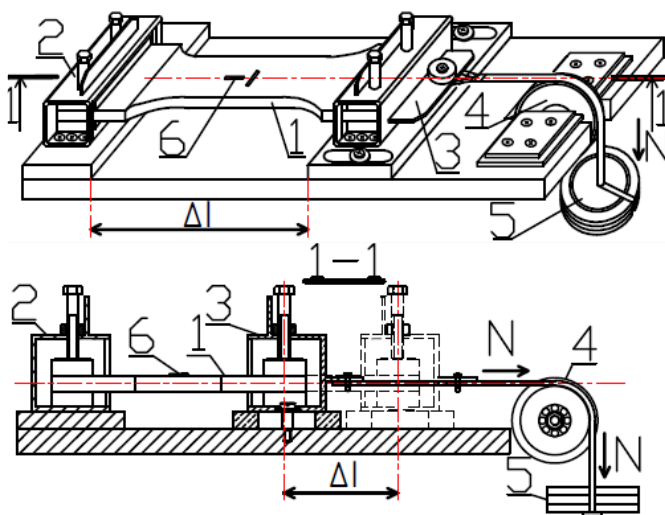


Рис. 2. Схема установки для испытания на осевое растяжение
1- испытательный образец-восьмерка ($b^{\text{раб}}=60$ мм); 2, 3- траверсы; 4- блок;
5- грузы, 6- тензорезисторы.

Для определения полного набора упругих характеристик проводили растяжение ГК образцов $t=12,5$ мм на специально сконструированной установке (рис. 2). В связи с отсутствием нормативов, подготовку образцов (тип А, тип Б) и нагружение осуществляли по аналогии с испытаниями на изгиб.

Выполнено обоснование оптимального комплекта измерительного оборудования. В качестве альтернативного варианта взамен СИИТ-3, для замера и регистрации быстроменяющихся линейных деформаций в режиме реального времени была

адаптирована и апробирована мобильная измерительная тензометрическая система (рис. 3) на основе оборудования компании ОВЕН СПб, которое успешно зарекомендовало себя в промышленных системах автоматизации.

Растяжение выполнено на образцах восьмерках с торцевыми накладками

в зоне захватов. При испытаниях фиксировалась нагрузка вплоть до разрушения, продольные и поперечные деформации ε_1 и ε_2 соответственно. По результатам испытаний образцов (тип А, Б) определялись модули упругости E_1 , E_2 и коэффициенты Пуассона ν_{12} , ν_{21} .

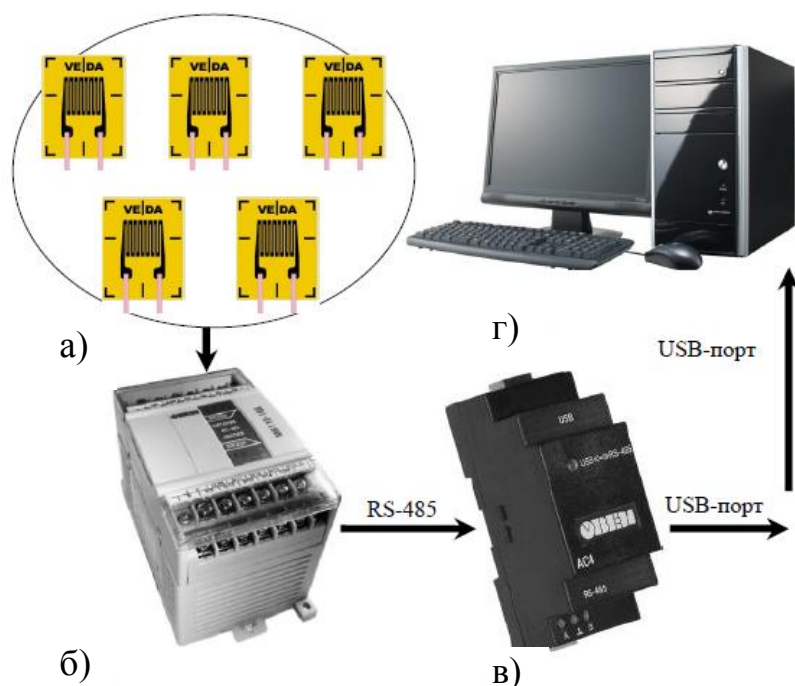


Рис.3. Мобильная тензометрическая система с непрерывной регистрацией деформаций
а) тензорезисторы «Веда»; б) модуль ввода сигналов тензорезисторов; в) преобразователь интерфейсов;
г) ПК с операционной системой Windows.

Испытания на сдвиг (рис. 4) выполнены в заданных условиях деформирования в шарнирной раме с жестко закрепленным в ней образцом с квадратным рабочим полем размером 200×200 мм. Образцы вырезались из ГКП в двух направлениях, чтобы

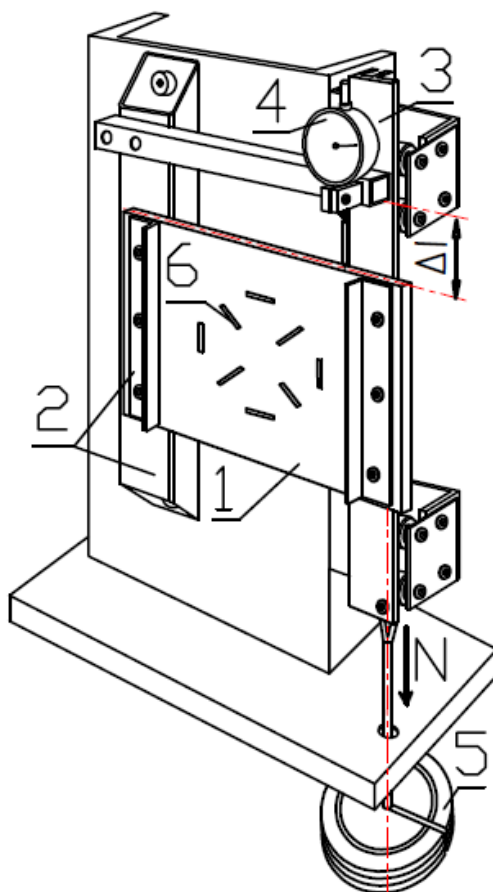


Рис. 4. Испытания на сдвиг
1- образец; 2- крепления;
3- подвижная направляющая;
4 – индикатор ч/т 0,001 мм;
5 - грузы 6 –тензорезисторы.

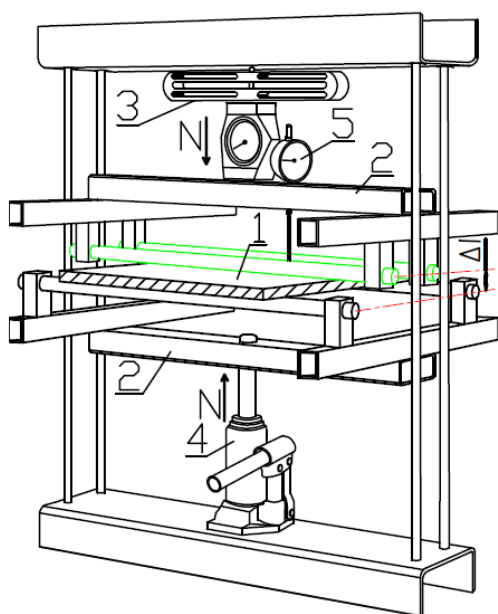


Рис. 5 Установки для
испытания стыков на изгиб:
1- образец; 2, 5 – траверсы
3–динамометр; 4–гидродомкрат.

главные оси симметрии материала были параллельны сторонам рабочего поля образца. Испытания проводили при ступенчато возрастающей нагрузке $\approx 0,05 P_{\text{раз}}$. В процессе испытания фиксировали величину нагрузки и деформации сдвига при пределе пропорциональности и разрушения.

Для изучения закономерностей НДС составных элементов со стыком согласно DIN EN 13963-2005-08 выполнены исследования по определению предела прочности, трещиностойкости и деформативности как однослойных так и двухслойных ГК элементов при стандартном и дополнительном армировании стыков и межэлементном соединениях (табл. 2).

Для заделки стыков между использовалась шпатлевка «Fugenfuller» Knauf. Формирование стыков выполнено на отрезной кромке, с фаской под углом 45° на глубину $1/3$ толщины ГКП. Для армирования стыков использована сетчатая армирующая лента «Knauf Gips-KG». Изготовленные образцы высушивались при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(50 \pm 5)\%$ в течение семи суток в лабораторных условиях. При дополнительном армировании поверхность образцов усиливалась стеклохолстом на поливинилацетатном универсальном клее ПВА-МБ. Для выполнения экспериментальных исследований запроектирована и изготовлена специальная установка (рис. 5), позволяющая испытывать на трех- и четырехточечный изгиб различные типы ГК элементов (одно – и двухслойные). Усилие передавалось через траверсу от гидродомкрата и фиксировалось динамометром. Прогиб (перемещение траверс относительно друг друга) фиксировался прогибомером с индикатором часового типа 0.01мм. Опытные образцы подвергались непрерывно возрастающей нагрузке со скоростью 250 ± 125 Н/мин. В ходе испытания всех образцов осуществлялась фиксация нагрузки, момента трещинообразования и прогиба вплоть до разрушения.

Анализ опытов при осевом растяжении (рис. 7 а) свидетельствует о том, что модуль упругости и коэффициент Пуассона у продольных образцов на 10–15% выше, чем в поперечных и достигает $E_1=2,5$ ГПа, $\nu_{12}=0,25$ и $E_2=2,2$ ГПа, $\nu_{21}=0,22$, соответственно по главным осям ортотропии.

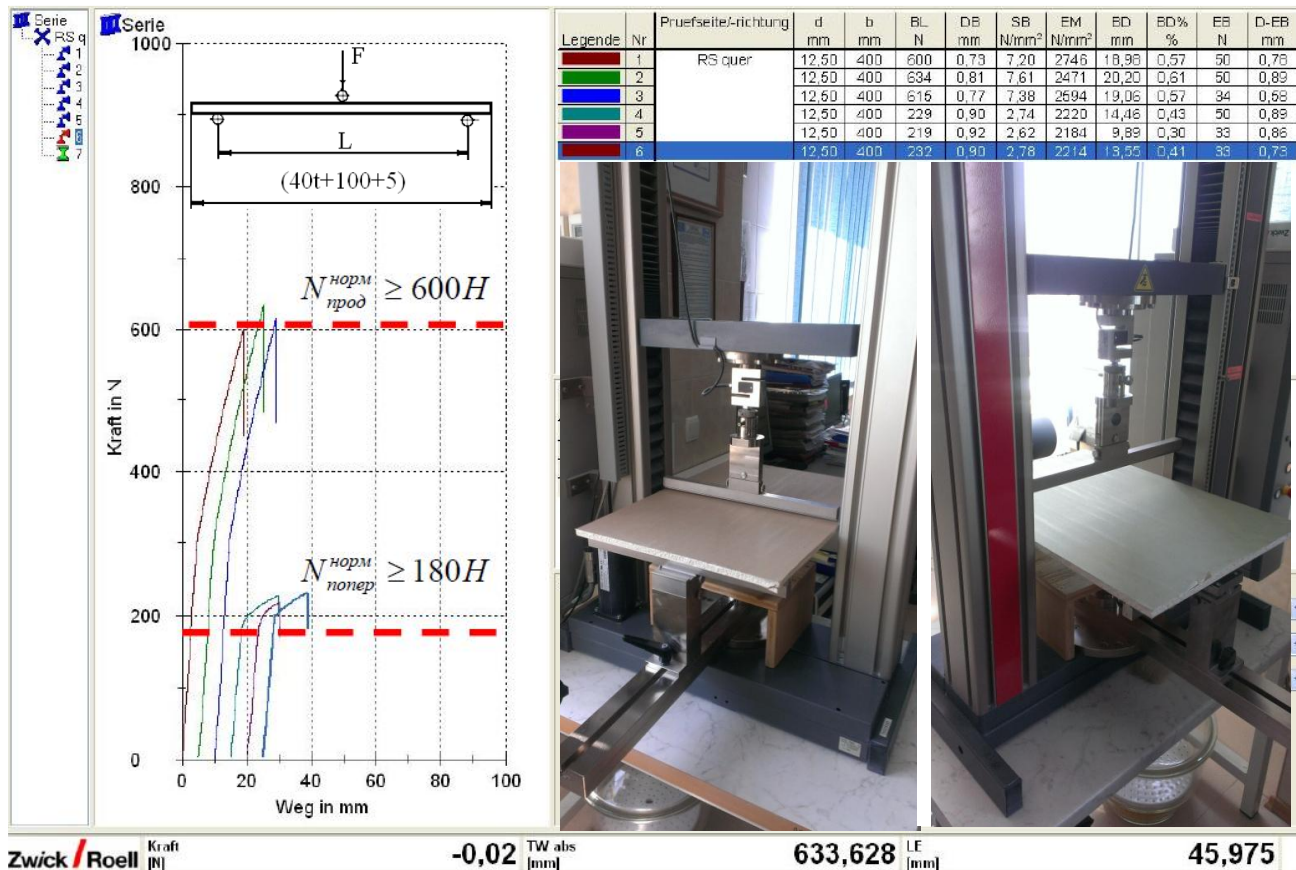


Рис. 6. Результаты испытания по ГОСТ 6266-97 при переменном пролете продольных и поперечных образцов 12,5 мм на оборудовании Zwick Roell.

При этом соблюдается известное условие симметрии упругих постоянных $E_1 \cdot \nu_{21} = E_2 \cdot \nu_{12}$. Предел прочности при растяжении для продольных образцов составляет до 1,8 мПа и до 0,9 мПа у поперечных. Значительное расхождение прочности при растяжении и изгибе обусловлено хрупкостью гипсового сердечника. Предел упругой работы для всех типов образцов составляет до 55-65 % от разрушающего усилия.

Испытания на сдвиг показали, что модули сдвига для образцов тип А, Б при пределе пропорциональности отличаются незначительно до 5 % (рис. 7 б) и равны $G = 1,05 - 1,11$ ГПа соответственно. При этом прочность при сдвиге выше в 1.7 раза у образцов типа А. Вплоть до разрушения деформирование всех типов характеризуется практически линейным характером. При нагрузке 50-60% от разрушающей зафиксировано характерное потрескивание без визуально видимых трещин. Разрушение образца проходит по плоскостям параллельным приложению разрушающей нагрузки.

По результатам измерений определены усредненные значения напряжений и деформаций, а также доверительные интервалы на основе критерия Стьюдента с заданной вероятностью $1 - \alpha = 0,95$.

Испытания составных элементов показали (рис. 8):

– в пределах упругой работы, двухслойные составные элементы, несмотря на межэлементное клеевое и винтовое соединения, не работают как полноценно

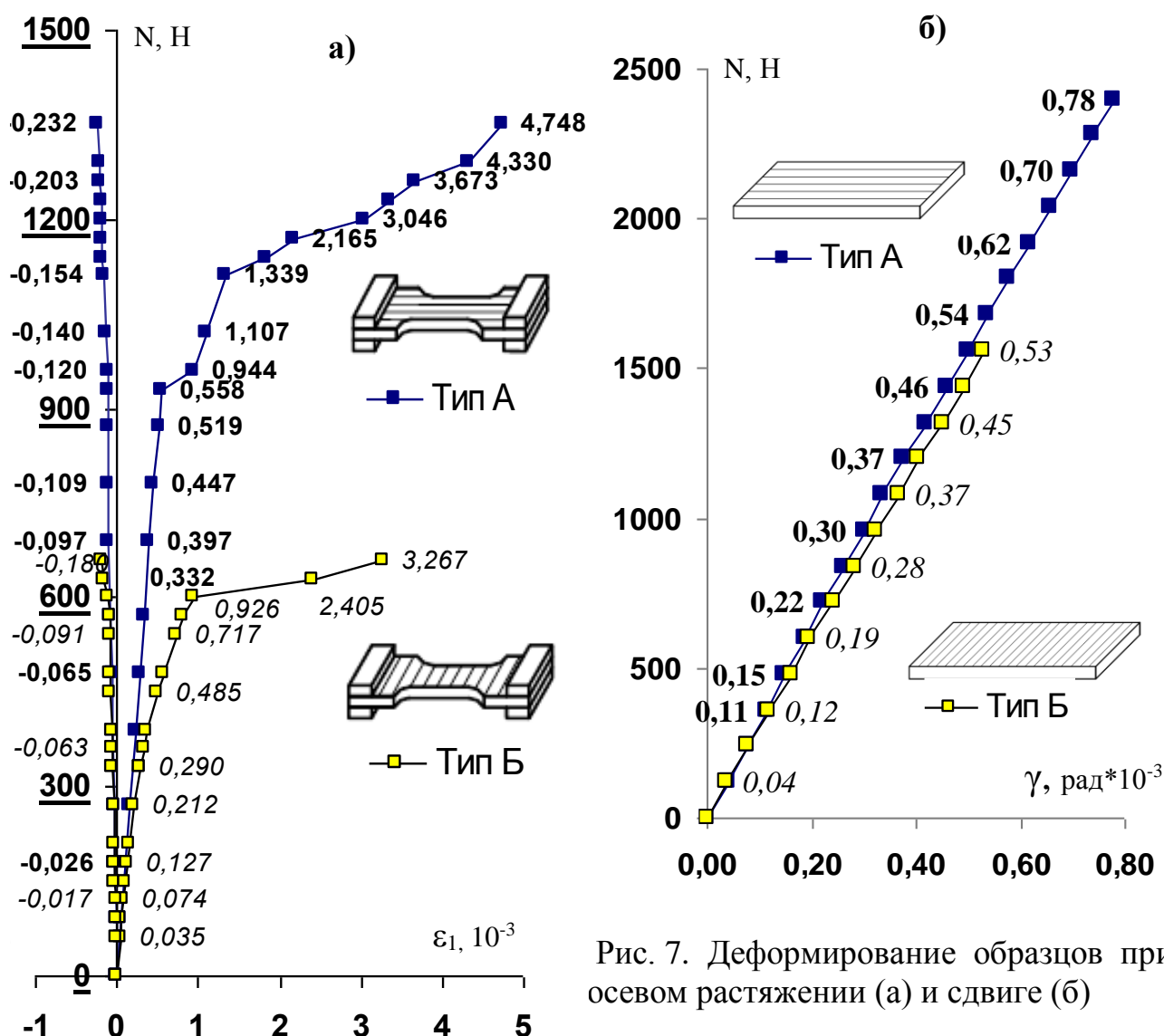


Рис. 7. Деформирование образцов при осевом растяжении (а) и сдвиге (б)

цельные элементы; о наличии частичной податливости свидетельствует отсутствие пропорционального уменьшения прогиба при увеличении высоты сечения по сравнению с однослойными образцами;

– на втором этапе наблюдается развитие микротрещин в гипсовом сердечнике, что подтверждается появлением переломов на графиках $N-f$, при этом в опытах начало микроразрушений фиксировалось микрометром и возникновением сопровождающего характерного «потрескивания» образца;

– образцы армированные стеклохолстом вплоть до разрушения деформировались без видимых трещин на лицевых гранях.

Самый низкий предел прочности отмечен для образцов типа 1.1, который в сравнении с образцами (тип А, Б) составил до 20% и 73% соответственно. Как для однослойных (тип 1.1) так и двухслойных образцов со стандартным стыком (тип 2.1) предел трещиностойкости составил в среднем 33–42% от предела их прочности на изгиб (табл. 3). Модуль упругости (тип 1.1) снижается незначительно до 7 % по сравнению с цельными образцами (тип А, Б).

Усиление стеклохолстом (тип 1.2, 2.4) приводит к резкому возрастанию предела трещиностойкости и увеличению до 10 % модуля упругости. При этом прочность и трещиностойкость образцов со стеклохолстом (тип 1.2) превышают идентичные характеристики поперечных цельных образцов типа Б в 1.8 раза.

В двухслойных образцах с одинарным усилением (тип 22, 23) предел прочности для каждого случая увеличился незначительно в среднем до 6%. В одном случае это объясняется тем, что усиление стыка стеклохолстом не компенсирует снижение общей жесткости составного сечения, вследствие податливости винтового соединения при сдвиговых усилиях. В другом, несмотря на «идеальное» сцепление слоев при винтовом и клеевом соединениях, «слабым» местом является стык со стандартным материалом. Наличие одновременно двух факторов усиления приводит к значительному увеличению прочности в 1,7 раза. При этом трещиностойкость достигает предела прочности при изгибе и разрушение образца происходит как по стыку так и по цельному сечению.

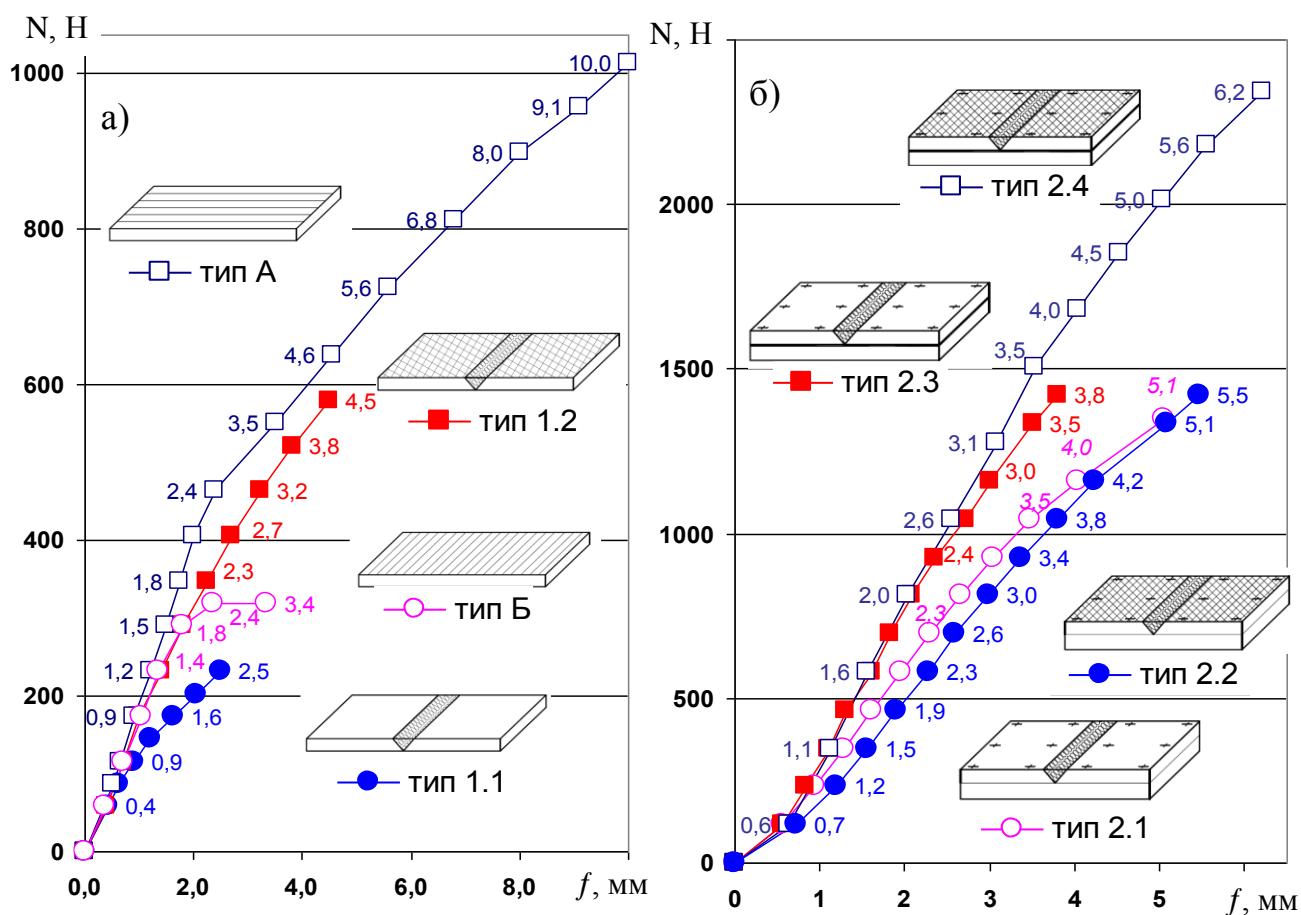


Рис. 8. Характер деформирования при изгибе однослойных (а) и двухслойных (б) ГК элементов с различными вариантами армирования и типом соединения.

Нагрузка при изгибе при образовании трещин и разрушения Таблица 3.

| N/тип | Тип А | Тип Б | Тип 1.1 | Тип 1.2 | Тип 2.1 | Тип 2.2 | Тип 2.3 | Тип 2.4 |
|----------------------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $N_{изг}^{трещ}$, Н | 1015 | 319 | 98 | 580* | 429 | 1420* | 464 | 2343* |
| $N_{изг}^{max}$, Н | 1015 | 319 | 232 | 580 | 1348 | 1420 | 1422 | 2343 |

Экспериментальные исследования показали, что для крупноразмерных ГК оболочек наиболее рациональным и технологичным является использование двухслойной конструкции с двойным усилением в виде одновременного использования клеевого и винтового соединений, и дополнительного армирования в виде стеклохолста, главным отличием которых является достижение предела трещиностойкости до предела прочности при растяжении.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования позволили получить необходимые данные к расчету.

В четвертом разделе приведена общая методика (рис. 9) расчета пологих ГК оболочек, базируемая на структурно–феноменологическом принципе.

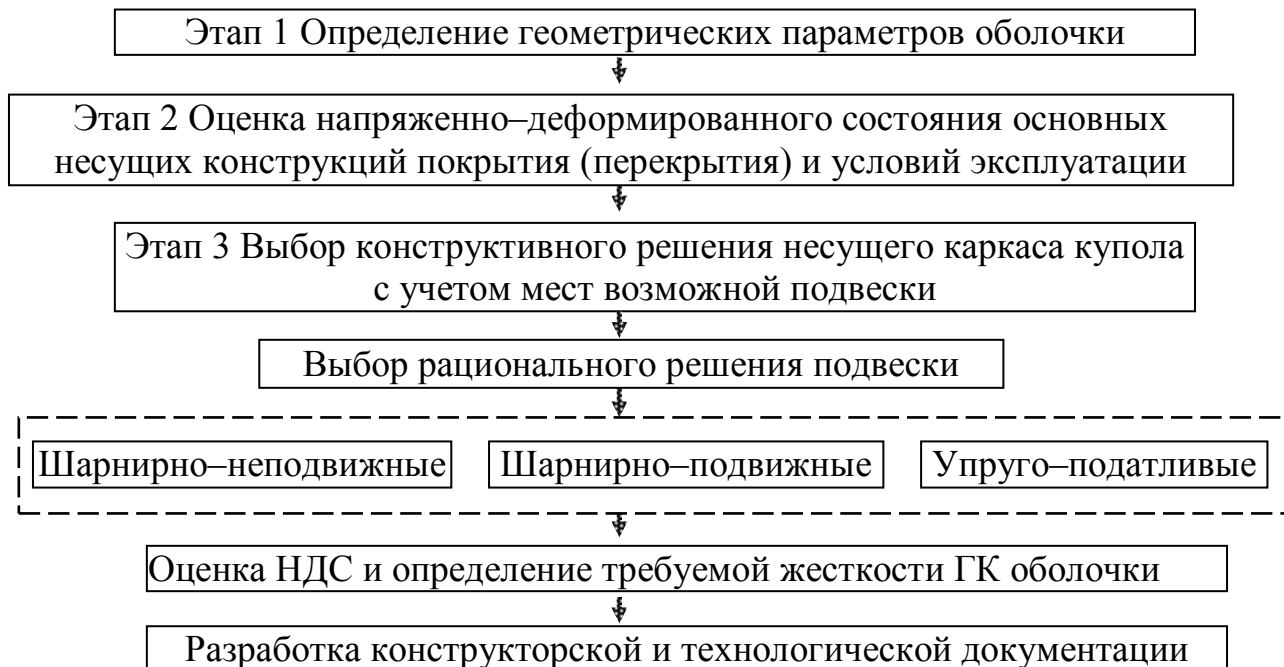


Рис. 9 Алгоритм расчета и проектирования крупноразмерных пологих ГК оболочек

Основные предпосылки и допущения:

- плоско армированный материал представляет собой сплошное макроскопически однородное ортотропное тело (рис.10);
- основной материал – гипсовый сердечник и армирующий картон линейно упруги и однородны: связь между деформациями и напряжениями в связующем и арматуре подчиняется закону Гука;
- между сердечником и армирующим картоном идеальное сцепление;
- ГК оболочка работает в условиях плоского напряженного состояния, дополнительные напряжения, ввиду различных значений коэффициентов Пуассона для гипсового сердечника и армирующего картона, ничтожно малы.

Расчеты показывают, что в пределах упругой работы частичная податливость двухслойных составных образцов может быть учтена путем перехода к однородному ортотропному телу, подчиняющемуся закону Гука.

Для перехода к однородному ортотропному эквивалентному телу обладающего упругими характеристиками E_1 , E_2 , μ_{12} , μ_{21} , G_{12} определяемых при одноосном растяжении и сдвиге стандартных цельных образцов необходим

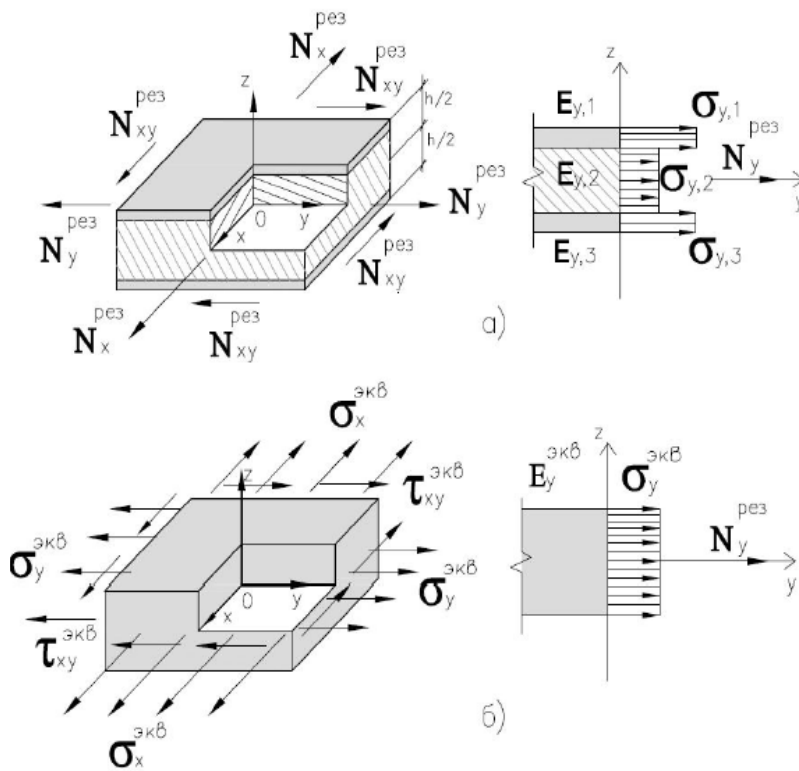


Рис. 10. Переход от фактической к расчетной модели ГКП как слоистого композитного материала при плоском напряженном состоянии

предела прочности. При этом ГКП имеет различные прочностные и деформационные характеристики в продольном и поперечном направлениях:

$$R_1^p = \sigma_{mp,1}^p > R_2^p = \sigma_{mp,2}^p$$

$$R_1^{изг} = \sigma_{mp,1}^{изг} > R_2^{изг} = \sigma_{mp,2}^{изг}$$

где $R_1^p, R_2^p, \sigma_{mp,1}^p, \sigma_{mp,2}^p$ – пределы прочности и трещиностойкости при одноосном растяжении (р) в продольном и поперечном направлениях (1,2).

$R_1^{изг}, R_2^{изг}, \sigma_{mp,1}^{изг}, \sigma_{mp,2}^{изг}$ – то же при изгибе.

Для обеспечения трещиностойкости важным является установление уровня допустимых расчетных напряжений в материале при плосконапряженном состоянии, который предлагается ограничивать этапом начала развития неупругих деформаций.

$$\sigma_{mp,1}^p > \sigma_{расч,1}^p = 1,6 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{mp,2}^p > \sigma_{расч,2}^p = 1,1 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{mp,1}^{изг} > \sigma_{расч,1}^{изг} = 6,0 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{mp,2}^{изг} > \sigma_{расч,2}^{изг} = 4,0 \text{ МПа}$$

где $\sigma_{расч,1}^p, \sigma_{расч,2}^p, \sigma_{расч,1}^{изг}, \sigma_{расч,2}^{изг}$ – расчетные значения предела трещиностойкости при одноосном растяжении и изгибе в продольном и поперечном направлениях.

Для решения практических задач рекомендуется ограничиваться обеспечением трещиностойкости в поперечном направлении. Трещиностойкость считается обеспеченной, если эквивалентные напряжения в

подбор эквивалентной жесткости, который заключается в определении эквивалентной толщины при неизменных упругих константах.

При подборе эквивалентной жесткости за основной критерий принималась абсолютная ошибка аппроксимации, которая находилась в пределах до 12 %. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что наиболее рациональной является корректировка толщины эквивалентного тела равная 15,5 мм. При двойном усилении предел трещиностойкости достигает

предела прочности. При этом ГКП имеет различные прочностные и деформационные характеристики в продольном и поперечном направлениях:

в срединных $\sigma_{\text{экв}}^{cp}$ и крайних $\sigma_{\text{экв}}^{кр}$ слоях оболочки не превышают расчетных значений трещиностойкости в поперечном направлении: для срединного слоя $\sigma_{\text{экв}}^{cp} \leq \sigma_{\text{расч}2}^p = 1,1$ МПа, для крайних слоев $\sigma_{\text{экв}}^{кр} \leq \sigma_{\text{расч}2}^{usz} = 4,0$ МПа.

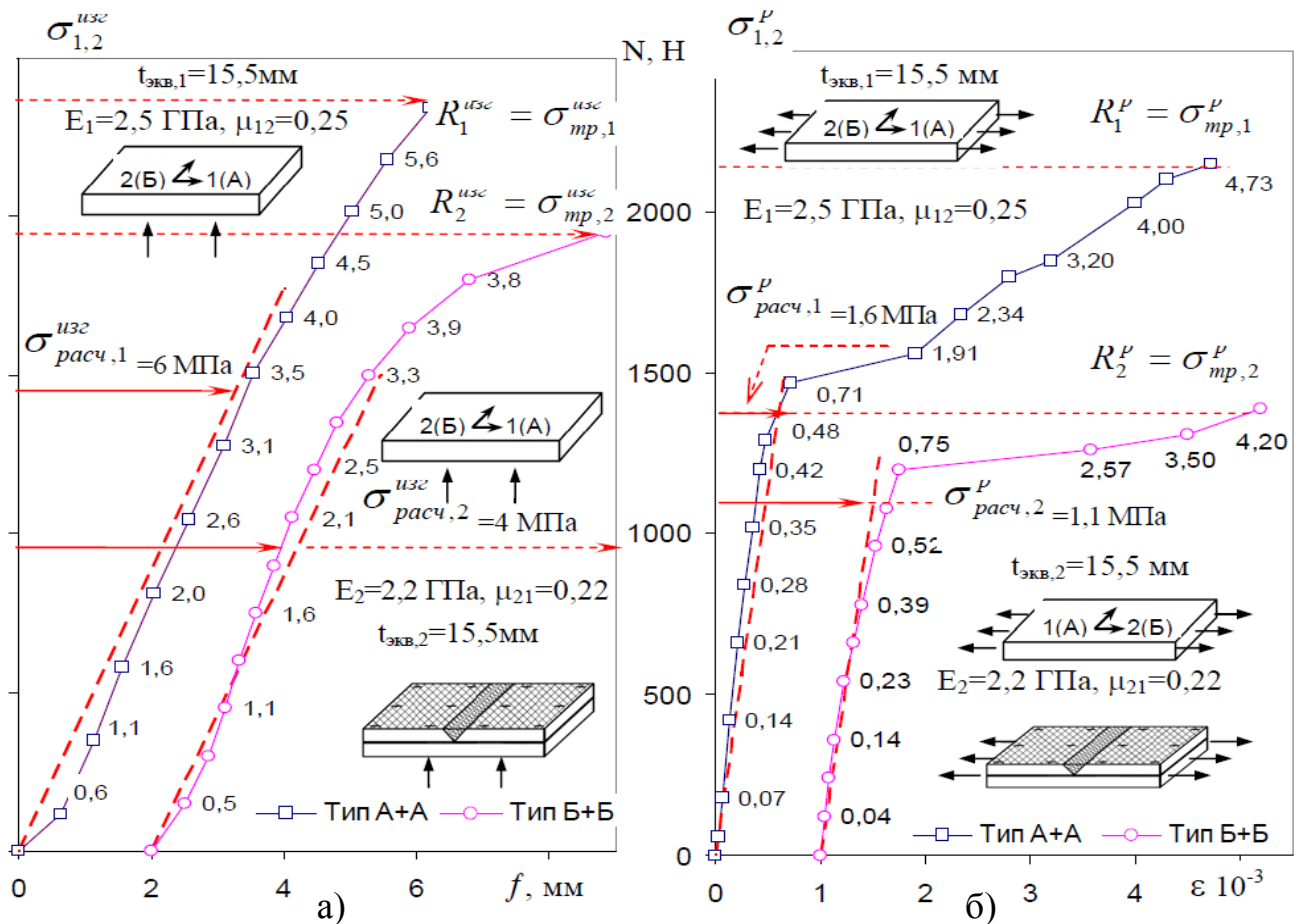


Рис.11 Сопоставление экспериментальных данных при изгибе (а) и растяжении (б) ГК продольных и поперечных двухслойных образцов с расчетными по SCAD с приведенной эквивалентной жесткостью при $t=15,5$ мм.

Расчеты показывают, что для определения эквивалентных напряжений при плоском напряженном состоянии целесообразно использование как первой, так и четвертой теорий прочности. Для анализа НДС оболочек с различной сложностью конфигурации наиболее целесообразно использование МКЭ, который позволяет проводить анализ, основанный на вариационных принципах механики деформируемого твердого тела. Построение дискретных моделей может быть как с использованием более простых плоских элементов, так и криволинейных. Эффективность использования различных КЭ во многом зависит от задачи исследований, пологости и функции кривизны оболочек.

Для формирования разрешающих уравнений конечно-элементной модели используются энергетические принципы и общеизвестные физические уравнения закона Гука для плоского напряженного состояния ортотропного тела.

Разработанные предложения по развитию методики расчета и критерии оценки трещиностойкости позволяет проектировщикам более достоверно оценивать НДС тонкостенных крупноразмерных пологих ГК оболочек.

В пятом разделе на основе полученных экспериментально-теоретических результатов выполнены численные исследования с целью проектирования крупноразмерной эллипсоидной оболочки в рекреационной зоне первого учебного корпуса Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (рис 12). Исходными данными для расчета являются габариты рекреационной зоны главного учебного корпуса. Ширина здания в осях 1–4 составляет 16,0 м, длина в осях А-Е – 30,0 м (рис. 1). Район строительства объекта: по снегу – V с нормативным весом снегового покрова $p_0=1.5 \text{ кН/м}^2$; по ветру – III с нормативным напором – $w_0=0,5 \text{ кН/м}^2$.

Учитывая размеры эллипсоидной оболочки ($2a=14.3 \text{ м}$, $2b=8,7 \text{ м}$) и конструктивное решение стропильного покрытия с ограниченным количеством мест для возможной подвески, пришлось отойти от типового решения купольных пологих систем Кнауф типа «Берлин» и «Мюнхен» и запроектировать несущий каркас из серповидных изогнутых ферм с горизонтальными решетчатыми связями для восприятия температурных перепадов (рис.12). Расчет несущих конструкций выполнен по первой и второй группе предельных состояний.

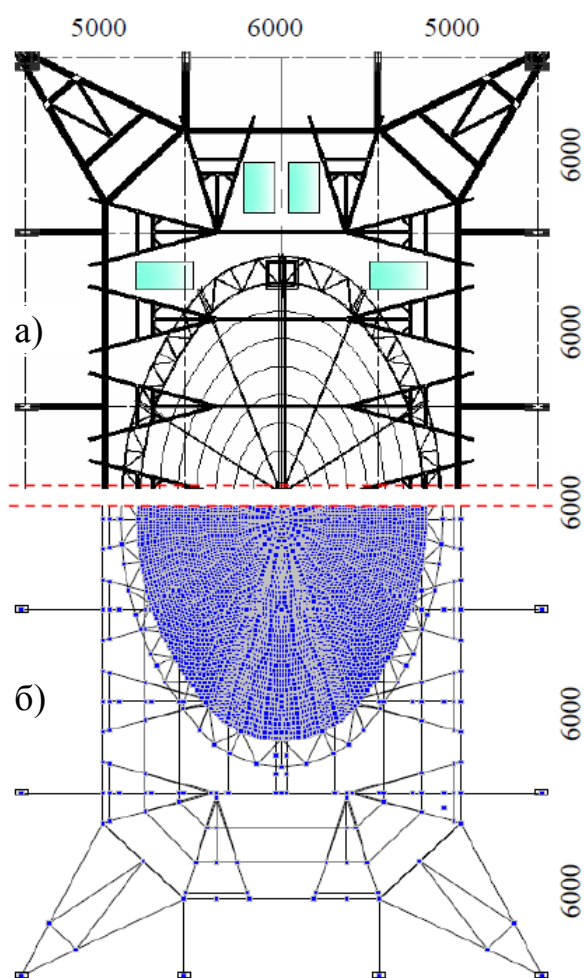


Рис.12. Конструктивное решение (а) и расчетная модель покрытия (б)

Для расчета использован программный комплекс «SCAD Office». На основании расчета была запроектирована оболочка положительной гауссовой кривизны (тип В рис. 10). Нижний и верхний пояс радиальных ферм, кольцевые элементы пространственной оболочки запроектированы из стальной квадратной трубы $4 \times 3 \text{ мм}$, а элементы решетки ферм и горизонтальных связей из трубы 25×2 . На втором этапе был выполнен расчет тонкостенной ГК оболочки. Оболочка смоделирована четырехугольными объемными КЭ, шаг дискретизации вдоль кольцевого и радиального направлений составлял $0.1 \div 0.14 \text{ м}$, что обеспечивает соотношение сторон не более 2 и необходимую точность расчета. Для обеспечения совместности деформаций, разбиение оболочки в узлах примыкания к радиальным и кольцевым ребрам, выполнялся с помощью треугольных элементов.

Учитывая наличие температурных воздействий и существенного прогиба конструкций базового покрытия от снеговой нагрузки (рис. 13) при численном моделировании использованы три типа подвесов для крепления несущего каркаса купола к конструкциям покрытия:– шарнирно–неподвижные; шарнирно–

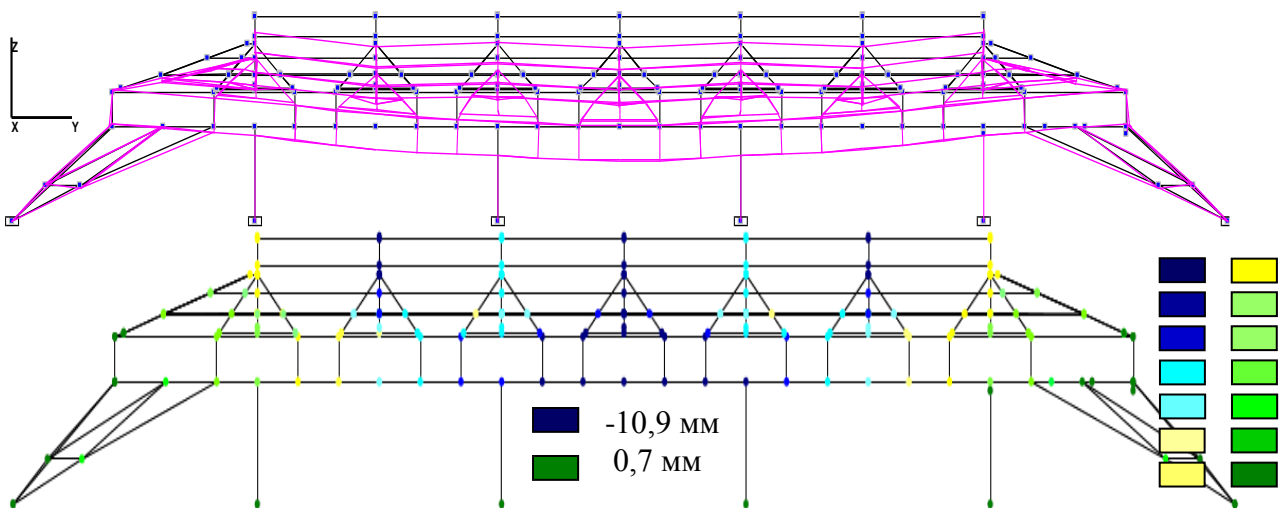
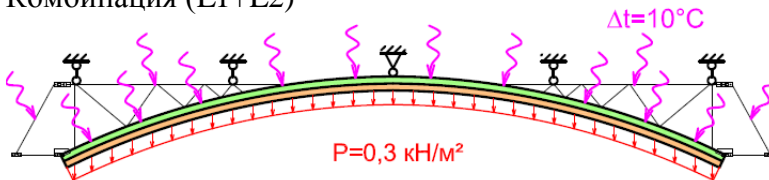


Рис. 13 Прогнозируемые деформации покрытия от снеговой нагрузки

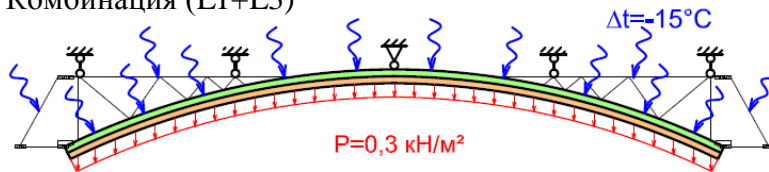
подвижные; упруго-податливые с жесткостью в вертикальном направлении эквивалентно моделирующая поведение пластинчатого шарнира, в местах крепления несущего каркаса купола к стропильным конструкциям покрытия. При расчете были приняты следующие виды статических загрузений (рис. 14):

– постоянная нагрузка от собственного веса (L1);

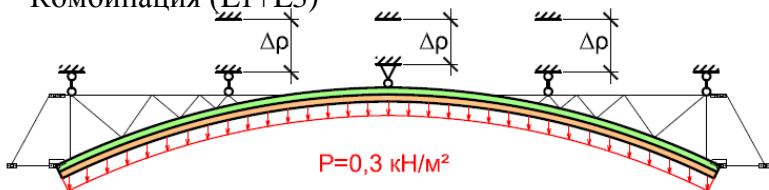
Комбинация (L1+L2)



Комбинация (L1+L3)



Комбинация (L1+L3)



Комбинация (L1+L3+L4)

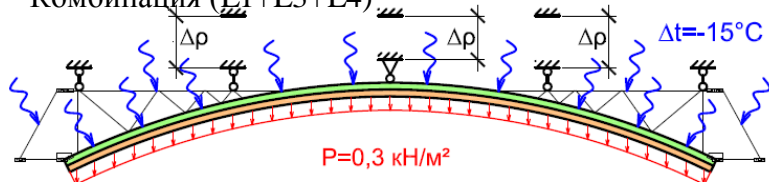


Рис. 14 Прогнозируемые комбинации нагружений в процессе эксплуатации ГК оболочки

– переменная кратковременная от температурного воздействия в летний период эксплуатации (L2);

– переменная кратковременная вследствие прогиба конструкций покрытия от снеговой нагрузки (L3);

– эпизодическая нагрузка, вызванная аварийным температурным перепадом $\Delta t = -15^\circ\text{C}$ в зимний период эксплуатации (L4).

Результаты численных исследований и анализ полей приведенных напряжений (рис. 15) показали:

– наиболее неблагоприятная комбинация нагружений (L1+L3+L4);

– схема с шарнирно-неподвижными опорами более предпочтительна при

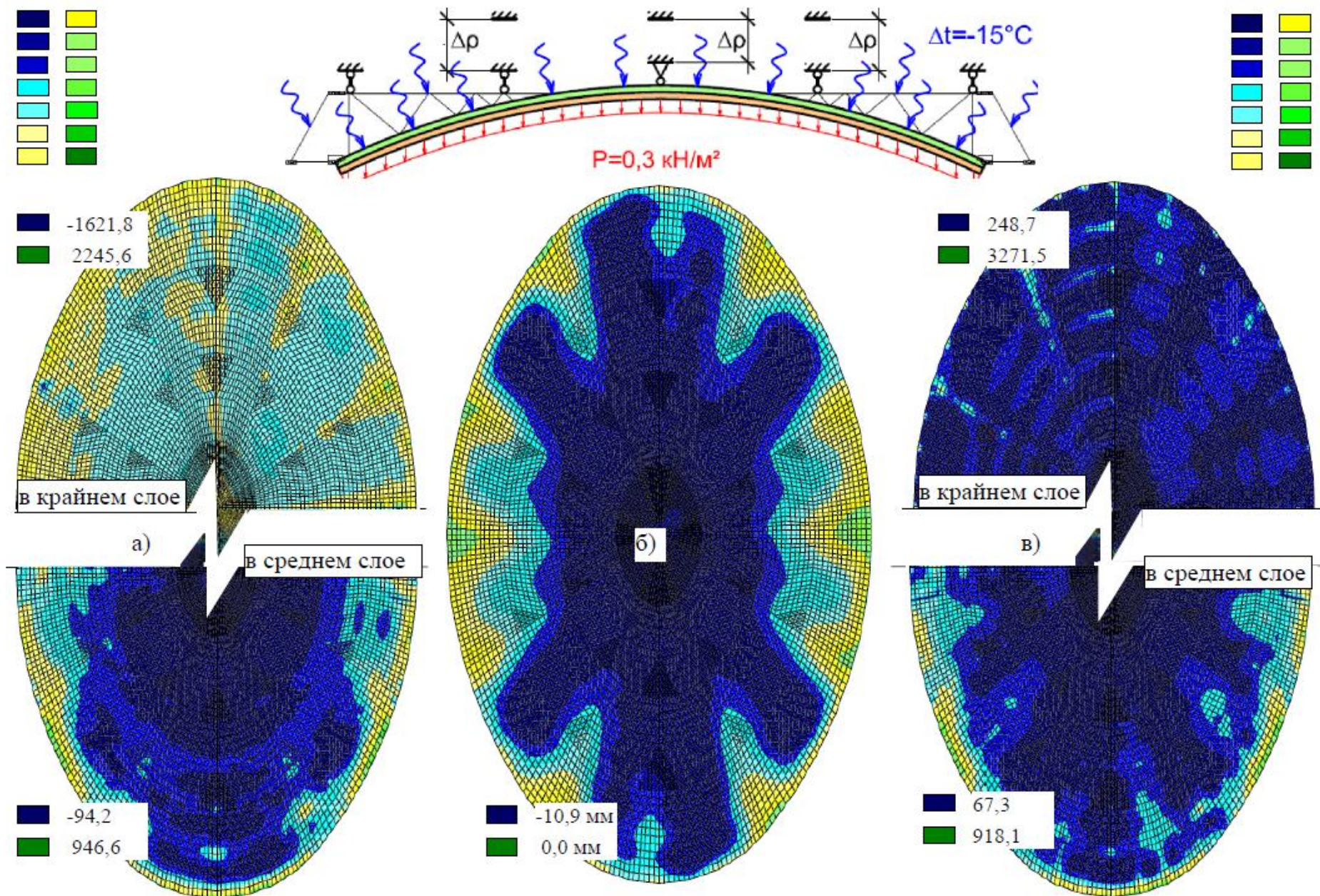


Рис. 15 Поля приведенных напряжений в кН/м^2 по I и IV теории прочности (а, в) и поля деформаций (б) от действия собственного веса, прогиба покрытия от снега, аварийного температурного перепада $\Delta t = -15^\circ\text{C}$ в зимний период эксплуатации

отсутствии температурных перепадов и деформаций вышележащего покрытия;

- при температурных воздействиях и вероятного эксплуатационного прогиба стропильного покрытия, использование пластинчатого шарнира для несущего каркаса купола позволяет в местах опорных закреплений до 1.5 раза снизить уровень локальных напряжений;

- для обеспечения стабильных эксплуатационных характеристик требуется двухслойная оболочка с усиленными стыками, что позволяет повысить трещиностойкость стыков до предела прочности ГКП.

ВЫВОДЫ

В диссертации решена актуальная научно-прикладная задача по развитию методики расчета и проектирования крупноразмерных пологих ГК оболочек на основе экспериментальных исследований с применением высокотехнологического оборудования и современных программных комплексов численного анализа. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Усовершенствована и дополнена методика экспериментальных исследований по определению упругих характеристик и трещиностойкости ГКП: разработаны лабораторные установки по испытаниям на осевое растяжения и чистый сдвиг в комплекте с адаптированной мобильной тензометрической системой с непрерывной регистрацией быстроменяющихся деформаций и предложена универсальная измерительно–силовая установка для определения прочности и трещиностойкости при изгибе с варьируемой величиной пролета и приложением сосредоточенных нагрузок.

2. Испытания на трехточечный изгиб, одноосное растяжение и чистый сдвиг цельных однослойных образцов показали:

- при изгибе стандартные продольные образцы по сравнению с поперечными имеют модуль упругости выше в 1,10–1,2 раза, что составляет в среднем 2,2 ГПа и 2,6 ГПа, а прочность при изгибе выше в 2,6–2,8 раза, которая достигает 2,7 и 7,4 МПа соответственно.

- при одноосном растяжении образцов–восьмерок предел прочности, коэффициент Пуассона, модуль упругости в продольном направлении составляют до 1,8 МПа; 0,25; 2,5 ГПа и до 0,9 МПа; 0,22; 2,2 ГПа соответственно в поперечном; при этом значительное расхождение прочности при растяжении и изгибе обусловлено хрупкостью гипсового сердечника.

- модули сдвига в продольном и поперечном направлениях отличаются до 5 % и составляют 1,05–1,11 ГПа соответственно, при этом прочность при сдвиге выше в 1.7 раза при приложении нагрузки ортогонально слоям укладки.

3. Испытания на четырехточечный изгиб и одноосное растяжение составных ГК образцов показали:

- для одно– и двухслойных образцов со стандартным армированием стыка предел трещиностойкости составлял 33–42% от предела прочности при изгибе;

- образцы армированные стеклохолстом вплоть до разрушения деформировались без видимых трещин на лицевых гранях, что говорит о высокой эффективности данного вида усиления;

– для однослойных образцов усиление стеклохолстом приводит к резкому возрастанию предела трещиностойкости в 1,8 раза;

– в двухслойных образцах одновременное использование клеевого соединения и усиление стеклохолстом приводят к резкому увеличению прочности и трещиностойкости в 1,7 раза; при этом предел трещиностойкости достигает предела прочности при изгибе и разрушение образцов происходит как по стыку, так и по цельному сечению.

4. Разработанные предложения по развитию методики расчета тонкостенных ГК оболочек базируются на структурно–феноменологическом подходе. Гипсокартон, как плоско армированный материал, представляется в виде однородного ортотропного тела, подчиняющегося закону Гука. Для перехода от комбинированного сечения с двойным усилением к ортотропному эквивалентному телу необходим подбор эквивалентной жесткости при неизменных упругих характеристиках E_1 , E_2 , μ_{12} , μ_{21} , G_{21} , полученных при одноосном растяжении и чистом сдвиге эталонных образцов.

5. Обеспечение трещиностойкости осуществляется путем установления уровня допустимых расчетных напряжений в материале при плосконапряженном состоянии, который предлагается ограничивать этапом начала развития неупругих деформаций.

Для решения практических задач рекомендуется ограничиваться обеспечением трещиностойкости в поперечном направлении. Трещиностойкость считается обеспеченной, если эквивалентные напряжения в срединных $\sigma_{\text{экр}}^{\text{ср}}$ и крайних $\sigma_{\text{экр}}^{\text{кр}}$ слоях оболочки не превышают расчетных значений трещиностойкости в поперечном направлении: для срединного слоя $\sigma_{\text{экр}}^{\text{ср}} \leq \sigma_{\text{расч2}}^{\text{р}} = 1,1$ МПа, для крайних слоев $\sigma_{\text{экр}}^{\text{кр}} \leq \sigma_{\text{расч2}}^{\text{изг}} = 4,0$ МПа.

6. При ограниченном количестве мест возможной подвески, рекомендуется отходить от типовых решений куполов и разрабатывать рациональную схему несущего каркаса. Результаты численных исследований показывают, что схема закрепления с шарнирно–неподвижными опорами более предпочтительна при отсутствии температурных перепадов и деформаций вышележащего покрытия. При температурных перепадах и эксплуатационном прогибе несущего покрытия, использование пластинчатых шарниров позволяет в местах опорных закреплений до 1,5 раза снизить уровень локальных напряжений в оболочке.

7. Результаты работы внедрены при расчете и проектировании крупноразмерной эллипсоидной оболочки, размеры которой в несколько раз превышают диаметры типовых куполов «Берлин» и «Мюнхен» и могут быть использованы при разработке технических нормативов и проектной документации по устройству уникальных пологих оболочек.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

– публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Веретенников, В.И. Характер распределения прочности тяжелого бетона по сечению и объему железобетонных элементов различного способа

формования [Текст] / В.И. Веретенников, А.А. Долматов, А.А. Бармотин, Д.А. Тахтай, М.С. Булавицкий, **А.Б. Косик** // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Сучасні будівельні матеріали, конструкції та інноваційні технології зведення будівель і споруд: зб. наук.пр. – Макіївка: ДонНАБА. – 2010. – Вип. 2010–5 (85). – С.419–432. (*Изучено напряженно-деформируемое состояние железобетонных элементов кольцевого сечения*).

2. Горохов, Е.В. Особенности проектирования и монтажа крупноразмерных гипсокартонных куполов Кнауф [Текст] / Е.В. Горохов, В.Ф. Мушанов, В.Н. Васылев, А.А. Бармотин, В.Р. Касимов, **А.Б. Косик** // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва: зб. наук.пр.– Макіївка: ДонНАБА. – 2011. – Вип. 2011 – 6 (92).– С.3 – 13. (*Разработана технология монтажа крупноразмерных гипсокартонных куполов*).

3. Бармотин, А.А. Экспериментально-теоретические исследования прочности и деформативности гипсокартонных конструкций [Текст] / А.А. Бармотин, **А.Б. Косик** // Современное промышленное и гражданское строительство. – Макеевка: ДонНАСА.–2015.–Т.11, № 3– С.139–150. (*Произведены замеры и фиксация деформаций в режиме реального времени*).

4. Бармотин, А.А. Прочность, Трещиностойкость и деформативность стыков гипсокартонных элементов при изгибе [Текст] / А.А. Бармотин, **А.Б. Косик** // Современное промышленное и гражданское строительство. – Макеевка: ДонНАСА. – 2015. – Т.11, № 4 – С.177 – 188. (*Предложены варианты усиления стыков гипсокартонных конструкций*).

– **публикации по материалам конференций:**

5. Старченко, А.Ю. Исследования долговечности цементной плиты Кнауф AQUAPANEL Outdoor [Текст] / А.Ю. Старченко, С.В. Клименко, В.И. Братчун, А.А. Бармотин, **А.Б. Косик** // Сборник тезисов докладов международного научного симпозиума «Инновации в области применения гипса в строительстве» (31 мая–1 июня 2012 г., Москва).– ФГБОУВПО «Московский государственный строительный университет». Группа КНАУФ СНГ, М.:ООО «Аделант», 2012.– С. 117–124. (*Систематизированы факторы, влияющие на долговечность конструкций*).

6. Горохов, Е.В. Конструктивные и технологические решения устройства гипсокартонных криволинейных оболочек [Текст] / Е.В. Горохов, А.М. Гавриш, А.Ю. Старченко, С.В. Клименко, А.А. Бармотин, **А.Б. Косик** // Сборник докладов международной научно–практической конференции «Сухое строительство: товароведческие аспекты развития отрасли» (1–2 ноября 2012, Киев).– К.: «КНУСА».–2012.– Выпуск 2 – С.16 – 26. (*Проанализированы проблемы внедрения в интерьеры сложных гипсокартонных оболочек*).

7. Старченко, А.Ю. Исследование стыков гипсокартонных плит КНАУФ при изгибе [Текст] / А.Ю. Старченко, С.В. Клименко, В.И. Братчун, А.А. Бармотин, С.В. Кожемяка, Р.И. Игнатенко, **А.Б. Косик** // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Сухое строительство: товароведческие аспекты развития отрасли» (1–2 ноября 2012, Киев). – К.:

«КНУБА».–2012.– Выпуск 2 – С.124–133. (*Выполнен анализ влияния шовного и армирующего материала на прочность стыка*).

– публикации в других изданиях:

8. Хохрякова, Д.А. Влияние качества поверхностей строительных конструкций на расход штукатурных смесей [Текст] / Д.А. Хохрякова, **А.Б. Косик**, М.В. Анненкова // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва: зб. наук.пр.– Макіївка: ДонНАБА. – 2010.– Вип. 2010–3 (83).– С.37–42. (*Выполнены замеры расхода смеси в зависимости от типа основания при оштукатуривании стен на реальных объектах*).

9. Бармотин, А.А. Нормирование технологических показателей при устройстве наливных гипсовых полов Кнауф [Текст] / А.А. Бармотин, С.В. Кожемяка, **А.Б. Косик**, Л.Р. Хафизова // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва: зб. наук.пр.- Макіївка: ДонНАБА. – 2011.– Вип. 2011–6 (92).– С.98–105. . (*Выполнен сравнительный анализ цементных и гипсовых материалов для устройства полов*).

10. Бармотин, А.А. Технология оштукатуривания стен и потолков сухой смесью Кнауф МП-75 [Текст] / А.А. Бармотин, **А.Б. Косик** // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Технология, организация, механизация и геодезическое обеспечение строительства: сб. науч.тр.– Макеевка: ДонНАСА. – 2014.– Вип. 2014–6 (110).– С.44–49. . (*Систематизированы данные по механизации штукатурных работ*).

АННОТАЦИЯ

Косик А. Б. Трещиностойкость крупноразмерных пологих гипсокартонных оболочек – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, 2019.

Диссертация посвящена исследованию НДС гипсокартонных (ГК) пологих крупноразмерных оболочек при различных условиях эксплуатации, для которых, на основании экспериментальных исследований и численного моделирования разработаны предложения по совершенствованию методики расчета и предложены рекомендации по проектированию.

В первом разделе приведены характеристики ГК плит, которые регламентируются стандартами DIN EN 520:2005-03 и ГОСТ 6266-97. Выполнен обзор технологии устройства криволинейных ГК элементов и конструктива типовых пологих ГК куполов. Для оценки НДС тонких строительных оболочек принимаются допущение, что материал подчиняется закону Гука и справедлива гипотеза плоских сечений. Для ГК плит близка модель деформирования, применительно к анизотропным слоистым композитам. В сопоставлении с классическими методами, приведены преимущества численных методов

инженерного анализа конструкций. Для определения упругих характеристик ГКП отсутствуют рекомендации по проведению экспериментальных исследований и методам регистрации линейных деформаций.

Во втором разделе приведены методики экспериментальных исследований прочности и деформативности стандартных и трещиностойкости составных ГК элементов при одноосном растяжении, изгибе и сдвиге. Испытания образцов $t=12,5$ мм проводили по ГОСТ 6266-97 и по DIN EN 520. Для определения полного набора упругих характеристик проводили испытания на одноосное растяжение и чистый сдвиг ГК образцов на специально сконструированных установках. Выполнено обоснование комплекта измерительного оборудования для регистрации быстроменяющихся деформаций в режиме реального времени. Для составных элементов по DIN EN 13963-2005-08 выполнены исследования по определению предела прочности, трещиностойкости и деформативности как однослойных так и двухслойных ГК элементов при стандартном и дополнительном армировании стыков и межэлементных соединениях.

В третьем разделе приведены результаты исследований. Испытания на изгиб, одноосное растяжение и чистый сдвиг цельных образцов показали, что ГКП обладают явно выраженной ортотропией упругих и прочностных характеристик в ортогональных направлениях. Для составных однослойных так и двухслойных образцов со стыком предел трещиностойкости составлял в среднем 33-42% от предела их прочности на изгиб. При одновременном использовании клеевого соединения и усиления стеклохолстом предел трещиностойкости достигает предела прочности при изгибе.

В четвертом разделе приведена общая методика расчета тонкостенных ГК оболочек которая базируется на структурно–феноменологическом принципе. Гипсокартон представляется в виде сплошного однородного ортотропного тела, подчиняющегося закону Гука. Для перехода от комбинированного сечения к однородному ортотропному телу необходим подбор эквивалентной жесткости при неизменных упругих характеристиках полученных на эталонных образцах.

В пятом разделе выполнен расчет и проектирования крупноразмерной пологой эллипсоидной оболочки ($2a=14,3$ м, $2b=8,7$ м) в рекреационной зоне первого учебного корпуса Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Ключевые слова: гипсокартонные плиты, упругие характеристики, ортотропия, пологие купола и оболочки, трещиностойкость, деформативность.

ABSTRACT

Kosik A. B. **Crack resistance of large-sized flat gypsum shells** – Manuscript.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.23.01 – Building constructions, buildings and structures. – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, 2019.

Thesis is devoted to research of stress strain state of large-sized flat gypsum shells under different operating conditions. On the basis of experimental research and

numerical modeling, the offers for improving the methods of calculation and recommendations on the design have been developed.

The first section shows the characteristics of gypsum plates, which are regulated by the standards DIN EN 520: 2005-03 and GOST 6266-97. The review of the technological organization of curved gypsum elements and the structure of typical shallow gypsum domes have been carried out. To estimate the stress strain state of thin building shells it is accepted that the material follows the Hooke's law and the hypothesis of plane sections is fair. The model of deformation with respect to an anisotropic layered composites can be applied to gypsum plates. The advantages of numerical methods of engineering analysis of structures have been compared to the classical methods. To determine the elastic characteristics of gypsum plates there are no recommendations for experimental studies and methods of registration of linear deformation.

The second section shows the methodology of experimental studies of strength and deformability of standard and crack resistant composite gypsum elements under uniaxial tensile, bending and shear. Test samples $t = 12,5$ mm was carried out according to GOST 6266-97 and DIN EN 520. Uniaxial tensile test and pure shear gypsum samples on specially designed units have been carried out to determine the complete set of elastic characteristics. The set of measuring equipment has been provided to register rapidly changing deformation in real time. For composite elements according to DIN EN 13963-2005-08 the research has been performed to determine the tensile strength, crack resistance and deformability of single-layer and dual-layer gypsum elements with standard and reinforcement joints and interconnections.

The third section describes the results of studies. Bend tests, uniaxial tension test and pure shear of undivided samples showed that gypsum plates have orthotropy elastic and strength properties in orthogonal directions. For composite single-layer and dual-layer samples with a joint, the limit of crack resistance was averagely 33-42% of the tensile strength in bending.

When simultaneously using an adhesion bond and glass cloth strengthening, the limit of crack resistance reaches the limit of strength in bending.

The fourth section provides a general method of calculation of thin-walled gypsum shells which is based on the structural-phenomenological principle. Gypsum is represented as a solid homogeneous isotropic body following Hooke's law. To change from the combined cross-section to a homogeneous orthotropic body it is necessary to select the equivalent stiffness at constant elastic characteristics obtained in reference samples.

The fifth section provides the calculation and design of large-sized flat ellipsoid shell ($2a = 14,3$ m, $2b = 8,7$ m) in the recreational area of the first academic building of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture.

Keywords: gypsum plate, elastic characteristics, orthotropy, shallow dome, flat shell, crack resistance, deformability.