

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи

Косик Алексей Борисович



УДК 692.21:699.844

**ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ ПОЛОГИХ
ГИПСОКАРТОННЫХ ОБОЛОЧЕК**

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Бармотин Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент



Идентичность всех экземпляров
диссертации заверяю:
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.006.02



Т.В. Радионов

Макеевка – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГКП, КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ КОМПОЗИТНЫХ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ	12
1.1 Физико-механические характеристики гипсокартонных плит.....	12
1.2 Унифицированные элементы металлического каркаса.....	14
1.3 Способы изготовления криволинейных ГК элементов.....	16
1.4 Анализ конструктивных решений и опыт устройства крупноразмерных ГК куполов-оболочек в гражданских зданиях.....	19
1.5 Анализ методов расчета строительных конструкций.....	25
1.6 Численный анализ НДС конструкций на основе МКЭ.....	27
1.7 Определение напряженно-деформированного состояния строительных тонкостенных оболочек.....	30
1.8 Измерение линейных деформаций тензометрами и тензорезисторами.....	32
1.9 Моделирование НДС композитных материалов.....	35
Выводы по 1 разделу.....	39
2. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО- ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	42
2.1 Общие положения.....	42
2.2 Мобильная измерительная тензометрическая система.....	46
2.3 Определение разрушающей нагрузки и прогиба гипсокартонных плит при переменном пролете по ГОСТ 6266-97.....	55
2.4 Определение предела прочности на растяжение при изгибе гипсокартонных плит по DIN EN 520.....	56
2.5 Методика испытаний образцов-моделей на осевое растяжение.....	59
2.6 Методика испытаний образцов-моделей на чистый сдвиг.....	61

2.7	Испытание на прочность и трещиностойкость стыков составных одно- и двухслойных ГК образцов при изгибе по DIN EN 13963.....	63
2.8	Методика проведения выборочных исследований.....	67
2.9	Численный анализ НДС строительных оболочек с применением вычислительного программного комплекса SCAD.....	70
	Выводы по 2 разделу.....	72
3.	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ, ДЕФОРМАТИВНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГКП	74
3.1	Прочность и деформативность при стандартных испытаниях на трехточечный изгиб по ГОСТ 6266-97 и DIN EN 520.....	74
3.2	Коэффициенты Пуассона, модули упругости, прочность ГК образцов-восьмерок при осевом растяжении.....	77
3.3	Прочность и модуль упругости ГК образцов-моделей при чистом сдвиге..	78
3.4	Трещиностойкость и прочность одно- и двухслойных ГК образцов-моделей при стандартном и дополнительном армировании стыков и межэлементном соединениях.....	79
	Выводы по 3 разделу.....	88
4.	МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИПСОКАРТОННЫХ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК.....	90
4.1	Общие положения.....	90
4.2	Определение геометрических параметров оболочки.....	91
4.3	Оценка НДС несущих конструкций покрытия и условий эксплуатации....	92
4.4	Выбор конструктивного решения и расчет несущего каркаса оболочки....	93
4.5	Модель ГК элемента в условиях плоского напряженного состояния.....	96
4.6	Система разрешающих уравнений для плоского напряженного состояния ортотропного тела.....	97
4.7	Критерии трещиностойкости ортотропной ГК оболочки.....	100
	Выводы по 4 разделу.....	104
5.	ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОНТАЖ КРУПНОРАЗМЕРНОЙ ЭЛЛИПСОИДНОЙ ОБОЛОЧКИ.....	105

5.1	Характеристики архитектурно-планировочного решения здания и основных конструктивных элементов для проектирования оболочки.....	105
5.2	Оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций базового покрытия.....	109
5.3	Расчет несущего каркаса крупноразмерной эллипсоидной оболочки.....	115
5.4	Расчет трещиностойкости гипсокартонной оболочки.....	118
5.5	Конструкторские и технологические решения по изготовлению и монтажу эллипсоидной гипсокартонной оболочки.....	127
	Выводы по 5 разделу.....	132
	ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.....	134
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	136
	Акт внедрения.....	150
	Акт внедрения.....	151

ВВЕДЕНИЕ

Низкая удельная материалоемкость, широкий диапазон вариации звукоизолирующих и огнезащитных характеристик при гарантированной жесткости всей конструкции, возможность создания объемных криволинейных элементов определяют стабильное применение комплектных гипсокартонных (ГК) систем при ремонте, реконструкции и строительстве гражданских зданий. Гипсокартон, относится к крупноформатным тонкостенным конструкционным отделочным плитам ($6,5 \leq t \leq 25 \text{ мм}$). Как композитный материал гипсокартонные плиты (ГКП) обладают высокой относительной прочностью на изгиб. Для достижения требуемой эксплуатационной жесткости ГК конструкции монтируются с различными системами каркасов из унифицированных элементов.

Цельность ГК облицовки определяется показателями прочности гипсокартонной плиты и трещиностойкости стыков между плитами. Практика эксплуатации показывает, что наиболее проблемные и ответственные участки вероятного образования и развития трещин являются стыки ГКП.

Наиболее распространенные причины образования трещин в ГК конструкциях обусловлены рядом факторов:

- отсутствие деформационных швов, компенсирующих температурные перепады и деформации зданий от различных силовых воздействий;
- наличие неучтенных динамических нагрузок на несущие конструкции;
- значительная концентрация локальных напряжений от смонтированного оборудования, различных предметов интерьера и наличия фигурных вырезов;
- нарушение технологии монтажа (отклонение от конструктивной схемы, жесткостных свойств используемых материалов, нарушение требований по расстановки крепежных элементов, ошибки при подготовке кромок и т.д).

Отсутствие подтвержденных опытных данных о поведении под нагрузкой ГКП не позволяет с гарантированной точностью моделировать напряженно-деформированного состояния, как унифицированных плоских конструкций так и

многообразных объемных криволинейных элементов имеющих сложную и нестандартную геометрию.

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.

Степень разработанности темы. Теоретической основой для выполнения исследований в области строительных оболочек, в т.ч. с применением композиционных материалов, являются работы С.А. Амбрацумяна,

В.В. Болотина, В.В. Васильева, В.З. Власова, Е.В. Горохова, Д.М. Карпиноса, Х.М. Муштари, В.Ф. Мущанова, Ю.В. Немировского, Б.Е. Победри, Ю.Н. Работнова, Р.Б. Рикардса, А.В. Розе, Г.А. Тетерса, С.П. Тимошенко и ряда других отечественных и зарубежных ученых, а также техническая документация и технологические решения изготовителей гипсокартонных плит (ГКП) по унифицированным ГК конструкциям.

Цель работы: 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 экспериментальных 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 исследований. Крупноразмерные пологие ГК оболочки.

Предмет исследований. Напряженно-деформированное состояние и трещиностойкость крупноразмерных пологих ГК оболочек.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- изучены закономерности деформирования ГКП при изгибе с использованием специализированного высокотехнологического оборудования фирмы Zwick Roell; получены упругие и прочностные характеристики с учетом ортотропии в ортогональных направлениях, 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;

- в дополнение к европейским и отечественным нормативным методам испытания 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 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

- результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены 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» и при повышении квалификации проектировщиков и архитекторов по программе «Комплектные системы сухого строительства. Изготовление и монтаж гипсокартонных конструкций криволинейной формы»;

- 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.

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.

Степень достоверности и апробация 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.

Результаты работы внедрены при проектировании и строительстве крупноразмерной эллипсоидной многослойной оболочки эксплуатирующейся при температурно-влажностных перепадах, существенных эксплуатационных прогибах опорных конструкций и ограниченности мест подвески.

Основные исследования теоретического и прикладного характера выполнены в соответствии с госбюджетной темой: К2-13-11 «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.).

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.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы автором в 7 научных работах, из которых 4 работы опубликованы в рецензируемых изданиях, 3 публикации – в материалах научных конференций. Общий объем публикаций – 8,49 п.л., из которых 3,3 п.л. принадлежат лично автору.

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

РАЗДЕЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГКП, КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ КОМПОЗИТНЫХ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Физико-механические характеристики гипсокартонных плит

Гипсокартонная плита (ГКП) представляет собой листовой отделочный материал, полученный по непрерывной конвейерной технологии, формируется из армированного минеральным волокном гипсового сердечника и внешнего армирования в виде оклеенного высококачественного многослойного картона ($t \geq 6\text{мм}$). [4,8-12,14] Гипсокартон, относится к крупноформатным тонкостенным конструкционным отделочным плитам ($6,5 \leq t \leq 25\text{мм}$) и обладает высокой относительной прочностью на изгиб.

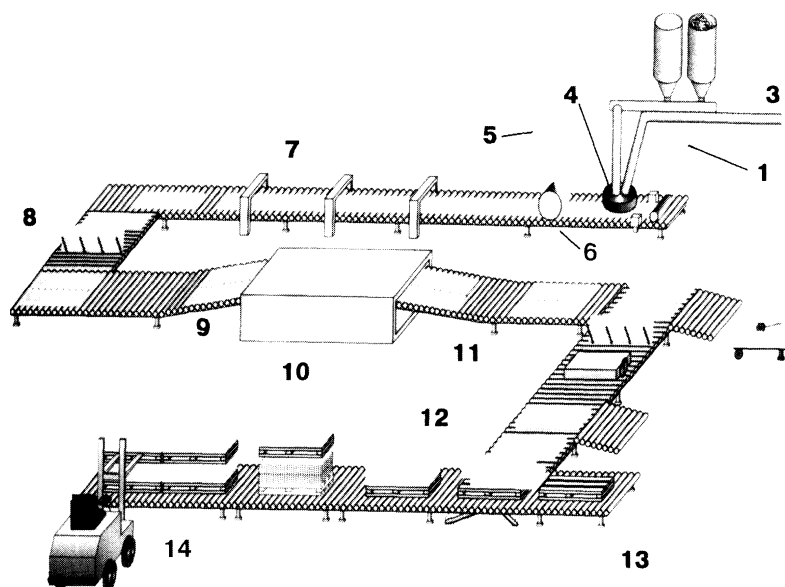


Рис.1.1. Схема производства ГКП:

1-рулонный картон для лицевой стороны листов; 2-емкость для гипса; 3 - подача воды; 4 - смеситель (гипсомешалка); 5 - рулонный картон для тыльной (нижней) стороны листов; 6- формовочный узел; 7 - узел резки листов; 8 - кантователь листов; 9 - загрузочный мост; 10 - сушильная камера; 11, 12 - выгрузочный мост; 13 - узел пакетирования ГКЛ; 14 – штабелировщик

Физико-механические

характеристики регламентируются Европейским стандартом DIN EN 520:2005-03 [2] и Межгосударственным стандартом ГОСТ 6266-97 [3] и как полимерный материал, разрешен в строительстве.

В эксплуатационных условиях ГКП работают на изгиб, растяжение, сдвиг, испытывая при этом воздействие температурных перепадов, переменной влажности и различного рода излучений. [5,6]

Деформируемость гипса зависит от длительности действия нагрузки, пористости и влажности. Деформации могут быть как упругими и пластическими.

Таблица 1.1. Предельная прочность ГКП

№ п/п	Испытание ГКП толщиной 9,5 мм	Предельное значение Н/мм ²
1	Сжатие поверхности	8 – 9,5
2	Сжатие кромок	7 - 10
3	Растяжение поперек волокон картона, вдоль волокон картона	1 – 1,2 1,8 – 2,5
4	Сдвиг поперек волокон картона, вдоль волокон картона	3,5 – 4,5 3,5 - 4
5	Изгиб поперек волокон картона, вдоль волокон картона	≥ 150 ≥ 450
6	Твердость по Бринеллю поверхности ГКП	15

Результаты испытаний образцов ГКП на прочность приведены в таблице 1.1.

Установлены следующие свойства:

Коэффициент паропроницания, 0,009 – 0,23 кг/ (ч.м.Па);

Коэффициент теплового расширения при свободном удлинении составляет примерно 0,018 мм/ м.

Набухание по толщине $\approx 1,0$ мм/ м при $t = 20^\circ\text{C}$ и повышение относительной влажности воздуха от 65 до 95%.

Удельная теплоемкость C равняется 837 – 1088 Дж/кгК

Теплопроводность, характеризуемая расчетным значением по нормам DIN 4108, ч.4 $\sim 0,21$ Вт/ (м.К).

Таб. 1.2. Нормируемые требования к разрушающей нагрузке и прогибу ГКП при испытаниях на переменном пролете по ДСТУ

Толщина листов, мм	Разрушающая нагрузка, Н (кгс), не менее для образцов		Прогиб, мм, не более для образцов	
	продольных	поперечных	продольных	поперечных
До 10,0 включ.	450 (45)	150 (15)	-	-
Свыше 10,0 до 18,0 включ.	600 (60)	180 (18)	0,8 (1,0)*	1,0 (1,2)*
Свыше 18,0	500 (50)	-	-	-
*В скобках указано максимальное значение прогиба для отдельного образца				

Таб.1.3. – Предельная нагрузка при изгибе и модуль упругости по DIN EN 520

Номинальная толщина t мм	Предельная нагрузка при изгибе ^a N		Модуль упругости ^d E Н/мм ²	
	направление		направление	
	Продольное L ^b	Поперечное T ^c	Продольное L	Поперечное T
<12.5	≥43·t	≥16,8·t	-	-
12.5	≥610	≥210	≥2800	≥2200
15	≥735	≥250		
18	≥880	≥300		
>18	≥43·t	≥16,8·t	-	-
^a Среднее значение; отклонение единичного значения – 10%, значения промежуточной толщины интерполируются. ^b Лицевая сторона картона в растянутой зоне ^c Тыльная сторона картона в растянутой зоне ^d Среднее значение				

ГКП присущ ряд отличительных признаков: экономичность; обработка без применения специализированного оборудования; безопасность труда при реализации технологических процессов; применение винтовых соединений без рассверливания отверстий; небольшая масса и транспортабельность; высокая точность размеров и возможность обработки поверхностей; огнестойкость, теплоизоляция, достаточная жесткость и экологичность. [7,13,15,17-19,23-26]

1.2 Унифицированные элементы металлического каркаса

Для достижения требуемой эксплуатационной жесткости ГК конструкции монтируются различные системы каркасов из унифицированных элементов отвечающих стандарту DIN 18182 . [16]

Профили (табл. 1.4) и элементы крепления (рис. 1.2) изготавливаются из оцинкованного гальваническим способом мягкого стального нелегированного листа (или стальной ленты). Профили выпускаются с U-образным и С-образным поперечным сечением, жесткость стеновых профилей увеличивают путем устройства продольных гофров (ребер жесткости) при их холодной прокатке. [20-22]

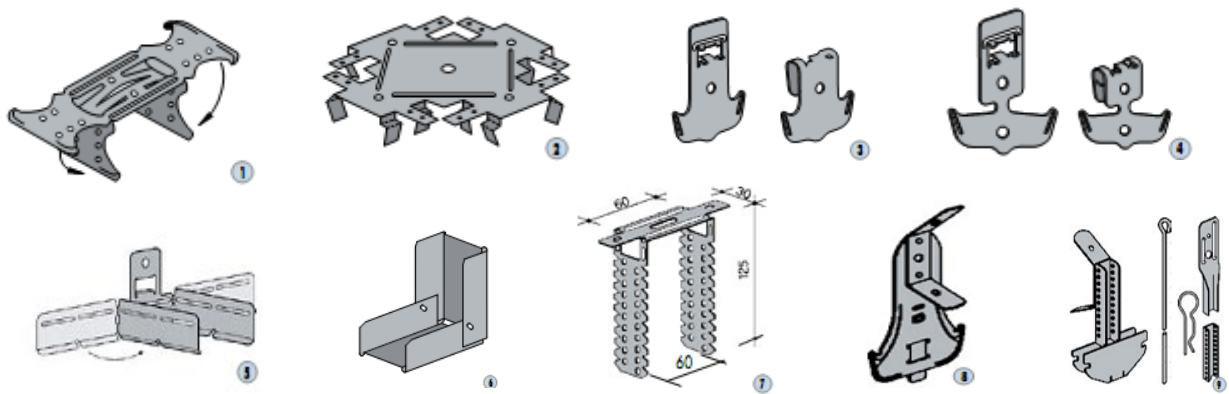


Рис. 1.2. Основные элементы крепления для подвесных потолков:

1- крестовое соединение; 2- одноуровневый соединитель; 3- угол анкерного соединения для CD; 4- вращающийся анкерный угол; 5- универсальный элемент для профиля CD; 6- угловой соединитель 7- прямой подвес; 8- анкерный фиксатор; 9- комбинированная подвеска (нониус).

Основными элементами каркаса в потолочных системах сложной формы являются CD-профили 60/27, которые предварительно также изогнуты в соответствии с требуемым радиусом формируемой поверхности. [27-30, 36, 37] Изогнутые CD-профили Кнауф изготавливаются на специальном гибочном станке. [34, 35]

Таблица 1.4. Стандартные типовые профили для устройства каркасов подвесных потолков с применением гипсокартонных плит

Профиль		Высота стенки, мм ($\pm 0,2$)	Ширина полки, мм ($-0,2$)	Толщина стали, мм (min)	Вид
Наименование профиля	Обозначение типа профиля				
С-образный подвесного потолка	для CD 60x27	60	27	0,6 (0,56)	
U-образный направляющий профиль подвесного потолка	для UD 28x27	27	28	0,6 (0,54)	

1. 3 Способы изготовления криволинейных ГК элементов

Криволинейные поверхности гипсокартонных обшивок находят применение в помещениях различного назначения: гражданских, жилых и других зданиях, включая вокзалы, терминалы, торговые и выставочные павильоны, залы для зрителей, учебные аудитории, холлы отелей, санаториев, медицинских заведений.

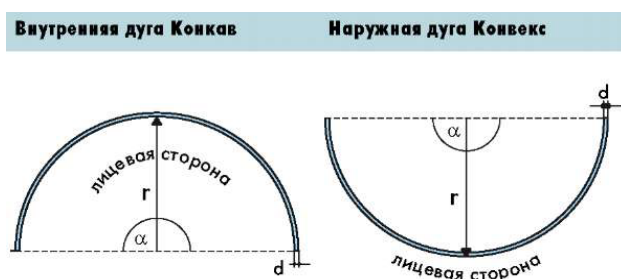
Для изготовления объемных криволинейных элементов из ГКП ($6,5 \leq t \leq 12,5 \text{ мм}$), в зависимости от возрастания радиусов кривизны, используют технологию фрезерования, технологиигиба в увлажненном и воздушно-сухом состояниях. [2, 31-34]



Рис.1.3. Примеры дизайнерского решения криволинейных гипсокартонных потолков

В увлажненном состоянии радиус изгиба ГКП уменьшается в три раза (рис.1.4). ГКП всегда следует выгибать вдоль длины, а не вдоль ширины, т.к. их выгибание должно выполняться поперек волокон картонной оболочки.

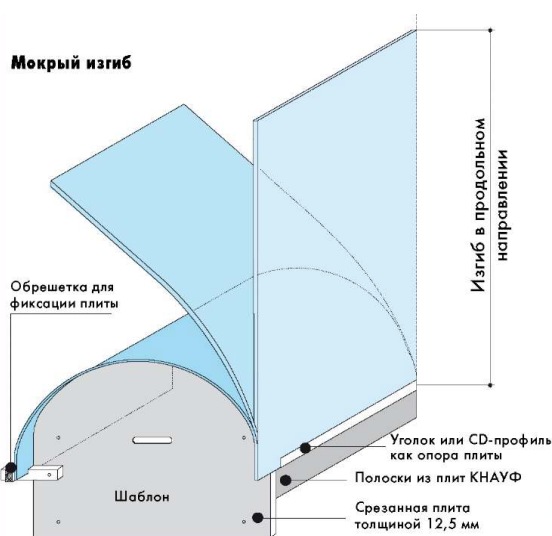
Для выполнения криволинейных элементов из гипсокартона (рис. 1.5) основной подготовительной операцией является изготовление шаблонов, которое должно обеспечить их обрачиваемость, необходимую прочность и жесткость, стойкость и соответствие их размеров требованиям проекта.



Толщина плиты d мм	Радиус изгиба	
	Сухой изгиб мм	Мокрый изгиб мм
6,5	≥ 1000	≥ 300
9,5	≥ 2000	≥ 500
12.5	≥ 2750	≥ 1000

Изготовление шаблонов можно осуществлять любыми строительными материалами, которые обеспечивают вышеназванные требования. Перед увлажнением водой ГКП необходимо положить на подкладки, чтобы избежать увлажнение ее кромок и обратной стороны.

Увлажнение гипсового камня ГКП осуществляют накрыванием его вогнутой (в будущем) стороны мокрой дерюгой, которую периодически смачивают водой до тех пор, пока гипсовый сердечник не увлажнится до нужной глубины. О степени просачивания сердечника свидетельствует изменение цвета



на обрезном крае ГКП на более темный. Увлажнение гипсового сердечника ускоряется, если подвергать будущую вогнутую поверхность перфорации металлическим цилиндром с шипами вдоль и поперек гипсокартонной плиты, создавая на ней макропоры.

Во время увлажнения ГКП постепенно, под действием собственного веса выгибается

Рис. 1.5. Мокрый изгиб по шаблону

на поверхности шаблона к ожидаемой форме

(рис. 1.5). Концы ГКП закрепляют на фиксаторах шаблона. Вогнутой стороной, может быть как лицевая, так и тыльная сторона ГКП. Лицевая сторона по внутренней дуге (конкав) образует свод потолка, а лицевая сторона по внешней дуге (конвекс) образует выпуклую поверхность. Время сушения криволинейного элемента составляет не менее 24 часов. После полного высыхания ГКЛ получают гнутый элемент заданной конфигурации. [31, 34, 35]

Для формирования криволинейных гипсокартонных поверхностей малого радиуса (100-400 мм) используются заготовки ГКП с П-образными прорезами, фрезерованными с помощью специальных фрезерных приборов.

Формируя и выпуклые, и вогнутые поверхности, прорезы всегда делают на растянутой стороне ГКП, оставляя без повреждений противоположный картон.

Расстояние между прорезами (пазами) может быть разной, в зависимости от формы и плавности нужного изгиба заготовки.

Подготовленная таким способом заготовка с ГКЛ сначала выгибается, а потом укладывается на шаблон (рис. 1.6). Прорезы в гипсокартонной заготовке очищаются от пыли и шпаклюются шпаклевкой "Унифлотт" за два раза. После полного высыхания шпаклевки лицевую сторону заготовки обрабатывают шпаклевкой "Унифлотт". Использование гипсокартонных заготовок из ГКП с фрезерованными пазами не ограничивается изготовлением гнутых элементов малого радиуса. Применение такой технологии распространяется и на ГКП с V-образными пазами, которая делает возможным формировать поверхности любых видов и сечений, создавая ломанные разноуровневые, коробчатые, запертые, гофрированные, ступенчатые, разомкнутые, растровые формы.

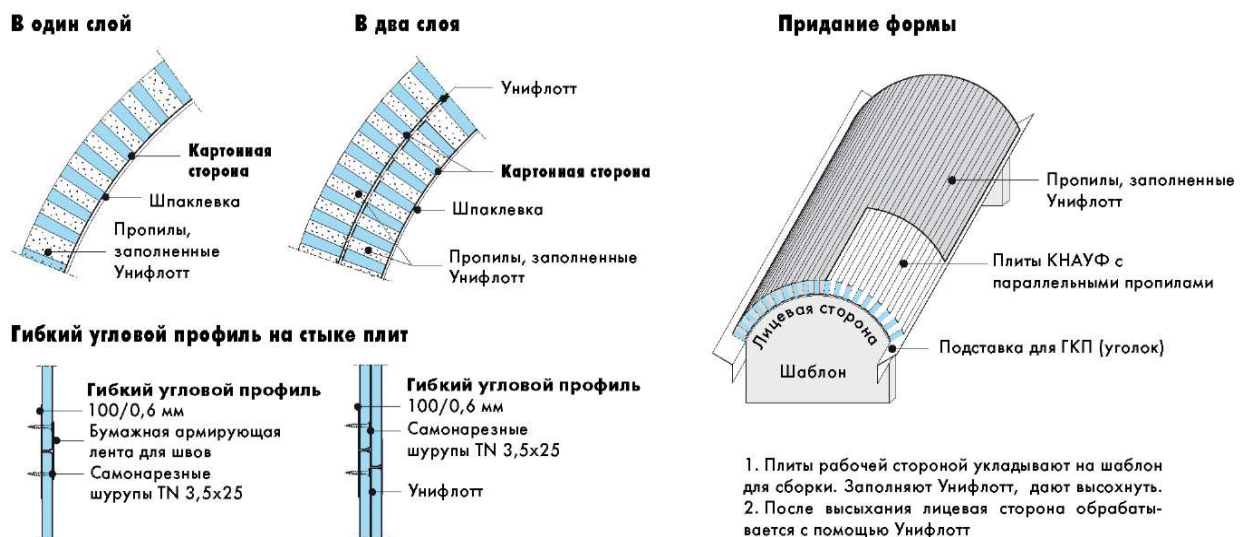


Рис. 1.6. Формирование гнутого элемента с помощью пропилов

Эти поверхности разрешают распространить возможности применения объемных элементов при обрамлении внутреннего пространства помещений разного назначения. Применение таких форм при строительстве новых и реконструкции существующих домов не только оказывает содействие решению дизайнерских задач, но и повышает огнестойкость инженерных конструкций и пожарную безопасность всего здания в целом. Подобные конструкции могут быть использованы для скрытой прокладки трубопроводов, воздухопроводов и других инженерных коммуникаций. Ломанные и криволинейные элементы из

гипсокартона могут также применяться при облицовке металлических и деревянных колонн, пилястр и других архитектурных элементов. Кроме того, во многих случаях можно значительно улучшить звукопоглощающие свойства оградительных конструкций помещений и их акустические характеристики.

1. 4 Анализ конструктивных решений и опыт устройства крупноразмерных ГК куполов-оболочек в гражданских зданиях

Купол (итал. Cupola – купола, свод, от лат. Cupula, уменьшительное от сира – бочка) – пространственная, несущая конструкция покрытия, по форме близкая к полусфере или другой поверхности вращения кривой.

Купол возник в странах Востока и имел, прежде всего, утилитарное назначение. При отсутствии дерева покрытием для жилищ служили глиняные и кирпичные купола. Но постепенно, благодаря своим исключительным эстетическим и тектоническим качествам, купол приобрел самостоятельное смысловое содержание как архитектурная форма. Развитие формы купола связано с постоянным изменением характера его геометрии. Купольные покрытия получили развитие в архитектуре Древнего Рима.

Позже традиция куполостроения была перенята византийской религиозной и культовой архитектурой. Византийские архитекторы впервые удачным образом разрешили задачу помещения купола над основанием не только круглого, но и квадратного и вообще многоугольного плана. Купол стал важнейшим элементом архитектуры византийского храма. Усовершенствованный византийцами купол распространился из Византии по всем ее провинциям и странам. Разнообразные по конструкции купола использовались главным образом в храмовой архитектуре.

Высшую степень развития купол получил в итальянском зодчестве эпохи Возрождения. В период барокко купола были атрибутом самых больших построек и дворцов, подчас становясь доминантой городской застройки. В архитектуре Возрождения получают распространение зонтичные купола и римские кессонированные купола.

С развитием технологии строительства, при возведении куполов стали использовать металлический каркас, железобетон, остекление. Процесс

совершенствования купольных покрытий в настоящее время проявляется как в композиционно-функциональном, так и в конструктивном аспекте, позволяя успешно осуществлять разнообразные архитектурные замыслы. Купола стало возможно изготавливать из современных материалов, которые способны сделать конструкцию более прочной и легкой, что позволяет перекрыть пространство с большим пролетом.

Обзор конструктивных решений несущих купольных покрытий гражданских зданий показал, что основные типы куполов различают по конструкции (ребристые, ребристо-кольцевые, сетчатые и т.д), по форме (сферические, эллиптические, стрельчатые и т.д) (рис. 1.7), по стреле подъема f (высокие $f \geq 0,2d$ мм, пологие $f \leq 0,2d$). В наиболее распространенном ребристо-кольцевом куполе, за счет совместной работы всех элементов пространственной системы, кольца не только работают на местный изгиб, но и воспринимают растягивающие или сжимающие усилия от ребер купола, а в случае жесткого сопряжения колец с ребрами - и изгибающие моменты.

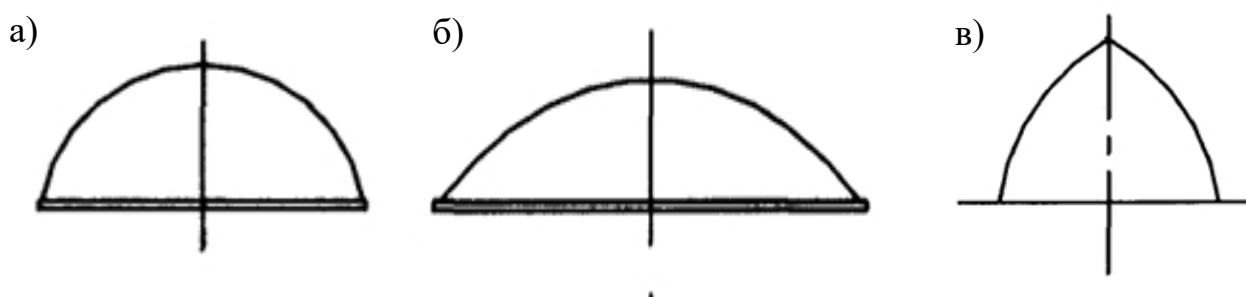
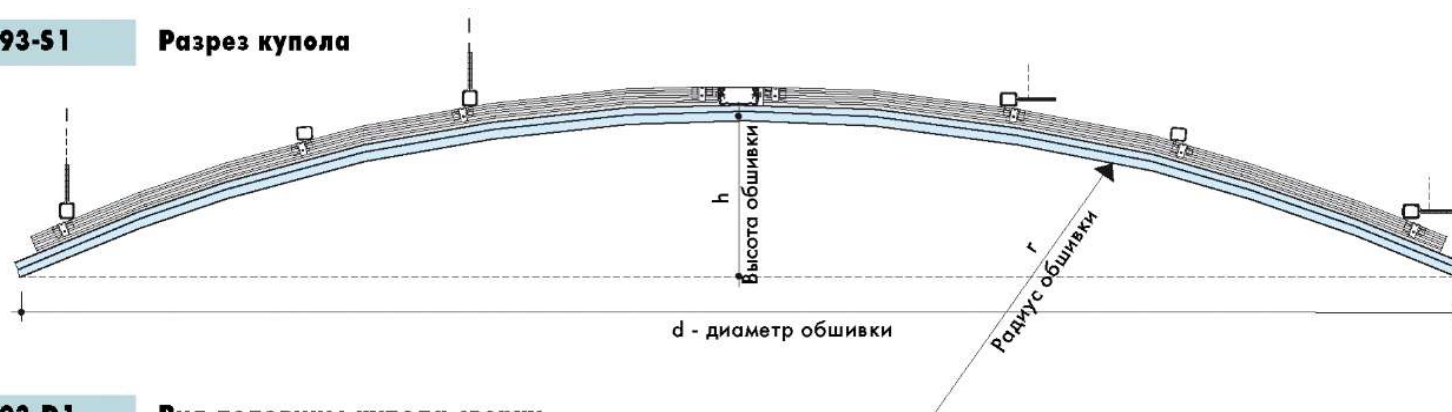


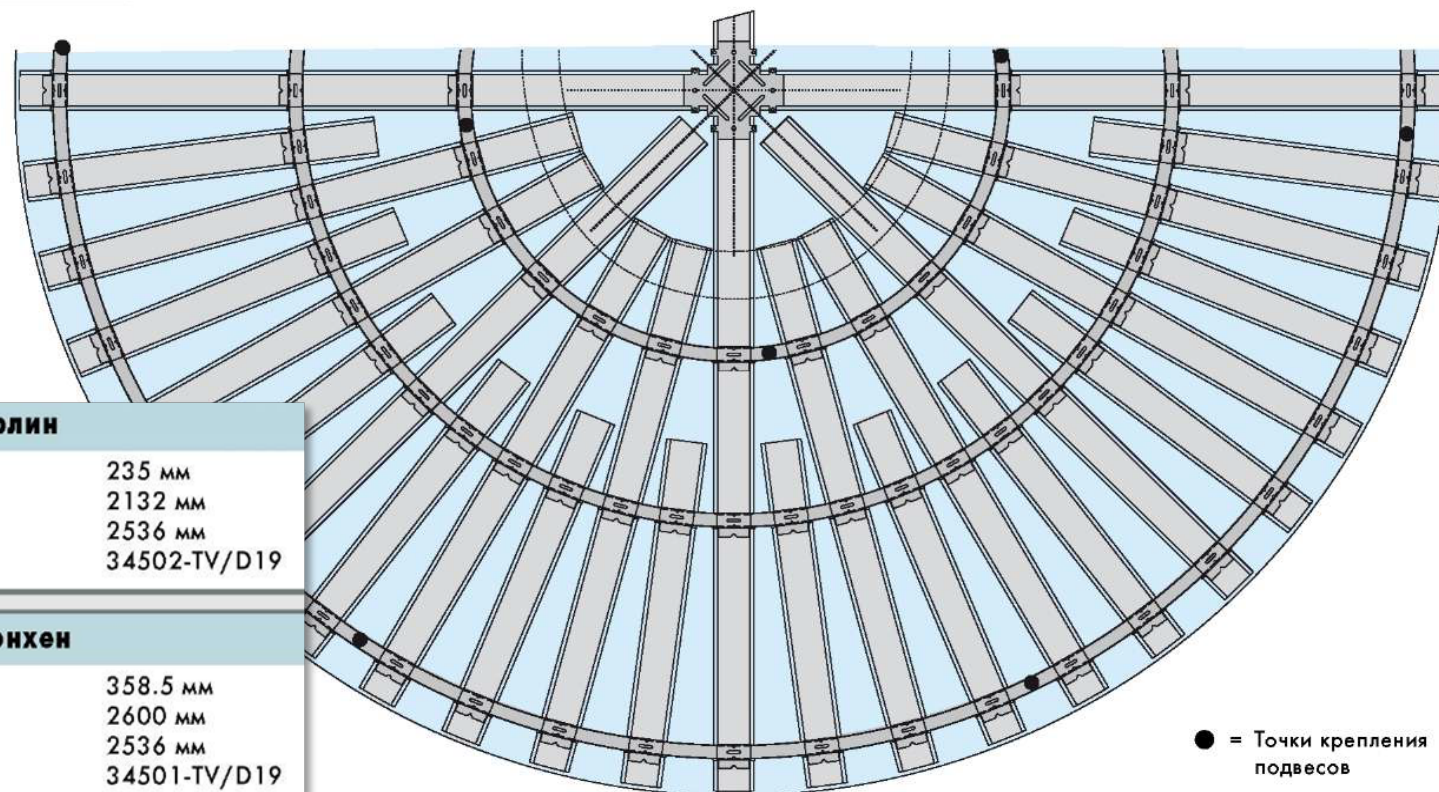
Рис. 1.7. Формы куполов: а) поперечный разрез сферического купола; б) поперечный разрез эллиптического купола; в) разрез стрельчатого купола

Унифицированные купола Кнауф типа «Берлин» и «Мюнхен» относятся к пологим куполам и выполнены по ребристо-кольцевой схеме: основной несущий каркас из профильной стальной трубы и второстепенный из тонкостенных прессованных оцинкованных профилей DIN 18182. В конструкции каркаса следует различать следующие конструктивные элементы: основной каркас — каркас, к которому посредством соединителей крепятся несущие профили (элементы основного каркаса изготовлены из квадратной трубы 20x20x2,5 или 20x20x2,0 мм, изогнутой в форме окружности, по дуге окружности допускаются

D193-S1 **Разрез купола**



D193-D1 **Вид половины купола сверху**



Пологий купол Берлин

Высота обшивки h:	235 мм
Диаметр обшивки d:	2132 мм
Радиус обшивки r:	2536 мм
Плановый номер:	34502-TV/D19

Пологий купол Мюнхен

Высота обшивки h:	358.5 мм
Диаметр обшивки d:	2600 мм
Радиус обшивки r:	2536 мм
Плановый номер:	34501-TV/D19

Рис.1.8 Геометрия пологих куполов Кнауф

сварные соединения)[54, 57]; несущий каркас — каркас, к которому производится крепление обшивки из плит КНАУФ (элементы несущего каркаса изготовлены из профиля CD 60x27x0,55 мм, изогнутого в форме дуги определенного радиуса); соединитель основного и несущего каркасов — элемент, изготовленный путем конструктивной доработки стандартного соединителя для CD-профиля; для соединения металлических частей каркаса используются винты самонарезные типа LN 3,5x9,5 мм. Крепление основного каркаса купола к перекрытию здания осуществляется при помощи нониус-подвеса требуемой длины. Для крепления нониус-подвесов к перекрытию здания используются дюбели металлические саморазжимные типа TDN 6 или BZN 6-5. Крепление обшивки к каркасу купола осуществляется с использованием винтов самонарезных типа TN 25 и TN 35 (рис. 1.9). [16, 39-42, 45]

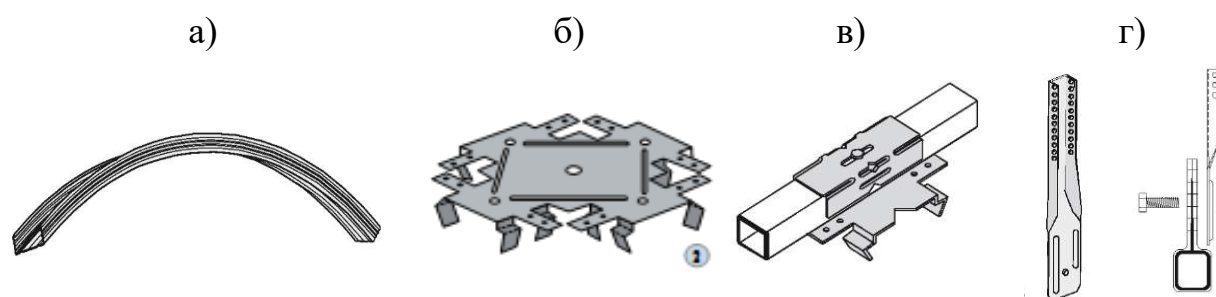


Рис. 1.9 Комплектующие к куполам: а) изогнутый профиль CD; б) одноуровневый соединитель ;в) подвеска 4-гранной трубы; г) нониус подвес

Опыт монтажа крупноразмерных нестандартных гипсокартонных криволинейных поверхностей в гражданских зданиях показывает, что для обеспечения эстетических требований эксплуатации (трещиностойкость, минимизация прогибов и др.) требуется дополнительные расчеты, позволяющие учитывать индивидуальные особенности объекта, включая особенностей условий эксплуатации и ограниченные возможности монтажа гипсокартонных конструкций. [38, 43, 44, 46-50]

При реконструкции пятизвездочного отеля Донбасс-Палац были разработаны и успешно применены конструкции пологих куполов типа Берлин диаметрами 3900 мм и 6200 мм.

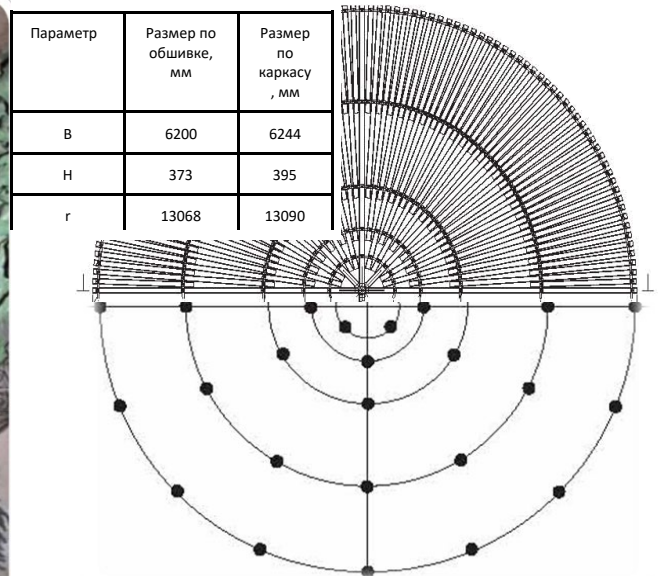


Рис. 1.10 Фрагмент и конструктивное решение пологого купола диаметром 6,2 м в пятизвездочном отеле «Добасс Палас» (г. Донецк)

Элементы основного каркаса (кольца) индексируются в порядке: от наименьшего к наибольшему. Элементы несущего каркаса (изогнутые CD-профили) индексируются в порядке: от наибольшего к наименьшему.

Табл. 1.5. Параметры основного каркаса купола 6200

Индекс кольца, j	Диаметр основного каркаса (кольца), мм	Длина дуги кольца L _д , мм	Количество точек крепления, шт.
0	700 ± 50	2040 ÷ 2360	4
1	1250 ± 50	3770 ÷ 4090	4
2	2200 ± 50	6750 ÷ 7070	6
3	4000 ± 50	12410 ÷ 11470	12
4	5800 ± 50	18060 ÷ 11470	16

Табл. 1.6. Параметры несущего каркаса купола 6200

Индекс кольца, j	Диаметр элемента основного каркаса (кольца), мм	Длина дуги кольца L _д , мм	Количество точек закрепления к перекрытию, шт.
0	≈3120	4	20
1	≈3080	4	20
2	≈2910	16	80
3	≈2650	24	96
4	≈2160	48	144
5	≈1240	96	192
		S=192	S=552

В табл.1.5 и 1.6 приведены геометрические параметры элементов каркасов купола 6200. На строительном объекте сборка каркаса купола осуществлялась по

схеме. Располагались несущие профили №0 (индекс $i=0$) в последовательности цветной маркировки и соединялись при помощи одноуровневого Х образного соединителя. Устанавливалось наименьшее кольцо (индекс $j=0$) таким образом, чтобы положение цветных стрелок на кольце совпадало с цветовой маркировкой несущих профилей (индекс $i=0$). Устанавливались несущие профили №24 для купола 6200 (индекс $i=1$) в положение согласно схеме для купола, закреплялись на малом кольце при помощи соединителя. Устанавливались кольца в порядке возрастания индекса j кольца, соблюдая цветовую маркировку. Поднималась и устанавливалась полученная конструкция в проектное положение. Производилось крепление к перекрытию согласно ранее сделанной разметке при помощи нониус-подвесов регулируемой длины, проверив расположение всех колец в плоскости по уровню (схема расположения точек крепления основного каркаса к перекрытию для купола приведена на рис. 1.10). Производилось крепление несущих профилей (в порядке увеличения индекса i) к основному каркасу, соблюдая порядок цветовой маркировки. Обшивка каркаса купола плитами КНАУФ выполнялась после установки и полной сборки каркаса купола в проектном положении и производилась в 2 этапа. На профили несущего каркаса со стороны крепления лицевой обшивки закреплялись полосы, шириной 60 мм, из плиты КНАУФ 9,5 мм по всей длине несущего профиля. Устройство лицевой обшивки каркаса купола производилось от центра купола к внешнему краю с использованием плит КНАУФ 12,5 мм.

Практика эксплуатации подобного рода ГК облицовок выявила наиболее проблемные и ответственные участки вероятного образования и развития трещин, которыми являются стыки ГКП. Наиболее распространенные причины образования трещин в ГК конструкциях обусловлены рядом факторов:

- отсутствие деформационных швов, компенсирующих температурные перепады и деформации зданий от различных силовых воздействий;
- наличие неучтенных динамических нагрузок на несущие конструкции;[79]
- значительная концентрация локальных напряжений от смонтированного оборудования, различных предметов интерьера и наличия фигурных вырезов;

-нарушение технологии монтажа (отклонение от конструктивной схемы, жесткостных свойств используемых материалов, нарушение требований по расстановки крепежных элементов, ошибки при подготовке кромок и т.д).

1. 5 Анализ методов расчета строительных конструкций

Методы инженерного анализа, которые могут быть разделены на две категории классических и численных методов (рис. 1.11). [72-78, 80-85, 87]

С помощью классических методов распределения напряжений и деформаций решаются напрямую, на основании общеизвестных физических принципов и обеспечивают ясное понимание исследуемой проблемы. *Энергетические методы* основываются на определении минимума потенциальной энергии для исследуемой области, что обеспечивает хорошую сходимость для ряда задач.

В *методе граничных элементов* размерность задачи понижается за счет того, что элементы представляют только границы моделируемой области, но требует знания фундаментального решения системы уравнений.

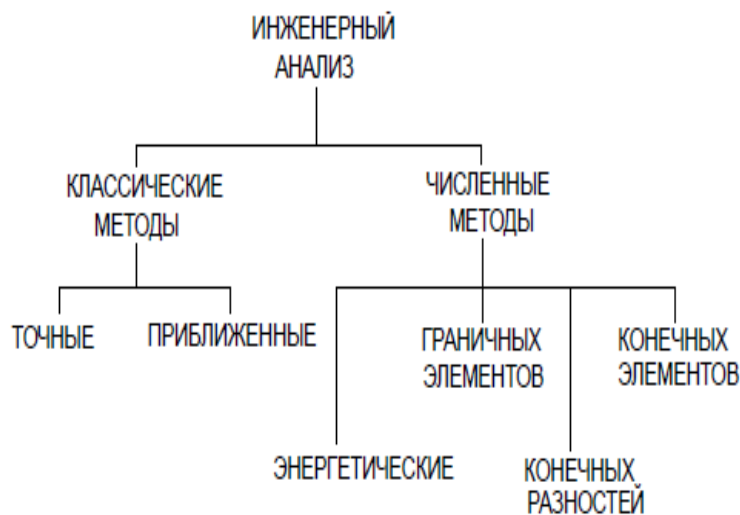


Рис. 1.11. Методы инженерного анализа

Метод конечных разностей преобразует систему дифференциальных уравнений в систему алгебраических уравнений. Метод позволяет решать задачи при наличии сложной геометрии и особых нагрузок, но при этом Отличается громоздкостью вследствие того, что требование регулярной сетки на рассматриваемой области

приводит к системам уравнений очень больших порядков [106-109].

Метод конечных элементов позволяет использовать элементы различных форм для получения сеточных разбиений любых нерегулярных областей.

Размеры конечных элементов в разбиении могут практически не ограничены. Нагрузки и граничные условия могут задаваться в произвольном виде. МКЭ как и другие численные методы требует, выполнения большого числа вычислительных операций по сравнению с классическими методами. Точность расчета зависит от дискретизации континуальной системы, типов КЭ, корректность назначения граничных условий.

В МКЭ, аналогично методам строительной механики, за неизвестные могут приниматься различные величины, как кинематические (перемещения, деформации), так статические (внутренние силы, напряжения и др.) или смешанные кинематические и статические параметры. В зависимости от выбора узловых неизвестных различают три формы МКЭ: метод перемещений, метод сил и смешанный метод

Метод перемещений – наиболее распространенная форма МКЭ, так как для рассматриваемой конструкции менее трудоемко определить кинематически определимую основную систему метода перемещений, в сравнении со статически определимой системы метода сил.

Для формирования разрешающих уравнений конечно-элементной модели используются энергетический принцип. Наиболее распространенным является принцип минимума потенциальной энергии, или принцип Лагранжа. Основными неизвестными здесь являются перемещения узловых точек дискретной схемы, напряжения определяются путем численного дифференцирования перемещений. К достоинствам метода относятся: простота реализации; удовлетворительные точность и устойчивость решения. Минусы: точность определения напряжений ниже, чем перемещений.

Для МКЭ в форме *метода сил* основными неизвестными являются напряжения, что на практике связано с определенными сложностями.

При *смешанном методе* перемещения и напряжения в пределах каждого КЭ аппроксимируются одновременно.

1. 6 Численный анализ НДС конструкций на основе МКЭ

МКЭ основан на представлении реальной континуальной конструкции ее дискретной моделью. На этапе моделирования реального НДС конструкций система дифференциальных уравнений преобразуется в соответствующую систему алгебраических уравнений. [69, 96-105, 110, 111, 113-116]

Построение расчета сводится к нескольким стадиям:

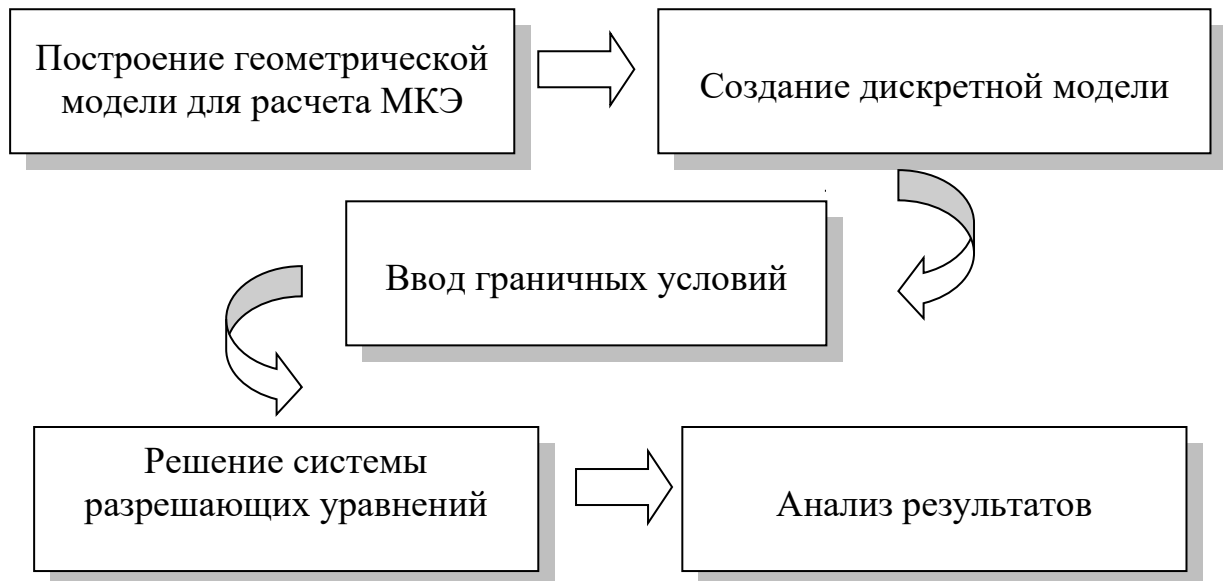


Рис. 1.12 Основные стадии расчета метода конечных элементов

Первая стадия – создание геометрической модели для расчета МКЭ, которая определяется координатами узлов, принадлежащих элементу

Табл. 1.7. Конечные элементы для задач с разным порядком аппроксимации.

		Геометрия и функция аппроксимации		
		линейная	квадратичная	кубическая
Геометрия	1D			
	2D			
	3D			

Рисунок 1.2 – Конечные элементы для одно-, двух- и трехмерных задач с разным порядком аппроксимации.

На второй стадии определяется рациональность использования различных типов КЭ (стержневые элементы, пластины, оболочки, объемные элементы и т. д.) в рассматриваемой модели.

При дискретизации континуальных систем выполняются мероприятия по созданию максимально возможного количества областей с регулярной сеткой конечных элементов. В местах, где предполагаются большие градиенты напряжений, необходима более мелкая сетка. При решении двумерных задач разбивка области обычно производится треугольными и прямоугольными элементами.

Каждый конечный элемент в дискретной системе характеризуется обособленным набором данных:

- координаты всех узлов элемента;
- номера узлов, в которых элемент связан с другими элементами;
- Физико-механические свойства материалов (модули деформаций и т.п.)

На стадии моделирования граничных условий учитывают как действие активных сил, так и наложенных на систему связей. Статические граничные условия учитываются при формировании вектора нагрузки R . Приложение силовых факторов должно учитывать особенности реальной работы конструкции при рассматриваемых режимах эксплуатации. Для получения узловых нагрузок при необходимости вводят дополнительные узлы и разбивают конструкции на более мелкие элементы. Распределенные нагрузки заменяются эквивалентными обобщенными узловыми силами.

Общая система уравнений равновесия конечно-элементной модели исследуемого деформированного тела.

$$[K] \cdot \{U\} = \{R\} + \{R\}^q + \{R\}^g + \{R\}^{\varepsilon_0} + \{R\}^{\sigma_0} \quad (1.1)$$

где $[K]$ - матрица жесткости конечно-элементной модели;

$\{U\}$ - вектор узловых перемещений;

$\{R\}, \{R\}^q, \{R\}^g, \{R\}^{\varepsilon_0}, \{R\}^{\sigma_0}$ - векторы узловых сил, эквивалентных распределенным поверхностным и массовым силам, начальным деформациям и напряжениям.

Кинематические граничные условия представляются в виде заданных узловых перемещений. Нулевые перемещения соответствуют абсолютно жестким опорным связям. Отличные от нуля заданные перемещения могут быть обусловлены смещением (осадкой) фундамента и т. п. Помимо жестких связей и смещений опор в реальной конструкции могут иметь место упругие связи (упругое основание). Количество связей должно быть достаточным, чтобы обеспечить построение кинематически неизменяемой модели.

Несмотря на сложность и объем вариационных вычислений, МКЭ позволяет получить наглядную физическую интерпретацию НДС конструкции.

Практика расчетов показывает:

- линейные элементы требуют более мелкой сетки;
- упорядоченная сетка предпочтительнее произвольной формы;
- прямоугольная сетка с четырьмя узлами (рис. 1.13, а) более выгодна, чем сетка с треугольными элементами (рис. 1.13, б);
- сетка треугольных элементов с промежуточными узлами (рис. 1.13, в) имеет точность, близкую к сетке прямоугольных элементов с четырьмя узлами (см. рис. 1.13, а);
- прямоугольная сетка с восемью узлами (рис. 1.13, г) предпочтительнее сетке треугольных элементов с промежуточными узлами (см. рис. 1.13, в), несмотря на большую площадь прямоугольных элементов;

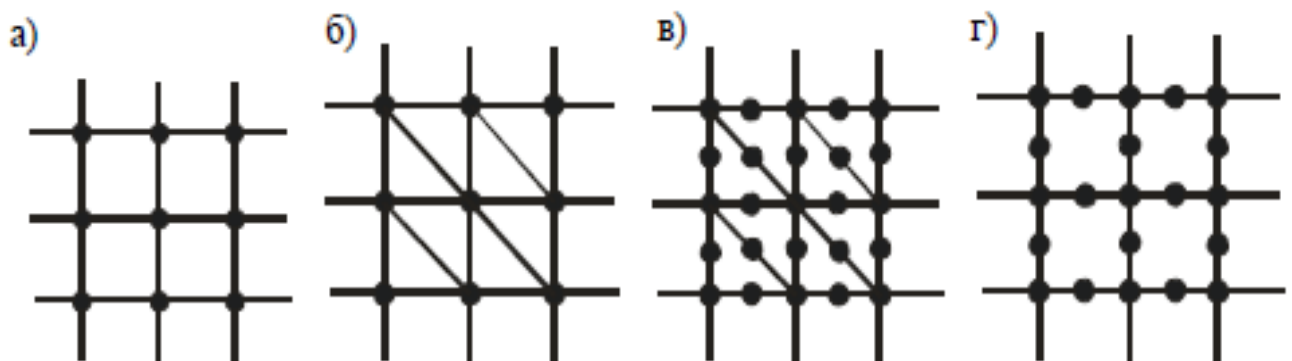


Рис. 1.13 Различные типы конечноэлементных сеток

Мелкая сетка требуется в местах значительного градиента деформаций или напряжений. Крупная сетка, в основном, используется в зонах без резких всплесков

деформаций или напряжений или во второстепенных зонах, для чего выделяются возможные области концентрации напряжений.

Точность результатов расчетов уменьшается, если существенно различаются размеры соседних элементов. Вблизи концентратора напряжений точность результатов расчетов может снижаться при наличии значительном отличии размеров соседних элементов

Форма конечных элементов может оказывать влияние на точность расчетов. Вытянутые элементы дают меньшую точность, чем равноразмерные элементы. Недопустимы четырехугольные элементы с углами $>180^\circ$.

МКЭ допускает ясную геометрическую, конструктивную и физическую интерпретацию и является основным методом в основе подавляющего большинства современных программных комплексов

1. 7 Определение напряженно-деформированного состояния строительных тонкостенных оболочек

Большая часть оболочек, применяемых в строительстве, относится к тонким оболочкам, для расчета которых используется математический аппарат на основе допущений, что материал подчиняется закону Гука и перемещения точек оболочки малы по сравнению с ее толщиной. [64-68, 88, 90-95, 117-126, 131-138, 140, 142,143, 146, 147, 167-169]

Кроме того, используются два допущения теории пластин:

1) о прямых нормалях, т. е. считается, что линейные элементы оболочки, нормальные к срединной поверхности, остаются прямолинейными и нормальными к изогнутой срединной поверхности;

2) об отсутствии поперечного давления, т. е. предполагается, что нормальные напряжения, перпендикулярные к срединной поверхности, пренебрежимо малы.

При расчете оболочек произвольной формы используют систему криволинейных координат: расстояние z по вертикали, отсчитываемое от точки O , определяющее параллель Π , и угол θ , отсчитываемый от начальной плоскости

yOz , определяющий положение плоскости BOA , в которой лежит меридиан M . Пересечение параллели Π и меридиана M определяет положение точки K на поверхности.

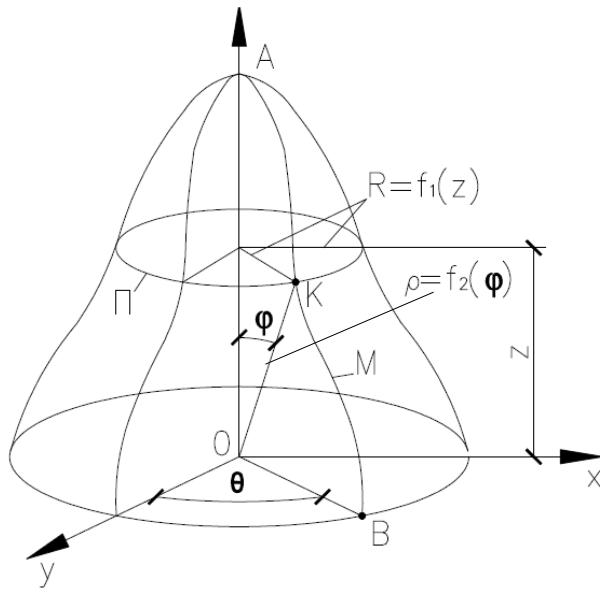


Рис.1.14 Тонкостенная оболочка вращения произвольной формы

Радиус R представляет собой функцию от z . При сферической системе за координаты принимаются: угол φ , отсчитываемый в плоскости BOA от вертикальной оси z , определяющий положение параллели Π , и угол θ , определяющий положение меридиана M . Радиус R представляет собой функцию от φ . Если выделить из оболочки, нагруженной непрерывно распределенной нагрузкой, элемент AOB двумя парами смежных взаимно

ортогональных сечений. На него действуют десять погонных усилий: изгибающие моменты M_x и M_y , крутящие моменты H_x и H_y , продольные силы N_x и N_y , поперечные силы Q_x и Q_y и сдвигающие силы T_{xy} и T_{yx} .

Для решения статически неопределимой задачи о напряженном состоянии пользуются решениями для частных случаев формы оболочки дающих возможность упростить количество разрешающих уравнений.

Наиболее распространенное решение получается по безмоментной теории, когда напряжениями изгиба можно пренебречь, учитывая лишь напряжения, связанные с деформацией срединной поверхности.

Это применимо в тех случаях, когда радиусы срединной поверхности изменяются плавно, оболочка не имеет переломов и резких изменений толщины. Нагрузка, действующая на оболочку, тоже изменяется плавно. По безмоментной теории предполагается, что изгибающие и крутящие моменты, а также поперечные силы отсутствуют, т. е. $M_x = M_y = H_x = H_y = Q_x = Q_y = 0$, и остаются

лишь продольные силы N_x и N_y и сдвигающие силы $T_{xy} = T_{yx}$.

$$N_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_x \left(1 - \frac{z}{R_2}\right) dz \quad N_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_y \left(1 - \frac{z}{R_1}\right) dz \quad (1.2)$$

$$T_{xy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{xy} \left(1 - \frac{z}{R_2}\right) dz \quad T_{yx} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \tau_{yx} \left(1 - \frac{z}{R_1}\right) dz \quad (1.3)$$

Если оболочка представляет собой оболочку вращения и нагрузка симметрична относительно оси вращения и нормальна к срединной поверхности, то сдвигающие силы $T_{xy} = T_{yx}$ отсутствуют и остаются только продольные силы; меридиональные N_m и окружные N_t .

При постоянной интенсивности давления q и постоянных радиусах R_1 и R_2 главных кривизн меридиональные, так же как и окружные погонные силы N_m и N_t , одинаковы во всех точках и напряженное состояние оболочки *однородное*.

1. 8. Измерение линейных деформаций тензометрами и тензорезисторами

По конструктивному решению тензометры бывают механические, электромеханические, струнные, проволочные, тензометры сопротивления. [151-154] При испытании конструкций для измерения малых деформаций могут использоваться тензометры с фиксацией этих деформаций с увеличением.

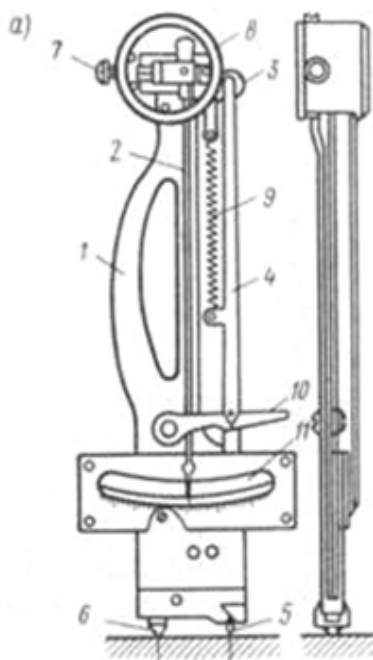


Рис 1.15. Тензометр Гугенбергера:

1 — корпус прибора; 2 — стрелка; 3 — коромысло; 4 — рычаг; 5 — призма (подвижный нож); 6 — неподвижный нож; 7 — регулировочный винт; 8 — предохранительный кожух; 9 — пружина; 10 — арретир; 11 — зеркальная шкала.

В практике наибольшее распространение получили механические рычажные тензометры Гугенбергера (рис.1.15.) благодаря простой схеме, достаточной точности, малому габариту и небольшой массе.

Тензометр крепится к исследуемой конструкции с помощью трубцин или других аналогичных устройств.

Тензометр Гугенбергера малопригоден для измерения быстроменяющихся деформаций, вибрации, поэтому для снижения погрешности измерений тензометров располагают вне зон местной концентрации напряжений.

Тензометр Аистова (рис. 1.16) также использует принцип системы рычагов и винтовой пары. Стандартная база измерений 20 мм и 50 мм, которая может быть увеличена до 200 мм при использовании допприиспособлений. Благодаря наличию диска они позволяют измерять деформации в широких пределах без перестановки прибора. На диске имеется градуированная шкала в миллиметрах. При измерении деформаций острие микрометрического винта доводят до контактной площадки, электрическая цепь замыкается и берется отчет по звуковому сигналу.

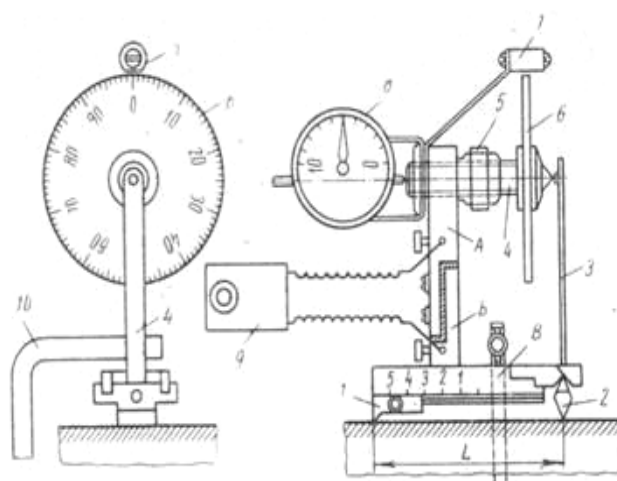


Рис 1.16. Тензометр Аистова ТА-2:

1 — неподвижная призма; 2 — подвижная призма; 3 — перо; 4 — микрометрический винт; 5 — натяжная гайка; 6 — диск со шкалой; 7 — указатель для отсчетов; 8 — счетчик; 9 — генератор сигналов, звуковой частоты; 10 — трубка

Широкое распространение также получили тензометры с индикаторами часового типа. При этом деформация исследуемого объекта воспринимается подвижным рычагом и передается на измерительный шток индикатора. Точность измерений определяется точностью используемого индикатора и может быть повышена изменением соотношения плеч рычагов.

В ряде случаев для замера деформаций при испытании конструкций используются электрические тензометры, состоящие из датчиков омического сопротивления, емкостные, индуктивные и др.

Одним из наиболее распространенных методов экспериментального исследования деформаций является электротензометрический метод. Тензорезисторы отличаются высокой чувствительностью и возможностью измерять деформации малых участков и в труднодоступных местах. Отношение относительного изменения сопротивления тензорезистора к его относительному удлинению определяется коэффициентом тензочувствительности. Применяются проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы. [148, 150]

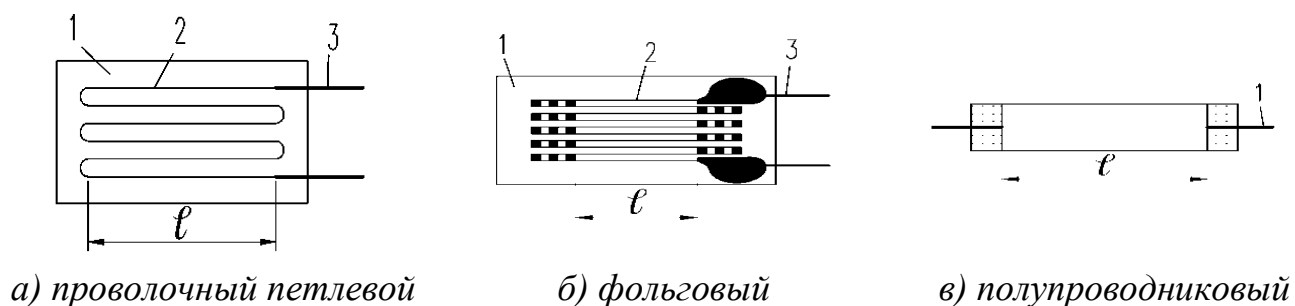


Рис. 1.17 – Основные виды тензорезисторов

Проволочный тензорезистор (рисунок 1.17,а) представляет собой плоскую спираль константановой или нихромовой проволоки диаметром 0,015..0,030 мм, наклеенную на бумажную подложку 2.

Чувствительность тензорезистора к поперечным деформациям обусловлена с наличием петель на концах, чем меньше их доля, тем меньше влияние, поэтому для тензорезисторов с базой $l \geq 5$ мм поперечную тензочувствительность S_y не учитывают.

Фольговые тензорезисторы (рисунок 1.17, б) изготавливают из константановой фольги. Фольговые тензорезисторы обладают малой чувствительности к поперечной деформации благодаря конструкции перемычек, и повышенной теплопередаче. В связи с этим, возможно повышение диапазона рабочих температур и рабочего тока и, как следствие, повысить чувствительность электрической схемы с тензорезистором.

Полупроводниковые тензорезисторы (рисунок 1.17, в) представляют собой утоненную пластину из монокристаллов кремния или германия в определенном кристаллографическом направлении. Основным преимуществом полупроводниковых тензорезисторов является высокий коэффициент тензочувствительности, что позволяет измерять деформации без усиления выходного сигнала. Недостатками являются значительная зависимость сопротивления от кристаллографического направления, температуры, нестабильная чувствительности во времени.

1. 9. Моделирование НДС композитных материалов

В развитие инженерной механики композитов внесли значительный вклад работы Ю.Н. Работнова [86], Р. Кристенсена [166], Б.Е. Победри [70], В.В. Васильева [162]., И.Ф. Образцова [144], Г.А. Тетерса, Р.Б. Рикардса [145], Н.А. Амбросимова [89] и ряда других зарубежных и отечественных исследователей [51, 71, 112, 127-130, 139, 141].

Применяемые в массовом строительстве КМ характеризуются большим разнообразием как в виде слоистых материалов, армированных последовательно чередующимися слоями так или матриц с дискретным или пространственным армированием. Матрица в армированных КМ придает форму, обеспечивает несущую способность композиции и передачу усилий на элементы армирования при различных нагрузках: растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг и др.

В механике композитов, как правило, рассматривается два уровня - микронеоднородность композита, матрица составленная из волокон и связующего и макронеоднородность, когда композит по толщине рассматривается как однородное анизотропное тело, что позволяет, использовать общеизвестные подходы теории анизотропных сред с ортогональной симметрией свойств.

На первом уровне решается задача микромеханики на основе микромоделей композитов для установления связи между характеристиками КМ и его компонентов и анализа распределения напряжений и деформаций внутри компонентов и на межфазных границах.

На втором уровне решается задача определения жесткостных и упругих характеристик всего многослойного пакета. Осреднение проводится в сочетании с некоторыми гипотезами о полях напряжений, перемещений и деформаций. При формулировке гипотез учитывается фактический способ взаимодействия слоев в многослойном композите. В теории армированных сред [158-161, 163-165] для моно-и многослойного композита неоднородность обобщается определение эффективных деформативных характеристик. Замена неоднородного композита эффективным однородным анизотропным телом эффективно, в первую очередь, для решения задач жесткости пластин и оболочек. При этом такой подход не дает возможности достоверно определить концентрацию напряжений и деформаций на границах раздела фаз, микродефектов структуры и внутри составляющих компонентов КМ.

Механические свойства композитов в отличие от металлов характеризуются большим числом экспериментальных постоянных. Модели деформирования и разрушения композитов строятся на структурно-феноменологическом принципе по построению определяющих соотношений с учетом многообразия физико-механических характеристик композитов.

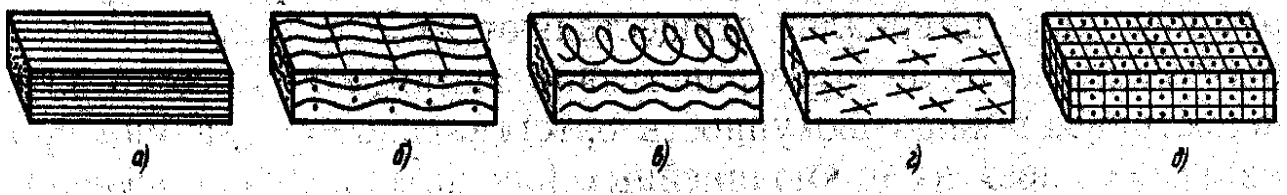


Рис. 1.18 Материалы, армированные прямолинейными волокнами (а) и тканями (б); хаотические, армированные непрерывными (в) и дискретными (г) волокнами; пространственно армированные (д)

При анализе НДС анизотропных материалов обладающих упругой симметрией пользуются упругими характеристиками – модулями Юнга и сдвига, коэффициентами Пуассона. Для ортотропного материала, оси симметрии которого совпадают с осями координат, закон Гука с использованием упругих постоянных записывается в форме:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \sigma_x / E_x - (\mu_{yx} / E_y) \sigma_y - (\mu_{zx} / E_z) \sigma_z; \\ \varepsilon_y &= -(\mu_{xy} / E_x) \sigma_x + \sigma_y / E_y - (\mu_{zy} / E_z) \sigma_z; \\ \varepsilon_z &= -(\mu_{xz} / E_x) \sigma_x - (\mu_{yz} / E_y) \sigma_y + \sigma_z / E_z; \end{aligned} \right\} (1.4)$$

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy} / G_{xy}; \quad \gamma_{yz} = \tau_{yz} / G_{yz}; \quad \gamma_{zx} = \tau_{zx} / G_{zx}. \quad (1.5)$$

Модуль сдвига $G_{xy}^{(45)}$ связан с модулями упругости E_x и $E_{xy}^{(45)}$ соотношением

$$G_{xy}^{(45)} = E_x E_{xy}^{(45)} / [E_x (1 + \mu_{yx}) + E_y (1 + \mu_{xy})]. \quad (1.6)$$

Коэффициенты Пуассона ортотропного тела связаны с его модулями упругости зависимостями

$$\mu_{xy} = \frac{1}{2} (E_x / E_y + E_x / G_{xy} + 1 - 4E_x / E_{xy}^{(45)}); \quad (1.7)$$

$$\mu_{yz} = \frac{1}{2} (E_y / E_z + E_y / G_{yz} + 1 - 4E_y / E_{yz}^{(45)}); \quad (1.8)$$

$$\mu_{zx} = \frac{1}{2} (E_z / E_x + E_z / G_{zx} + 1 - 4E_z / E_{zx}^{(45)}). \quad (1.9)$$

При этом считается справедливым:

$$\mu_{zx} / E_z = \mu_{yz} / E_y = \mu_{xz} / E_x = \mu_{zy} / E_z. \quad (1.10)$$

Для оценки прочности КМ при в сложном напряженном состоянии, используют различные критерии предельных состояний, при которых КМ переходит от упругого состояния к пластическому или разрушается.

Расчет упругих характеристик ортогонально-армированных КМ по свойствам компонентам базируется на модели, состоящей из однонаправленных слоев, уложенных поочередно в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Оси координат x и y принимаются в плоскости укладки волокон, а ось z перпендикулярно слоям.

Основные допущения: каждый элементарный слой в процессе нагружения находится в однородном НДС; все слои жестко связаны между собой, что позволяет считать КМ ортотропным материалом

Слои с волокнами, ориентированными вдоль оси x имеют индекс a , а слои, ориентированными вдоль оси y имеют индекс b . Объемная доля слоев a равна m , а

слоев b равна (1- m). Упругие характеристики КМ рассчитывается по формулам:

$$E_x = (1-m)(\kappa_1\kappa_2 - \kappa_3^2) / [c_{a11}(c_{b11}\kappa_2 - c_{b12}\kappa_3) + c_{a12}(c_{b12}\kappa_1 - c_{b11}\kappa_3)]; \quad (1.11)$$

$$E_y = (1-m)(\kappa_1\kappa_2 - \kappa_3^2) / [c_{a22}(c_{b22}\kappa_1 - c_{b12}\kappa_3) + c_{a12}(c_{b12}\kappa_2 - c_{b22}\kappa_3)]; \quad (1.12)$$

$$E_z = (\kappa_1\kappa_2 - \kappa_3^2) / [\kappa_4(\kappa_2\kappa_5 - \kappa_3\kappa_7) + \kappa_6(\kappa_1\kappa_7 - \kappa_3\kappa_5) + \kappa_8(\kappa_1\kappa_2 - \kappa_3^2)]; \quad (1.13)$$

$$\mu_{yx} = -\frac{c_{a12}(c_{b11}\kappa_2 - c_{b12}\kappa_3) + c_{a22}(c_{b12}\kappa_1 - c_{b11}\kappa_3)}{c_{a22}(c_{b22}\kappa_1 - c_{b12}\kappa_3) + c_{a12}(c_{b12}\kappa_2 - c_{b22}\kappa_3)}; \quad (1.14)$$

$$\mu_{xz} = \{1/[c_{a11}(c_{b11}\kappa_2 - c_{b12}\kappa_3) + c_{a12}(c_{b12}\kappa_1 - c_{b11}\kappa_3)]\}[(1-m)c_{b31}(\kappa_1\kappa_2 - \kappa_3^2) + m(c_{a31} - c_{b31})(c_{b11}\kappa_2 - c_{b12}\kappa_3) + m(c_{a32} - c_{b32})(c_{b12}\kappa_1 - c_{b11}\kappa_3)]; \quad (1.15)$$

$$\mu_{yz} = \{1/[c_{a22}(c_{b22}\kappa_1 - c_{b12}\kappa_3) + c_{a12}(c_{b12}\kappa_2 - c_{b22}\kappa_3)]\}[(1-m)c_{b32}(\kappa_1\kappa_2 - \kappa_3^2) + m(c_{a32} - c_{b32})(c_{b22}\kappa_1 - c_{b12}\kappa_3) + m(c_{a31} - c_{b31})(c_{b12}\kappa_2 - c_{b22}\kappa_3)]; \quad (1.16)$$

$$G_{xy} = c_{a66}c_{b66} / [mc_{b66} + (1-m)c_{a66}]; \quad (1.17)$$

$$G_{xz} = 1/[mc_{a55} + (1-m)c_{b55}]; \quad (1.18)$$

$$G_{yz} = 1/[mc_{a44} + (1-m)c_{b44}]. \quad (1.19)$$

Матричные обозначения коэффициентов податливости однонаправленных монослоев: $c_{a11} = 1/E_{ax}$; $c_{a22} = 1/E_{ay}$; $c_{a33} = 1/E_{az}$;

$$\begin{aligned} c_{a44} &= 1/G_{ayz}; & c_{a55} &= 1/G_{axz}; & c_{a66} &= 1/G_{axy}; & c_{a13} &= c_{a31} = -\mu_{axz}/E_{az} = -\mu_{axz}/E_{ax}; \\ c_{a23} &= c_{a32} = -\mu_{azy}/E_{az} = -\mu_{ayz}/E_{by}; & c_{b11} &= 1/E_{bx}; & c_{b22} &= 1/E_{by}; & c_{b33} &= 1/E_{bz}; & c_{b44} &= 1/G_{yz}; \\ c_{b55} &= 1/G_{xz}; & c_{b66} &= 1/G_{xy}; & c_{b13} &= c_{b31} = -\mu_{bzx}/E_{bz} = -\mu_{bxz}/E_{bx}; & c_{b23} &= c_{b32} = -\mu_{bzy}/E_{bz} = -\mu_{ayz}/E_{by}; \\ \kappa_1 &= c_{a11} + [m/(1-m)]c_{b11}; & \kappa_2 &= c_{a22} + [m/(1-m)]c_{b22}; & \kappa_3 &= c_{a12} + [m/(1-m)]c_{b12}; & \kappa_4 &= m(c_{a13} + c_{b13}); \\ \kappa_5 &= c_{b13} - c_{a13}; & \kappa_6 &= m(c_{a23} + c_{b23}); & \kappa_7 &= c_{b23} - c_{a23}; & \kappa_8 &= mc_{a23} + (1-m)c_{b33}. \end{aligned}$$

Для инженерных расчетов модулей упругости E_x и E_y и коэффициента Пуассона μ_{yx} ортогонально-армированных КМ используются формулы:

$$E_x = [mc_{b11} + (1-m)c_{a11}] / (c_{a11}c_{b11}); \quad (1.20)$$

$$E_y = [mc_{b11} + (1-m)c_{a11}] / (c_{a22}c_{b22}); \quad (1.21)$$

$$\mu_{yx} = -c_{a22} / [mc_{a22} + (1-m)c_{a11}]. \quad (1.22)$$

ВЫВОДЫ ПО 1 РАЗДЕЛУ

1. Гипсокартон, относится к крупноформатным тонкостенным конструкционным отделочным плитам ($6,5 \leq t \leq 25 \text{ мм}$) и обладают высокой относительной прочностью на изгиб. Для достижения требуемой эксплуатационной жесткости ГК конструкции монтируются с различными системами каркасов из унифицированных элементов, отвечающих стандарту DIN 18182. Низкая удельная материалоемкость, широкий диапазон вариации звукоизолирующих и огнезащитных характеристик при гарантированной жесткости всей конструкции, возможность создания объемных криволинейных элементов предопределяют стабильный спрос на комплектные ГК системы при строительстве, ремонте и реконструкции и гражданских зданий.

2. Физико-механические характеристики регламентируются Европейским стандартом DIN EN 520:2005-03 и Межгосударственным стандартом ГОСТ 6266-97 и как полимерный материал, разрешен в строительстве. В отечественной и зарубежной литературе отсутствуют сведения о результатах экспериментальных исследований прочности и деформативности и трещиностойкости ГКП.

3. 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 ($d \leq 3,6 \text{ м}$) и монтируются по ребристо-кольцевой схеме: основной несущий каркас из профильной стальной трубы и второстепенный из тонкостенных прессованных профилей. Сопряжение профилей к основному каркасу выполняется с помощью профильных соединителей на самонарезных винтах.

4. В практике строительства сложились тенденции к усложнению конструктивных форм пространственных конструкций в виде ГК куполов-оболочек. Внедрения в интерьеры сложных и габаритных ГК оболочек, значительно превышающих размеры стандартных куполов, приводит к

необходимости численного моделирования НДС и решения проблемы обеспечения трещиностойкости, как основополагающего критерия сохранения эстетического вида.

5. Большая часть оболочек, применяемых в строительстве, относится к тонким оболочкам для расчета которых принимается допущение, 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 вдоль срединной поверхности.

6. В сопоставлении с классическими методами численные методы инженерного анализа конструкций, базируются на отсутствии значительных затруднений по степени дискретизации континуальных моделей, включая геометрию оболочек любой степени сложности. МКЭ как основной численный метод строительной механики допускает ясную геометрическую, конструктивную и физическую интерпретацию и является основным методом в основе подавляющего большинства современных программных комплексов. Для формирования разрешающих уравнений конечно-элементной модели используются энергетический принцип. Наиболее распространенным является принцип минимума потенциальной энергии, или принцип Лагранжа.

7. В механике композитов, как правило, рассматривается два уровня - микронеоднородность композита, матрица составленная из волокон и связующего и макронеоднородность, когда композит по толщине рассматривается как однородное анизотропное тело, что позволяет, использовать общеизвестные подходы теории анизотропных сред с ортогональной симметрией свойств.

8. Замена неоднородного композита эффективным однородным анизотропным телом эффективно, в первую очередь, для решения задач

жесткости пластин и оболочек. При этом такой подход не дает возможности достоверно определить концентрацию напряжений и деформаций на границах раздела фаз, микродефектов структуры и внутри составляющих компонентов КМ. Расчет упругих характеристик ортогонально-армированных КМ по свойствам компонентам базируется на модели, состоящей из однонаправленных слоев, уложенных поочередно в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

9. Модель деформирования ГКП, применительно к композитам, может быть построена на структурно-феноменологическом принципе по построению определяющих соотношений который, в отличии от металлов, требует определения большего числа упругих характеристик. Основной проблемой в данном случае является отсутствие рекомендаций по проведению экспериментальных исследований и методам регистрации линейных деформаций при определении упругих характеристик.

РАЗДЕЛ 2

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Общие положения

На основании критического анализа нормативных требований, наличия опытных данных о НДС гипсокартонных оболочек разработана структурно-логическая схема задач исследований (рис.2.1)

Методы испытаний по определению физико-механических характеристик гипсокартонных плит регламентируются Европейскими стандартами [1, 2, 4] и Межгосударственным стандартом [3]. Под [3] были адаптированы национальные стандарты большинства стран СНГ и Таможенного союза ЕАЭС и разработаны технические условия производителей ГКП Knauf, Lafarge, Regips.



Рис.2.1 Структурно-логическая схема задач исследований

Существующая нормативная база Европейского Союза предусматривает несколько уровней. Первый уровень – союзный (наднациональный) – политика Центральных органов ЕС в области технического регулирования и стандартизации. Деятельность уполномоченных органов направлена на адаптацию Евростандартов на национальном уровне, гармонизацию ряда национальных стандартов с техническими регламентами и директивами ЕС. Второй уровень – национальный, включает деятельность уполномоченных исполнительных органов по формированию национального строительного законодательства. При разработке национальных стандартов используются адаптированные международные стандарты, европейские стандарты и другие стандарты предприятий и консорциумов.

Основным межгосударственным стандартом в Евросоюзе для гипсовых плит является EN 520. [2] Этот европейский стандарт был принят Европейским комитетом по стандартизации (CEN) 16 августа 2004 года. Членами CEN являются национальные институты стандартизации Бельгии, Дании, Германии, Эстонии, Финляндии, Франции, Греции, Ирландии, Исландии, Италии, Латвии, Литвы, Люксембурга, Мальты, Нидерландов, Норвегии, Австрии, Польши, Португалии, Швеции, Швейцарии, Словакии, Словении, Испании, Чешской Республики, Венгрии, Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии, а также Кипра. Для Федеративной Республики Германии этот европейский стандарт получил статус национального стандарта DIN 18180.

Этот документ охватывает следующие технические характеристики изделий: противопожарная характеристика, проницаемость по отношению к водяному пару, предел прочности на растяжение при изгибе (разрывная нагрузка), ударная прочность и термическое сопротивление.

Указанные выше технические характеристики относятся к системам, которые изготавливаются с применением гипсовых плит: прочность на сдвиг, огнестойкость, ударная прочность, звукоизоляция, изоляция от ударного шума, звукопоглощение и воздухопроницаемость, которые определяются с использованием соответствующих европейских испытательных методов.

Анализ показывает, что по основополагающим требованиям европейские и отечественные стандарты близки. Различия, в основном, заключаются в номенклатуре технических характеристик ГКП и по дополнительным требованиям евростандартов к гипсокартонным конструкциям в целом.

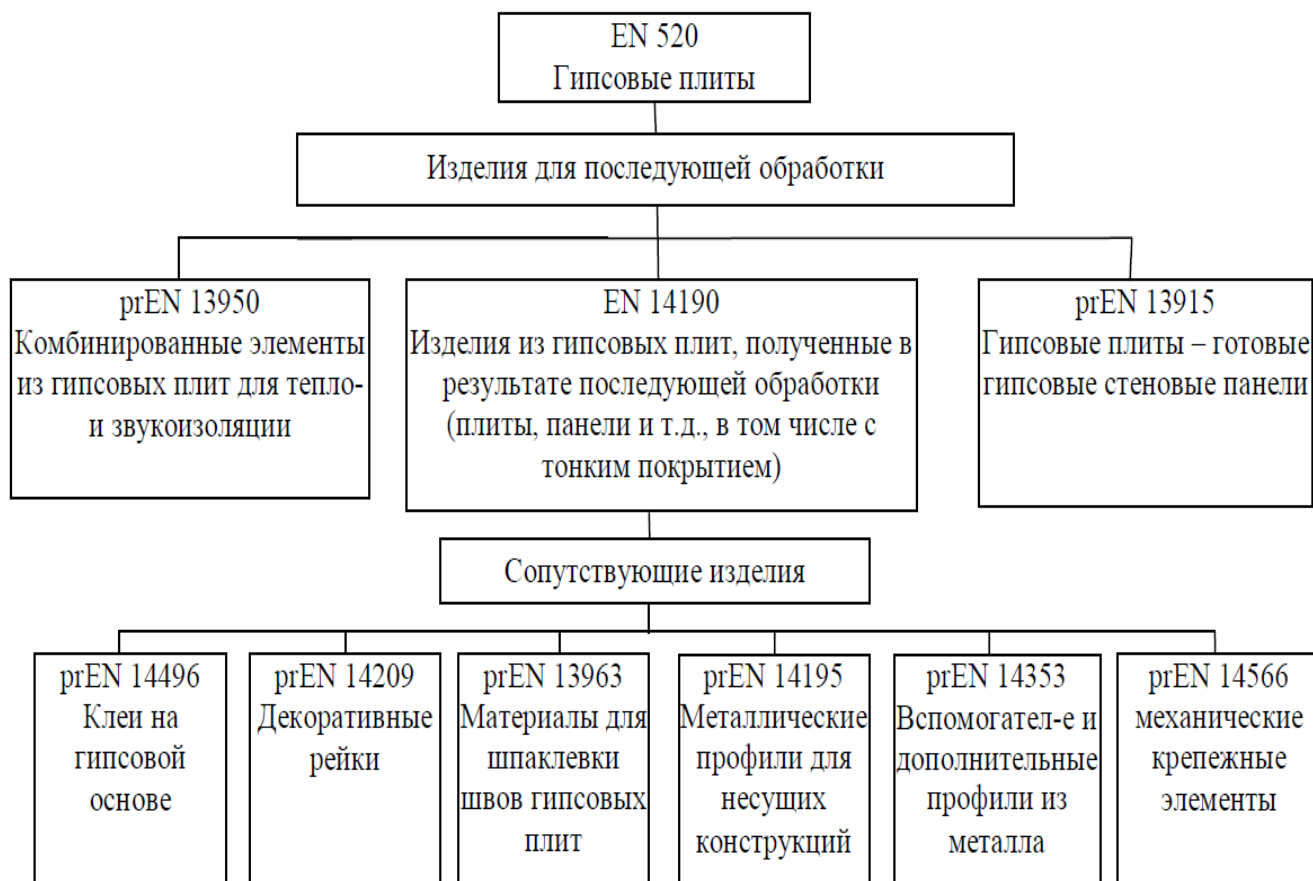


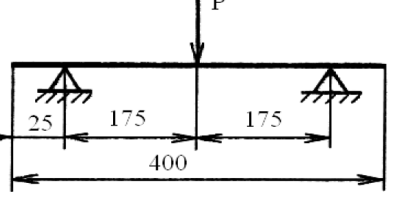
Рис. 2.2. Номенклатура нормативов Европейского Союза по гипсовым плитам и сопутствующим изделиям

Одним из основополагающих требований как европейского стандарта так и отечественного является прочность гипсокартонных листов при изгибе. Несмотря на близость подходов, затруднение вызывает сопоставление требуемых прочностных характеристик так как различны геометрические размеры испытываемых образцов (табл. 2.1).

В отличие от Межгосударственного стандарта, кроме требований и методов испытаний гипсовых плит европейской нормативной базой согласно DIN EN 13963-2005-08 «Материалы для шпатлевки швов на гипсовых плитах -

определения, требования и методы испытаний» регламентируются характеристики стыков при монтаже гипсокартонных конструкций.

Таблица 2.1 Методики испытания стандартных ГКП

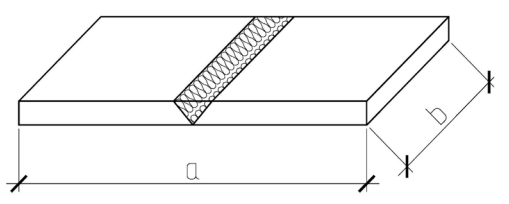
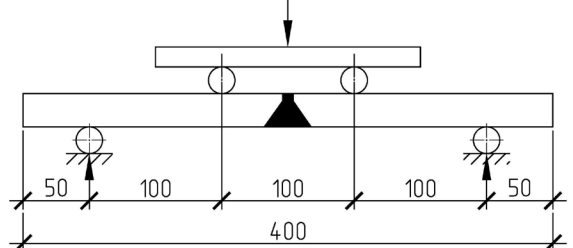
ГОСТ 6266-97	Нормируемая разрушающая нагрузка при изгибе	DIN EN 520:2005
Тип А/ Тип Б =600/180 Н		Тип А/ Тип Б =550/210 Н
$a=(40t+100+5)$; $b=(400+5)$	Размеры образцов, мм	$a=(400\pm5)$; $b=(300\pm5)$
		

Данный документ был разработан по поручению Европейской комиссии и Зоны свободной торговли CEN и поддерживает требования директив ЕС.

В нём определены требования к шпатлевочным материалам и армирующим лентам для заделки стыков стандартных и усиленным волокнами гипсовым плитам. Норматив имеет силу для шпаклевочных материалов, обрабатываемых как вручную, так и механическим способом и действителен как для шпаклевочного материала на гипсовой основе, так и других составов при различных вариантах армирующего материала.

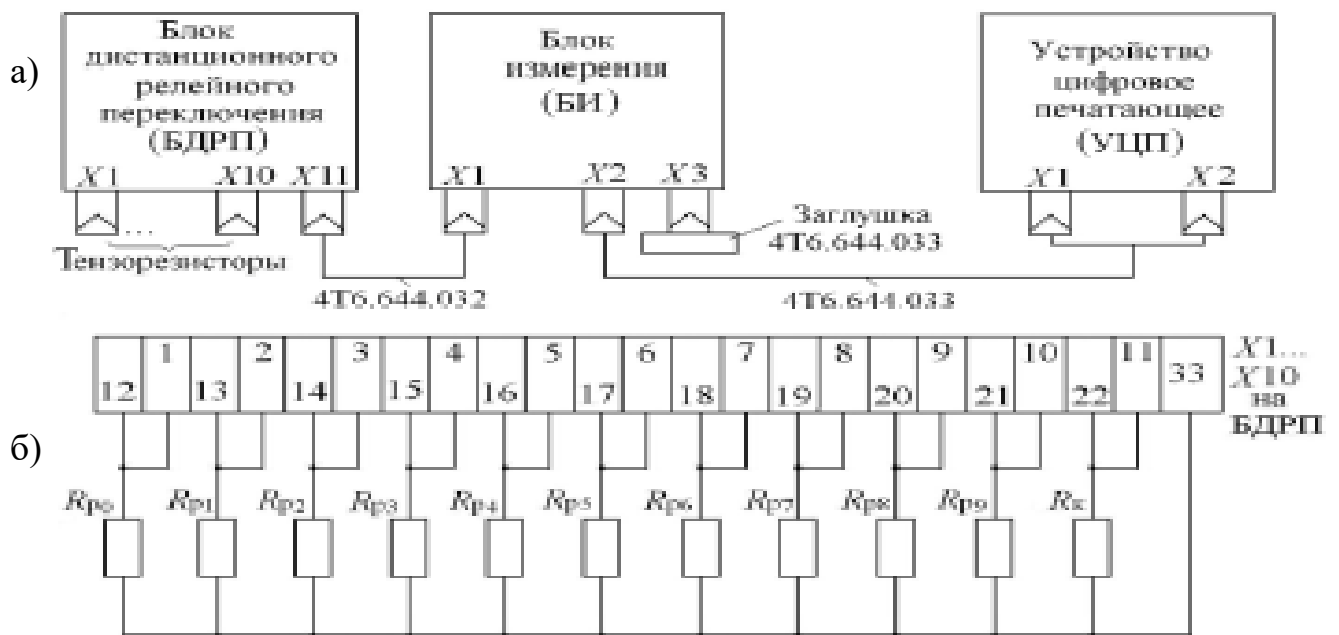
Приведенные в DIN EN 13963-2005-08 [1] методы испытания стыков плит при изгибе, прочность сцепления и когезия слоя шовного шпаклевочного материала позволяют с единых позиций производить анализ опытных данных на унифицированных образцах.

Табл. 2.2. Метод испытания стыков ГКП по DIN EN 13963

Опытные образцы	Схемы испытания
	

2.2. Мобильная измерительная тензометрическая система

До настоящего времени наиболее широко использовалась измерительная тензометрическая система СИИТ-3 (рис.2.3). Система предназначена для измерения выходных сигналов тензорезисторов с представлением результатов в цифровом виде. Система осуществляет последовательный опрос заданного количества измерительных каналов; предварительную аналоговую обработку измеряемых сигналов и преобразует их в цифровую форму с последующим выводом результатов измерения и номеров измерительных каналов на цифровое табло и цифропечатающее устройство. Данная система маломобильна, более трудоемка в обслуживании и значительно уступает высокоскоростным системам автоматизации на основе современных интерфейсов и ПК.



в)



Рис. 2.3 Структурная схема СИИТ-3
 а) схема соединения блоков СИИТ-3 и тензорезисторов;
 б) схема подключения тензорезисторов к БДРП;
 в) общий вид СИИТ-3

В настоящее время для замера и фиксации быстроменяющихся линейных деформаций в режиме реального времени, альтернативным вариантом СИИТ-3, может служить мобильная тензометрическая система (рис. 2.4) с использованием оборудования компании ОВЕН СПБ, которое успешно зарекомендовало себя при проектировании и обслуживании промышленных систем автоматизации и контроля, разработке аппаратно-програмных комплексов на базе КИП и тензорезисторов фирмы ВЕДА.

В разработках данных производителей используются передовые методы электроники, системы физического и математического моделирования, современные технологии разработки и тестирования ПО. [52, 53, 55, 157]

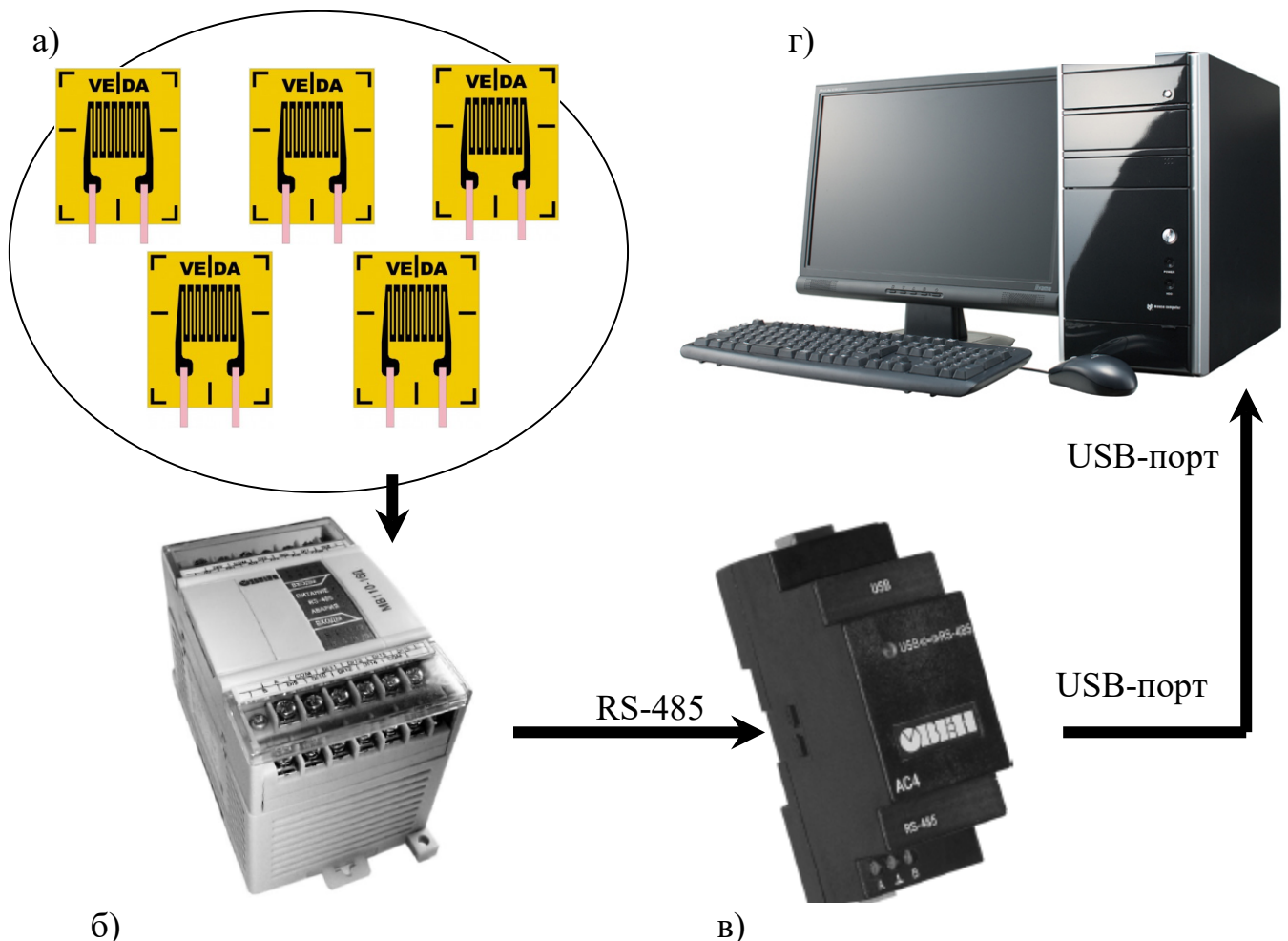


Рис.2.4 Мобильная измерительная тензометрическая система:

а) группа тензорезисторов «Веда»; б) Модуль ввода сигналов тензорезисторов; в) преобразователь интерфейсов; г) ПК с операционной системой Windows

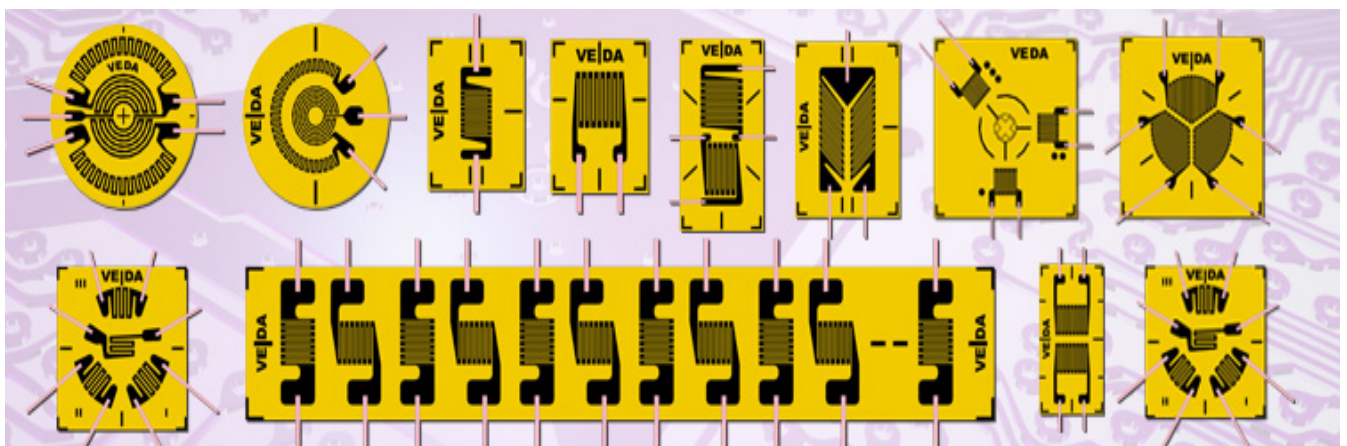
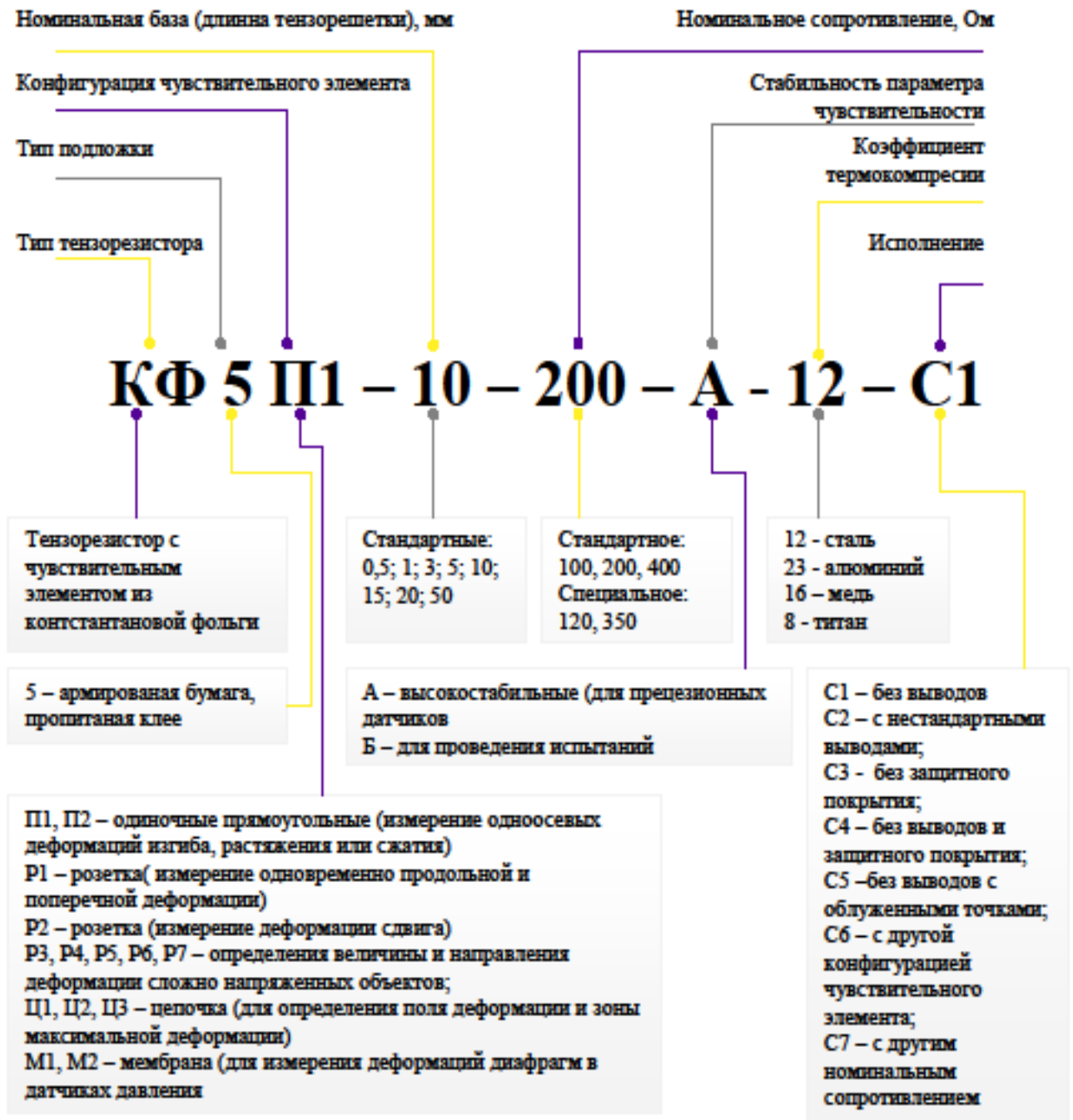
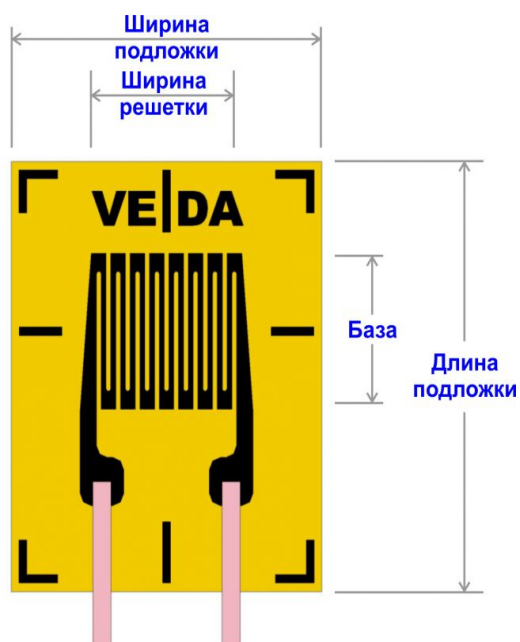


Рис. 2.5 Система обозначения тензорезисторов Веда

**Обозначения:**

R – номинальное сопротивление

C – ширина чувствительного элемента

L – длина подложки

B – ширина подложки

Предельное отклонение электрического сопротивления в партии (10 000 шт.), %	$\pm 1,0$
Предельное отклонение электрического сопротивления в группе (100 шт.), %	$\pm 0,2$
Максимальная измеряемая деформация, мкм/м	± 3000
Чувствительность	от - 1,9 до 2,3
Температурный диапазон работы, °C	от - 70 до + 200

Табл. 2.3 Клеи для наклейки тензорезисторов

Название	Характеристика	Применение	Температурный диапазон работ, °C
Клей циакрин ЭО	цианокрилатный, быстросхватывающийся, холодного отверждения	склеивает металлы и непористые материалы	от - 80 до + 80
Клей УВС-10ТС	фенольный однокомпонент-ный, горячего отверждения	применяется для наклейки тензорезисторов на металлы и различные неметаллические непористые материалы	от - 70 до + 300
Клей БФР-2К	фенолоформальдегидный однокомпонентный, горячего отверждения	применяется для склеивания металлических и неметаллических изделий	от - 70 до + 200

Структурная схема измерительной тензометрической системы (рис.2.6) включает в себя: группа тензорезисторов «Веда»; модуль ввода сигналов тензорезисторов МВ 110-224.4 Т Д «Овен»;- преобразователь интерфейсов АС-4 «Овен»; ПК с операционной системой Windows.

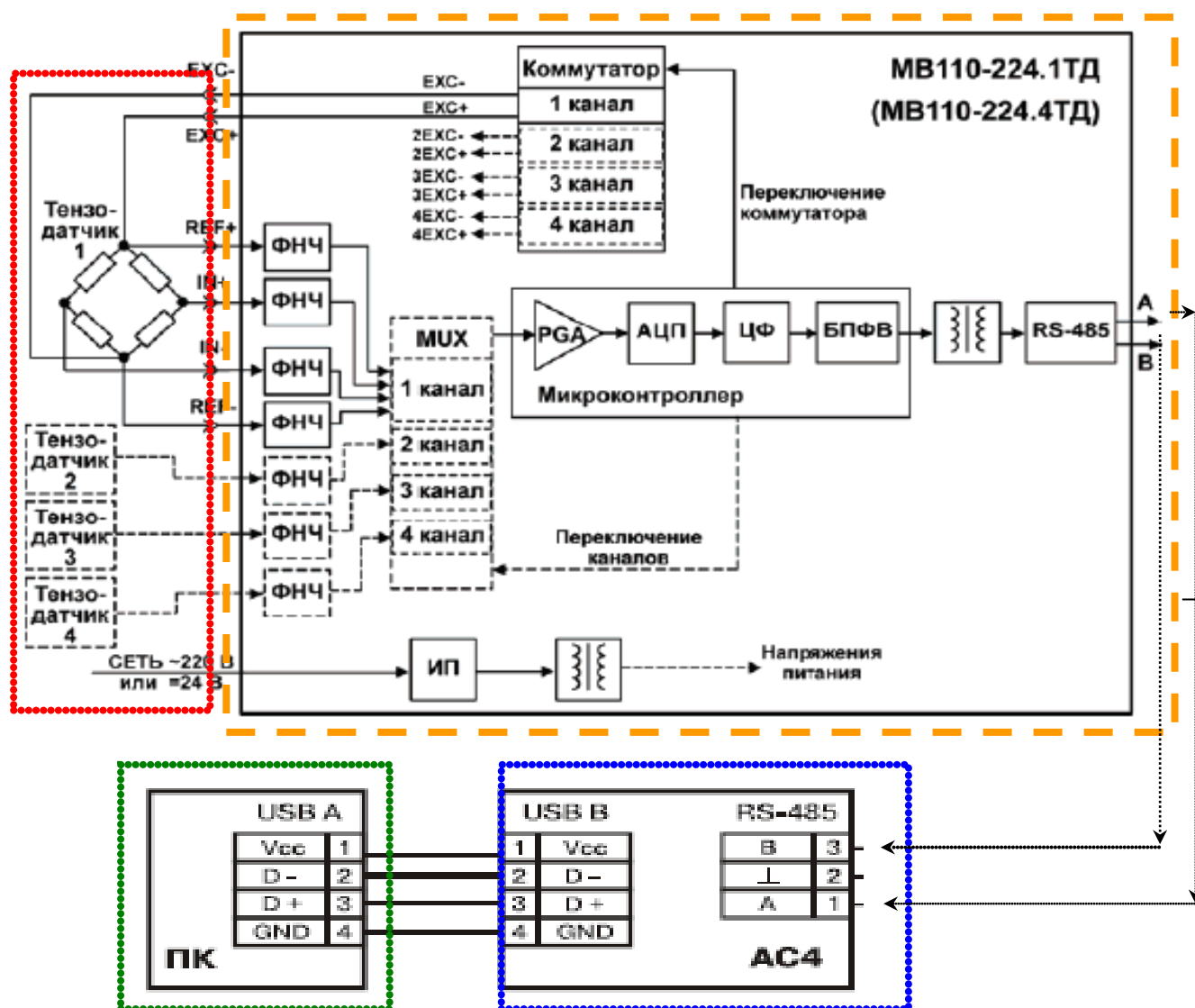


Рис. 2.6. Структурная схема тензометрической системы на основе приборов «Овен»

Модуль ввода сигналов тензорезисторов MB 110-224.4 Т Д «Овен» предназначен для измерения сигналов мостовых тензометрических датчиков, преобразования данных измерений в значение физической величины и передачи результатов измерения в сеть RS-485.

Прибор MB110-224.4ТД имеет четыре независимых измерительных канала для подключения четырех тензодатчиков. Приборы применяются для работы с тензометрическими датчиками мостового типа в составе измерительных систем контроля. Входным сигналом для прибора является постоянное напряжение с выхода резистивного моста (тензометрического датчика мостового типа рис. 2.6).

Прибор вырабатывает постоянное напряжение величиной 2.5 В для питания тензорезистивного моста (тензодатчика), клеммы прибора **EXC+**, **EXC-**. С диагонали моста выходной сигнал поступает на входы прибора **IN+**, **IN-** и через помехоподавляющие фильтры ФНЧ приходит на вход сигма-дельта **АЦП**.

Опорным напряжением для **АЦП** служит напряжение питания моста измеряемое непосредственно на клеммах датчика, входы **REF+**, **REF-**. В этом случае исключается погрешность падения напряжения на подводящих проводах и изменения падения напряжения на подводящих проводах из-за температурной зависимости сопротивления.

Уменьшенное по сравнению с традиционным (5 В или 10 В) напряжение питания моста тензодатчика 2,5 В позволяет уменьшить проходящий ток через него, а следовательно, уменьшается рассеиваемая мощность, что увеличивает время жизни (ресурс) тензодатчика. Уменьшенный вследствие этого эффект саморазогревания датчика также уменьшает ошибку измерения тензорезистора, имеющего высокий температурный коэффициент сопротивления.

В четырехканальном приборе **MB110-224.4ТД** каждый канал имеет отдельное независимое напряжение питания моста 2,5 В и отдельный коммутатор для знакопеременного режима, что повышает отказоустойчивость и надежность прибора. Все четыре коммутатора прибора переключаются синфазно (одновременно). Мультиплексор (**МЦХ**) поочередно коммутирует их для измерения одним каналом **АЦП**.

Необходимый размах входного сигнала для **АЦП** формирует усилитель с программируемым коэффициентом усиления (**PGA**), Прибор имеет семь переключаемых диапазонов измерений. Необходимый входной диапазон измерений выбирается пользователем в процессе конфигурации прибора.

Цифровой фильтр (**ЦФ**) обеспечивает дополнительную фильтрацию от импульсных помех и помех с частотами, кратными частоте промышленной сети 50 Гц. После преобразования в блоке приведения к диапазону физической величины (**БПФВ**) цифровой код поступает в ячейку памяти, которая обновляется с частотой 47 Гц. Буфера хранения данных прибор не имеет. Результаты измерения из данной

ячейки по запросу передаются мастеру сети RS-485 с помощью драйвера интерфейса **RS-485** (выходные клеммы **A** и **B**) Интерфейс **RS-485** гальванически изолирован от других цепей для улучшения помехоустойчивости. Отличительной особенностью прибора является наличие в нем универсального импульсного источника питания (**ИП**) с гальванической развязкой который позволяет прибору работать как от сети переменного тока с напряжением 220 В частотой 47-63 Гц. так и от источника постоянного тока с напряжением 24 В. Прибор позволяет получать результаты измерения в следующем виде значения сигнала тензодатчика в мВ в формате числа с плавающей точкой. Эти значения могут использоваться при проверке правильности полярности подключения прибора к датчику, проверке исправности датчика, поверке прибора. А также в виде значения физической величины в единицах физической величины или в процентах от диапазона, в формате числа с плавающей точкой.

Использование приведения измеренного значения к физической величине позволяет пользователю отображать контролируемые физические параметры непосредственно в единицах их измерения (атм, кПа, кг и т д.) Для выполнения операции приведения используются параметры **v.Min** и **v.Max**. Операция приведения линейно отображает диапазон внутреннего представления результатов измерения в диапазон, определяемый параметрами **v.Min** и **v.Max**.

Операция приведения корректно выполняется как при значении параметра **v.Max** большем параметра **v.Min**, так и когда параметр **v.Max** меньше **v.Min**.

Преобразователь интерфейса АС – 4. При проектировании промышленных систем автоматизации наибольшее распространение получили информационные сети, основанные на интерфейсе стандарта EIA RS-485. Он предусматривает передачу данных с помощью «симметричного» (дифференциального) сигнала по двум линиям (А и В) (рис. 2.6), объединенных в сеть стандарта RS-485.

Логический уровень сигнала определяется разностью напряжений на линиях (А-В). При использовании указанного интерфейса максимальная длина линии связи между крайними устройствами может составлять до 1200 м. Взаимодействие операционной системы (ОС) ПК с подключенным к нему по

интерфейсу USB устройством обеспечивает драйвер, устанавливаемый на ПК. Чаще драйвер позволяет ОС распознавать преобразователь USB RS-485.

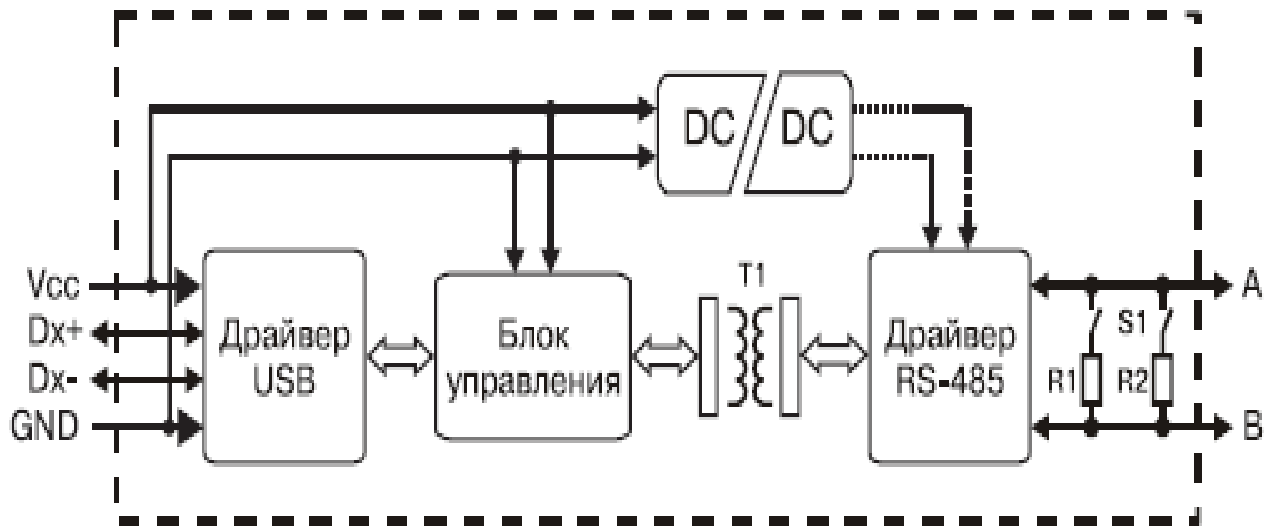


Рис. 2.7. Функциональная схема прибора АС 4

Прибор АС-4 (рис.2.7) предназначен для взаимного электрического преобразования сигналов интерфейсов USB и RS-485 с обеспечением гальванической изоляции входов между собой. Прибор автоматически определяет направление передачи данных, что позволяет исключить необходимость в дополнительном управлении обменом данными и значительно снизить временные интервалы (тайм-ауты) между кадрами данных. Прибор позволяет подключать к промышленной сети RS-485 персональный компьютер, имеющий USB-порт, при этом питание прибора осуществляется от шины USB. При подключении прибора к ПК в последнем появляется виртуальный COM-порт, что позволяет без дополнительной адаптации использовать информационные системы (SCADA, конфигураторы), работающие с аппаратным COM-портом.

Прибор состоит из следующих функциональных блоков:

- драйвера USB, предназначенного для преобразования электрических сигналов интерфейса USB в сигналы ТТЛ-логики и обратно;

- драйвера RS-485, необходимого для преобразования электрических сигналов интерфейса RS-485 в сигналы ТТЛ-логики и обратно, а также для выбора направления передачи данных, поскольку двухпроводный интерфейс RS-485 в один момент времени может либо передавать, либо принимать данные;

-блока управления, предназначенного для определения направления передачи пакета данных и соответствующего переключения драйвера RS-485 на прием или передачу, а также фильтрации электрических сигналов;

-для гальванической изоляции блоков предназначен трансформаторный преобразователь Т1;

-для питания гальванически изолированных частей прибора предназначен DC/DC преобразователь;

-для выбора номинала конечного согласующего резистора $R_{ср}$ предназначены DIP-переключатель S1 и резисторы R1 и R2.

Для проверки достоверности показаний полученных от тензометрической системы были проведены испытания образцов изменение деформаций в которых дополнительно измерялись механическими приборами – рычажными тензометрами Гугенбергера. В результате получено, что при быстроменяющихся деформациях более стабильней работают тензодатчики. Возможность фиксации деформаций в реальном времени с передачей данных на ПК является существенным преимуществом для применения измерительной тензометрической станции.

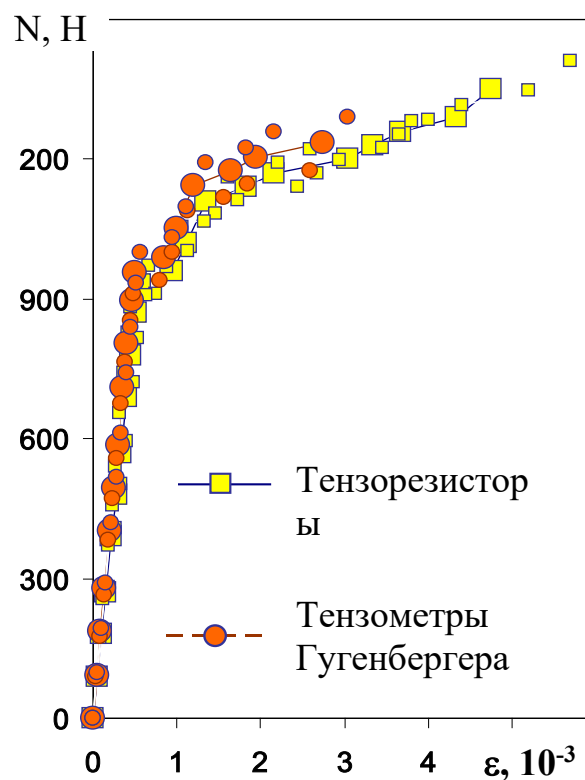


Фото 2.1. Измерение деформаций ГК образцов с помощью тензорезисторов и тензометров Гугенбергера

2.3 Определение разрушающей нагрузки и прогиба гипсокартонных плит при переменном пролете по ГОСТ 6266-97

Метод заключается в создании изгибающих напряжений в образце, испытываемом по однопролетной схеме, нагрузкой, прикладываемой в середине пролета и измерением прогиба образца в середине пролета с последующим доведением образца до разрушения. Испытания проводились в лаборатории ООО Кнауф Гипс Донбасс на сертифицированном оборудовании фирмы Цвикроел. Для испытаний изготавливались гипсокартонные образцы шириной $(400+5)$ мм и длиной $[(40s + 100) + 5]$ мм, (s - номинальная толщина листа в миллиметрах). Образцы, вырезали на расстоянии не менее 100 мм от кромок листа и маркировали (продольный L или поперечный T) и высушивали. На испытательном оборудовании устанавливали пролет в зависимости от номинальной толщины испытываемого образца. Пролет $l = 40s$: для ГКП 9,5 мм пролет составлял $l = 40s = 380$ мм, а для ГКП 12,5 мм соответственно 500 мм.

По стандартной схеме продольные образцы испытывали лицевой стороной вниз, а поперечные - тыльной. Для получения более полной

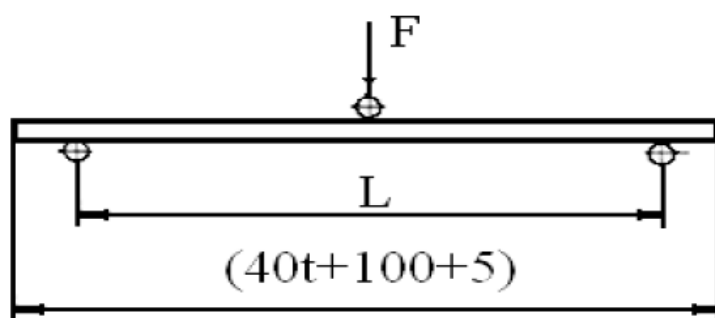


Рис 2.8 Схема испытания образцов на прочность при изгибе при переменном пролете

информации об особенностях деформации ГКП, испытания проводились по дополнительной схеме: продольные образцы испытывали лицевой стороной вверх, а поперечные – лицевой вниз.

К образцу прикладывали начальную нагрузку, равную 50 Н, выдерживали его под этой

нагрузкой в течение 1 мин и измеряли прогиб в середине пролета. Затем нагрузку увеличивали со скоростью 15-20 Н/с до величины 100 Н. Под этой нагрузкой образец выдерживали в течение 1 мин и фиксировали прогиб в середине пролета. Затем нагрузку повышали с той же скоростью до разрушения образца. Разность между значением прогиба образца при нагрузке 100 Н и нагрузке 50 Н, согласно

ДСТУ принимали за прогиб образца. Разрушающую нагрузку и величину прогиба серии образцов принимали как среднеарифметическое значение результатов испытаний, а результат испытания каждого отдельного образца сопоставляли с нормируемыми требованиями.

Таб. 2.4 Нормируемые требования к разрушающей нагрузке и прогибу ГКП при испытаниях на переменном пролете

Толщина листов, мм	Разрушающая нагрузка, Н (кгс), не менее для образцов		Прогиб, мм, не более для образцов	
	продольных	поперечных	продольных	поперечных
До 10,0 включ.	450 (45)	150 (15)	-	-
Свыше 10,0 до 18,0 включ.	600 (60)	180 (18)	0,8 (1,0)*	1,0 (1,2)*
Свыше 18,0	500 (50)	-	-	-
*В скобках указано максимальное значение прогиба для отдельного образца				

2.4 Определение предела прочности на растяжение при изгибе гипсокартонных плит по DIN EN 520

Для испытаний использовали лабораторные установки ООО Кнауф Гипс Донбасс. Из плиты вырезали опытные образцы с прямоугольными кромками и размерами $(400 \pm 1,5)$ мм х $(300 \pm 1,5)$ мм, (рис. 2.10): в продольном (L), в поперечном – (Т) направлениях. Опытные образцы вырезались на расстоянии не

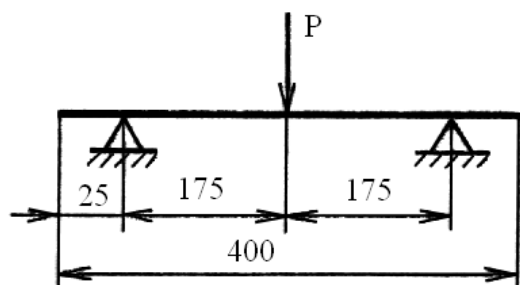


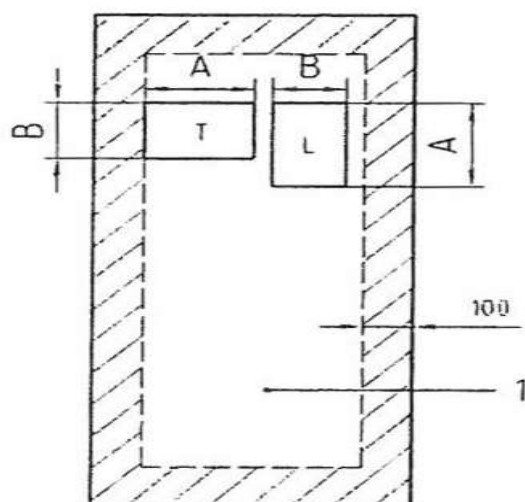
Рис. 2.9 Однопролетная схема испытания

менее 100 мм от продольных и поперечных кромок плиты. [156]

Опытные образцы высушивались при температуре (40 ± 2) °С до достижения постоянства массы. Образцы испытывались по однопролетной схеме при $l = 350 \pm 1$ мм (рис.2.9). Опытные образцы в продольном

направлении плиты укладывались на опоры лицевой стороной вниз, а опытные образцы в поперечном направлении плиты - лицевой стороной вверх.

Нагрузка прикладывалась с точностью ± 2 мм со скоростью (250 ± 125) Н/мин через нож с радиусом закругления от 5 мм. Время между началом приложения нагрузки и моментом разрушения испытуемого образца не превышало 20 секунд.



$$A = (400 \pm 1,5) \text{ мм}$$

$$B = (300 \pm 1,5) \text{ мм}$$

1 – Зона для отбора образцов

Рис. 2.10 – Отбор образцов для определения разрушающей нагрузки при изгибе

Таб.2.5. –Предельная нагрузка при изгибе и модуль упругости по DIN EN 520

Номинальная толщина t мм	Предельная нагрузка при изгибе ^a N, Н		Модуль упругости ^d E Н/мм ²	
	направление		направление	
	Продольное L^b	Поперечное T^c	Продольное L	Поперечное T
<12.5	$\geq 43 \cdot t$	$\geq 16,8 \cdot t$	-	-
12.5	≥ 610	≥ 210	≥ 2800	≥ 2200
15	≥ 735	≥ 250		
18	≥ 880	≥ 300		
>18	$\geq 43 \cdot t$	$\geq 16,8 \cdot t$	-	-

^a Среднее значение; отклонение единичного значения – 10%, значения промежуточной толщины интерполируются.

^b Лицевая сторона картона в растянутой зоне

^cТыльная сторона картона в растянутой зоне

^d Среднее значение

Разрушающая нагрузка и прогиб при изгибе рассчитывали как среднее арифметическое и сопоставляли с нормируемыми требованиями DIN EN 520.

Для определения модуля упругости E при изгибе вычислялся шаг в графике сила - прогиб в диапазоне между 10% и 40% F_{\max} (в квазилинейном-эластичном диапазоне). Модуль упругости E каждого опытного образца рассчитывался в Н/мм² по формуле:

$$E = \frac{l_1^3 (F_2 - F_1)}{4bt^3 (\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.1)$$

l – Расстояние между центрами опор 350 мм

b – Ширина испытательного образца 300 мм;

t – Номинальная толщина гипсокартонных листов в мм;

$F_2 - F_1$ – Увеличение силы в прямолинейном диапазоне графика силы прогиба в Н. F_1 должно составлять примерно 10%, а F_2 примерно 40% разрушающей силы F_{\max} ;

$\alpha_2 - \alpha_1$ – Увеличение прогиба в середине испытательного образца (соответственно $F_2 - F_1$).

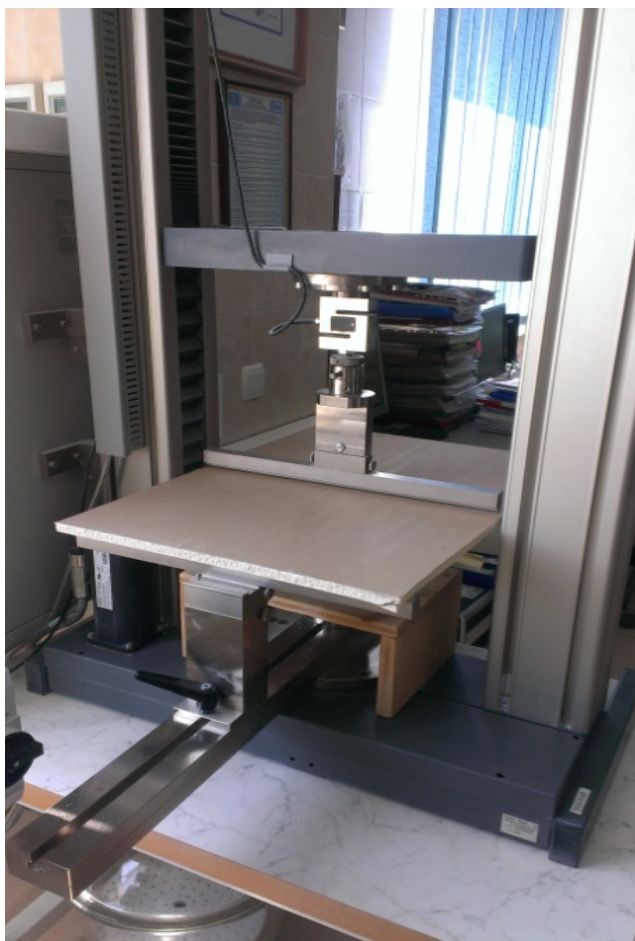


Фото 2.2. Испытания ГКП на сертифицированном оборудовании Zwick Roell.

2.5 Методика испытаний образцов-моделей на осевое растяжение

Для определения полного набора упругих характеристик проводили растяжение ГК образцов $t=12,5$ мм на специально сконструированной установке (рис. 2.11). В связи с отсутствием нормативов, подготовку образцов (тип А, тип Б)

и нагружение проводили по аналогии с испытаниями на изгиб.

Для выполнения экспериментальных исследований была запроектирована и изготовлена специальная установка (рис. 2.11), позволяющая испытывать образцы (одно – и двухслойные) на осевое растяжение. [56, 60, 62, 63]

Испытываемый образец закрепляется в неподвижной траверсе и через подвижную траверсу передается нагрузка, создаваемая системой

грузов. Для замера и фиксации быстроменяющихся линейных деформаций в режиме реального времени, применялась мобильная измерительная тензометрическая система (рис. 2.4) на основе оборудования компании ОВЕН СПБ для систем автоматизации.

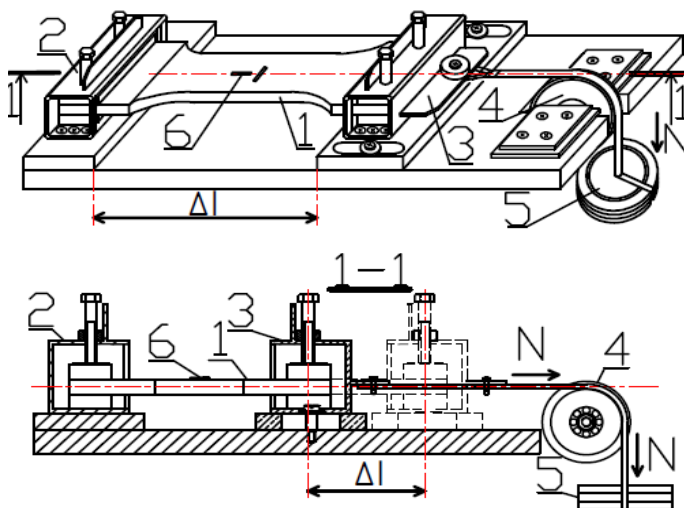


Рис.2.11 Схема установки и образцы для испытаний на осевое растяжение
1- образец; 2, 3- траверсы; 4- блок;
5- грузы, 6- тензорезисторы.

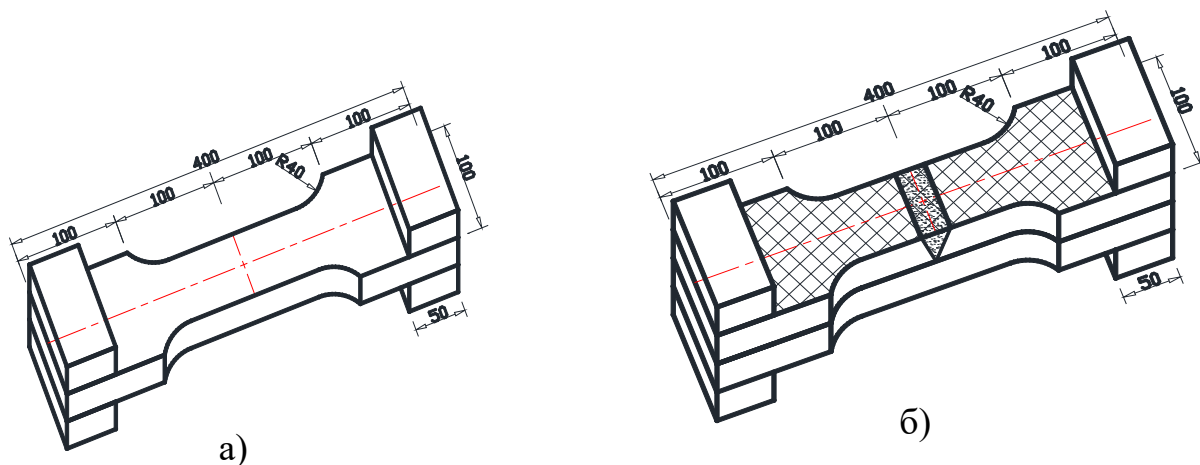


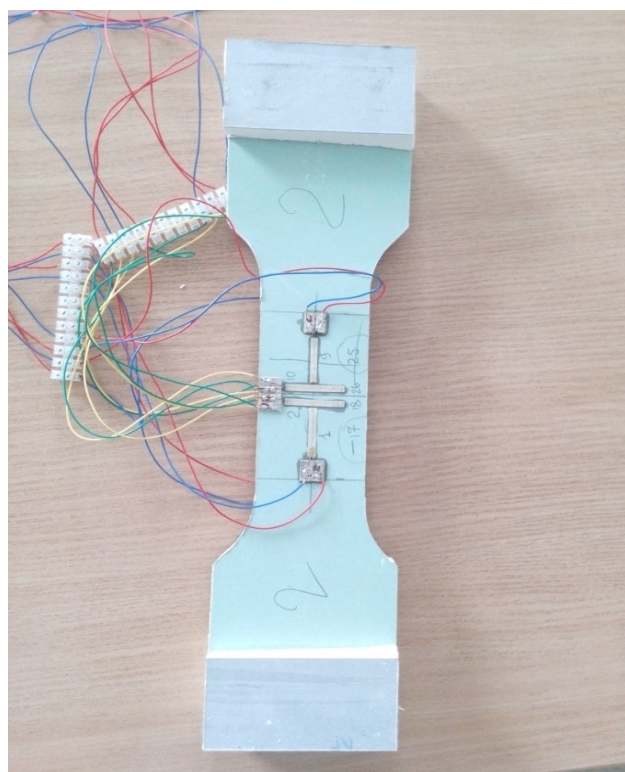
Рис.2.12 Экспериментальные образцы для испытаний на осевое растяжение:
однослойный образец (а), двухслойный со стыком армированный стеклохолстом (б).

Для замера деформаций использовались тензорезисторы фирмы Веда. Образцы для растяжения (рис. 2.12) представляли собой восьмерки с торцевыми накладками в зоне захватов. Так как ГКП является ортотропным материалом, то аналогично испытаниям на изгиб, образцы вырезались из ГКП в продольном и поперечном направлениях, т. е $0, 90^0$ к осям ортотропии.

Испытания на осевое растяжение проводились на однослойных и двухслойных образцах вдоль и поперек волокон (тип А, Б) и на двухслойных образцах в лицевом слое которых моделировался стык с применением шпаклевки фугенфулер с сетчатой армирующей лентой, лицевая поверхность данного типа образцов армировалась стеклохолстом на поливинилацетатном клее.



а)



б)

Фото 2.3 Установка для испытаний на осевое растяжение(а), образец – восьмерка с наклеянными тензорезисторами (б)

К образцам прикладывали растягивающую нагрузку равными ступенями до $0,05P_{\text{раз.}}$. При испытаниях фиксировались нагрузка вплоть до разрушения, продольные ε_1 и поперечные ε_2 деформации. По результатам испытаний определялись модули упругости E_1, E_2 и коэффициенты Пуассона ν_{12}, ν_{21} соответственно для продольных и поперечных образцов (тип А, Б)

2.6 Методика испытаний образцов-моделей на чистый сдвиг

Для выполнения экспериментальных исследований была изготовлена авторская установка, позволяющая создавать сдвиговые усилия в образце

Испытания на сдвиг (рис. 2.13) проводились в заданных условиях деформирования образца с квадратным рабочим полем. Образцы размером

300x200 мм вырезались из ГКП в двух направлениях, так чтобы главные оси симметрии материала были параллельны сторонам рабочего поля образца. [58, 59, 61]

В зонах закрепления образцы усиливались накладками. Для контроля деформаций на образец по всем граням и диагоналям наклеивались тензорезисторы. Образец закреплялся одной гранью к неподвижной траверсе, к противоположной прикладывается касательное нагружение, передаваемое от системы грузов через подвижную траверсу. Испытания проводили при ступенчато возрастающей нагрузке $\approx 0,05P_{\text{раз}}$. В процессе испытания фиксировали относительный сдвиг на пределе пропорциональности и

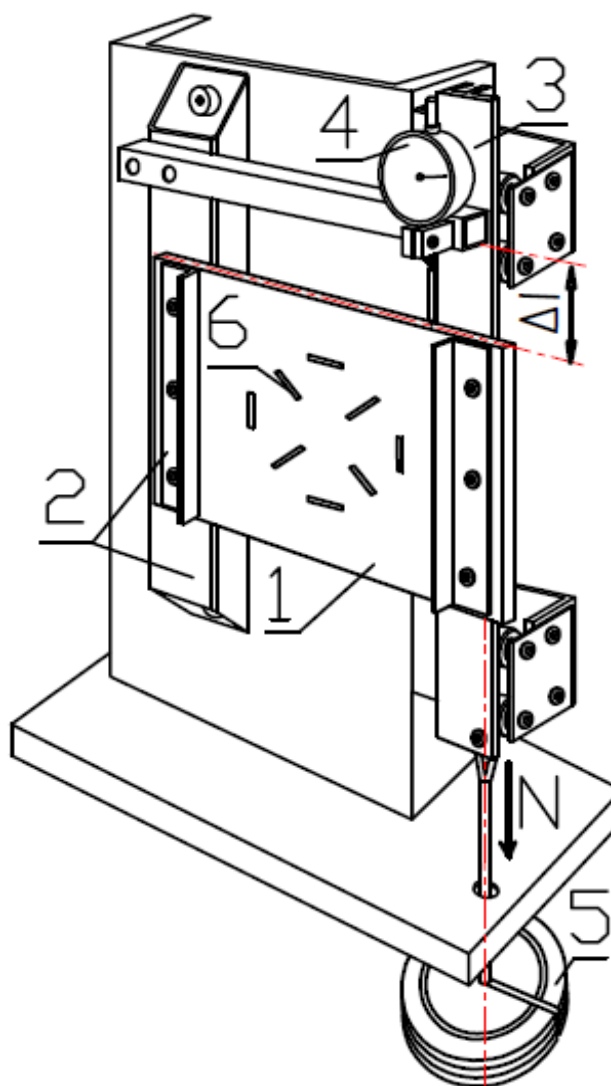


Рис. 2.13 Испытания на сдвиг: 1- образец; 2- крепления; 3- подвижная направляющая; 4 – индикатор ч/т 0,001 мм; 5 - грузы 6 – тензорезисторы.

при разрушении. В ходе испытания всех образцов осуществлялась фиксация прикладываемой нагрузки и изменения деформаций по всем граням и диагоналям образца вплоть до разрушения.

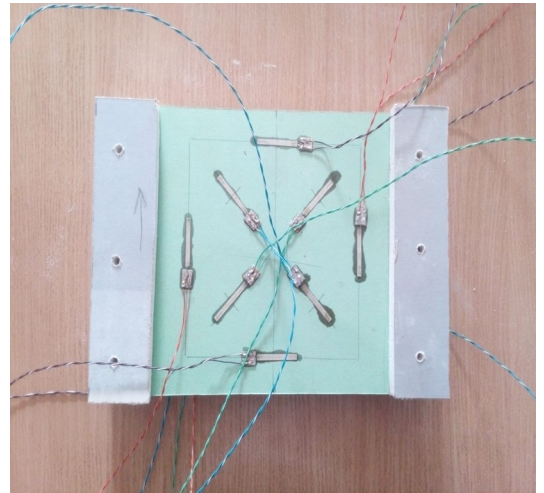
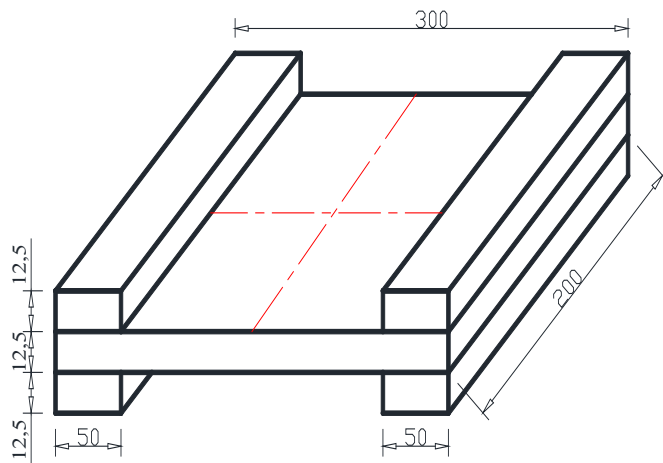


Рис 2.14 Экспериментальные образцы для проведения испытаний на сдвиг

Показания по граням оставались неизменными на протяжении всего эксперимента вплоть до разрушения, одна диагональ имела удлинение вторая укорачивание, что соответствует возникновению сдвиговых деформаций в испытываемом образце.

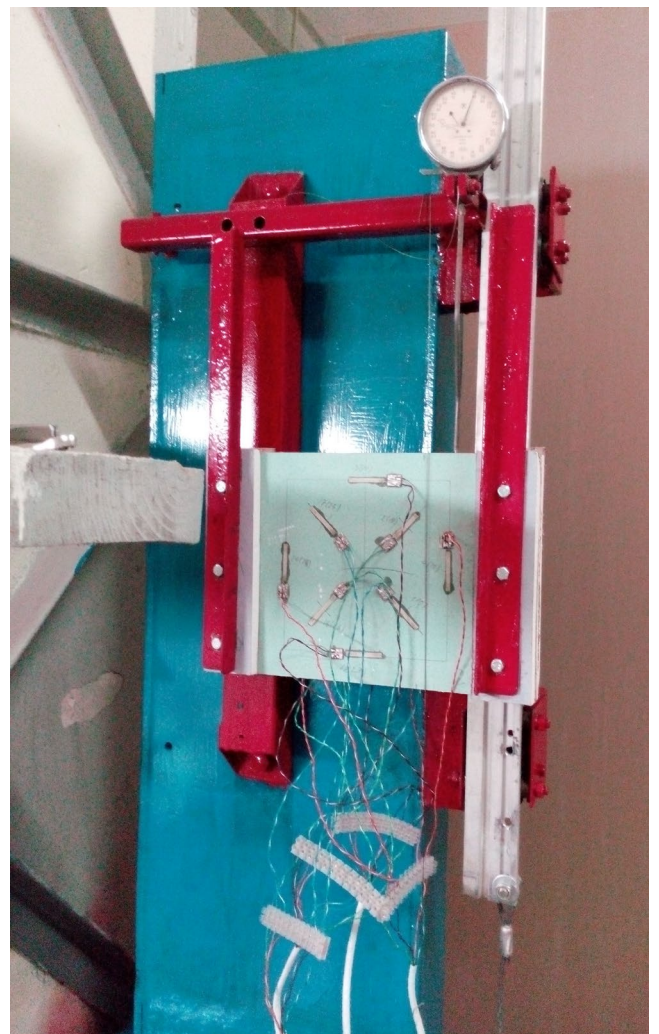


Фото 2.4 Установка для проведения испытаний на сдвиг.

При нагрузке соответствующей 50 % от разрушающей слышалось характерное потрескивание без визуально видимых трещин. Разрушение образца представляло собой срез по плоскостям параллельным приложению разрушающей нагрузки. По результатам испытания строились графики зависимости изменения угла γ называемым относительным сдвигом от прикладываемой нагрузки и высчитывался модуль сдвига. Результаты эксперимента на испытание образцов, вырезанных вдоль и поперек волокон, показывают линейный характер зависимости этих величин и одинаковые модули сдвига для данного типа образцов.

2.7 Испытание на прочность и трещиностойкость стыков составных одно- и двухслойных ГК образцов при изгибе по DIN EN 13963

Для изучения закономерностей работы стыков был проведен ряд экспериментальных исследований по определению предела прочности, трещиностойкости и деформативности как однослойных так и двухслойных ГК элементов на винтовом и клеевом соединениях.

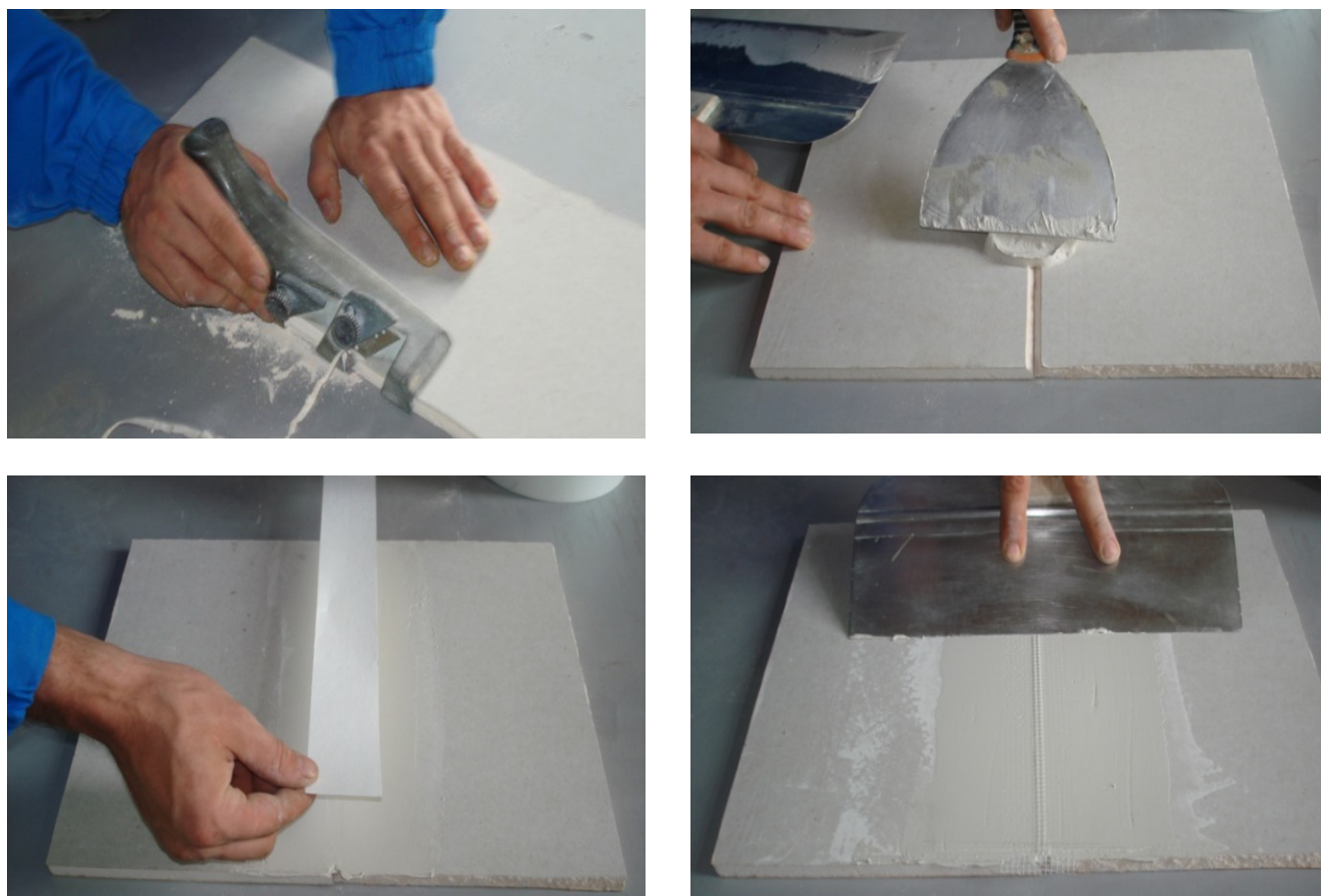
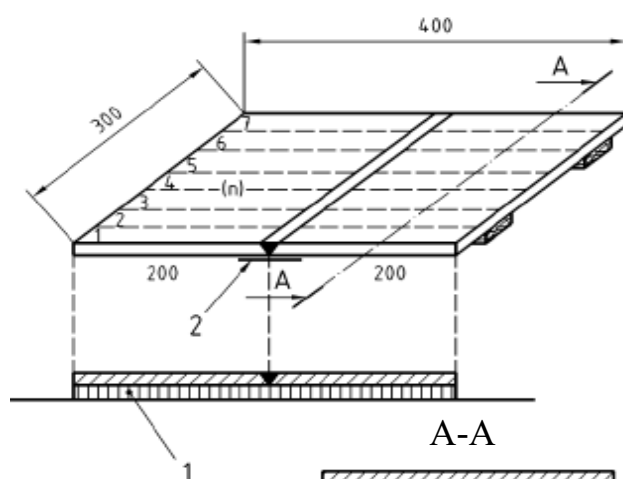


Рис.2.15 Последовательность операций по подготовке образцов

Для изготовления экспериментальных образцов вырезались по два фрагмента из гипсовой плиты согласно EN 520:2004 толщиной 12,5 мм, размер которых составляет 200 мм х 300 мм. Пробы соединялись попарно по длинной стороне согласно указаниям производителя. Перед нанесением шовного шпаклевочного материала закрывали обратную сторону шва клейкой лентой, а затем скрепляли рейками для опоры шва (рис. 2.16).



1 – деревянная форма для заделки швов;

2 – клейкая лента

Рис. 2.16. Изготовление образцов

Одно- и двухслойные образцы изготавливались с размерами 300х400 мм в количестве 40 шт. из гипсокартонных влагостойких плит (ГКПВ) толщиной 12.5 мм производства ООО Кнауф Гипс Донбасс. Для заделки стыков между гипсокартонными образцами использовались шпатлевки «Фугенфюллер» производства ООО Кнауф Гипс Донбасс.

Формирование стыков проводились на отрезной кромкой, которая подготавливалась в соответствии с требованиями технической документации Кнауф; для шпатлевки «Фугенфюллер» снималась фаска под углом 45° на

глубину $1/3$ толщины плиты (рис. 2.17). Для армирования швов гипсокартонных образцов применялась сетчатая армирующая лента (серпянка) производства «KnaufGips-KG» (Германия). Перед нанесением шовного шпатлевочного материала стык проклеивался с обратной стороны клейкой лентой.

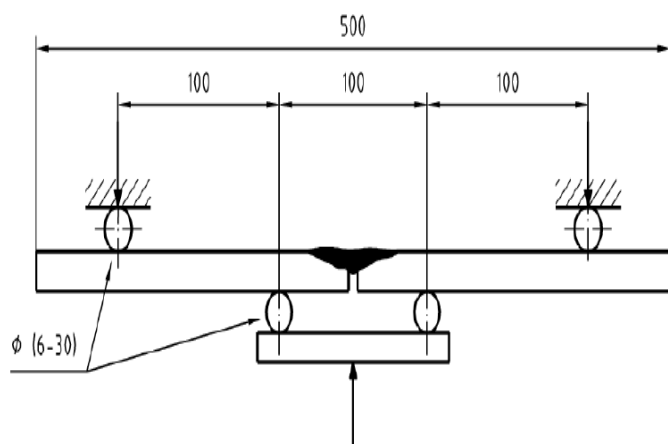


Рис. 2.17. Испытание на изгиб стыков ГКП

В первый слой шпатлевки втапливалась армирующая лента. После высыхания первого слоя широким шпателем (200-300 мм) наносился второй накрывочный выравнивающий слой шпаклевки.

Табл. 2.6 Характеристика одно- и двухслойных образцов с поперечным стыком.

Схема образца и тип соединения		Описание
Тип А (продольный эталонный) 	Тип Б (поперечный эталонный) 	Размеры: a=(400±5) мм; b=(300±5) мм Общие данные: - шесть образцов для каждой серии испытаний; - лицевой картон в растянутой зоне; 
Тип 1.1 	Тип 1.2 	
Шовный материал: фугенфюллер с серпянкой (тип 1.1,1.2); малярный стеклохолст на универсальном клею ПВА МБ (тип 1.2)		
Винтовое	Винтовое и клеевое	Фиксируемые данные: - фотофиксация испытания; - модуль упругости при изгибе; - график нагрузка-прогиб на каждом этапе нагружения; - нагрузка трещинообразования; - разрушающая нагрузка; -характер разрушения
Тип 2.1 	Тип 2.3 	
Тип 2.2 	Тип 2.4 	
Шовный материал: фугенфюллер с серпянкой (тип 2.2, 2.4); малярный стеклохолст на универсальном клею ПВА МБ (тип 2.2,2.3)		

Изготовленные образцы высушивались при температуре $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(50 \pm 5) \%$ в течение семи дней в лабораторных условиях. После сушки снималась клейкая лента. При изготовлении двухслойных образцов сначала производилось соединение слоев гипсокартона между собой (табл. 2.6), а затем выполнялись аналогичные операции по устройству стыка в однослойных образцах. Для дополнительного армирования поверхность образцов усиливалась стеклохолстом на поливинилацетатном универсальном клее.

Для выполнения экспериментальных исследований была запроектирована и изготовлена специальная установка (рис.2.18), позволяющая испытывать на трех- и четырехточечный изгиб различные типы ГК элементов (одно – и двухслойные).

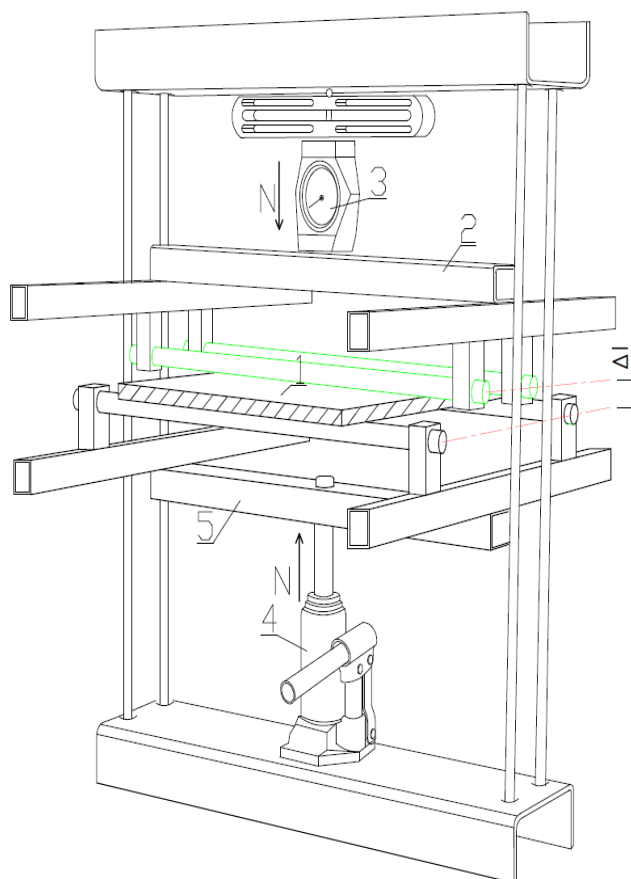


Рис. 2.18 Общий вид и схема установки для испытания стыков ГК элементов на изгиб: 1 - опытный образец; 2, 5 - верхняя и нижняя траверсы; 3 - динамометр; 4 - гидродомкрат.

Усилие, прикладываемое к образцу, передается через траверсу от гидродомкрата и фиксируется динамометром. В соответствии с изменением прикладываемой нагрузки также осуществляется фиксация прогиба испытуемого образца (перемещение траверс относительно друг друга) с использованием прогибомера с индикатором часового типа и ценой деления 0.01мм. Опытные образцы подвергались непрерывно возрастающей нагрузке со скоростью (250 ± 125) Н/мин. Погрешность в точности измерений составляла до 1%.

В ходе испытания всех образцов осуществлялась фиксация прикладываемой нагрузки, момента трещинообразования и прогиба вплоть до разрушения.

2.8. Методика проведения выборочных исследований

При выборочном исследовании обследованию подвергается часть единиц изучаемой совокупности, отобранных на основе научно разработанных принципов, обеспечивающих получение достаточного количества достоверных данных, для того чтобы охарактеризовать всю совокупность в целом. [156]

Основные этапы выборочных исследований:

- исследование характеристик на установленном числе единиц из генеральной совокупности;
- анализ полученных данных;
- определение ошибки и проверка достаточности объема выборки;
- распространение выборочных данных на генеральную совокупность;

Значение выборочного метода состоит в том, что при минимальной численности обследуемых единиц проведение исследования осуществляется в более короткие сроки и с минимальными затратами труда и средств.

В проведении ряда исследований выборочный метод является единственно возможным, например, при контроле качества материалов, если проверка сопровождается уничтожением обследуемых образцов.

Ошибка выборки — это объективно возникающее расхождение между характеристиками выборки и генеральной совокупности. Она зависит от ряда факторов: степени вариации изучаемого признака, численности выборки, методом отбора единиц в выборочную совокупность, принятого уровня достоверности результата исследования.

При случайном повторном (2.2) и бесповторном (2.3) отборах средняя ошибка выборочной средней рассчитывается по формулам:

$$\mu = \sqrt{\frac{s^2}{n}}, \quad (2.2)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{s^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)} \quad (2.3)$$

где μ — средняя ошибка выборочной средней; s^2 — дисперсия выборочной совокупности; n — численность выборки, N — численность генеральной совокупности.

Предельная ошибка выборки Δ связана со средней ошибкой выборки μ отношением: $\Delta = t * \mu$. При этом t как коэффициент кратности средней ошибки выборки зависит от значения вероятности P , с которой гарантируется величина предельной ошибки выборки.

Предельная ошибка выборки при бесповторном (2.4) и повторных (2.5) отборах определяется по следующим формулам:

$$\Delta_x = t \sqrt{\frac{s_x^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)} \quad (2.4)$$

$$\Delta_x = t \sqrt{\frac{s_x^2}{n}} \quad (2.5)$$

Под малой выборкой понимается несплошное статистическое обследование, при котором выборочная совокупность образуется из сравнительно небольшого числа единиц генеральной совокупности. Объем малой выборки обычно не превышает 30 единиц и может достигать до 4 — 5 единиц.

Средняя ошибка малой выборки $\mu_{M.B}$ вычисляется по формуле:

$$\mu_{M.B} \approx \sqrt{\frac{s_{M.B}^2}{n}}, \quad (2.6)$$

где $s_{M.B}^2$ — дисперсия малой выборки.

При определении дисперсии s^2 число степеней свободы равно $n-1$:

$$s_{M.B}^2 = \frac{\sum (x_i - \tilde{x})^2}{n-1}. \quad (2.7)$$

Предельная ошибка малой выборки $\Delta_{M.B}$ определяется:

$$\Delta_{M.B} = t\mu_{M.B} \quad (2.8)$$

При этом значение коэффициента доверия t зависит не только от заданной доверительной вероятности, но и от численности единиц выборки n . Для отдельных значений t и n доверительная вероятность малой выборки определяется по специальным таблицам Стьюдента (Табл. 2.7.), в которых даны распределения стандартизированных отклонений:

$$t = \frac{\tilde{x} - \bar{x}}{s_{M.B}}. \quad (2.9)$$

Поскольку при проведении малой выборки в качестве доверительной вероятности практически принимается значение 0,95 или 0,99, то для определения предельной ошибки малой выборки $\Delta_{M.B}$ используются следующие показания распределения Стьюдента:

Табл.2.7 Значения коэффициента Стьюдента (t-критерия) для различной доверительной вероятности S_t и числа степеней свободы n :

n	S_t		n	S_t	
	0,95	0,99		0,95	0,99
4	3,183	5,841	8	2,364	3,500
5	2,777	4,604	9	2,307	3,356
6	2,571	4,032	10	2,263	3,250
7	2,447	3,707	15	2,119	2,921

Выборочный метод чаще всего применяется для получения характеристик генеральной совокупности по соответствующим показателям выборки. В зависимости от целей исследований это осуществляется или прямым пересчётом показателей выборки для генеральной совокупности, или посредством расчёта поправочных коэффициентов. Способ прямого пересчёта состоит в том, что показатели выборочной средней \tilde{x} распространяется на генеральную совокупность с учётом ошибки выборки. Способ поправочных коэффициентов применяется в случаях, когда целью выборочного метода является уточнение результатов сплошного учета.

2.9 Численный анализ НДС строительных оболочек с применением вычислительного программного комплекса SCAD

Область применения различных программных систем во многом совпадает. При этом для каждой ПС присуща индивидуальная специализация и функциональные возможности. Для решения поставленных задач наиболее оптимальной является ПС StructureCAD (SCAD), для которой в ДонНАСА осуществляется лицензионное обслуживание и техническая поддержка.

SCAD включает развитую библиотеку конечных элементов для моделирования стержневых, пластинчатых, твердотельных и комбинированных конструкций, модули анализа устойчивости, формирования расчетных сочетаний усилий, проверки напряженного состояния элементов конструкций по различным теориям прочности, определения усилий взаимодействия фрагмента с остальной конструкцией, вычисления усилий и перемещений от комбинаций нагрузок.

Моделирование конструкций включает в себя:

- развитые графические средства формирования и корректировки геометрии расчетных схем, описания физико-механических свойств материалов;
- значительный набор параметрических прототипов конструкций, включающий оболочки, поверхности вращения, аналитически заданные поверхности;
- возможность формирования сложных расчетных моделей путем сборки из различных схем, а также импорт геометрии из графических редакторов в форматах DXF, DWG.

Результаты расчета отображаются как в графической, так и в табличной формах. В графической форме результаты расчета перемещений выводятся в виде деформированной схемы, цветовой и цифровой индикации значений перемещений в узлах, а также изополей и изолиний перемещений для пластинчатых и объемных элементов, выполняется анимация процесса деформирования. Усилия и напряжения в пластинчатых и объемных элементах выводятся в виде изополей или изолиний в указанном диапазоне цветовой шкалы с возможностью одновременного отображения числовых значений в центрах и узлах элементов.

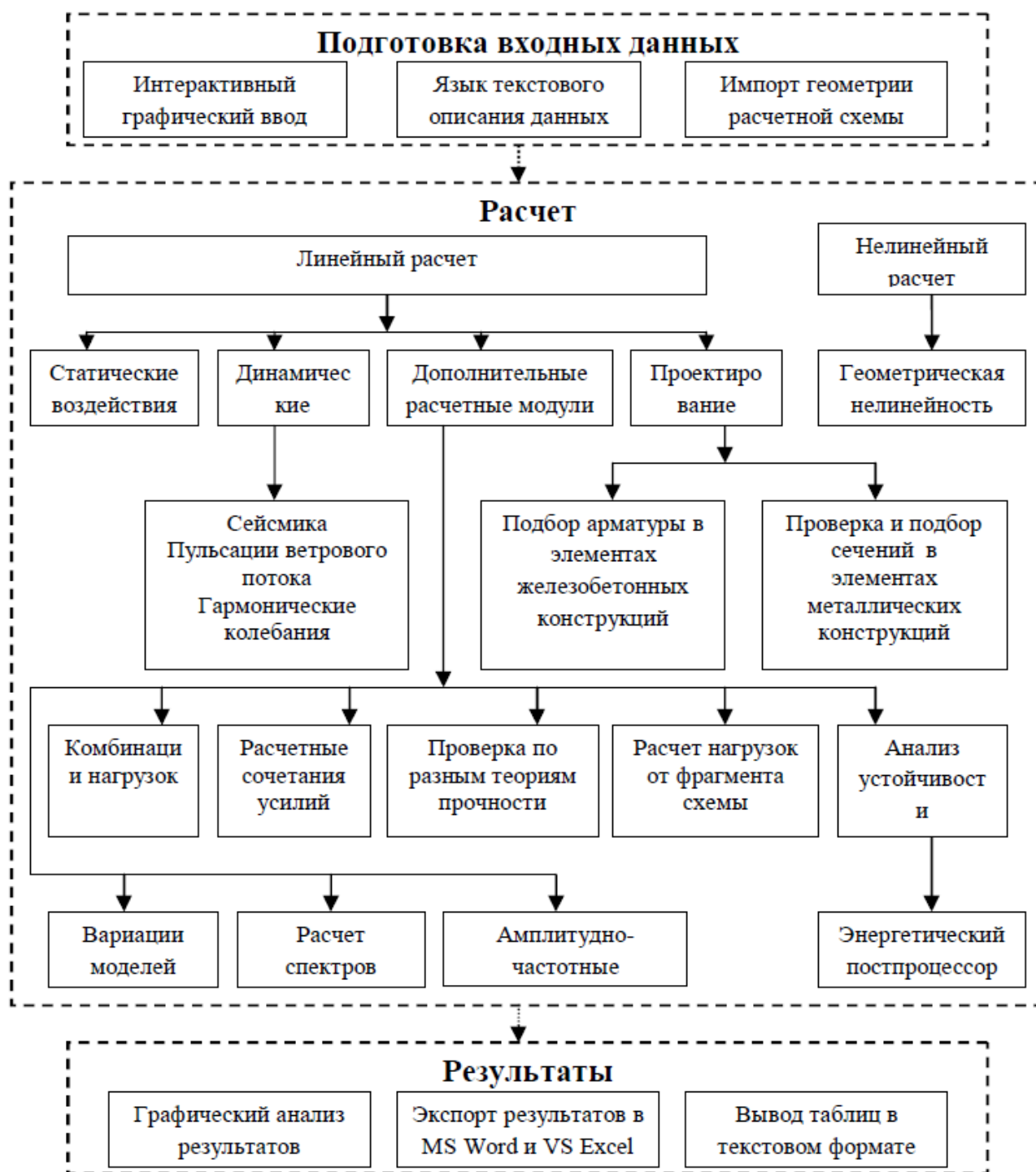


Рис. 2.19. Структура комплекса SCAD и связи между его компонентами

В основу комплекса заложена система функциональных модулей, связанных между собой единственной информационной средой, входная информация может быть подготовлена в графическом редакторе AutoCAD.

Функциональные модули SCAD делятся на четыре группы. Первую группа обеспечивает ввод входных данных в интерактивном графическом режиме и

графический анализ результатов расчета. Функциями модулей второй группы являются вычисления расчетных сочетаний усилий, главных и эквивалентных напряжений, анализа устойчивости и т.д. Документирование результатов расчета выполняют модули третьей группы. К четвертой группе включаются проектировочные постпроцессоры, которые служат для подбора жесткостных характеристик элементов. Все функциональные компоненты реализованы в единой графической среде. Интерфейс, функции контроля и анализа результатов унифицированы. Система контроля входных данных выполняет проверку расчетной схемы и фиксацию ошибок.

ВЫВОДЫ ПО 2 РАЗДЕЛУ

В соответствии со структурно-логической схемой проведения исследований приведены методики экспериментальных исследований прочности, деформативности и трещиностойкости стандартных и составных ГК элементов при одноосном растяжении, изгибе и чистом сдвиге.

1. Исследования прочности при изгибе стандартных (эталонных) образцов проведены по отечественным и европейским стандартам. Испытания стандартных образцов проводили на трехточечный изгиб при переменном пролете по ГОСТ 6266-97 и при постоянном по DIN EN 520. Образцы испытывались в продольном и поперечном направлениях (тип А, тип Б). Испытания проводились на специализированном оборудовании Zwick Roell.

2. Предложена и апробирована методика определения прочностных и деформационных характеристик ГК элементов при одноосном растяжении и чистом сдвиге с комплектом силового оборудования и адаптированной мобильной измерительной тензометрической системы для регистрации деформаций до стадии разрушения.

3. Для проверки достоверности показаний, проводились одновременные замеры деформаций тензометрической системой и тензометрами Гугенбергера. В стадии активного развития пластических деформаций, вплоть до разрушения стабильность показаний отмечалась с использованием тензорезисторов.

4. В дополнение к европейским и отечественным нормативным методам испытания предложена универсальная экспериментальная установка с возможностью испытания на трех- и четырехточечный изгиб при различных вариациях пролетов, размеров и прочности опытных образцов.

5. В соответствии с европейским стандартом DIN EN 13963-2005-08, для изучения закономерностей работы стыков был проведен ряд экспериментальных исследований по определению предела прочности, трещиностойкости и деформативности как однослойных так и двухслойных ГК элементов на винтовом и клеевом соединениях.

6. В проведении исследований, связанных с разрушением обследуемых образцов при контроле качества материалов, выборочный метод позволяет минимизировать сроки, затраты труда и численность образцов. Для малой выборки значение значения коэффициента Стьюдента (t критерия) значительно зависит не только от заданной доверительной вероятности, но и от численности единиц выборки n . Для отдельных значений t и n , доверительная вероятность малой выборки определяется по специальным таблицам Стьюдента. Для получения характеристик генеральной совокупности по соответствующим показателям малой выборки используют прямой пересчет показателей выборки или с учетом расчёта поправочных коэффициентов.

7. Для численного анализа оболочек соответствует необходимым критериям вычислительный программный комплекс StructureCAD (SCAD), который имеет развитую библиотеку конечных элементов, возможность проверки напряженного состояния конструкций по различным теориям прочности и значительный набор параметрических прототипов конструкций, включающий оболочки, поверхности вращения, аналитически заданные поверхности.

РАЗДЕЛ 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРОЧНОСТИ, ДЕФОРМАТИВНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГКП3.1 Прочность и деформативность при стандартных испытаниях на
трехточечный изгиб по ГОСТ 6266-97 и DIN EN 520

Исследования прочности при изгибе стандартных образцов проведены по отечественным и европейским стандартам, различия которых заключаются в схемах нагружения и геометрии образцов. Испытания стандартных образцов $t=12,5$ мм проводили на трехточечный изгиб по ГОСТ 6266-97 [3] и по DIN EN 520 [2]. Образцы вырезались из ГКП в продольном и поперечном направлениях (тип А, тип Б). Испытания гипсокартонных плит проводились на специализированном оборудовании Zwick Roell в лаборатории при ООО «Кнауф Гипс Донбасс».

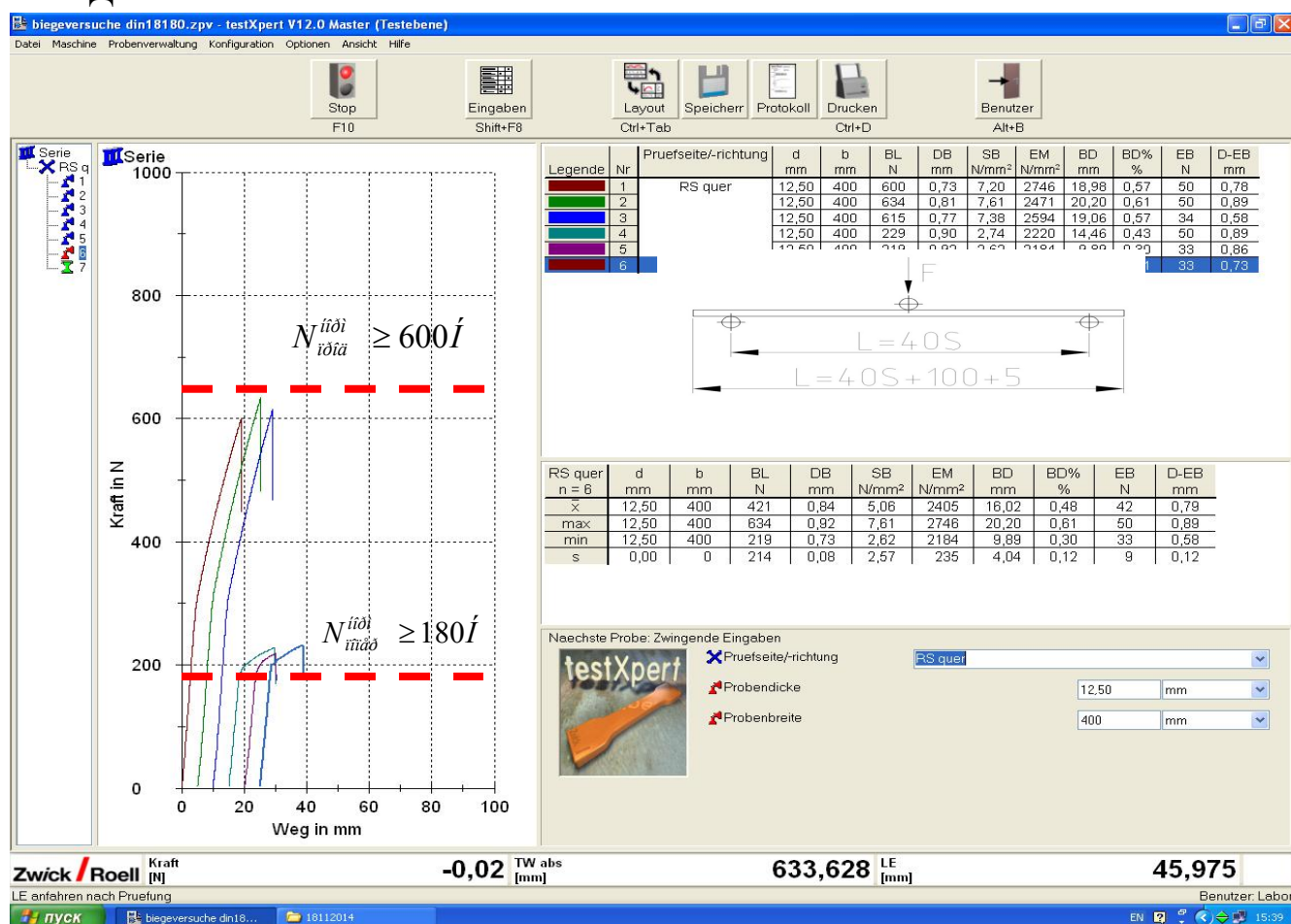


Рис.3.1. Результаты испытания по ГОСТ 6266-97 при переменном пролете продольных и поперечных образцов из ГКП 12,5 мм.

В результате испытания согласно ГОСТ 6266-97 [3] при переменном пролете продольных и поперечных образцов из ГКП 12,5 мм были получены деформации при изгибе (рис.3.1). На первом этапе, в зоне упругой работы, график имеет линейный характер. На втором этапе наблюдается развитие микротрещин, что подтверждается появлением соответствующих переломов на графиках и характерным потрескиванием в образцах. У продольных образцов видимый перелом в графике наступает при нагрузке около 300 Н, что составляет 50% от разрушающей. У поперечных образцов этот перелом менее заметен и составляет примерно 70% от разрушающего усилия. На третьем этапе фиксировалось разрушение образца. У продольных образцов разрушение наступает при нагрузке около 600 Н, что в три раза больше чем у поперечных, которая составляет 180 Н соответственно. Но на стадии близкой к разрушению у поперечных образцов имеется явно выраженная площадка пластических деформаций.

Также были проведены испытания согласно DIN EN 520 [2] при равном пролете образцов из ГКП 12,5 мм, вырезанных в продольном и поперечном направлениях. В результате испытаний были получены деформации плиты и построены соответствующие графики зависимости прогиба от прикладываемой нагрузки (рис.3.2.), которые имеют три характерные зоны. Первая – это зона упругой работы ГКП, график которой имеет линейный характер, которая на 20% больше у продольных образцов, чем у поперечных. Во второй зоне наблюдается развитие микротрещин, что подтверждается появлением соответствующих переломов на графиках и характерным потрескиванием в образцах. Этот перелом происходит при нагрузке около 40% от разрушающей для продольных образцов и 70% соответственно для поперечных образцов. В третьей зоне зафиксировано разрушение образца. В этой зоне график имеет линейный нисходящий характер. При этом у продольных образцов разрушение наступает при нагрузке около 610 Н, а максимальный прогиб у таких образцов - 12 мм. У поперечных образцов разрушение наступает при нагрузке около 210 Н, но на стадии близкой к разрушению имеется явно выраженная площадка пластических деформаций и максимальный прогиб составляет около 12 мм.

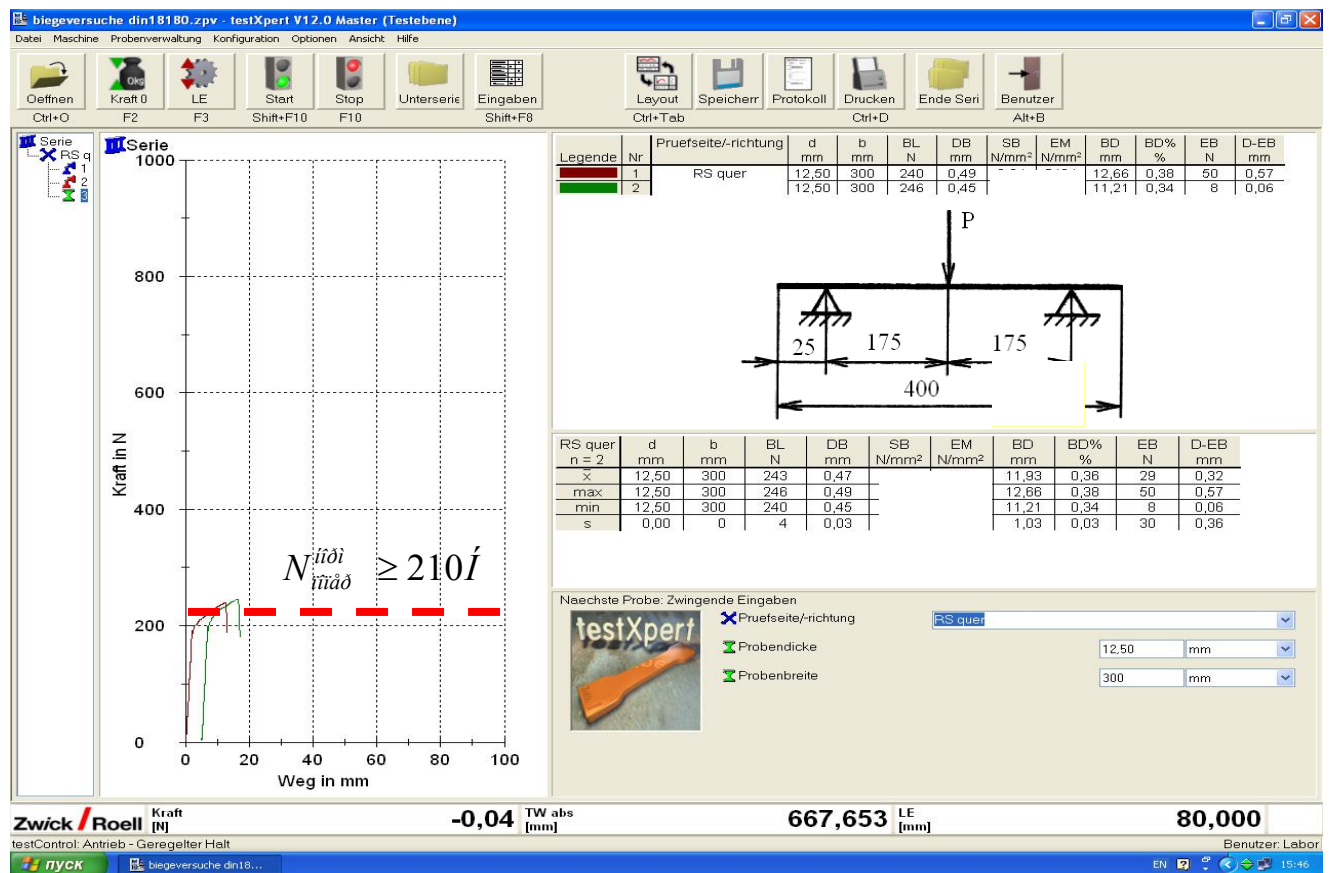
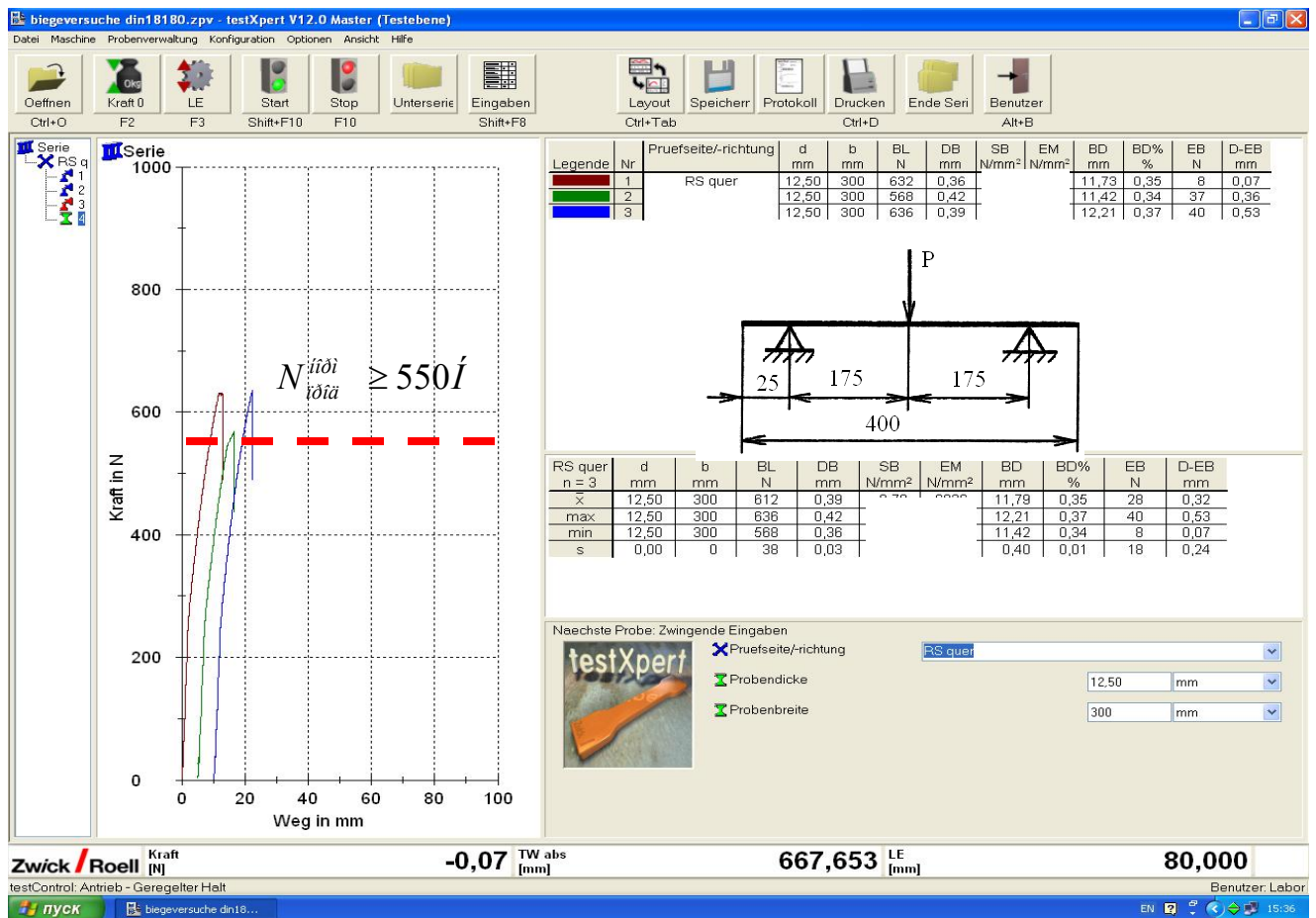


Рис. 3.2. Результаты испытания по DIN EN 520 продольных (а) и поперечных (б) образцов из ГКП 12,5 мм

Анализ характера деформирования при испытаниях на трехточечный изгиб стандартных образцов $t=12.5$ мм показывает, что 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 выше в 2,6-2,8 раза, которая достигает 2,7 и 7,4 МПа соответственно.

3.2 Коэффициенты Пуассона, модули упругости, прочность ГК образцов-восьмерок при осевом растяжении

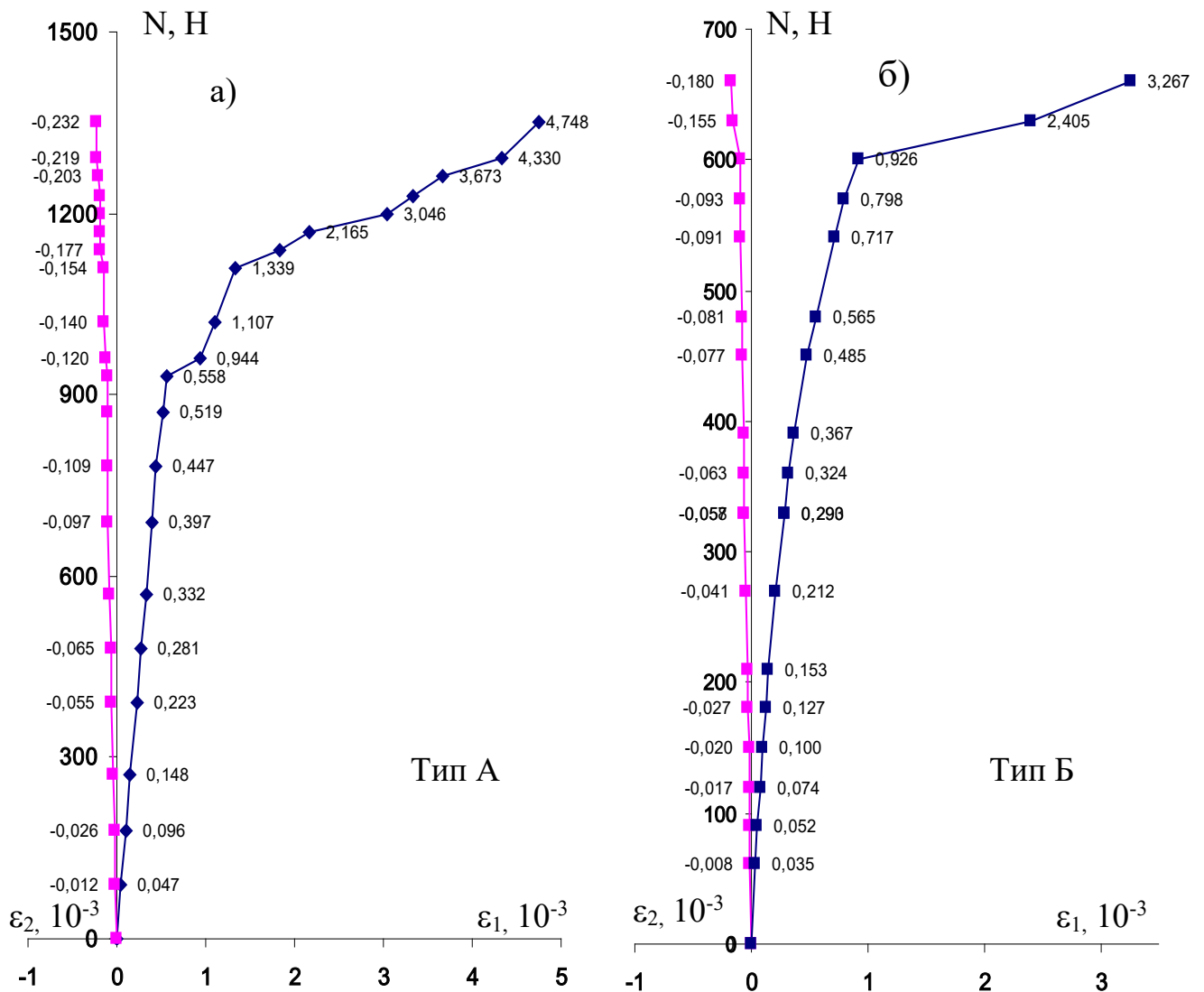


Рис. 3.3 Деформирование в продольном (а) и поперечном направлениях (б) образцов тип А и Б при осевом растяжении

Анализ опытных данных при осевом растяжении рис. 3.3 показывает, что модуль упругости и коэффициент Пуассона у продольных образцов на 10-15%

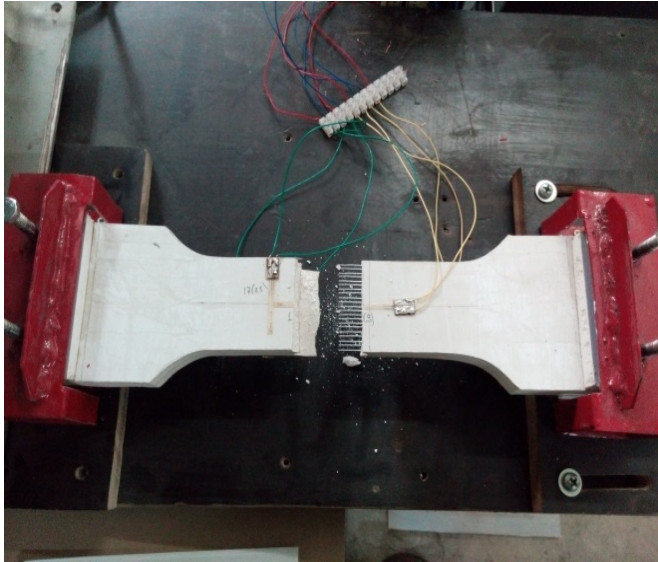


Фото 3.1. Разрушение образца при испытании на осевое растяжение

хрупкостью гипсового сердечника. Предел упругой работы для всех типов образцов составляет до 55-65 % от разрушающего усилия.

3.3 Прочность и модуль упругости ГК образцов-моделей при чистом сдвиге

Испытания на сдвиг показали, что модули сдвига для образцов тип А,Б при пределе пропорциональности различается незначительно до 5 % и составляет $\sigma = 1,05-1,1$ ГПа (рис. 3.4).

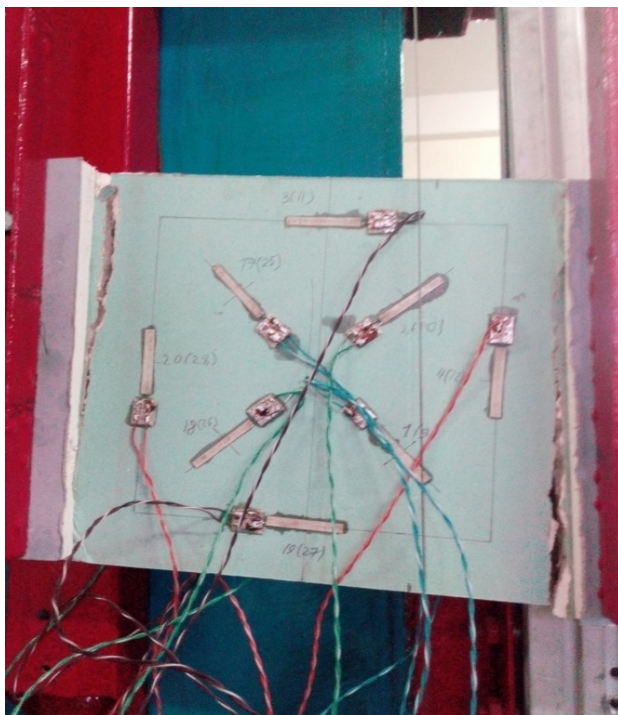


Фото 3.2. Разрушение образца при испытании на сдвиг

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. 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

При этом прочность при сдвиге выше в 1.7 раза у образцов тип А. Вплоть до разрушения деформирование всех типов имело линейных характер.

При нагрузке 50-60% от разрушающей фиксировалось характерное потрескивание без визуально видимых трещин. Разрушение образца проходило по плоскостям параллельным приложению разрушающей нагрузки. до разрушения деформирование всех типов имело линейных характер.

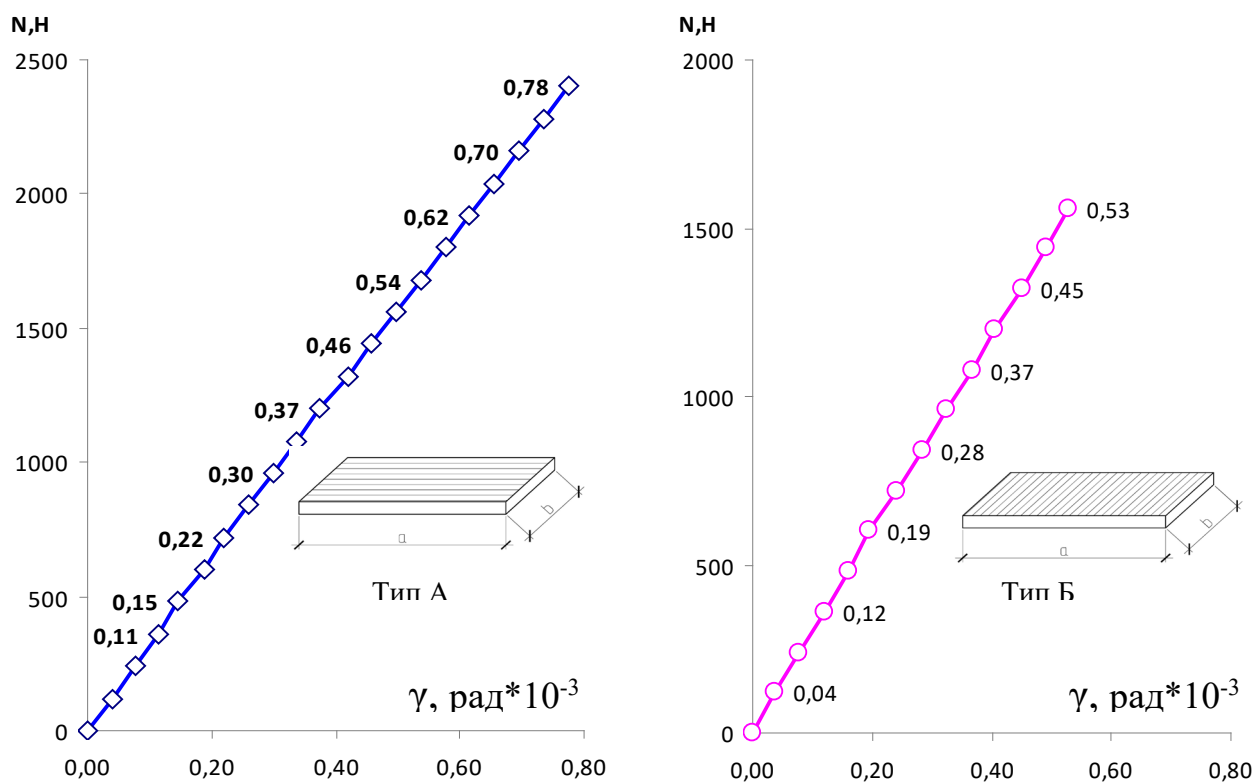


Рис 3.4. Испытание на сдвиг: приложение разрушающей нагрузки поперек волокон (а) и вдоль волокон (б).

3.4 Трещиностойкость и прочность одно- и двухслойных ГК образцов-моделей при стандартном и дополнительном армировании стыков и межэлементном соединениях

В результате испытания серии образцов, вырезанных в продольном и поперечном направлении, были построены графики зависимости прогиба от нагрузки (рис. 3.5). В однослойных цельных образцах разрушающая нагрузка и нагрузка трещинообразования практически равны. Значение разрушающего усилия у продольных образцов составляет 1015 Н, притом, что у поперечных образцов это усилие имеет в три раза меньшее значение и составляет 319 Н. А нагрузка трещинообразования в таких образцах составляет 99% от разрушающей. Графики условно имеют три зоны работы ГКП: упругая, трещинообразования с микротрещинами в гипсовом сердечнике и разрушения. В первой зоне график имеет линейный характер. Во второй зоне наблюдается развитие микротрещин, что подтверждается появлением соответствующих переломов на графиках и характерным потрескиванием в образцах. У продольных образцов перелом в графике более заметен и наступает при нагрузке составляющей 50% от

разрушающей. Максимальный прогиб в таком образце – 10 мм. У поперечных образцов это перелом в графике наступает при нагрузке 70% от разрушающей. Но на стадии близкой к разрушению у поперечных образцов есть явно выраженная площадка пластических деформаций, а максимальный прогиб составляет 3,5 мм.

Аналогичным образом были испытаны образцы с наличием поперечного стыка и серия испытаний образцов с поперечным стыком и проклеенных стеклохолстом. По результатам были построены графики зависимости прогиба от нагрузки (рис.3.6). Также как и предыдущие они имеют линейный характер. У образцов с поперечным стыком и проклеенных стеклохолстом график без видимых изломов, а нагрузка трещинообразования и разрушающая практически совпадает и имеет значение 580 Н. Максимальный прогиб в таком образце – 4,5 мм. Притом как у образцов с поперечным стыком, но без стеклохолста, этот перелом происходит при нагрузке примерно 98 Н, что составляет 42% от разрушающего усилия и дает перелом графика в этой точке. При этом разрушение наступает при нагрузке около 232 Н, а максимальный прогиб составляет 2,4 мм. Соответственно разрушающая нагрузка у образцов без стеклохолста в 2,5 раза меньше и составляет 40% от разрушающей нагрузки проклеенных образцов.

Также испытаны серии двухслойных образцов с поперечным стыком: 1) где листы гипсокартона соединены между собой самонарезными винтами; а также 2) листы гипсокартона прокручены самонарезными винтами и лицевая поверхность усилена стеклохолстом. В результате испытания образцов были построены графики зависимости прогиба от нагрузки (рис. 3.7). Графики имеют более сглаженный вид, по сравнению с однослойными образцами. То есть, нет явных границ между зонами работы ГКП. У образцов проклеенных стеклохолстом нагрузка трещинообразования совпадает с разрушающей нагрузкой и составляет 1420 Н, а максимальный прогиб таких конструкций – 5,3 мм. Притом как у образцов с поперечным стыком, но без стеклохолста, этот перелом происходит при нагрузке примерно 429 Н, что составляет 32% от разрушающего усилия и дает перелом графика в этой точке. При этом разрушение наступает при нагрузке около 1348 Н, а максимальный прогиб составляет 5,2 мм.

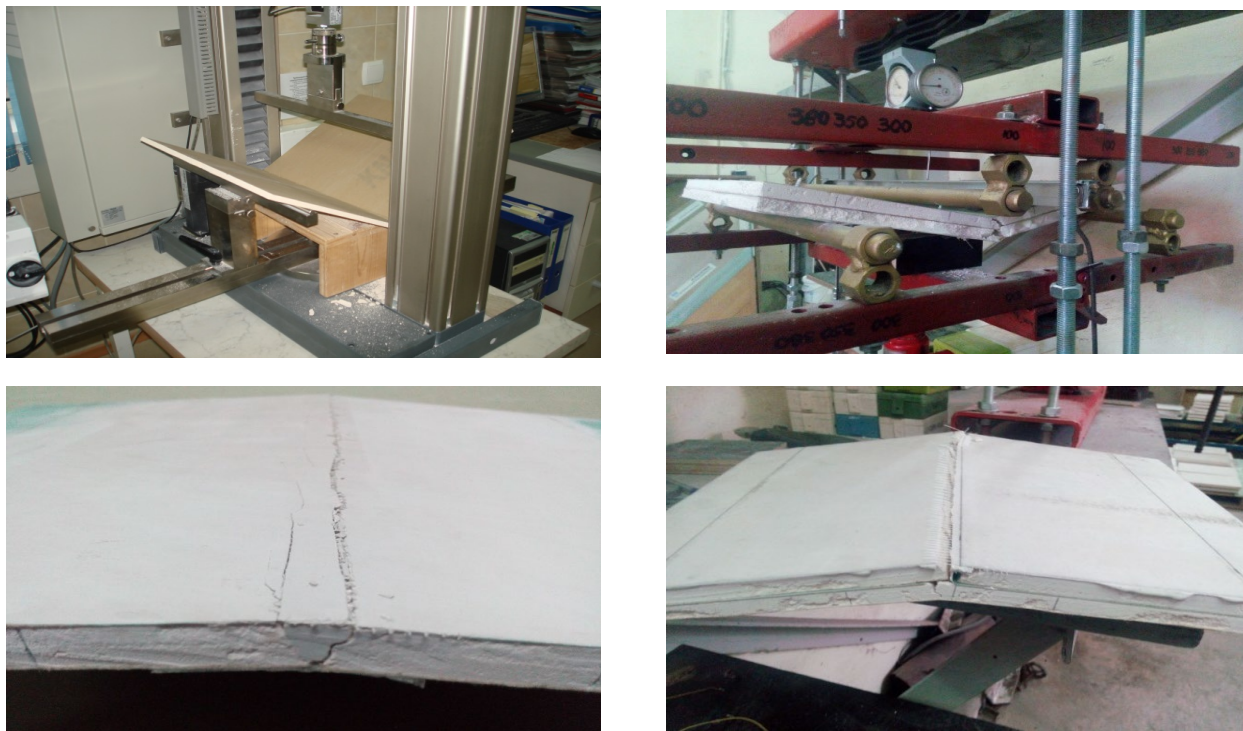


Фото 3.3. Разрушение образцов при испытании на изгиб.

Соответственно разрушающая нагрузка у образцов без стеклохолста меньше и составляет 98% от разрушающей нагрузки проклеенных образцов.

Также испытаниям подвергались серии двухслойных образцов с поперечным стыком: 1) где листы гипсокартона проклеены между собой и прокручены самонарезными винтами; а также 2) листы гипсокартона проклеенные между собой, прокручены самонарезными винтами и лицевая поверхность усилена стеклохолстом. В результате испытания образцов были построены графики зависимости прогиба от нагрузки (рис. 3.8). Графики имеют линейный вид со сглаженными границами между зонами работы ГКЛ. У образцов проклеенных стеклохолстом нагрузка трещинообразования совпадает с разрушающей нагрузкой и составляет 2343 Н, а максимальный прогиб таких конструкций – 6,2 мм. Притом как у образцов с поперечным стыком, но без наклеенного стеклохолста, этот перелом происходит при нагрузке примерно 464 Н, что составляет 32% от разрушающего усилия и дает перелом графика в этой точке. При этом разрушение наступает при нагрузке около 1422 Н, а максимальный прогиб составляет 3,6 мм. Таким образом, разрушающая нагрузка у образцов без стеклохолста меньше и составляет 60% от разрушающей нагрузки образцов проклеенных стеклохолстом.

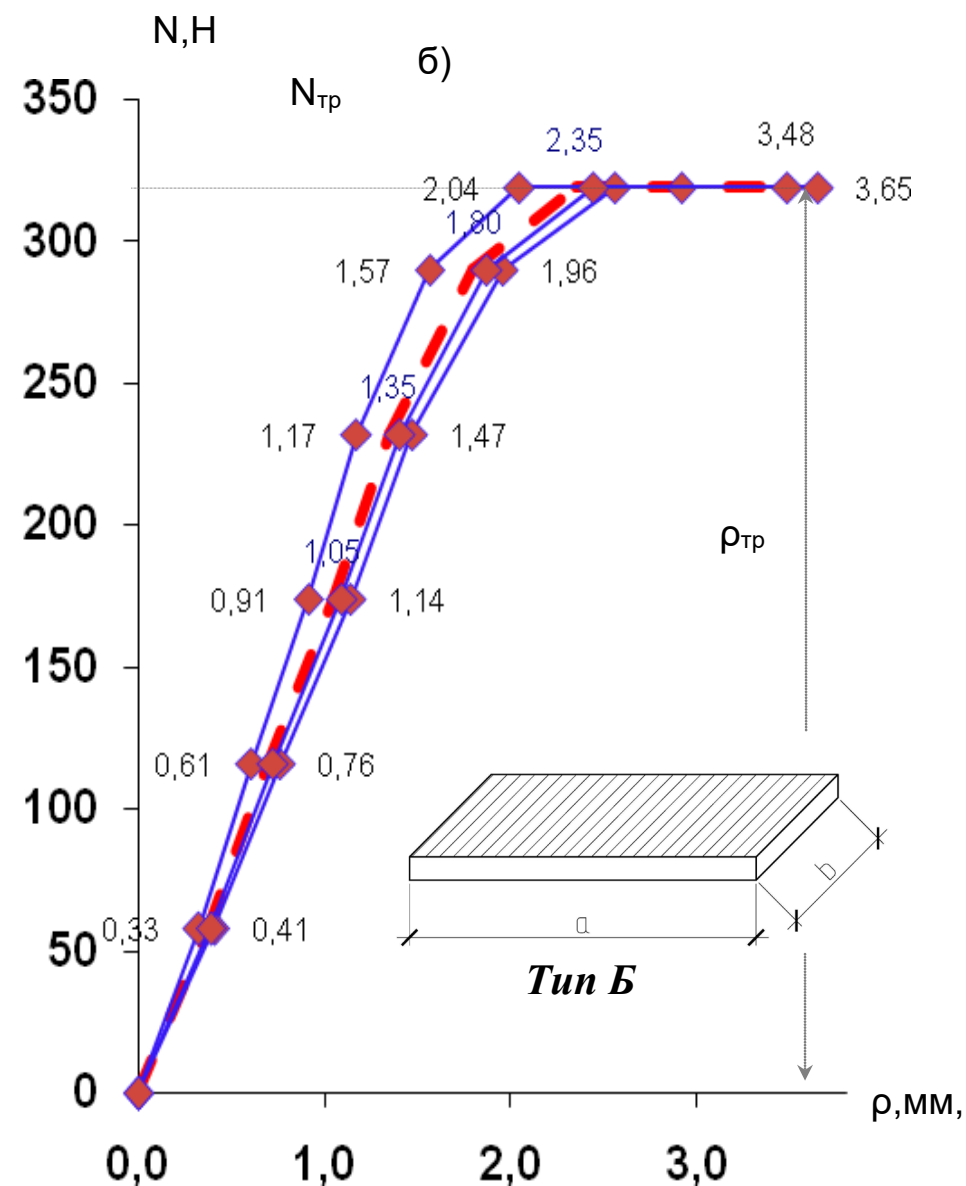
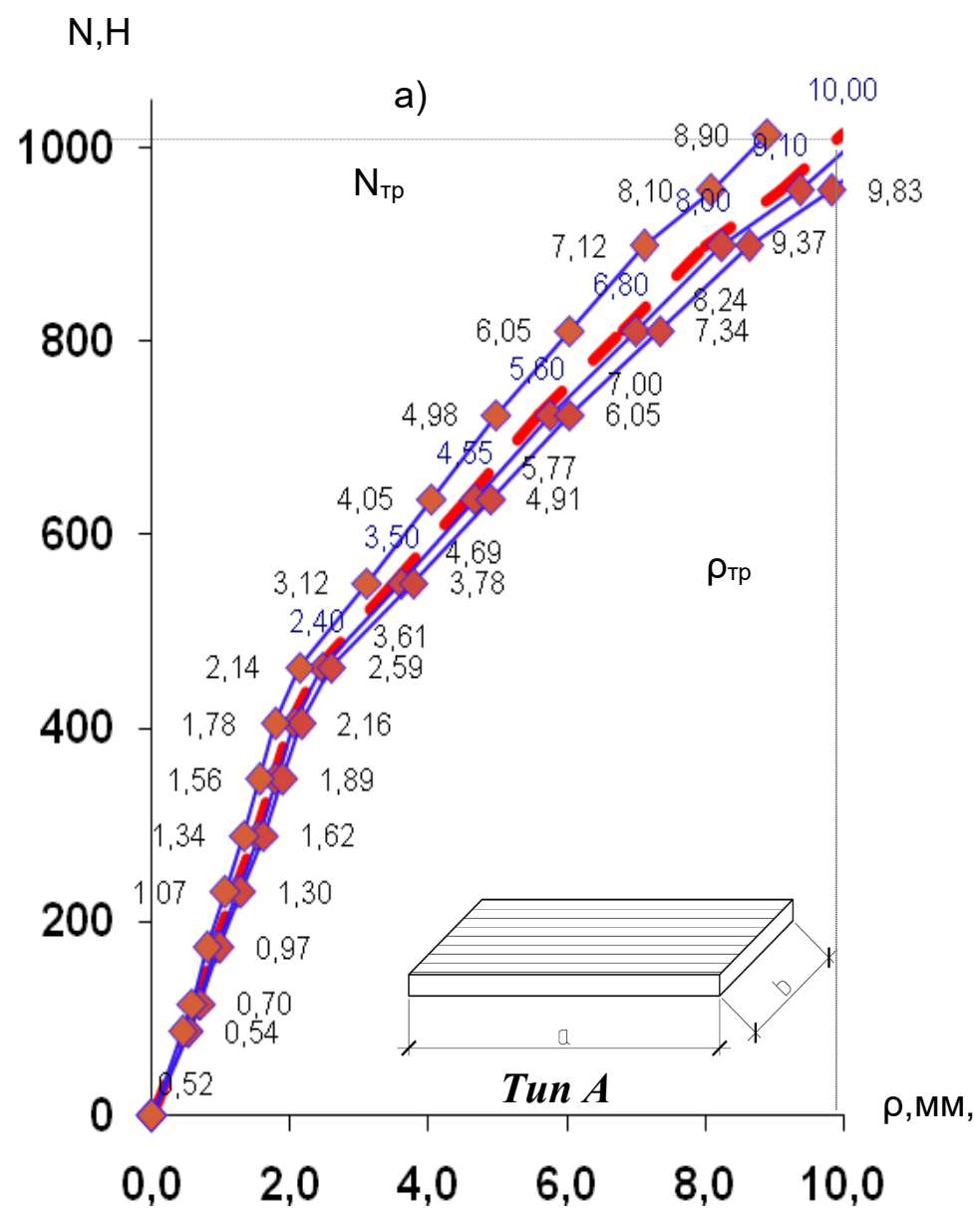


Рис.3.5 Графики зависимости прогиба от нагрузки образцов вырезанных из ГКП а) в продольном направлении; б) в поперечном направлении

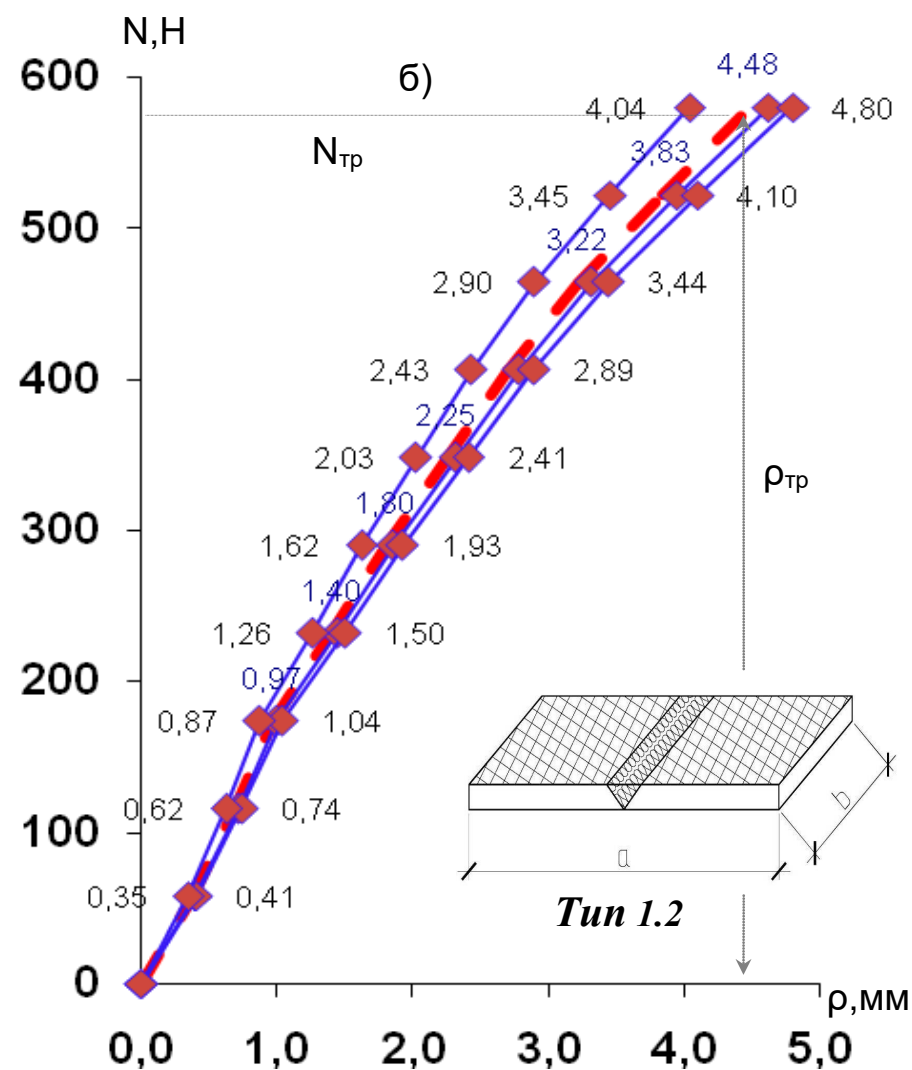
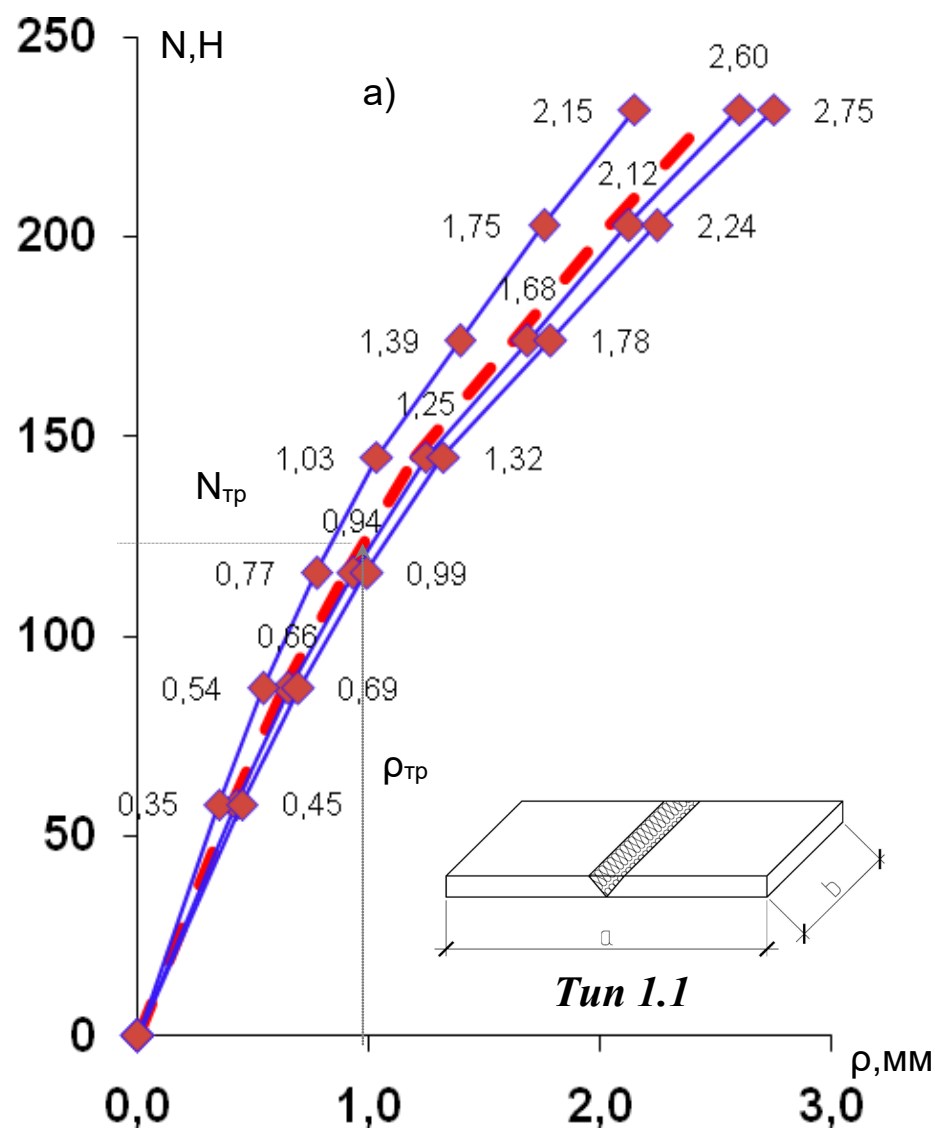


Рис. 3.6 Графики зависимости прогиба от нагрузки образцов вырезанных из ГКП а) с поперечным стыком; б) с поперечным стыком и проклеенных стеклохолстом

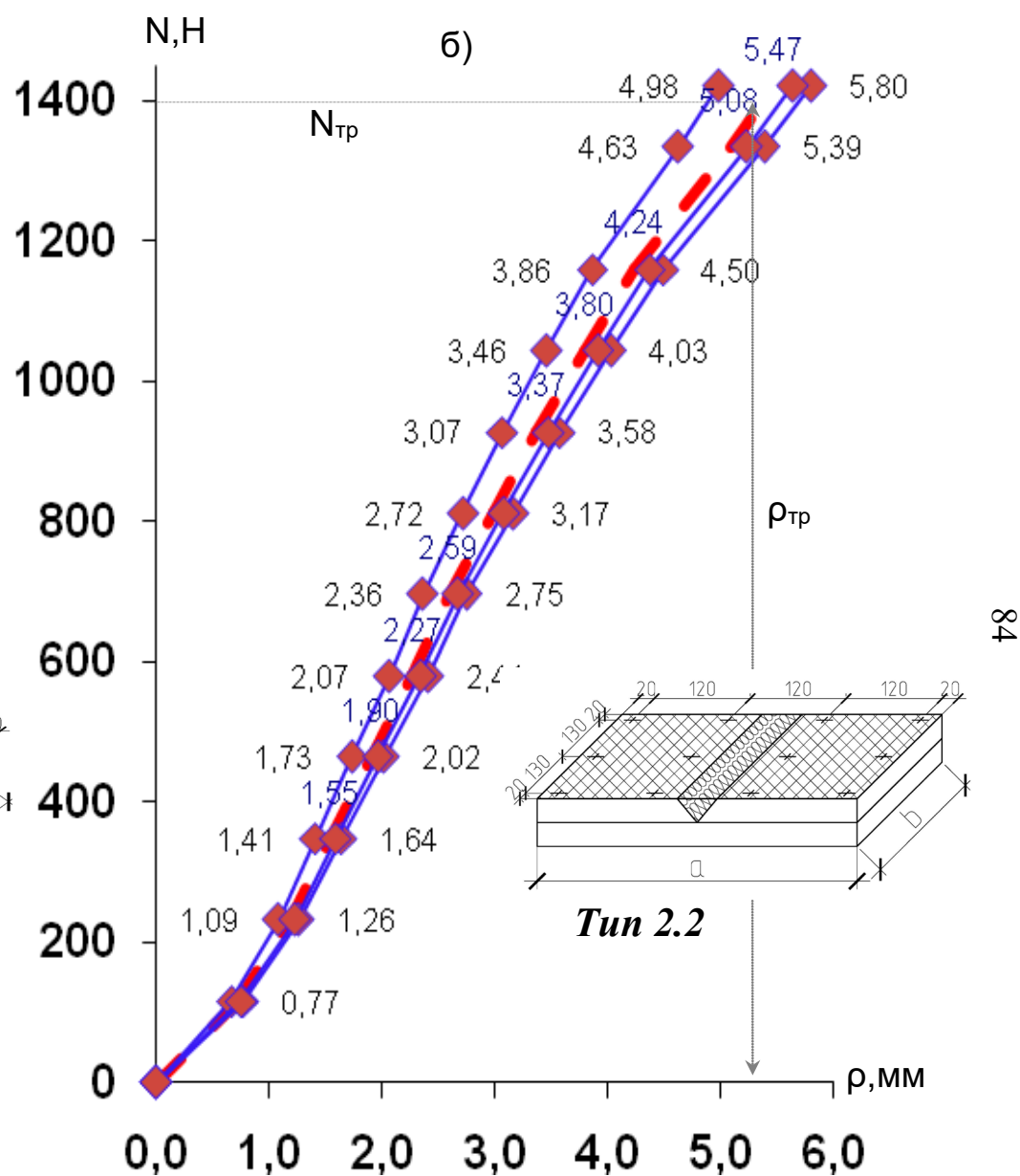
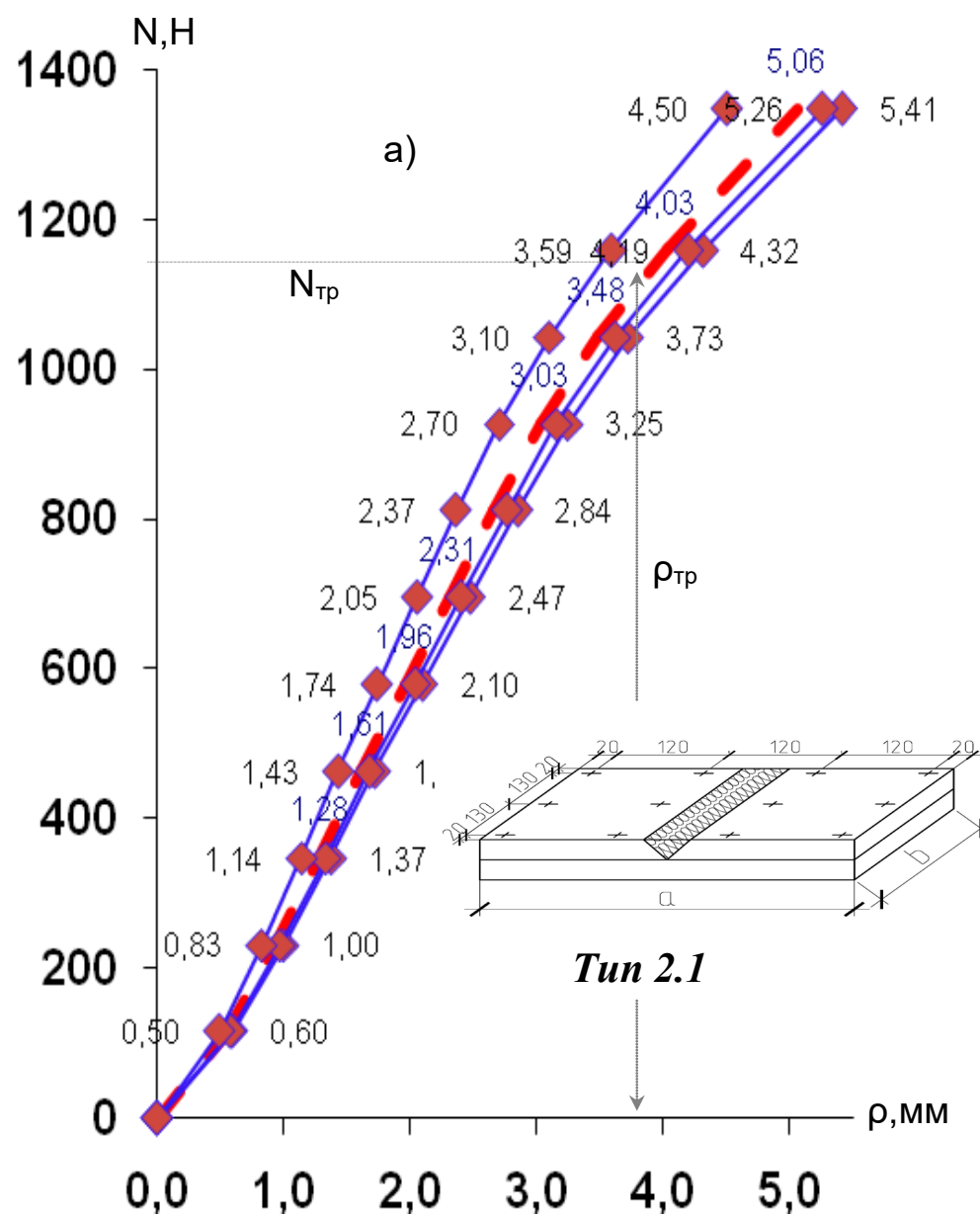


Рис. 3.7 Графики зависимости прогиба от нагрузки двухслойных образцов с поперечным стыком а) при винтовом соединении; б) при винтовом соединении и проклейкой стеклохолстом

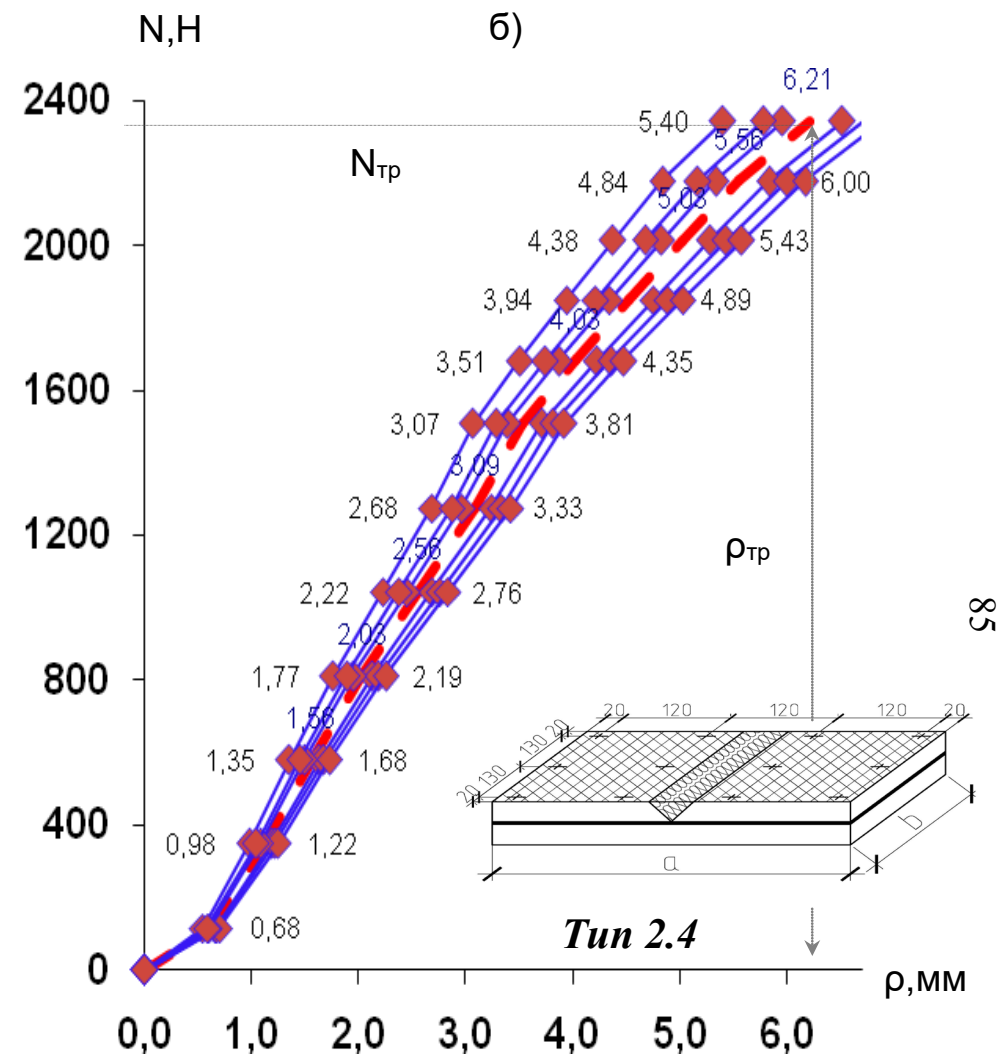
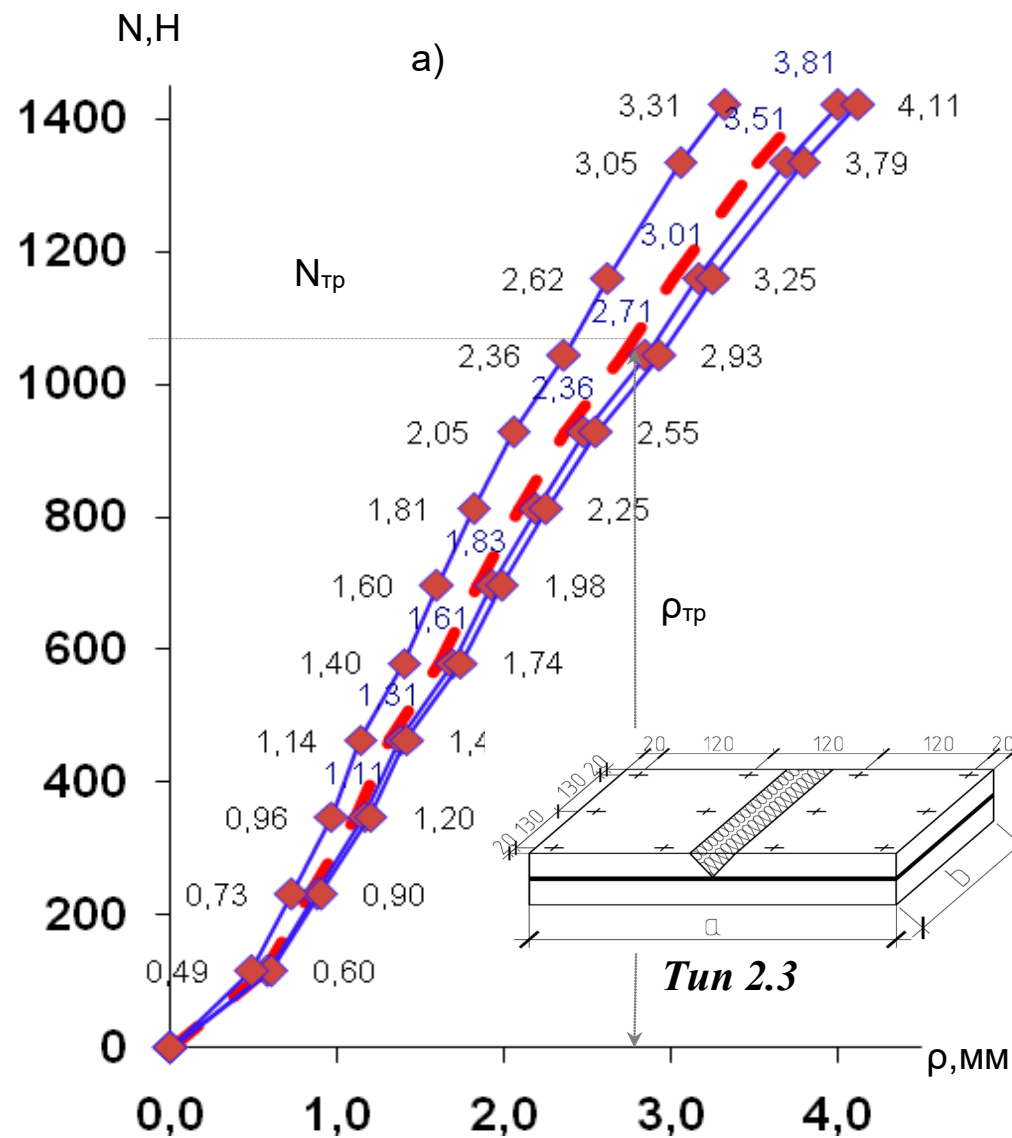


Рис. 3.8 Графики зависимости прогиба от нагрузки двухслойных образцов с поперечным стыком а) при винтовом соединении и проклейкой слоев м/у собой; б) при винтовом соединении и проклейкой слоев м/у собой и стеклохолстом

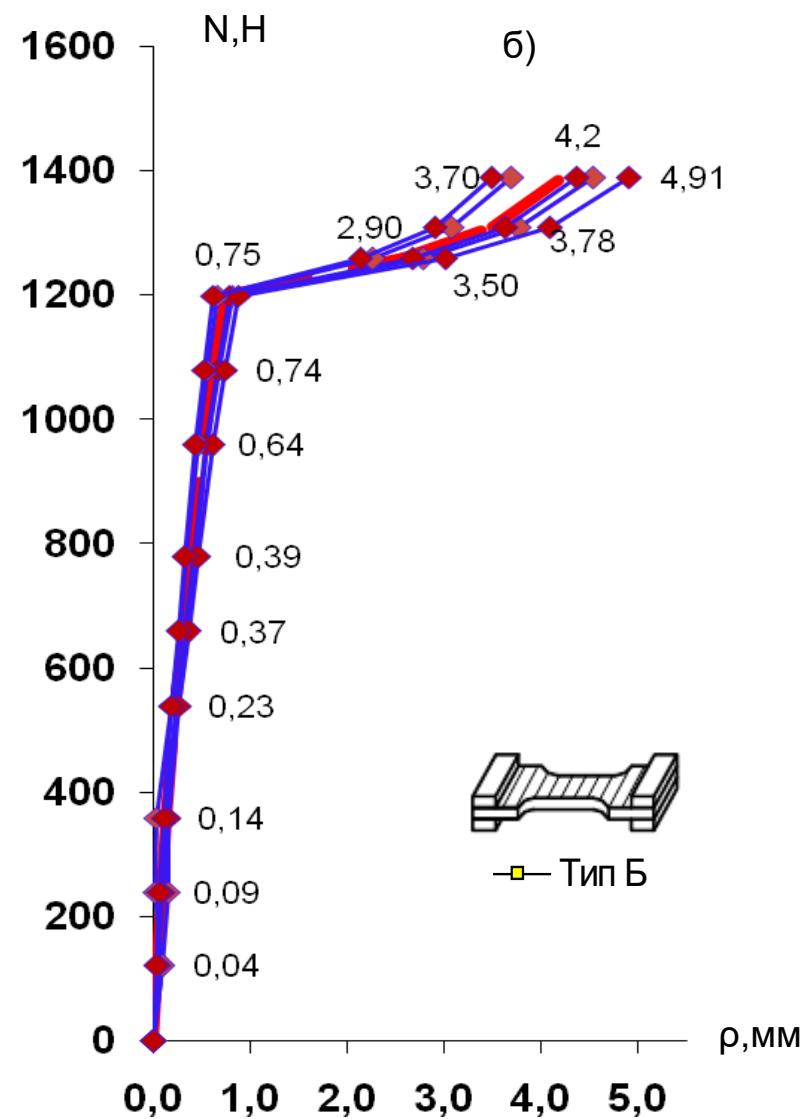
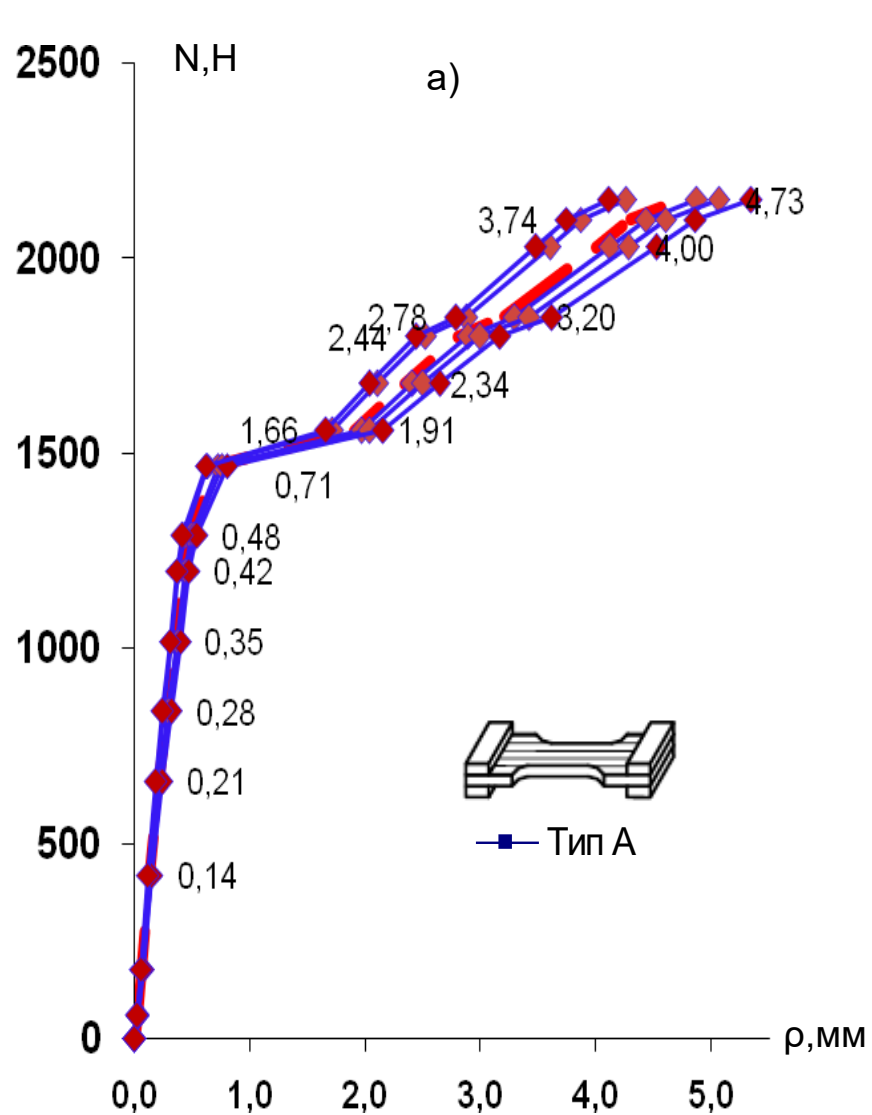


Рис. 3.9 Графики экспериментальных данных при растяжении а) продольных и б) поперечных двухслойных образцов

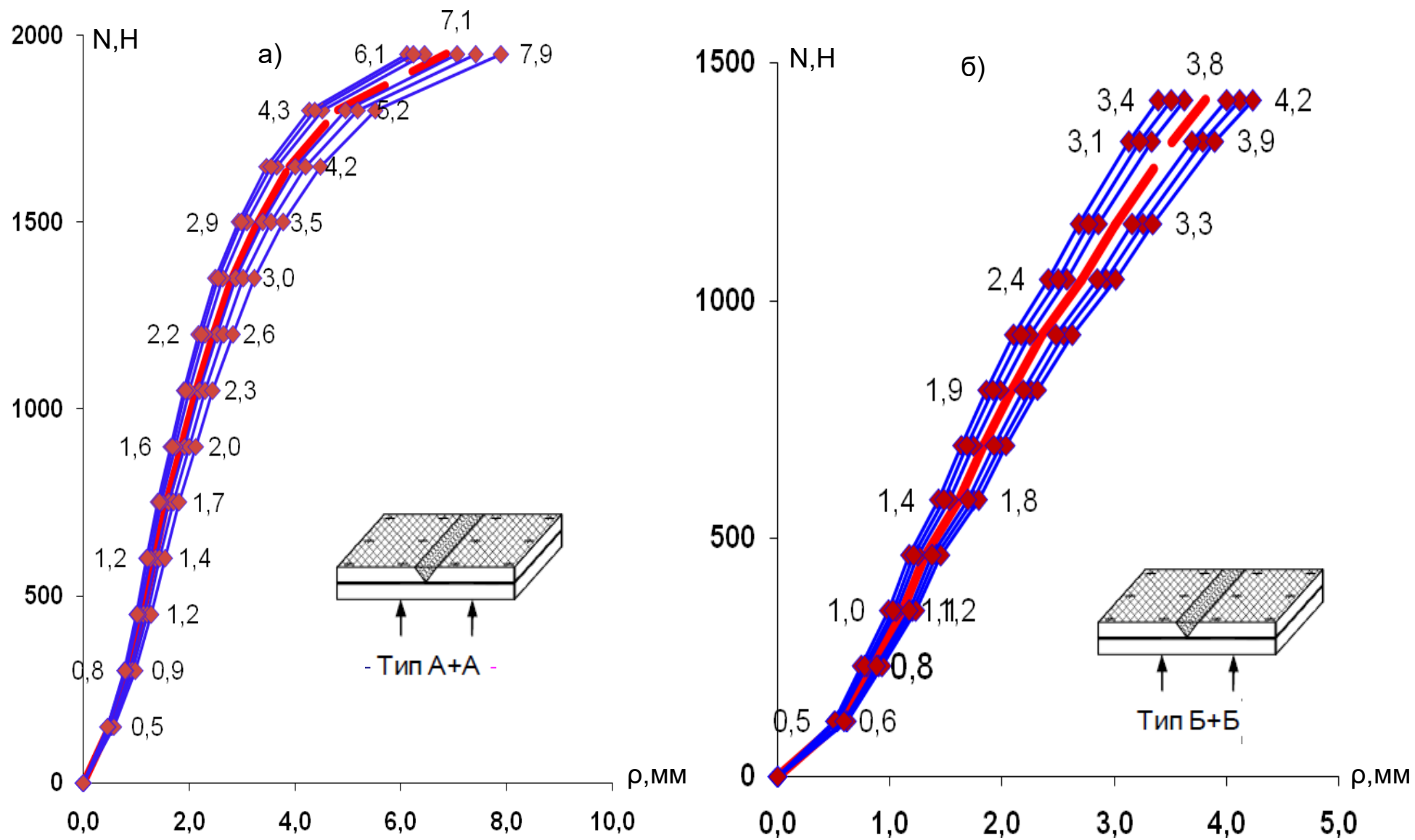


Рис. 3.10 Графики экспериментальных данных при изгибе а) продольных и б) поперечных двухслойных образцов

ВЫВОДЫ ПО 3 РАЗДЕЛУ

1. В результате испытаний на трехточечный изгиб выявлено, что 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 выше в 2,6-2,8 раза, которая достигает 2,7 и 7,4 МПа соответственно;

2. Предел упругой работы выше у поперечных образцов и составляет до 70 %, а у продольных до 50 % от разрушающего усилия;

3. На стадии близкой к разрушению в поперечных образцах имеется явно выраженная площадка пластических деформаций;

4. Анализ опытных данных при осевом растяжении показывает, 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;

5. 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.

6. При сдвиге разрушение образца проходит по плоскостям параллельным приложению разрушающей нагрузки, вплоть до разрушения деформирование всех типов имеет линейный характер, прочность при сдвиге у образцов тип А выше в 1.7 раза, модули сдвига для образцов тип А, Б при пределе пропорциональности различается незначительно до 5 %.

7. Испытания на четырехточечный изгиб одно- и двухслойных образцов со стыком без усиления показали что предел трещиностойкости составлял 33-42% от предела их прочности на изгиб;

8. При испытании на изгиб образцы армированные стеклохолстом вплоть до разрушения деформировались без видимых трещин на лицевых гранях, а для

однослойных образцов усиление стеклохолстом приводит к резкому возрастанию пределу трещиностойкости в 1.8 раза;

9. В двухслойных образцах одновременное использование клеевого соединения и усиления стеклохолстом приводит к резкому увеличению прочности и трещиностойкости в 1,75 раза при этом предел трещиностойкости достигает предела прочности при изгибе и разрушению образцов происходит как по стыку так и по цельному сечению.

РАЗДЕЛ 4

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИПСОКАРТОННЫХ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ
ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК

4.1 Общие положения

Проектирование конкретного дизайнерского решения может выполняться, исходя из конструктивных требований унифицированных решений, в пределах прогнозированной работы ГК конструкций, или, во втором случае, для особо сложных объемных криволинейных поверхностей на основании расчетов с учетом индивидуальных особенностей объекта и геометрии ГК конструкции (рис.4.1).

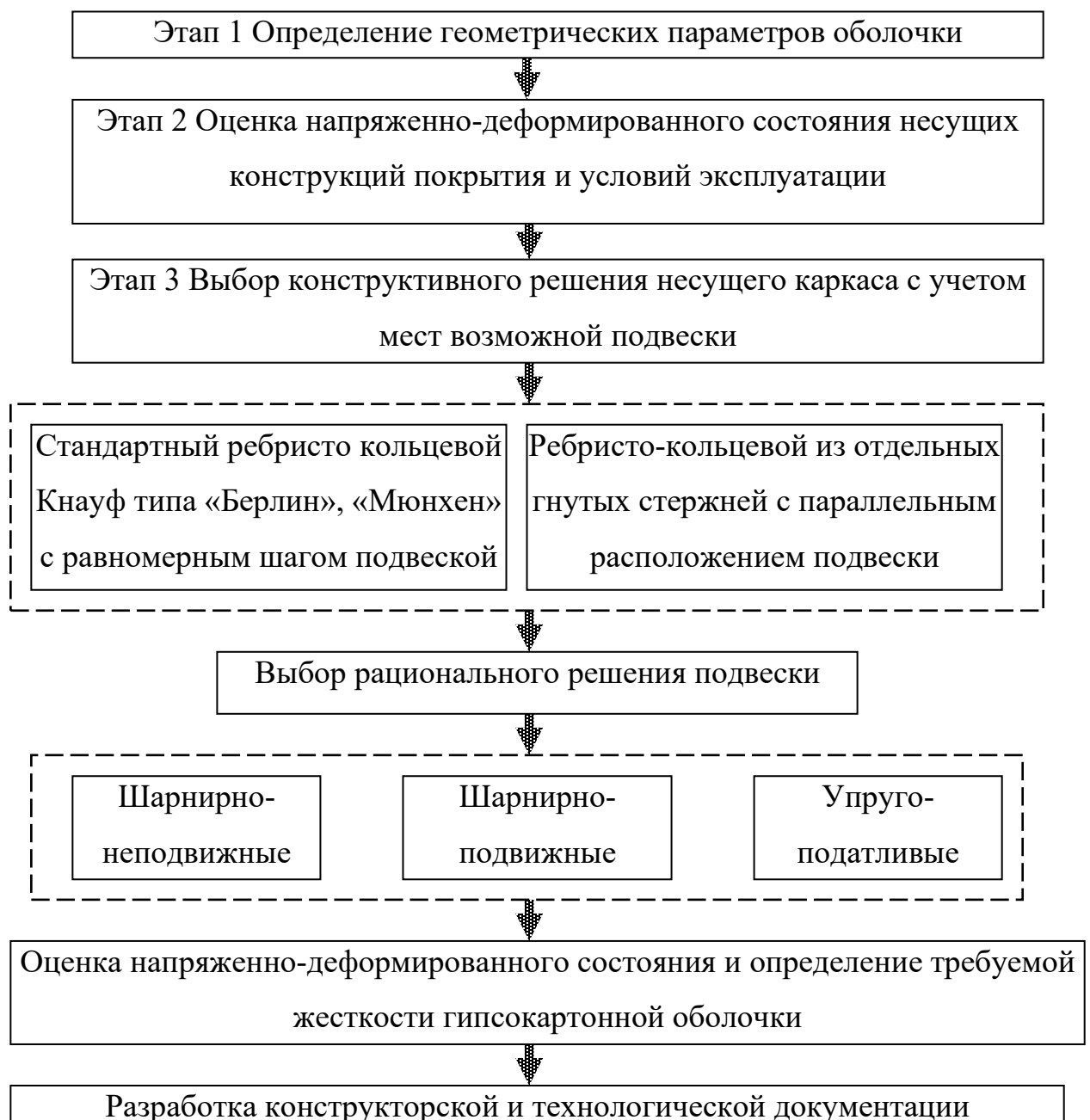


Рис.4.1 Алгоритм расчета и проектирования крупноразмерных ГК оболочек

4.2. Определение геометрических параметров оболочки

Унифицированные купола Кнауф типа «Берлин» и «Мюнхен» (рис 4.2) различаются между собой размерами и кривизной, но похожи по конструкции и относятся к пологим куполам. Пологие купола Кнауф выполнены по ребристо-кольцевой схеме: основной несущий каркас из профильной стальной трубы и второстепенный из тонкостенных пресованных оцинкованных профилей *DIN 18182*.

Крепление основного каркаса купола к перекрытию здания осуществляется при помощи нониус-подвеса требуемой длины.

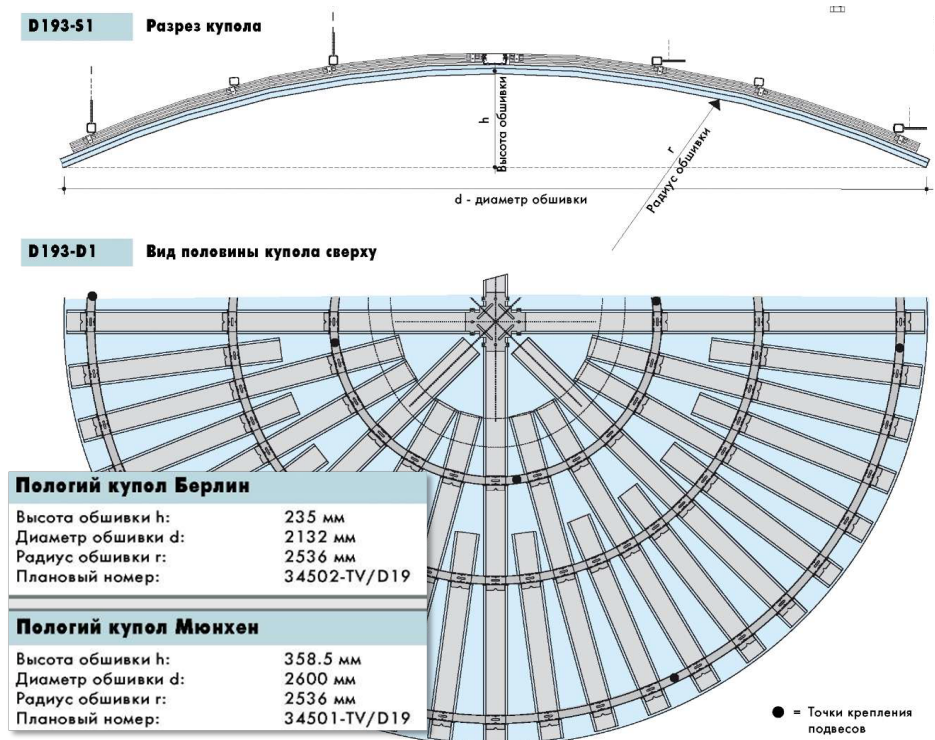


Рис.4.2 Геометрия пологих куполов Кнауф

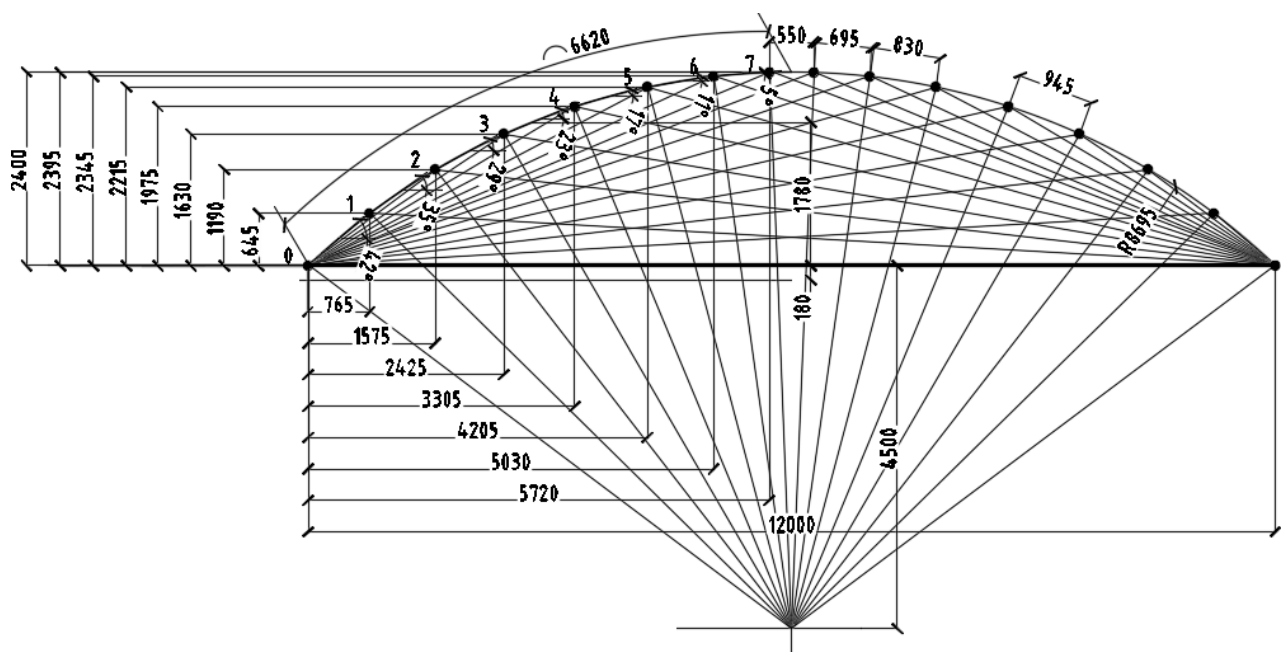


Рис. 4.3 Определение геометрических параметров несущего каркаса оболочки

При проектировании индивидуальных криволинейны оболочек, важным вопросом являются шаг и жесткость кольцевых элементов несущего каркаса (как правило из профильной трубы) для обеспечения установки подвески и необходимого пролета тонкостенных прессованных СД второстепенного каркаса.

4.3 Оценка НДС несущих конструкций покрытия и условий эксплуатации

К настоящему времени разработано ряд программных систем с помощью которых выполняется расчет напряженно- деформированного состояния (НДС) зданий. На отечественном рынке наиболее распространенными программными системами (ПС), ориентированными на расчет современных пространственных конструкций, являются ЛИРА, SCAD, ANSYS, MikroFE, STARK_ES и RobotMillenium.

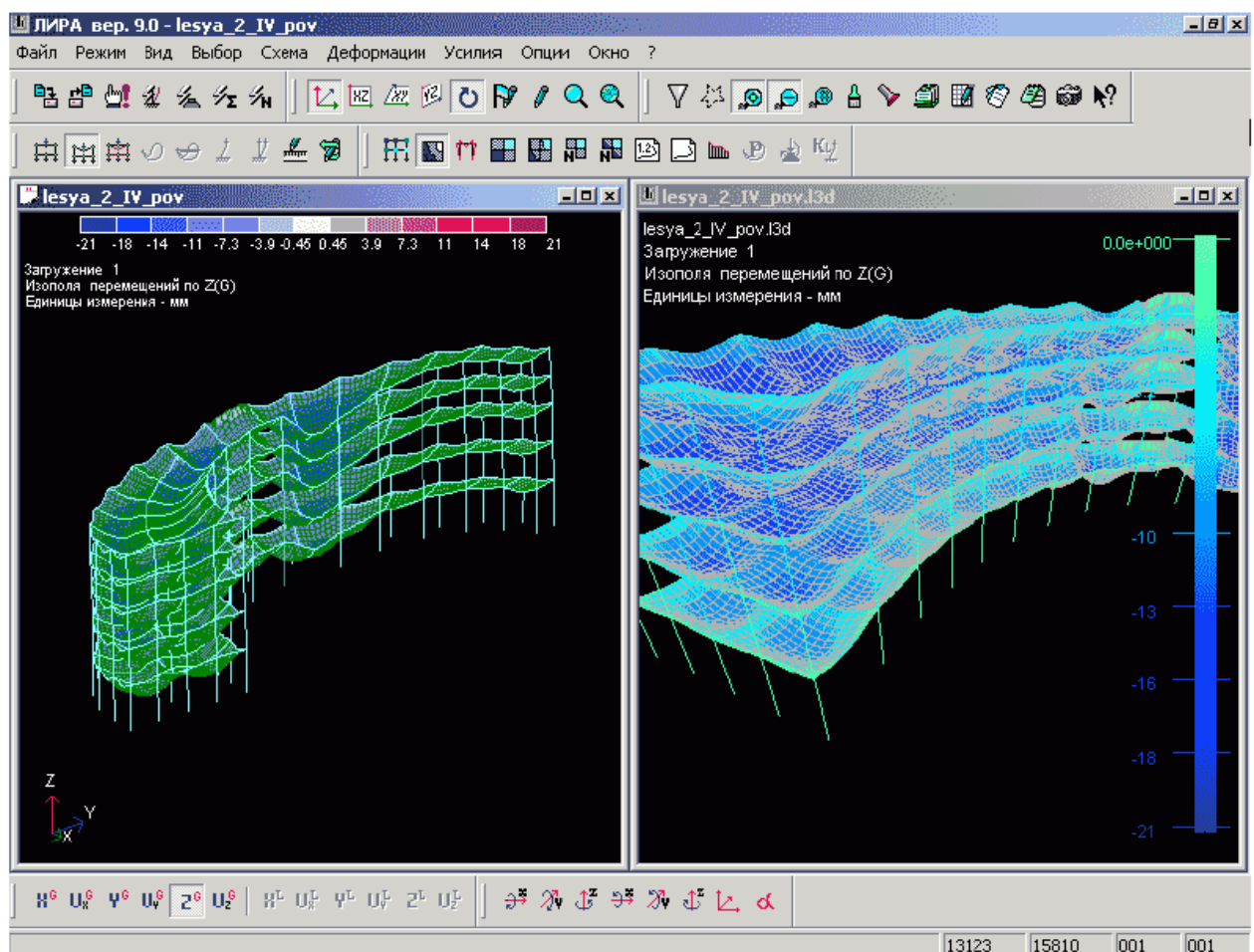


Рис. 4.4 Пример по определению перемещений покрытия с использованием ПС Лири

Все они используют унифицированные библиотеки конечных элементов и обеспечивают решение задач строительной механики:

- применение метода расчета на основе реальных диаграмм σ - ϵ материалов;
- определение наиболее невыгодных комбинаций нагрузок;
- определение главных и эквивалентных напряжений по теориям прочности;
- анализ устойчивости несущих элементов и конструкций в целом.

При эксплуатации возможно воздействие следующих видов нагрузок:

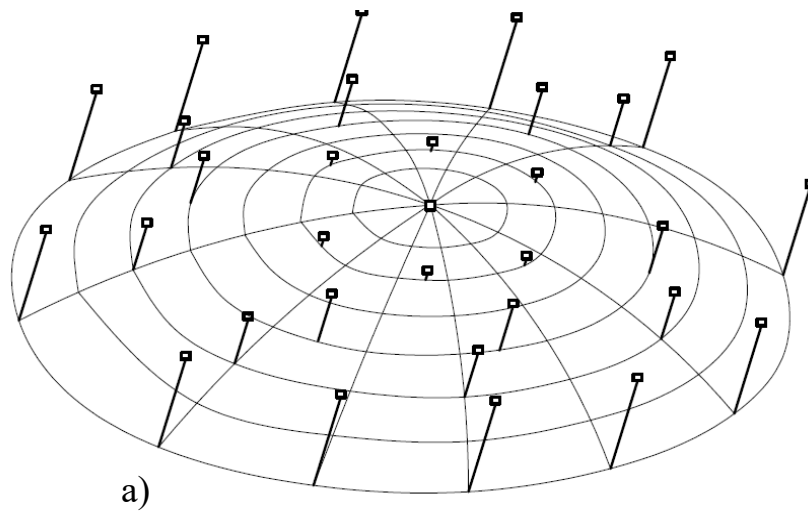
- постоянные (собственный вес оболочки);
- переменные кратковременные (температурно-климатические, прогибы несущего покрытия от снеговой и ветровой нагрузки, вес людей и т.п.);
- эпизодическое (аварийный температурный перепад из-за поломок системы отопления в зимний период эксплуатации).

Для проверки предельных состояний для второй группы (трещиностойкость) в основное сочетание входят постоянные и переменные нагрузки с эксплуатационными значениями, в аварийное сочетание кроме постоянных и переменных нагрузок может входить только одно эпизодическое воздействие [3].

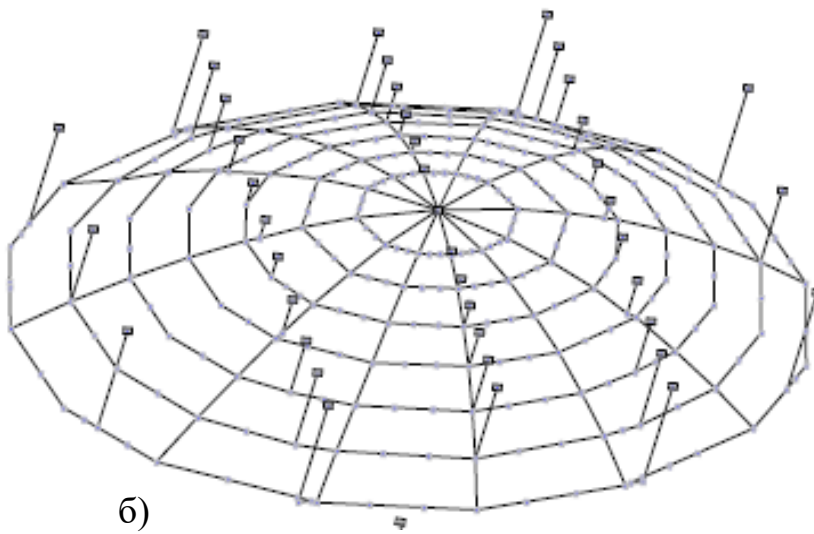
4.4 Выбор конструктивного решения и расчет несущего каркаса оболочки

Гипсокартонные купола не являются распорной системой, реализуются в сферической или эллиптической форме и представляют собой подвесную конструкцию состоящую из основного несущего каркаса и второстепенного их СД профилей для непосредственного крепления гипсокартонной оболочки.

Унифицированный каркас Кнауф из состоит отдельных колец рис. 4.5а и применим для плоских железобетонных перекрытий, позволяющих равномерно и с требуемой частотой установить подвесы. На практике зачастую приходится встречаться с ситуацией, когда требуемую частоту установки невозможно обеспечить за счет особенностей конструктивного решения перекрытия (балочные, покрытие из плоских решетчатых пролетных конструкций и т.п.) Уменьшение частоты подвесов требует увеличения жесткости конструкция несущего каркаса: ребристые, ребристо-кольцевые, ребристо-кольцевые со связями и т.п. (рис. 4.5)



а)



б)

Рис. 4.5. Варианты конструктивного решения ребристо-кольцевого каркаса для крупноразмерной гипсокартонной оболочки

а) стандартный ребристо кольцевой Кнауф типа «Берлин», «Мюнхен» с равномерным шагом подвеской

б) из отдельных изогнутых стержней с с параллельным расположением подвески

Расчет несущих конструкций подвесного потолка выполняется по первой и второй группе предельных состояний. Расчет элементов по первой группе предельных состояний подверженных осевому растяжению выполнялся по []:

$$\frac{N}{A_n} \leq R_y \gamma_c, \quad (4.1)$$

N – продольное усилие в элементе; A – площадь элемента; R_y – расчетное сопротивление стали; γ_c – коэффициент условия работы

Расчет элементов подверженных осевому сжатию проверяется на устойчивость:

$$\frac{N}{\varphi A} \leq R_y \gamma_c \quad (4.2)$$

N – продольное

усилие в элементе; A – площадь элемента; R_y – расчетное сопротивление стали; γ_c – коэффициент условия работы; φ – коэффициент продольного изгиба, определяемый по таблице в зависимости от R_y и λ – гибкость элемента (определяемая $\lambda = l/i$, l – расчетная длина элемента, i – радиус инерции элемента).

Расчет на прочность элементов, изгибаемых в одной из главных плоскостей, следует выполнять по формуле (4.3):

$$\frac{M}{W_{n,min}} \leq R_y \gamma_c, \quad (4.3)$$

$W_{n,min}$ – минимальный момент сопротивления сечения нетто;

M – максимальный изгибающий момент в поперечном сечении стержня.

Значение касательных напряжений τ в сечениях изгибаемых элементов должны удовлетворять условию формулы (4.4):

$$\tau = \frac{QS}{J_t} \leq R_s \gamma_c. \quad (4.4)$$

Q – максимальная поперечная сила; R_s – расчетное сопротивление стали сдвигу;

S – статический момент сдвигаемой части сечения брутто относительно нейтральной оси; J – момент инерции сечения; t – суммарная толщина стенки.

При расчете по второй группе предельных состояний подобранные элементы проверяются по предельной гибкости $[\lambda_{np}]$. После нахождения усилий в элементах производится уточнение предельных гибкостей:

$$[\lambda_{np}] = 180 - 60\alpha; \quad (4.5)$$

где α – коэффициент определяемый по формуле

$$\alpha = \frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c}, \text{ принимаемый не менее } 0,5; \quad (4.6)$$

φ – коэффициент продольного изгиба, определяемый по таблице в зависимости от R_y и λ – гибкость элемента определяемая $\lambda = \frac{l}{i}$, l – расчетная длина элемента, i – радиус инерции элемента.

После определения предельной гибкости производилась проверка по формуле:

$$\lambda \leq [\lambda_{np}]. \quad (4.7)$$

При расчете приняты следующие предельные гибкости (согласно табл. 19 [32]):

- для растянутых элементов предельная гибкость – $[\lambda] = 400$;

- для сжатых элементов предельная гибкость – $[\lambda] = 150$.

4.5 Модель ГК элемента в условиях плоского напряженного состояния

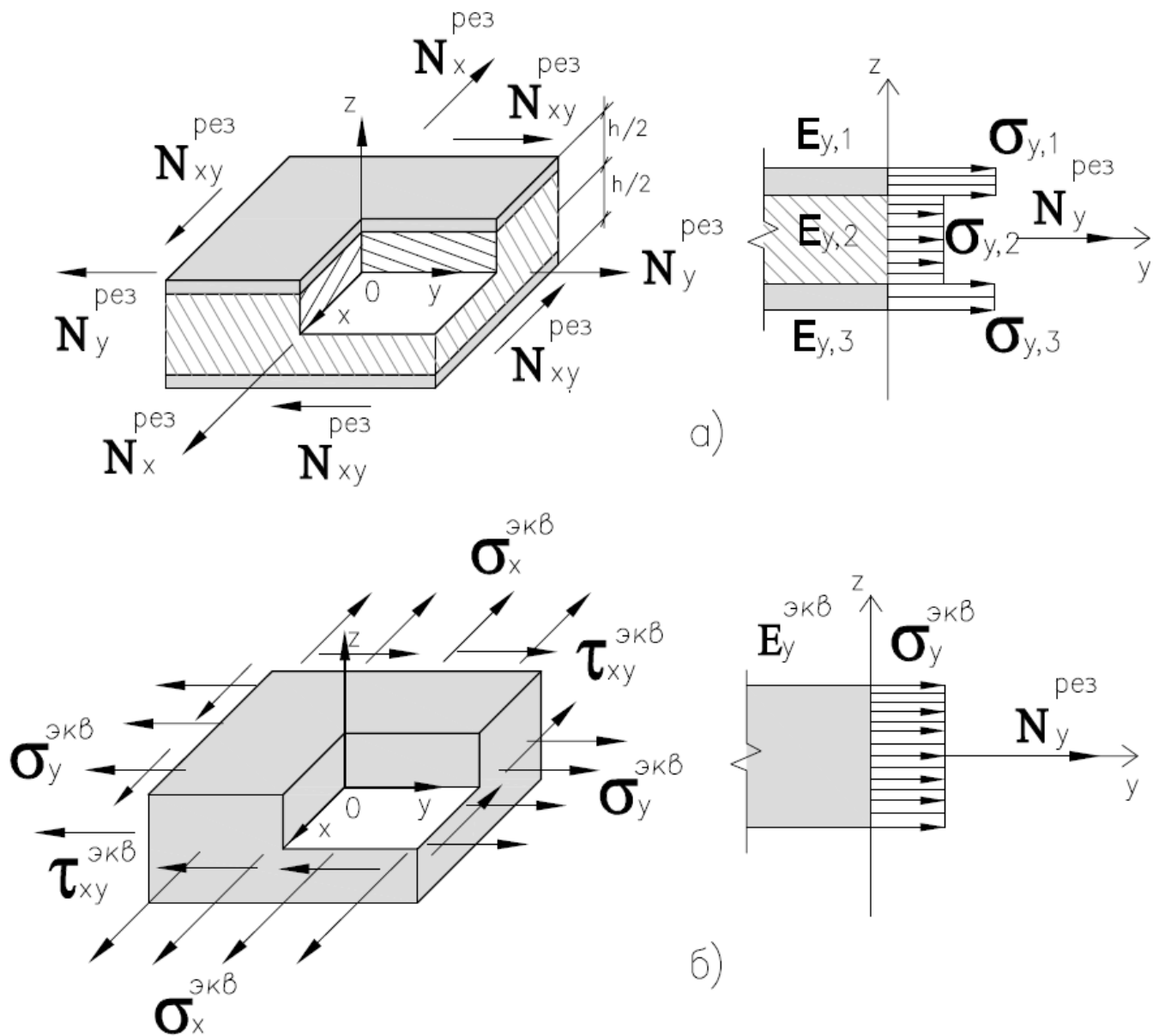


Рис. 4.6 Переход к расчетной схеме плоско-напряженного слоистого композитного материала (ГКП)

- а) структура и распределение напряжений в исходном гипсокартонном элементе;
 б) в расчетной ортотропной модели

Методики расчета гипсокартонных куполов строятся на структурно-феноменологическом подходе. Упругие постоянные E_x , E_y , ν_{xy} , ν_{yx} , G_{xy} определяются экспериментально.

Основные предпосылки и допущения:

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

4.6 Система разрешающих уравнений для плоского напряженного состояния ортотропного тела

При плоском напряженном состоянии размеры тела вдоль оси z малы (рис.4.6), а боковые плоскости хоу свободны от нагрузки, при этом напряжения $\sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ равны нулю. Ввиду малой толщины предполагается, что по плоскостям, параллельным хоу, напряжения пренебрежительно малы, а напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ не зависят от координаты z . Перемещения w вдоль оси происходят, но они представляют функцию напряжений σ_x, σ_y . Напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy} \neq 0$; $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$. Уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + X = 0 \qquad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0 \qquad (4.8)$$

Зависимости между перемещениями и деформациями	Уравнение совместности деформаций
$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$	$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}$

Физические уравнения закона Гука деформации через напряжения:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

или напряжения через деформации

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{1-\nu_{xy}*\nu_{yx}} \begin{bmatrix} E_x & \nu_{xy}*E_x & 0 \\ \nu_{yx}*E_y & E_y & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_{xy}*\nu_{yx})G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Здесь имеет место условие симметрии упругих постоянных

$$E_x*\nu_{xy} = E_y*\nu_{yx} \quad (4.11)$$

Современные численные методы позволяют проводить анализ НДС конструкций с различной конфигурацией и основаны 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. Наиболее распространенным является принцип минимума потенциальной энергии, или принцип Лагранжа. Функционал полной потенциальной энергии идеально упругого тела определяется формулой:

$$\Pi = U - A \quad (4.12)$$

где U - внутренняя энергия деформации тела:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} dV = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \left(\int_0^h \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} dz \right) d\Omega = \frac{1}{2} \int_V \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} \int_0^h dz d\Omega \quad (4.13)$$

A - работа внешних объемных и поверхностных сил, в области Ω и на поверхности Γ_t :

$$A_t = \int_S \{u\}^T \{t\} d\Gamma = \int_{\Gamma} \left(\int_0^h \{u\}^T \{t\} dz \right) d\Gamma = \int_{\Gamma} \{u\}^T \{t\} \int_0^h dz d\Gamma \quad (4.14)$$

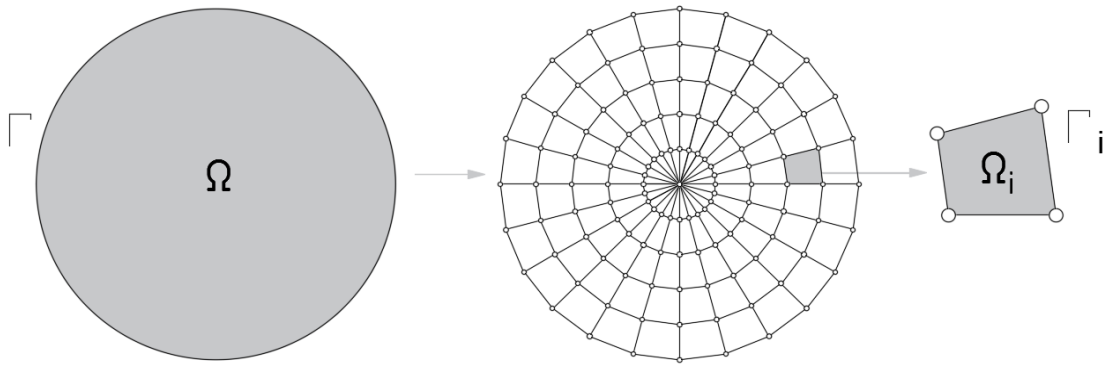


Рис. 4.7 Дискретизация континуальной модели с областью Ω и границей Γ

При решении плоской задачи узлы КЭ имеют две степени свободы.

$$\{u^e\} = \{u_{x1} \quad u_{y1} \quad u_{x2} \cdots u_{xn} \quad u_{yn}\}^T \quad (4.15)$$

Поле перемещений в пределах элемента определяются с помощью интерполирующих соотношений:

$$u_x(x, y) = \sum_{i=1}^n N_i^{(e)}(x, y) u_{xi}, \quad u_y(x, y) = \sum_{i=1}^n N_i^{(e)}(x, y) u_{yi} \quad (4.16)$$

где $N_i^{(e)}(x, y)$ – функции формы, отличная от нуля в узле i КЭ.

Вектора деформаций и напряжений вычисляются соответственно:

$$\{\varepsilon(x, y)\} = [D] [N^e] \{u^e\} = [B] \{u^e\}, \quad \{\sigma(x, y)\} = [E] \{\varepsilon(x, y)\} = [E] [B] \{u^e\} \quad (4.17)$$

$[D], [B]$ – матрицы частных производных интерполирующих функций и градиентов.

Общая система уравнений равновесия конечно-элементной модели:

$$[K] \{U\} = \{F_V\} + \{F_S\} \quad (4.18)$$

где $[K]$ – глобальная матрица жесткости конечно-элементной модели; $\{U\}$ – вектор узловых перемещений; $\{F_V\}, \{F_S\}$ – глобальный вектор узловых сил, статически эквивалентные заданным объемным и поверхностным силам,

4.7 Критерии трещиностойкости ортотропной ГК оболочки

ГКП как конструкционно-отделочные плиты конвейерного изготовления имеют регламентированные механические характеристики по прочности на растяжении при изгибе и жесткости, которая выражается в виде максимально допустимого прогиба контрольных образцов. Поэтому составные и комбинированные двухслойные образцы могут рассматриваться как типовые и относящихся к материалам со стабильными механическими показателями и с нормируемым значением доверительной вероятности.

Экспериментальные исследования показали, что наиболее рациональными являются использование для крупноразмерных ГК оболочек двухслойных элементов 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.

Однако предварительные расчеты показывают, что несмотря на межэлементное клеевое и винтовое соединения составное элемент не работает как полноценное цельное сечение, что свидетельствует отсутствие пропорционального уменьшения прогиба при увеличении толщины сечения. Наличие частичной податливости и подтверждается и результатами численного моделирования с использованием упругих характеристик полученных при одноосном растяжении.

Для перехода к однородному ортотропному эквивалентному телу обладающего упругими характеристиками E_1 , E_2 , μ_{12} , μ_{21} , G_{12} полученных при одноосном растяжении и сдвиге стандартных цельных образцов необходим подбор эквивалентной жесткости, который заключается в определении эквивалентной толщины при неизменных упругих константах. При подборе эквивалентной жесткости основным критерием принималась абсолютная ошибка аппроксимации:

$$\bar{A} = \frac{\sum |y_i - y_x| / y_i}{n} * 100\% \quad (4.19)$$

где y_i , y_x – значение фактических и расчетных значений исследуемого фактора;

При этом контролировалось выполнение условий

$$K_{\bar{A}} = \frac{\sum \bar{A}_1^{u32} + \bar{A}_2^{u32} + \bar{A}_1^p + \bar{A}_2^p}{n} \succ \min; \quad \bar{A}_1^{u32}, \bar{A}_2^{u32}, \bar{A}_1^p, \bar{A}_2^p \leq 15\% \quad (4.20)$$

где $\bar{A}_1^{u32}, \bar{A}_2^{u32}$ - абсолютная ошибка аппроксимации данных при изгибе продольных и поперечных образцов; \bar{A}_1^p, \bar{A}_2^p - то же при растяжении

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает, что наиболее оптимальной является корректировка толщины эквивалентного тела равная 15,5 мм. При этом абсолютная ошибка аппроксимации, которая находилась в пределах до 12 %. Для таких материалов как гипсокартон, предельным считается состояние, которое предшествует началу образования трещин. При двойным усилении предел трещиностойкости достигает предела прочности, но при этом ГКП имеет различные прочностные и деформационные характеристики в продольном и поперечном направлениях для которых имеет место условие:

$$R_1^p = \sigma_{mp,1}^p \succ R_2^p = \sigma_{mp,2}^p \quad R_1^{u32} = \sigma_{mp,1}^{u32} \succ R_2^{u32} = \sigma_{mp,2}^{u32} \quad (4.21)$$

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).

$R_1^{u32}, R_2^{u32}, \sigma_{mp,1}^{u32}, \sigma_{mp,2}^{u32}$ - 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.

$$\sigma_{mp,1}^p \succ \sigma_{расч,1}^p = 1,6 \text{ МПа} \quad \sigma_{mp,2}^p \succ \sigma_{расч,2}^p = 1,1 \text{ МПа} \quad (4.22)$$

$$\sigma_{mp,1}^{u32} \succ \sigma_{расч,1}^{u32} = 6,0 \text{ МПа} \quad \sigma_{mp,2}^{u32} \succ \sigma_{расч,2}^{u32} = 4,0 \text{ МПа} \quad (4.23)$$

где $\sigma_{расч,1}^p, \sigma_{расч,2}^p, \sigma_{расч,1}^{u32}, \sigma_{расч,2}^{u32}$ - расчетные значения предела трещиностойкости при одноосном растяжении и изгибе в продольном и поперечном направлениях.

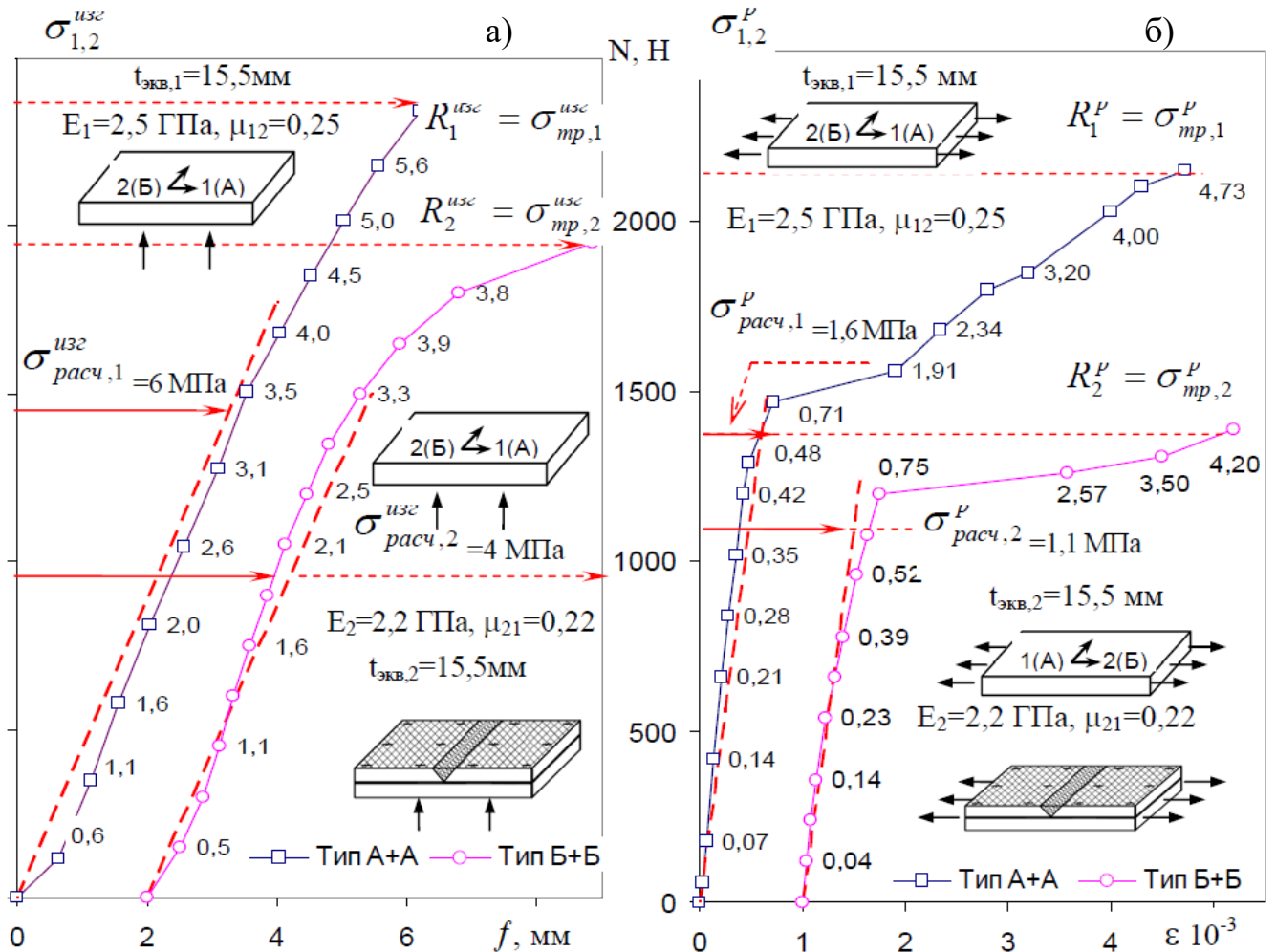


Рис.4.8 Сопоставление экспериментальных данных при изгибе (а) и растяжении (б) ГК продольных и поперечных двухслойных образцов с расчетными по SCAD с приведенной эквивалентной жесткостью $t=15,5 \text{ mm}$.

Для практических инженерных расчетов рекомендуется ограничиваться обеспечением трещиностойкости в поперечном направлении. Трещиностойкость считается обеспеченной, если эквивалентные напряжения в материале не превышает предела трещиностойкости в поперечном направлении:

$$\text{ - для срединного слоя } \sigma_{расч2}^P \geq \sigma_{экв}^{ср} ; \text{ для крайних слоев } \sigma_{расч2}^{изг} \geq \sigma_{экв}^{кр}$$

Расчеты показывают, что для определения эквивалентных напряжений при плоском напряженном состоянии целесообразно использование как первой (наибольших нормальных напряжений) так и четвертой (энергетической) теорий прочности, при этом погрешность расчетов не превышает 10 %:

$$\sigma_{экв}^I = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4\tau_{12}^2} \quad \sigma_{экв}^{IV} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 * \sigma_2} \quad (4.24)$$

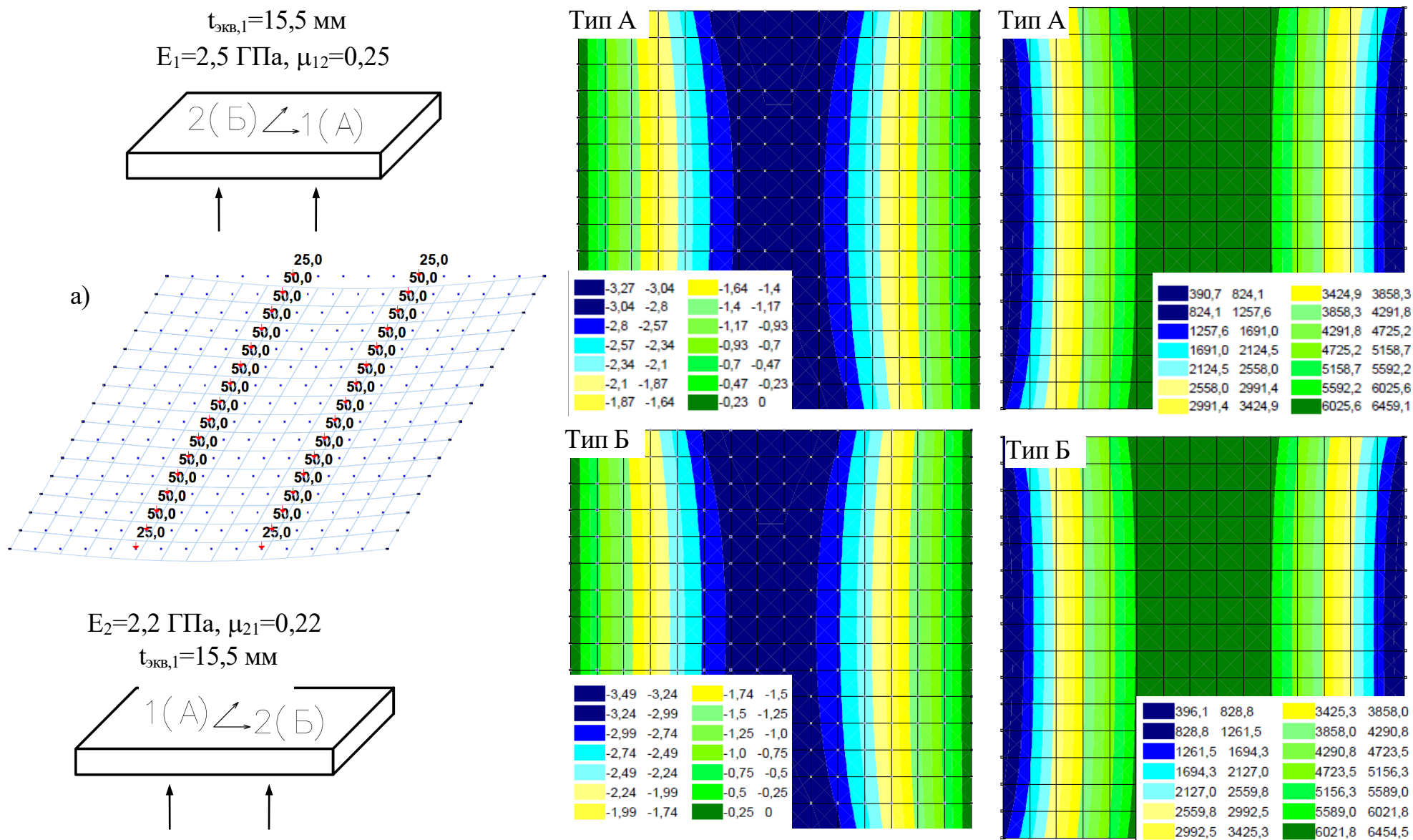


Рис.4.9 Отображение деформированной схемы и узловой нагрузки (а), поля деформаций (мм) и приведенных напряжений (кН/м²) при изгибе продольных (тип А) и поперечных (тип Б) образцов с эквивалентной толщиной $t_{\text{экв}}=15,5$

ВЫВОДЫ ПО 4 РАЗДЕЛУ

1. Методика расчета ГК оболочек строится на структурно-феноменологическом подходе. Упругие постоянные E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{21} , G_{12} определяются экспериментально. В качестве основных предпосылок принимается, что гипсокартон как плоско армированный материал представляет собой сплошное макроскопически однородное ортотропное тело с эквивалентной жесткостью. При этом связь между деформациями и напряжениями следует закону Гука.

2. Для перехода от комбинированного сечения с двойным усилением к однородному ортотропному телу обладающему упругими характеристиками E_1 , E_2 , μ_{12} , μ_{21} , G_{12} полученных при одноосном растяжении и сдвиге стандартных образцов необходим подбор эквивалентной жесткости, который заключается в определении эквивалентной толщины при неизменных упругих константах.

3. Для таких материалов как гипсокартон, предельным считается состояние, которое предшествует началу образования трещин. Для обеспечения трещиностойкости важным является установление уровня расчетных напряжений при плосконапряженном состоянии, который предлагается ограничивать этапом начала развития неупругих деформаций.

4. Для решения практических задач рекомендуется ограничиваться обеспечением трещиностойкости в поперечном направлении. Трещиностойкость считается обеспеченной, если эквивалентные напряжения в срединных $\sigma_{\text{эkv}}^{\text{cp}}$ и крайних $\sigma_{\text{эkv}}^{\text{кр}}$ слоях оболочки не превышают расчетных значений трещиностойкости в поперечном направлении: для срединного слоя $\sigma_{\text{эkv}}^{\text{cp}} \leq \sigma_{\text{расч}2}^p = 1,1$ МПа, для крайних слоев $\sigma_{\text{эkv}}^{\text{кр}} \leq \sigma_{\text{расч}2}^{\text{изг}} = 4,0$ МПа.

5. Для определения эквивалентных напряжений при плоском напряженном состоянии, целесообразно одновременное использование как первой (наибольших нормальных напряжений) так и четвертой (энергетической) теорий прочности, при этом погрешность расчетов в подавляющем количестве случаев не превышает 10 %.

РАЗДЕЛ 5

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОНТАЖ КРУПНОРАЗМЕРНОЙ ЭЛЛИпсоИДНОЙ ОБОЛОЧКИ

5.1 Характеристики архитектурно-планировочного решения здания и основных конструктивных элементов для проектирования оболочки

Объектом для проектирования эллипсоидной крупноразмерной гипсокартонной оболочки является рекреационная зона внутреннего дворика первого учебного корпуса Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Необходимость в разработке проекта реконструкции связана с дефицитом помещений внеаудиторной подготовки студентов и их отдыха в перерывах между занятиями. В связи с этим был предложен проект использования рекреационного внутреннего дворика, который находится в пространстве между главным учебным корпусом и блоком текущих аудиторий. Проект реконструкции был разработан на основе техзадания, утвержденного на совете ректората согласно плану развития материальной базы академии.

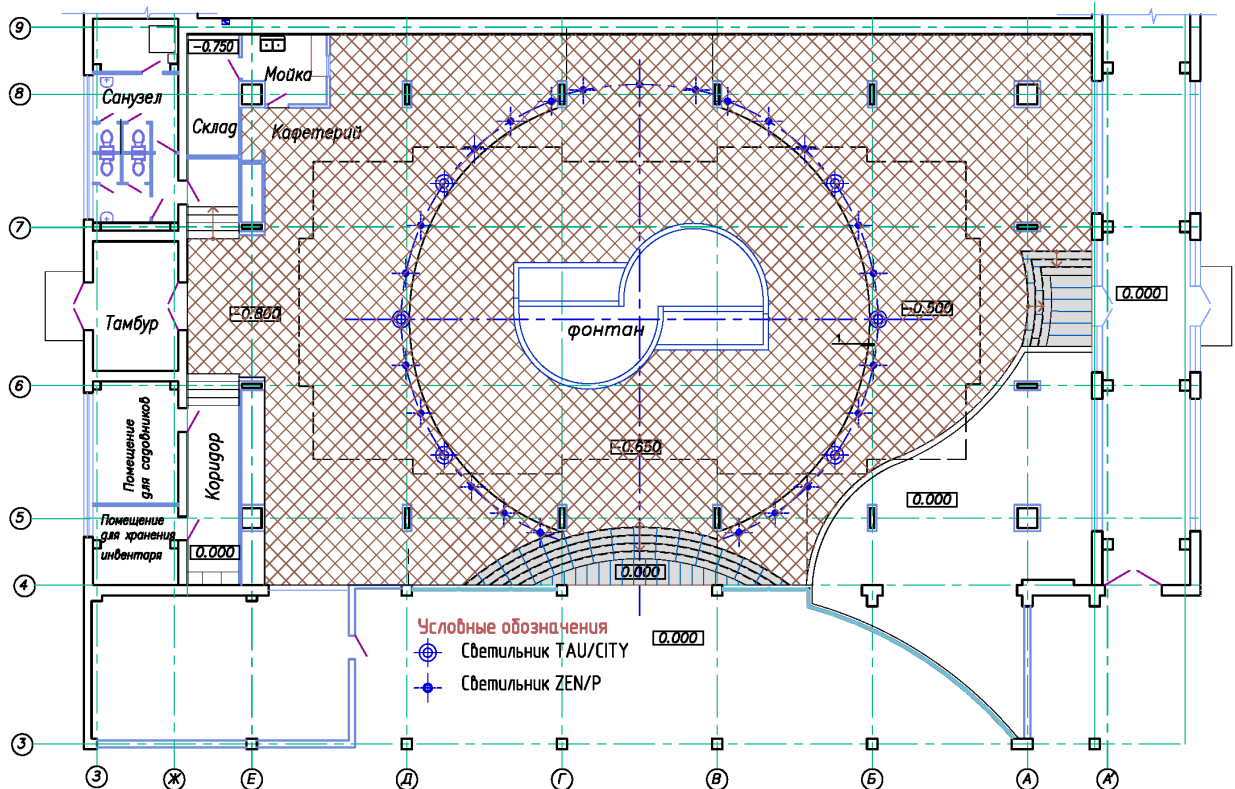
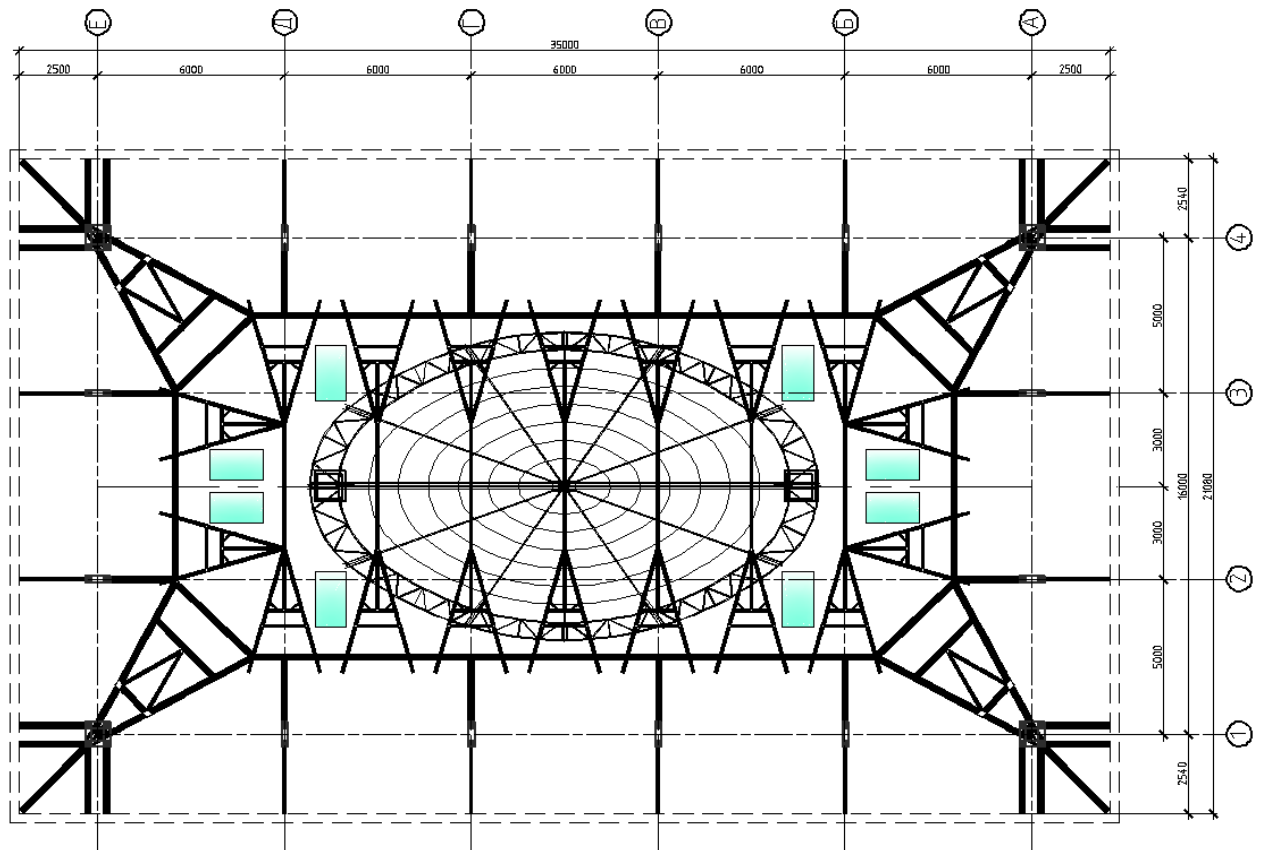
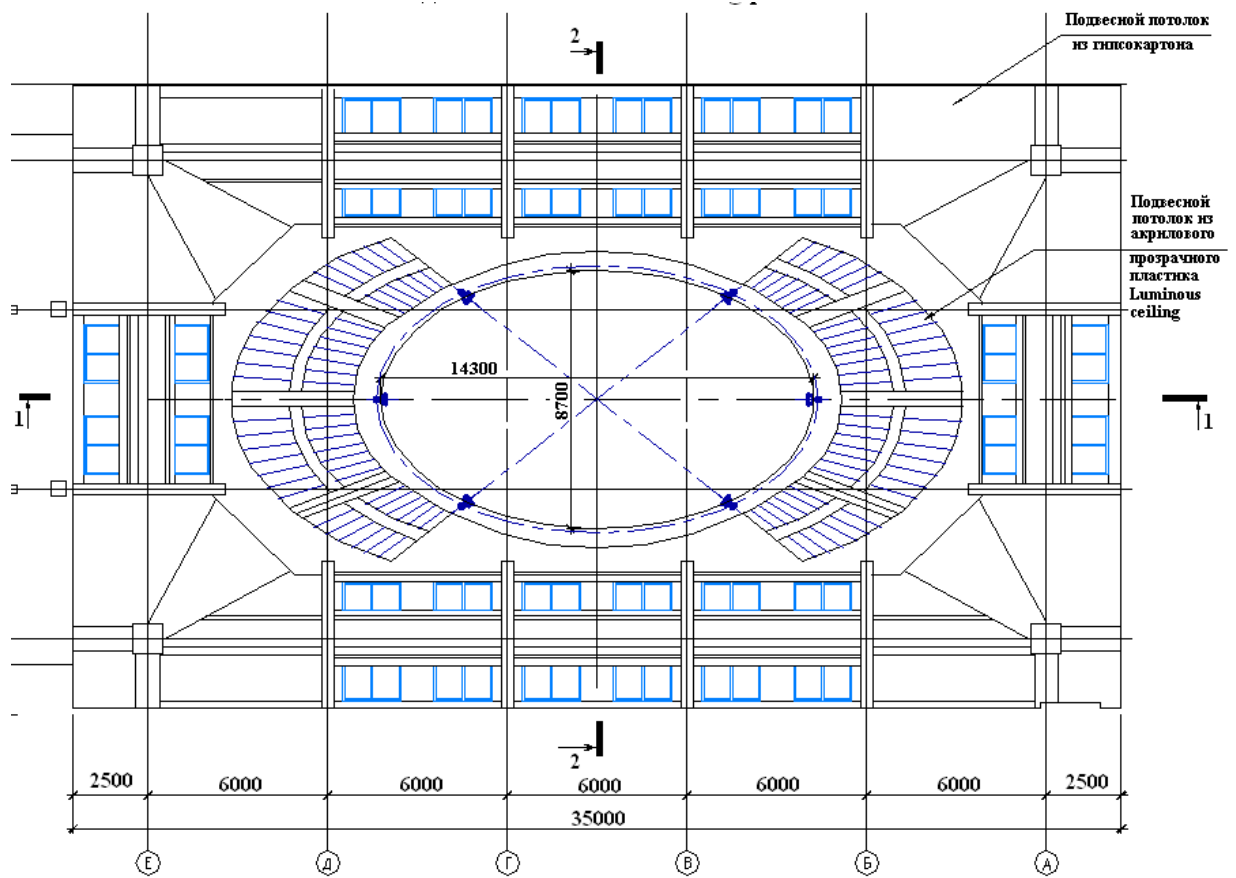


Рис.5.1 План первого этажа реконструируемой рекреационной зоны ДонНАСА



а)



б)

Рис.5.2.Конструктивное решение покрытия (а), схема подвесного потолка (б)

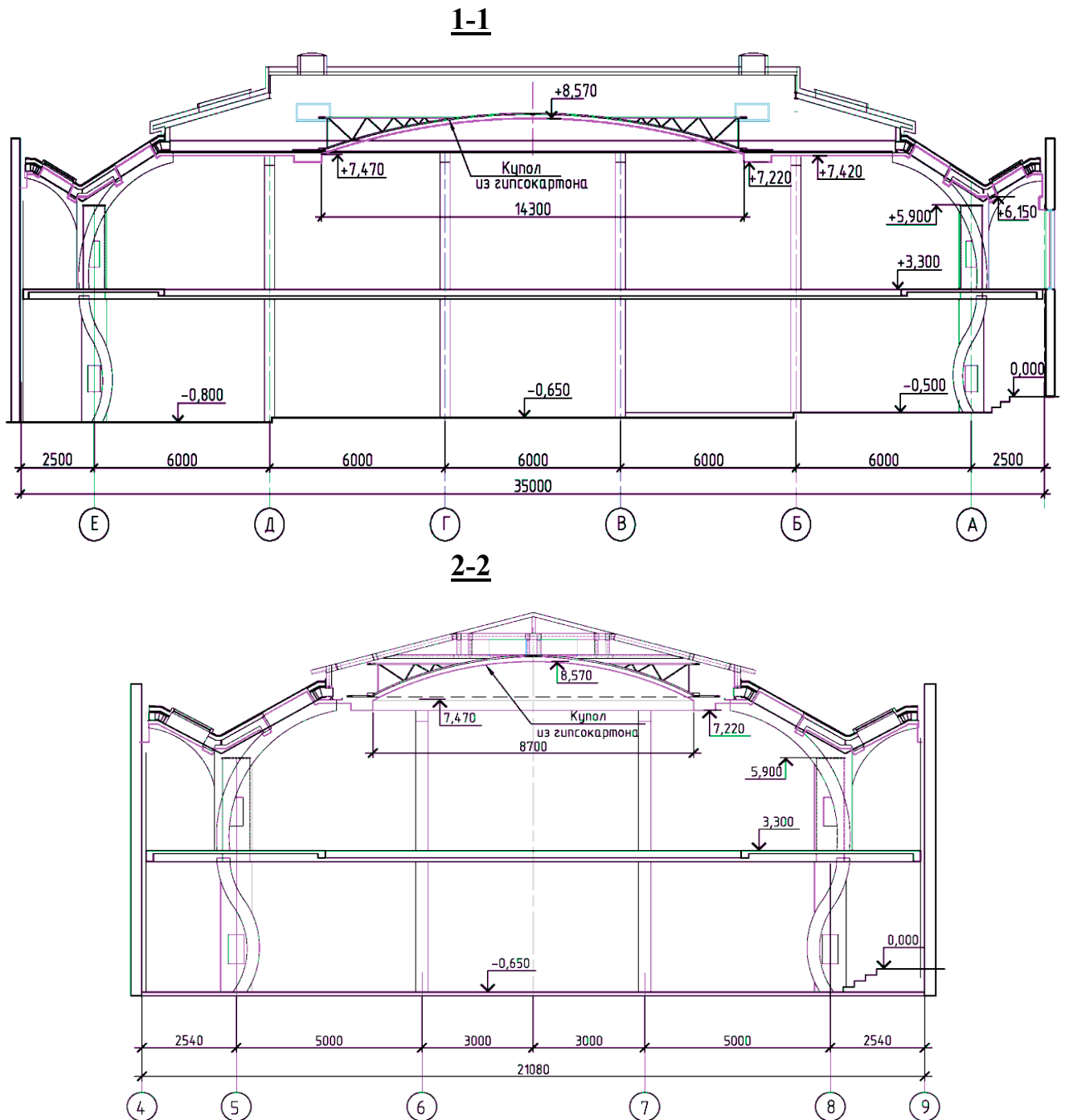


Рис. 5.3 Продольный (1-1) и поперечный (2-2) разрезы рекреационной зоны.

Согласно схемам функционального зонирования пространство рекреационного внутреннего двора разбито на два яруса по высоте. На первом этаже в центральной части расположена рекреационная зона с элементами благоустройства и отдыха, на втором этаже пространство галереи используется для экспозиционной зоны. Основные размеры в плане 21.х35 м.

Площадь рекреационной зоны первого этажа - 737.8 м².

Площадь экспозиционной зоны - 460 м².

Общая площадь - 1198 м².

Строительный объем - 6642 м³.

Проектом предусмотрена каркасная конструктивная схема прочность и устойчивость, которой обеспечивается жестким соединением колонн с фундаментами и шарнирным с несущими элементами покрытия.

Фундаменты под колонны каркаса запроектированы монолитные железобетонные столбчатого типа с системой распоров от влияния горных подработок. Размер подошвы фундамента марки ФУ-1 2200x2200 мм. Размер подошвы фундамента марки ФГ-1 2200x1500 мм. Низ фундамента расположен на отметке -2.750. Материал - бетон класса С16/20.

Колонны приняты двухветвевого и четырехветвевое типов с трубчатого профиля под жесткое соединение с фундаментами. Используемый материал для колонн - сталь С345.

Перекрытие монолитное железобетонное балочного типа. Балки - металлические, плита - монолитная железобетонная. Материал - бетон С20/25.

Фермы металлические с шарнирным соединением с силовым поясом.

Стены внутреннего двора - существующие.

Ограждающие элементы покрытия представлены трехслойной конструкцией кровли на метало-деревянном каркасе, утепленная слоем минеральной ваты толщиной 200 мм.

Климатические условия:

- - по снегу – V (г. Макеевка, Донецкая обл.) с нормативным весом снегового покрова $p_0 = 1,5 \text{ кН} / \text{м}^2$;
- - по ветру – III с нормативным ветровым напором - $\omega_0 = 0,5 \text{ кН} / \text{м}^2$.
- термическое сопротивление конструкций покрытия – $5.5 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт}$

За условную отметку чистого пола 0.000 принята отметка чистого пола первого этажа главного корпуса с абсолютным значением.

5.2 Оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций базового покрытия

Исходными данными для расчета несущих конструкций подвесного потолка является здание внутреннего двора I-го учебного корпуса ДонНАСА, выполненного из стального каркаса (рис. 5.2). Ширина здания в осях 1-4 составляет 16,0 м, длина в осях А-Е – 30,0 м. Общие габариты здания по наружному контуру строительных конструкций составляют 35,0х21,08 м.

Отметка верха обвязочного контура для опирания стропильных конструкций составляет - +7,800 м. Отметка верха междуэтажного перекрытия - +3,300 м.

Расчетная схема конструкций покрытия с несущими элементами подвесного потолка является составляющей частью общей расчетной схемы конструкций внутреннего двора и представлена на рис. 5.4.

При расчете узлы соединения конструкций между собой принимались жесткими. Расчет выполнен согласно следующим нормативным документам:

- ДБН В.1.2-2:2006 "Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования"
- СНиП II-23-81* "Металлические конструкции. Нормы проектирования".

При выполнении расчета приняты следующие виды загрузки:

загрузка 1 (статическое) – постоянная нагрузка от ограждающих конструкций покрытия и перекрытия и подвесного потолка с учетом собственного веса несущих конструкций;

загрузка 2 (статическое) – снеговая нагрузка на покрытие здания;

загрузка 3 (статическое) – полезная (временная) нагрузка на конструкции покрытия здания;

загрузка 4 (статическое) – ветровая нагрузка на конструкции покрытия здания (разгружающий эффект).

В основу расчета положен метод конечных элементов. В качестве основных неизвестных приняты следующие перемещения узлов: линейное по оси X, линейное по оси Y, линейное по оси Z, угловое вокруг оси X, угловое вокруг оси Y, угловое вокруг оси Z.

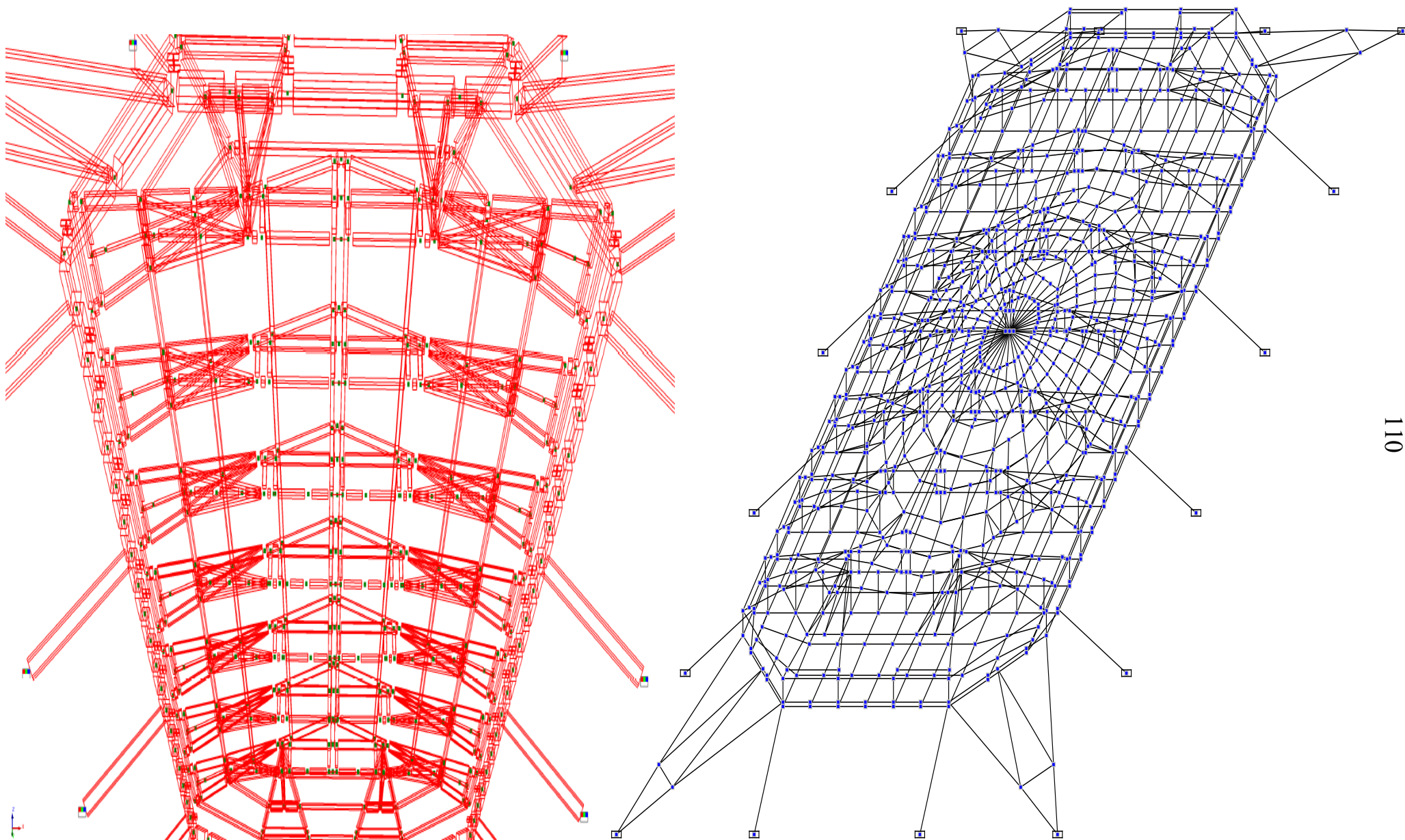
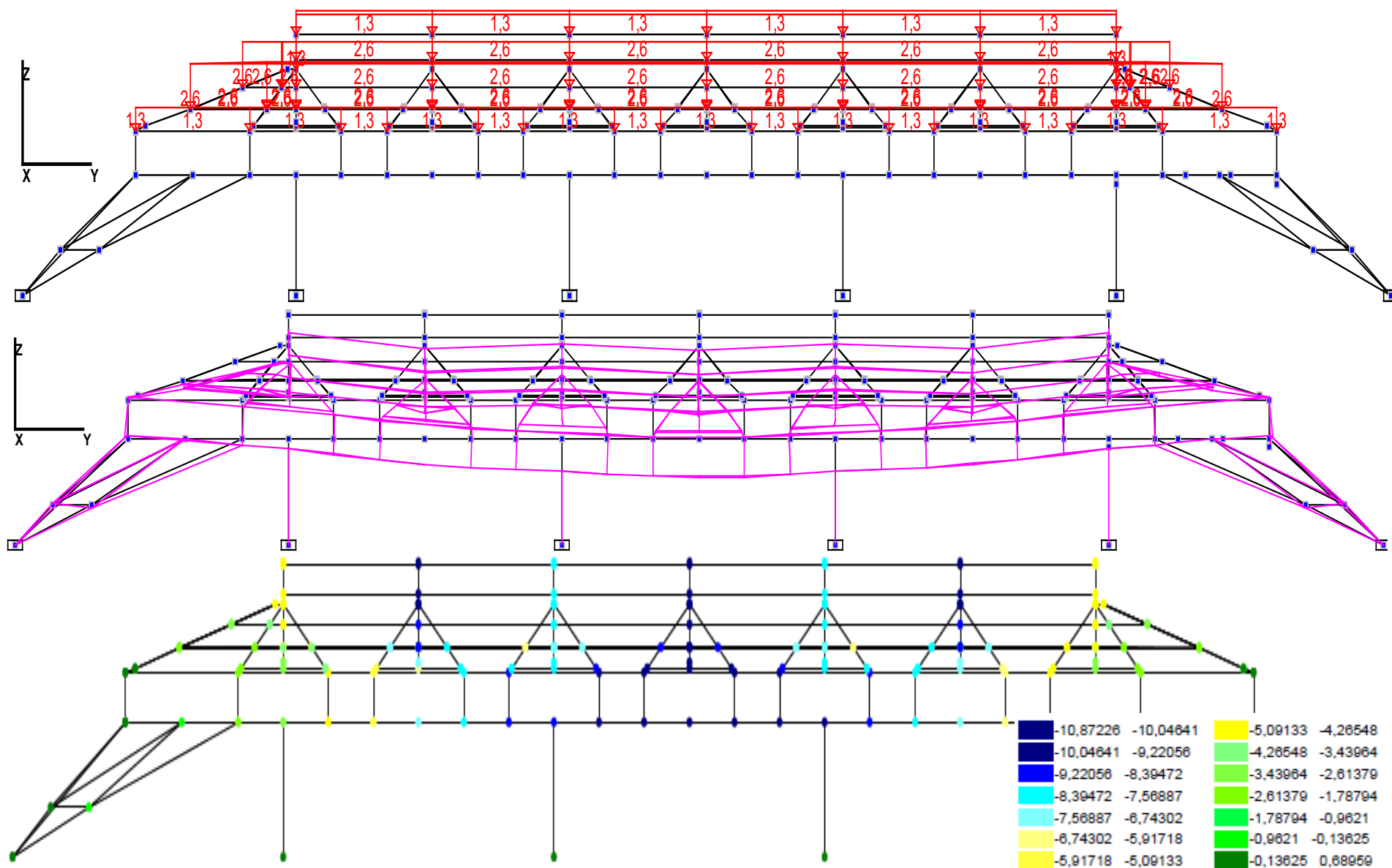


Рис.5.4 . Графическая модель и расчетная схема и конструкций покрытия с несущими элементами подвесного потолка



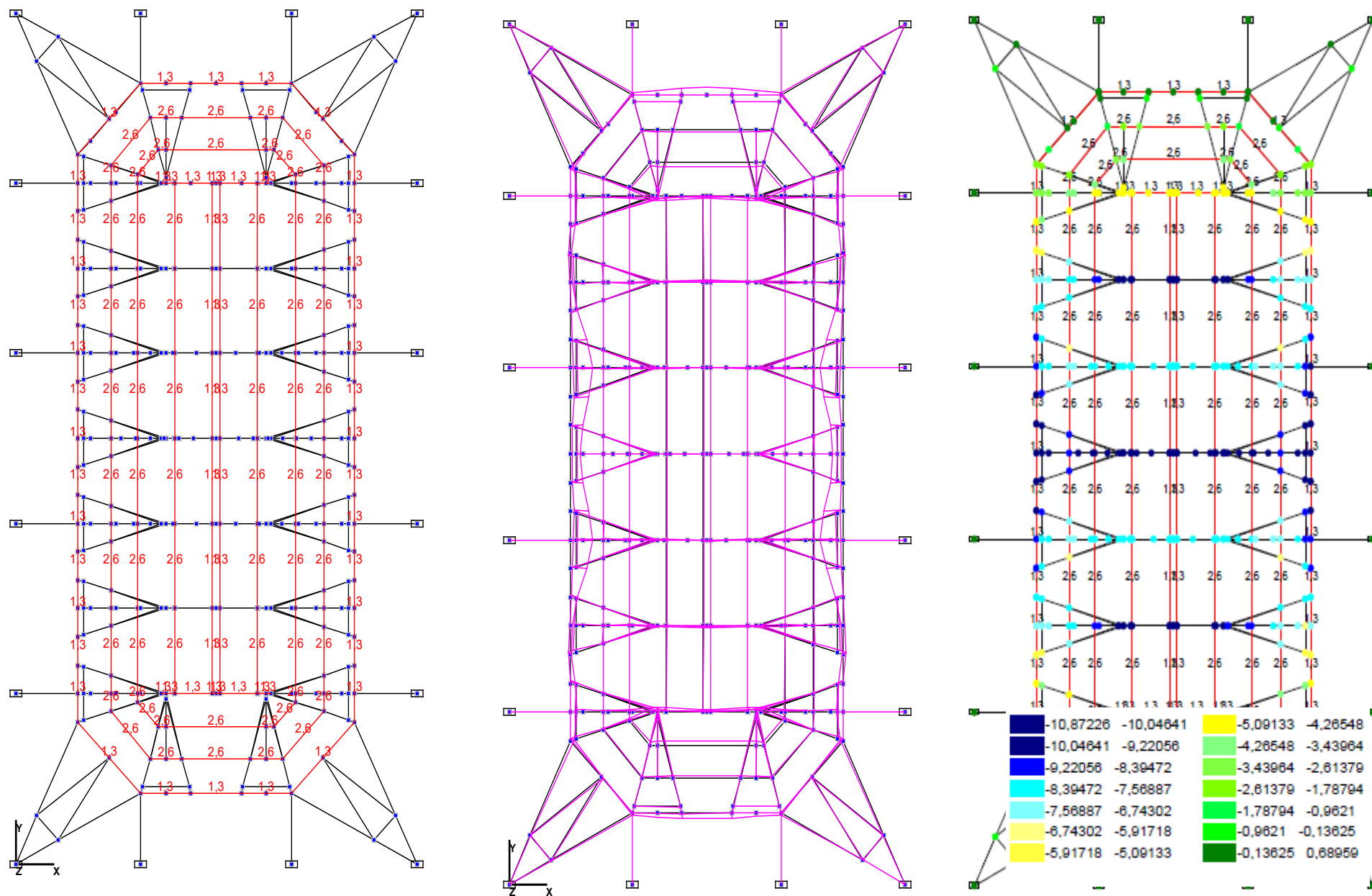
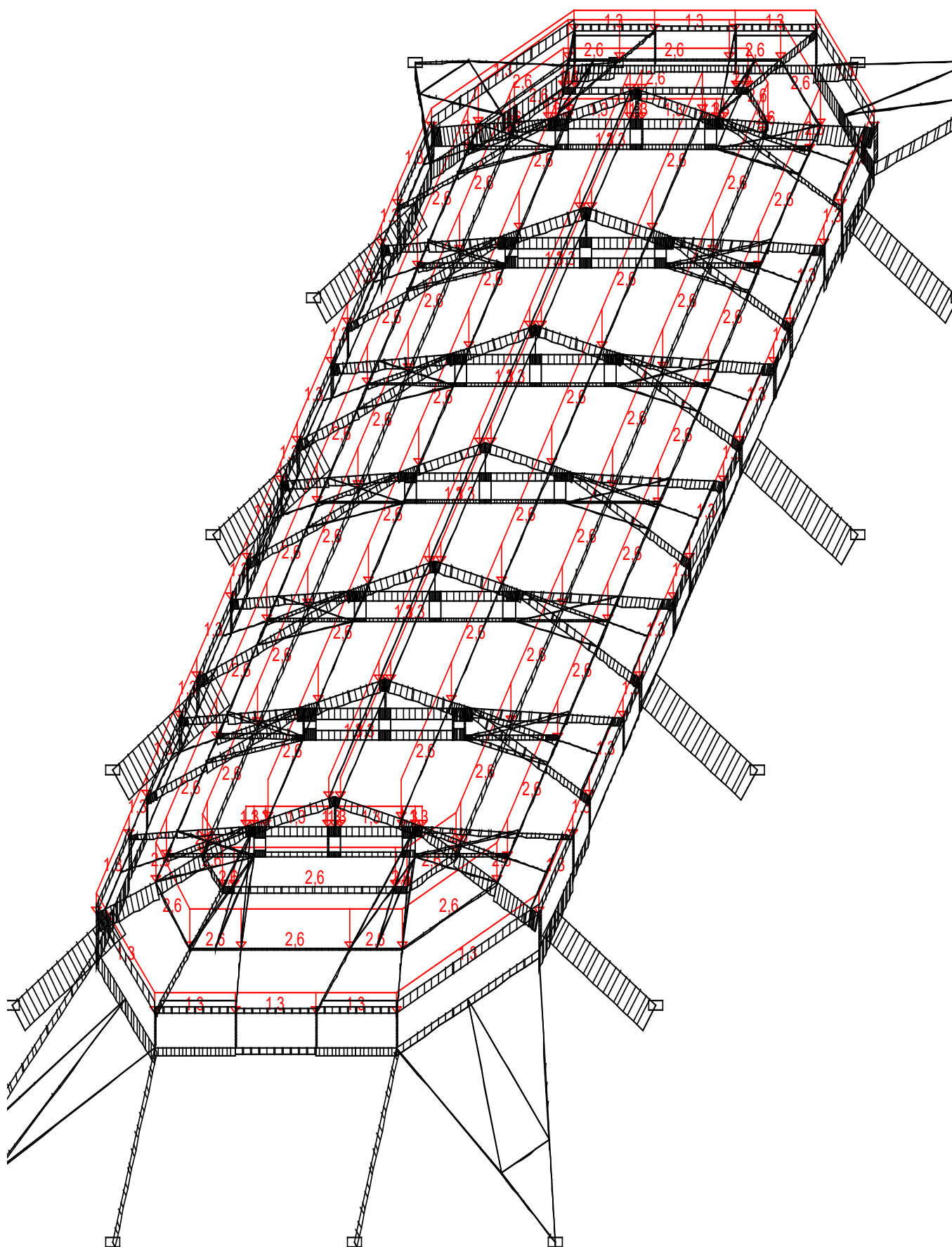


Рис. 5.6. Деформации конструкций покрытия от снеговой нагрузки



Расчетные схемы конструкций состоят из универсальных пространственных стержневых конечных элементов. Пространственный стержневой конечный элемент воспринимает следующие виды усилий:

N – осевое усилие;

M_K – крутящий момент относительно оси X_1 ;

M_Y – изгибающий момент относительно оси Y_1 ;

M_Z – изгибающий момент относительно оси Z_1 ;

Q_Y – перерезывающая сила вдоль оси Y_1 ;

Q_Z – перерезывающая сила вдоль оси Z_1 .

Расчет показал, что величины M_K , M_Z , Q_Y пренебрежимо малы. Поэтому элементы конструкции можно рассматривать как центрально или внецентренно нагруженные стержни.

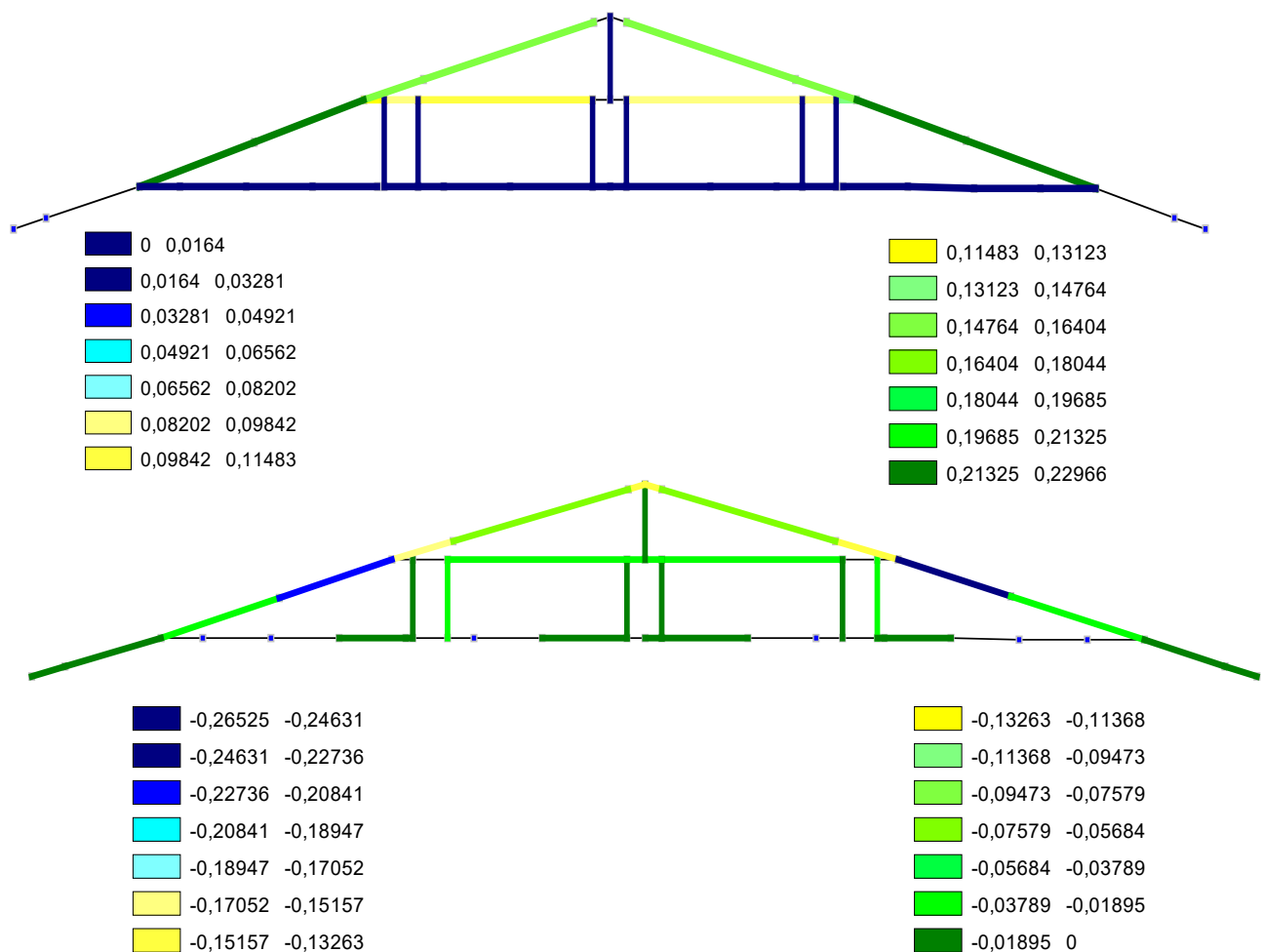


Рис 5.8. Эпюры изгибающих моментов M_y

а) цветовая индикация положительных значений усилий;

б) тоже, отрицательных

5.3 Расчет несущего каркаса крупноразмерной эллипсоидной оболочки.

На основании анализа НДС покрытия был определен ряд значимых факторов влияющих на выбор конструктивного решения несущего каркаса оболочки:

- наличие ограниченности мест возможной подвески;
- технологические особенности монтажа, связанные со стесненностью работ;
- существенные прогибы базового покрытия от снеговой нагрузки до 12 мм;
- возможные температурные перепады в процессе эксплуатации.

При проектировании и расчете был принят вариант несущего каркаса оболочки из серповидных изогнутых ферм с горизонтальными решетчатыми связями.

Для расчета использован программный комплекс «SCAD Office» (рис.5.9). Для расчета и подбора сечения, элементы несущего каркаса были разбиты на отдельные группы элементов унификации. В качестве группы унификаций были приняты:

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 группа – кольцо купола, 1-й ярус; | 6 группа – кольцо купола, 6-й ярус; |
| 2 группа – кольцо купола, 2-й ярус; | 7 группа – кольцо купола, 7-й ярус; |
| 3 группа – кольцо купола, 3-й ярус; | 8 группа – продольные элементы; |
| 4 группа – кольцо купола, 4-й ярус; | 9 группа – поперечные элементы; |
| 5 группа – кольцо купола, 5-й ярус; | 10 группа – вертикальные элементы |

При расчете узлы соединения конструкций между собой принимались жесткими. В программном комплексе предусмотрено формирование необходимых загружений, соответственно нормативным документам, действующим в проектировании объектов строительства. При расчете определялись оптимальные поперечные сечения несущих конструкций подвесного потолка.

В качестве проката для несущих конструкций подвесного потолка принимались стальные гнутые замкнутые сварные квадратные профили по ГОСТ 30245-2003, как наиболее экономичные по расходу металла. Благодаря этому получены оптимальные сечения элементов несущего каркаса из тр. \square 40х3 мм. На основании расчета была запроектирована оболочка положительной гауссовой кривизны (рис.5.10), усиленная радиальными и кольцевыми рёбрами.

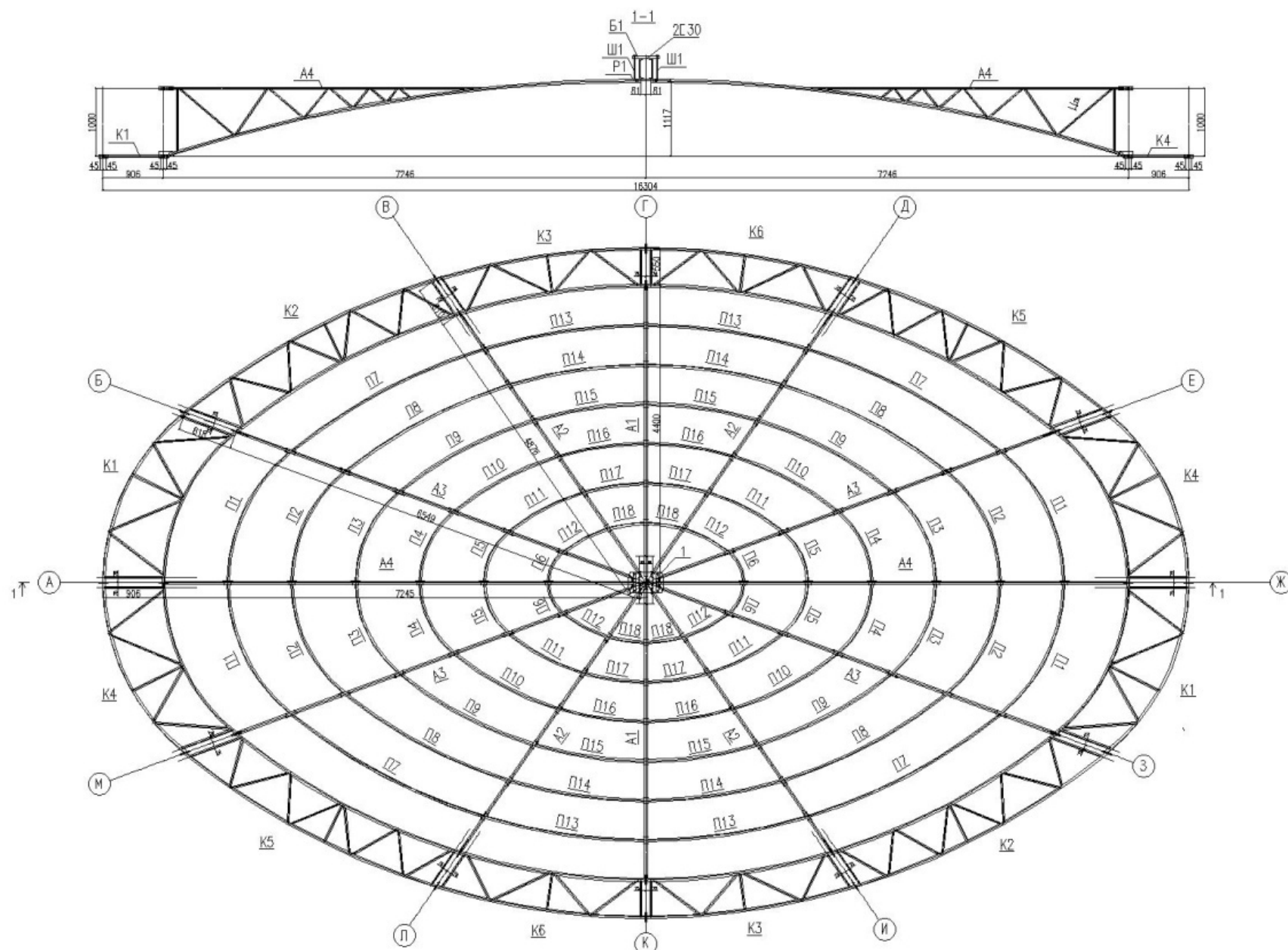


Рис. 5.10 Конструктивное решение несущего каркаса эллипсоидной оболочки

Кольцевые ребра установлены с шагом 0.965м, описаны эллипсами и смоделированы элементом пространственной рамы сечением из стальной квадратной трубы 40х3 мм. Оболочка усилена 7 кольцевыми поясами. Радиальные элементы оболочки расположены с шагом 30° и запроектированы сложного составного сечения и по статической схеме работы являются фермами с сжато-изогнутыми поясами. Стержни решетки смоделированы элементами пространственной фермы сечением из стальной квадратной трубы 25х2 мм. Нижний и верхний пояс фермы радиального ребра запроектирован из стальной квадратной трубы 40х3 мм, тип конечного элемента присвоен - стержень пространственной рамы.

5.4 Расчет трещиностойкости гипсокартонной оболочки

Гипсокартонная оболочка, в основном, смоделирована четырехугольными объемными конечными элементами, шаг дискретизации вдоль кольцевого и радиального направлений составляет 0.1÷0.14м, что обеспечивает соотношение сторон не более 2 и необходимую точность расчета, согласно рекомендациям [5, 6, 7]. Для обеспечения совместности деформаций, разбиение оболочки в узлах примыкания к радиальным и кольцевым ребрам, выполняется с помощью треугольных элементов.

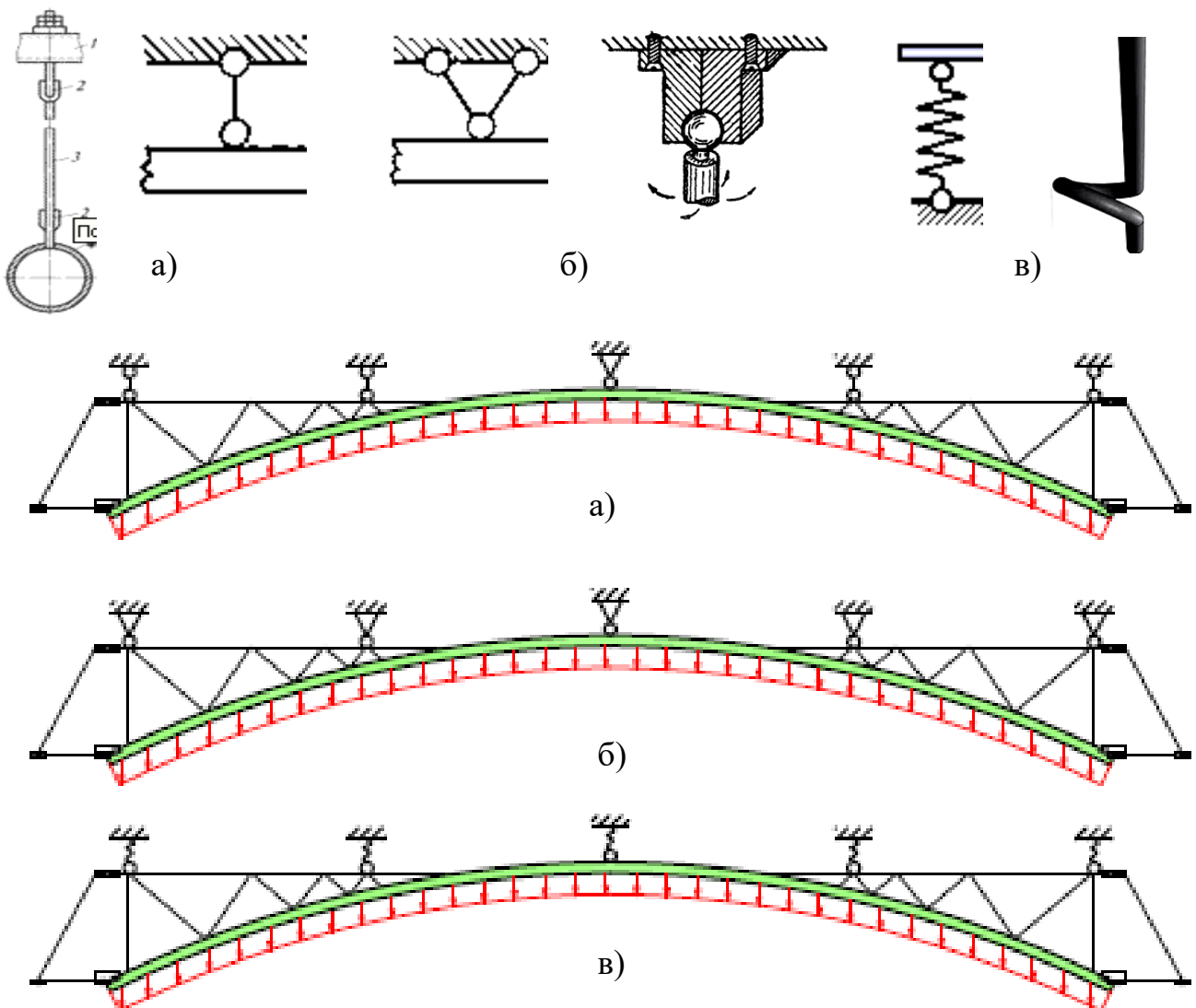
Характеристики элементов ортотропной оболочки: $E_1=2,5 \cdot 10^3$ МПа, $E_2=2,2 \cdot 10^3$ МПа; $\mu_{12}=0.25$, $\mu_{21}=0.22$; модуль сдвига $G_{12}=1,1 \cdot 10^3$ МПа; объёмный вес $\gamma=9,80$ кН/м³, коэффициент температурного расширения при свободном удлинении 0,018 мм/ м. Задача решалась в линейной постановке, оболочка рассчитывалась на действие всех видов статических нагрузок.

Для изучения напряженно-деформированного состояния оболочки в численном моделировании использованы три типа опорных узлов:

- шарнирно-подвижная опора;
- шарнирно-неподвижная опора;
- упругоподатливая опора с жесткостью в вертикальном направлении эквивалентно моделирующая поведение пластинчатого шарнира.

При выполнении расчета приняты следующие виды статических нагрузок:

- нагрузка (L1) – постоянная нагрузка от собственного веса оболочки;
- нагрузка (L2) – переменная кратковременная от температурного воздействия $\Delta t = +10^\circ\text{C}$ в летний период эксплуатации
- нагрузка (L3) – переменная кратковременная от смещения опорных точек крепления оболочки вследствие прогиба стропильных конструкций покрытия от снеговой нагрузки
- нагрузка (L4) – эпизодическая нагрузка, вызванная аварийным температурным перепадом $\Delta t = -15^\circ\text{C}$ в зимний период эксплуатации.



Исходя из вероятных условий эксплуатации были приняты следующие комбинации нагрузок:

I комбинация (L1+L2) - постоянная нагрузка от собственного веса оболочки и температурное воздействие $\Delta t = +10^\circ\text{C}$ в летний период эксплуатации

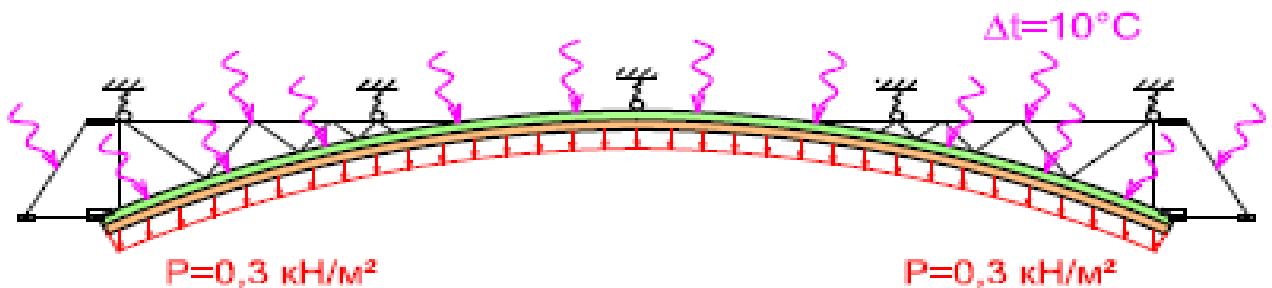


Рис.5.12. I комбинация нагрузок

II комбинация (L1+L3) - постоянная нагрузка от собственного веса оболочки и нагрузка от смещения точек крепления оболочки при прогибе конструкций покрытия от снеговой нагрузки.

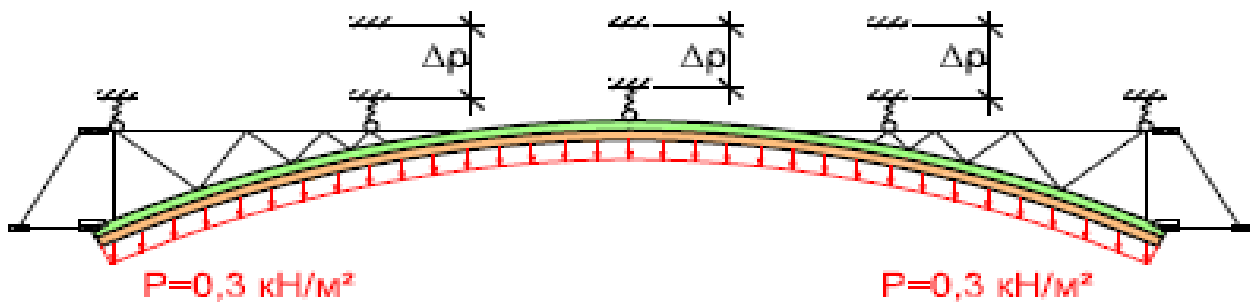


Рис.5.13. II комбинация нагрузок

III комбинация (L1+L4) - постоянная нагрузка от собственного веса купола и нагрузка от температурного воздействия $\Delta t = -15^\circ\text{C}$ при резком нарушении температурного режима эксплуатации в зимний период.

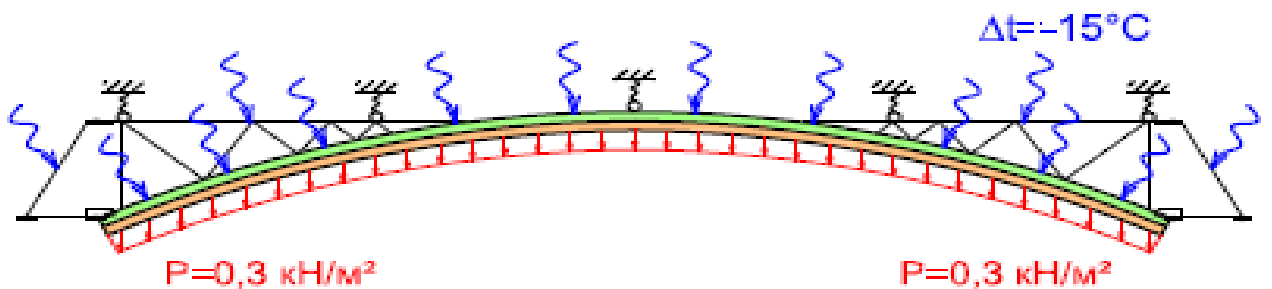


Рис. 5.14. III комбинация нагрузок

IV комбинация (L1+L3+L4) – постоянная от собственного веса купола, от смещения точек крепления при прогибе покрытия от снега и нагрузка от нарушении температурного режима эксплуатации $\Delta t = -15^\circ\text{C}$.

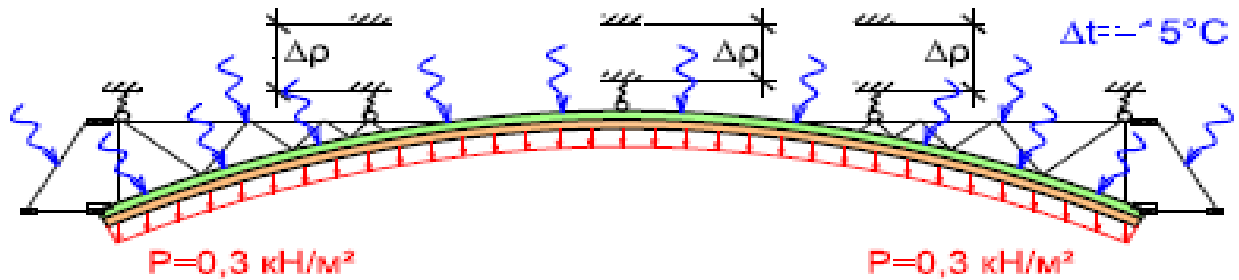


Рис.5.15. IV комбинация загрузжений

Анализ результатов поля приведенных напряжений, позволил сделать следующие выводы:

- схема закрепления с шарнирно-неподвижными опорами более предпочтительна при 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 раз снизить уровень локальных напряжений до границы трещинообразования в стыках гипсокартонной оболочки такого размера;
- при шарнирно-подвижных опорах величины приведенных напряжений составляют промежуточные значения между вариантами с шарнирно-неподвижными и упругоподатливыми опорами.

Результаты расчетов как по первой так и по четвертой теориями прочности показывают, что использование пластинчатых шарниров и двухслойных элементов с двухфакторным усилением в виде одновременного использования клевого и винтового соединения, и дополнительного армирования в виде стеклохолста обеспечивает условия трещиностойкости изложенных в разделе 4. При этом для самого неблагоприятного сочетания нагрузок L4 величины приведенных напряжений не превышают допустимых для срединного слоя

$$\sigma_{расч2}^p \geq \sigma_{экв}^{cp}; \text{ для крайних слоев } \sigma_{расч2}^{изг} \geq \sigma_{экв}^{кр}.$$

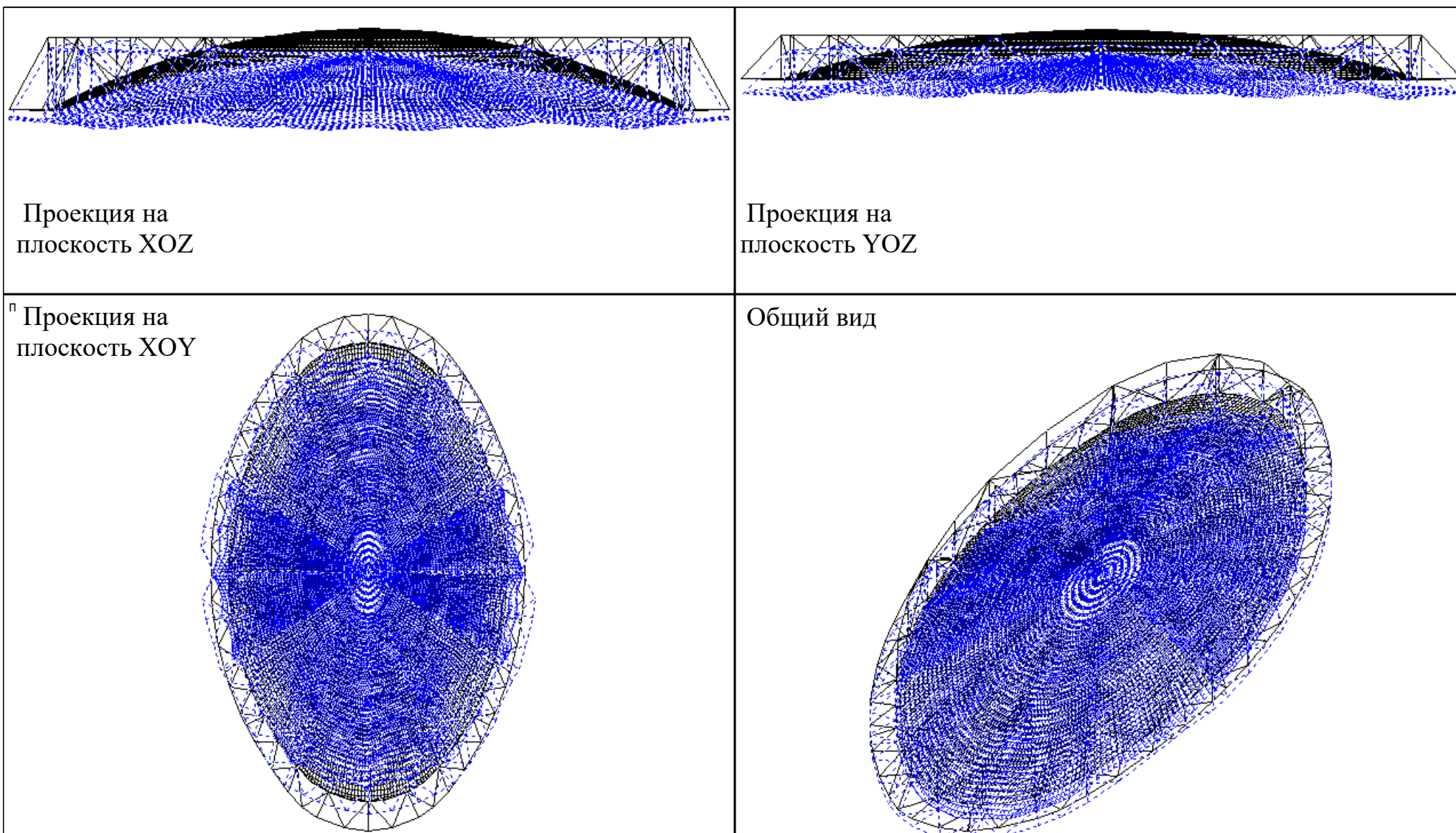


Рис. 5.16 Отображение деформаций эллипсоидной оболочки на проекции

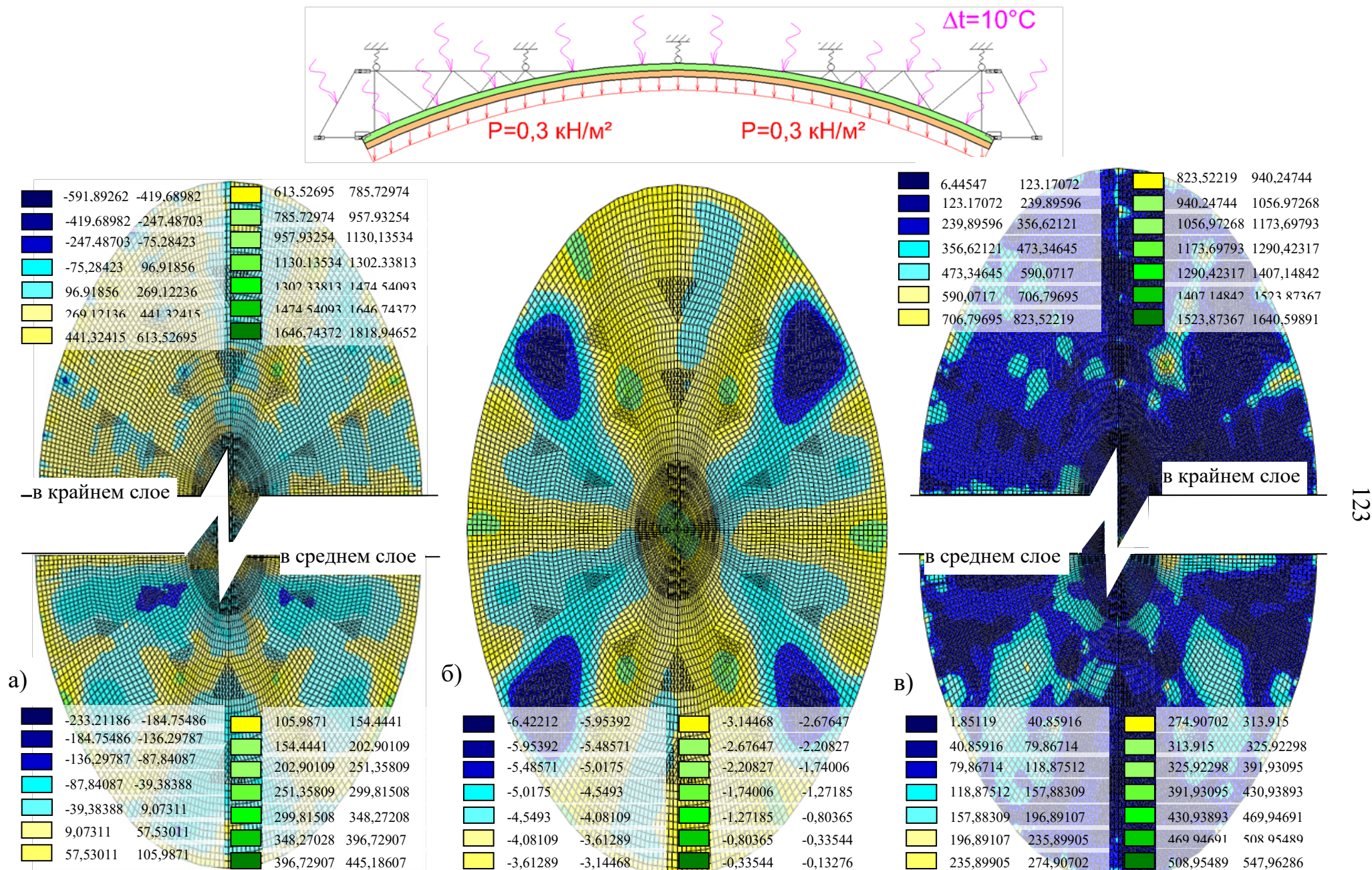


Рис. 5.17 Поля приведенных напряжений в кН/м^2 по I и IV теориям прочности (а, в) и поля деформаций (б) от действия собственного веса и повышенной температуры в летний период эксплуатации при упругоподатливых опорах

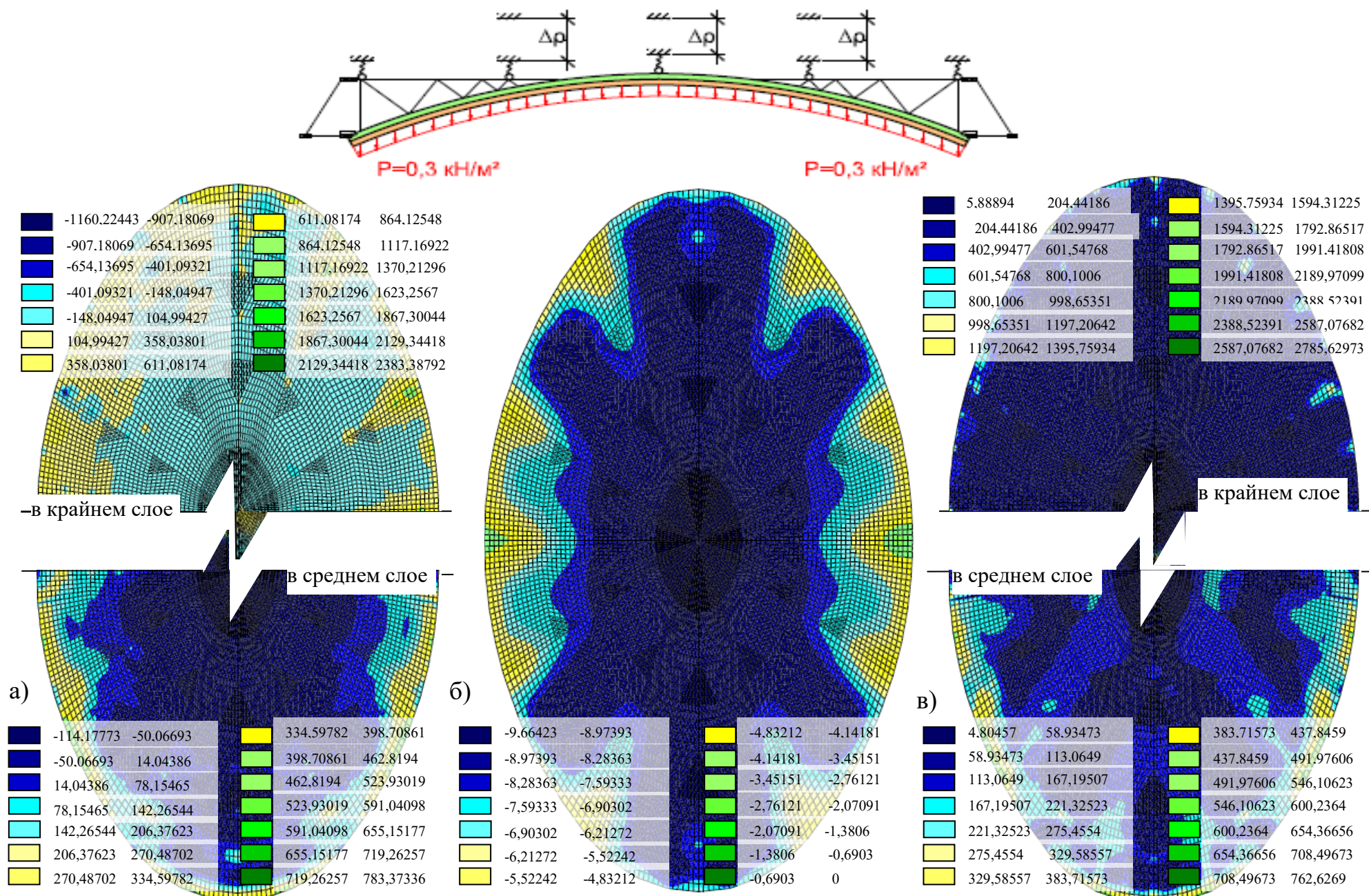


Рис. 5.18 Поля приведенных напряжений в кН/м^2 по I и IV теориям прочности (а, в) и поля деформаций (б) от действия собственного веса и прогиба покрытия от снеговой нагрузки при упругоподатливых опорах

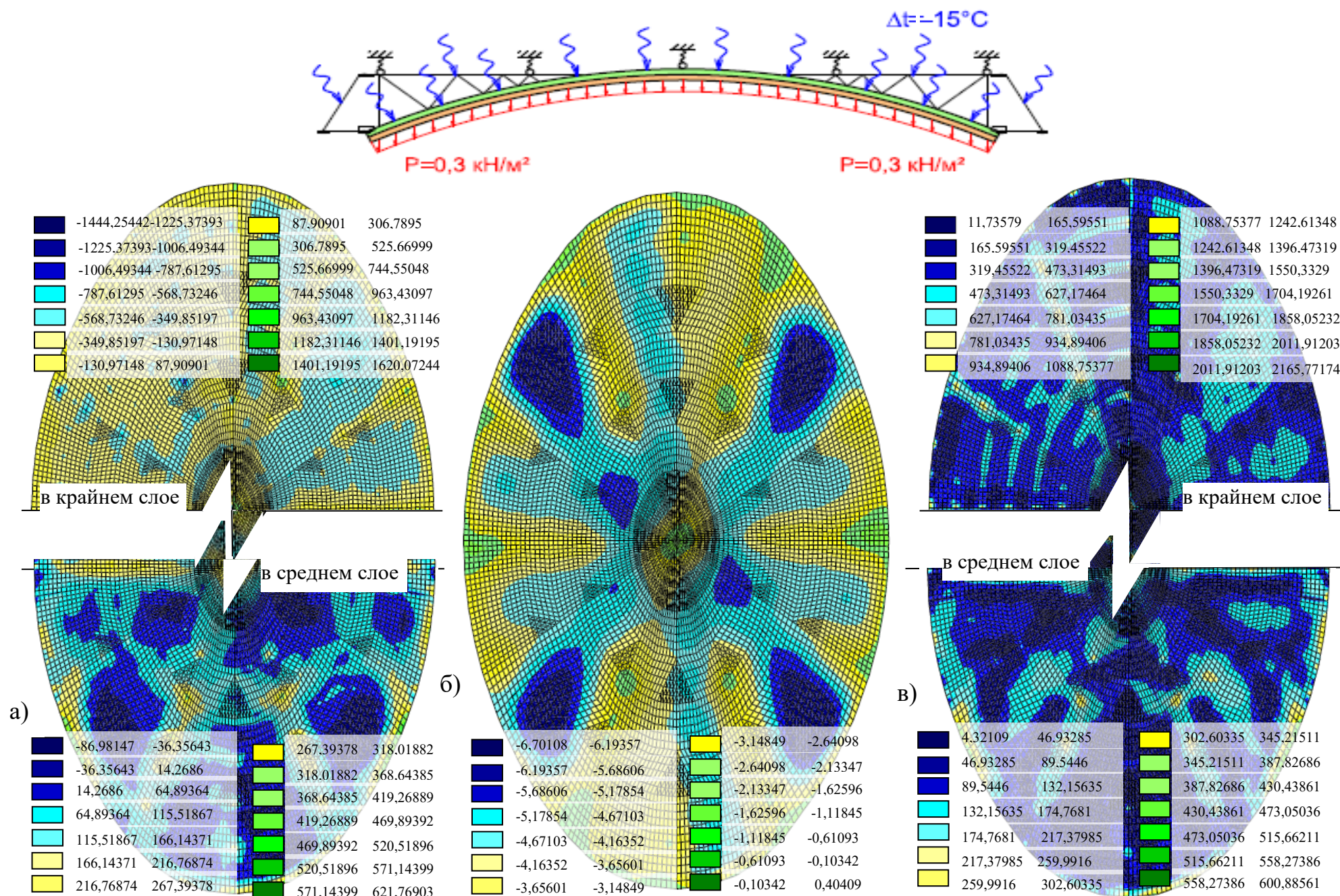
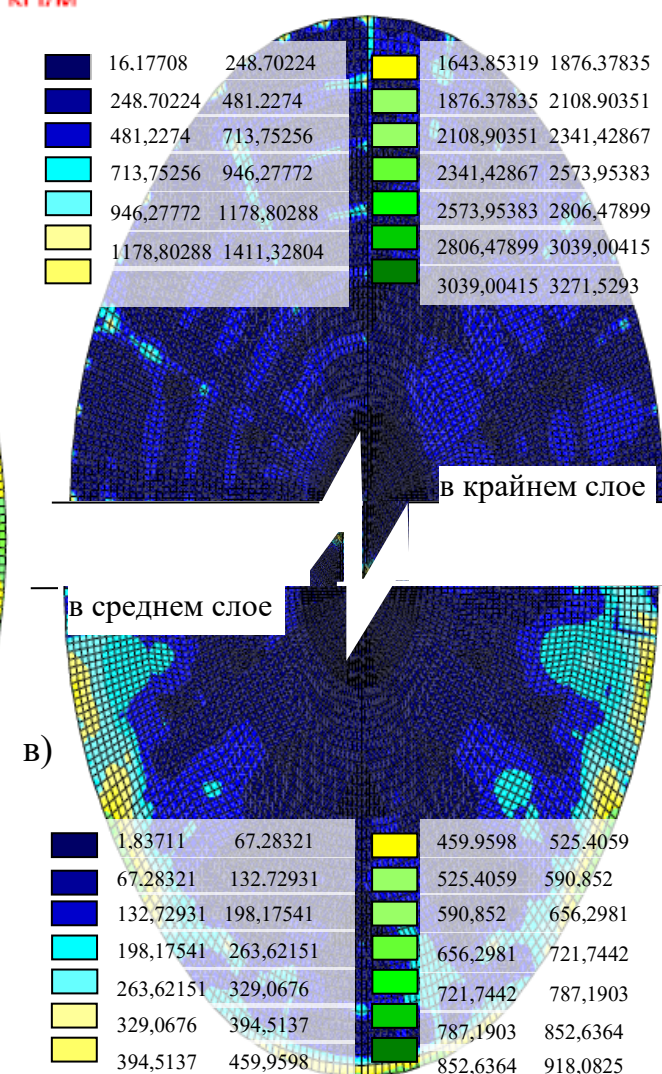
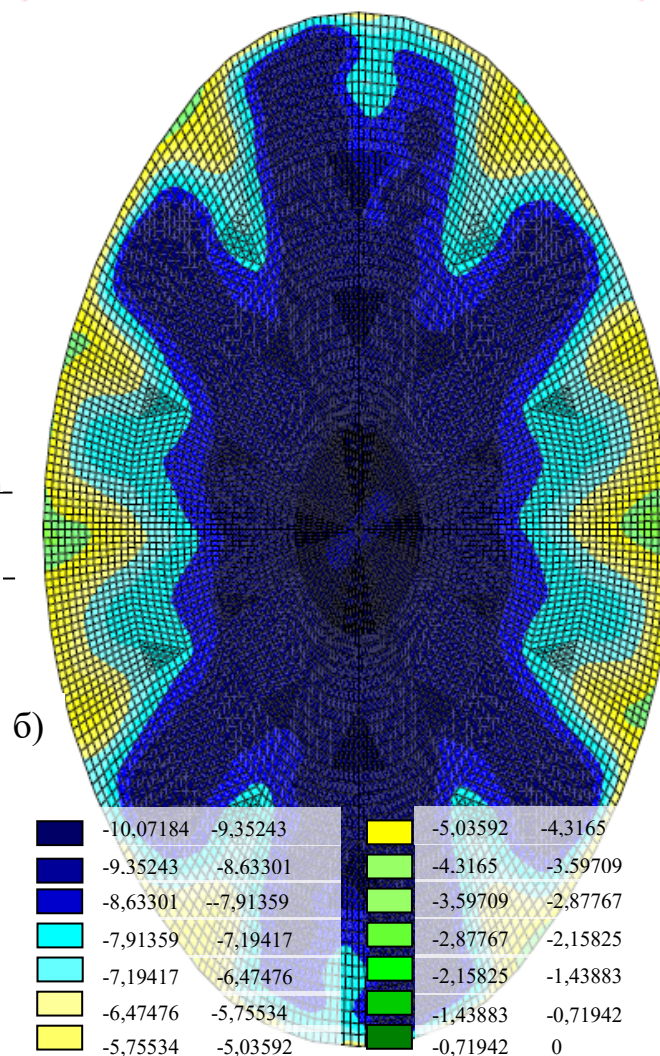
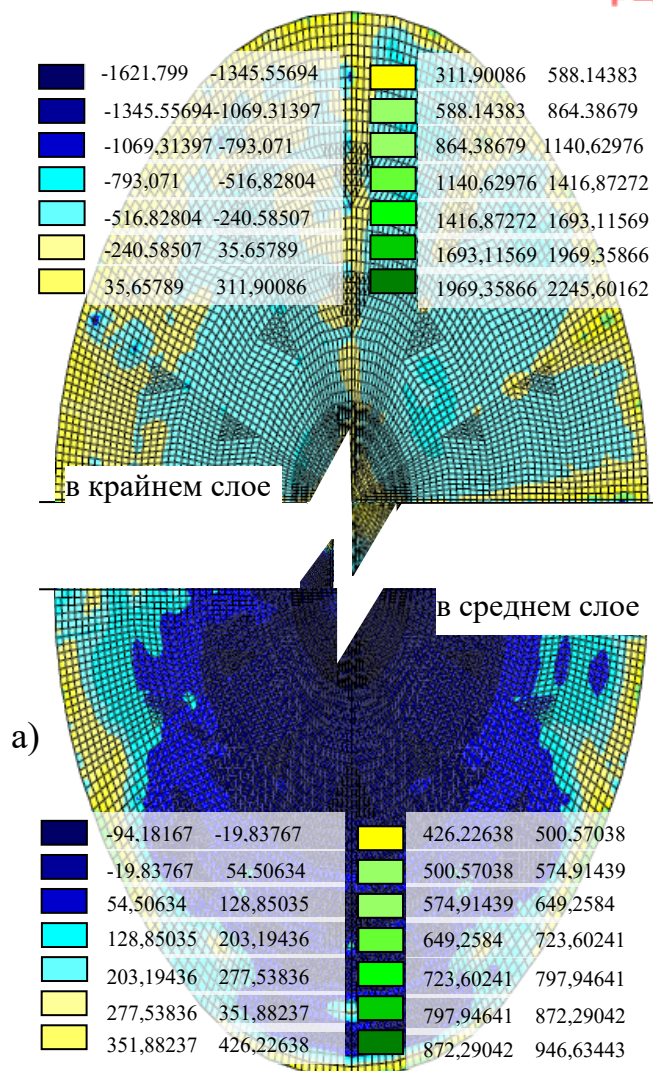
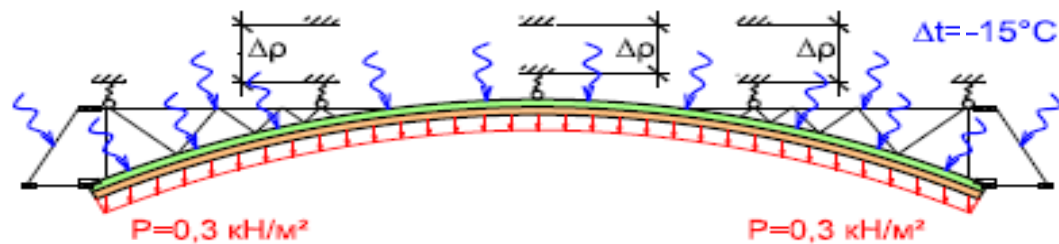


Рис. 5.19 Поля приведенных напряжений в кН/м² по I и IV теориям прочности (а, в) и поля деформаций (б) от действия собственного веса и от аварийного температурного перепада $\Delta t = -15^{\circ}\text{C}$ в зимний период при упругоподатливых опорах



5.5 Конструкторские и технологические решения по изготовлению и монтажу эллипсоидной гипсокартонной оболочки.

Несущий каркас состоит из радиальных элементов - арок А1, А2, А3, А4 и кольцевых элементов, представляющих собой гнутые стержни из стальной квадратной трубы 40х3 мм П1, П2,...П18, и пространственные элементы, образующие наружное кольцо несущей рамы К1, К2,...К6.



Рис. 5.21 Изготовление каркаса

Монтаж металлических конструкций производился при помощи болтовых соединений, так как совпадением отверстий соединяемых элементов автоматически контролируется правильность их установки и взаимного расположения. Болтовое соединение обеспечивает достаточно плотное соединение элементов при относительно простой постановке его в проектное положение, не требующего специального оборудования и подвода энергии.

При изготовлении металлоконструкций, состоящих из множества крупных узлов, обязательно производится, контрольная сборка всех элементов МК, для проверки качества изготовления, обеспечения проектных размеров конструкции, подгонки кромок и возможной рассверловки монтажных отверстий, в соответствии с требованиями технической документации.

Контрольная сборка несущего каркаса купола осуществлялась на ровной горизонтальной поверхности. Перед началом сборки проверялись геометрические размеры каждого сборочного элемента: длина дуги; радиус; диаметры и

межосевые расстояния отверстий под болтовые соединения; качество выполнения сварных соединений; качество антикоррозионного покрытия.

Сборка осуществлялась от выбранной оси по часовой стрелке (с привязкой к условиям и направлению монтажа в зимнем саду). Сначала устанавливались радиальные элементы (арки) А1, А2,..., которые раскреплялись кольцевыми элементами К1, К2,... П1, П2,... и т.д. с соблюдением направления монтажа.

Во время сборки контролировалась точность стыковки смежных элементов, в случае необходимости выполнялась корректировка отверстий. После завершения сборки проверялись соответствие проекту геометрических размеров конструкции в целом.

После проведения всех контрольных замеров сборочные элементы нумеровались в соответствии с направлением монтажа, производилась разборка несущей рамы купола и транспортировка конструкций к месту монтажа.



Рис. 5.22 Монтаж несущего каркаса оболочки

Для удобства сборки оболочки на проектной отметке зимнего сада предварительно был собран сплошной настил, который опирался на конструкцию из трубчатых лесов. Высотная отметка определена для удобства выполнения монтажных и малярных работ. Толщина настила и ячейка лесов подбирались исходя из нагрузки на 1 м² площади.

Элементы подавались на рабочую отметку по номерам в соответствии с направлением монтажа. Вначале крепился элемент вершины каркаса. Затем крепились радиальные элементы от оси «А» и далее по часовой стрелке с

креплением к стропильным конструкциям, параллельно устанавливались кольцевые элементы.



Рис. 5.23 Монтаж вспомогательного каркаса оболочки из тонкостенных оцинкованных СД профилей $t=0,55\text{мм}$

На всех этапах контролировались высотные, угловые, линейные отметки. После завершения монтажа несущего каркаса выполнялся монтаж вспомогательного каркаса из тонкостенных оцинкованных СД профилей $t=0,55\text{ мм}$, предварительно изогнутых по соответствующим радиусам.

Для определения радиусов и длин СД профилей на основании проекта несущей рамы осуществили раскладку СД профилей с учетом раскладки гипсокартонных элементов облицовки оболочки. Расчет велся для $\frac{1}{4}$ поверхности исходя из симметрии конструкции. Согласно раскладке необходимо установить 43 профиля с изменением радиуса кривизны от 9,45м до 23,43м с соответствующим изменением длины. Под каждый профиль был сделан чертеж с указанием радиуса кривизны, длины дуги и количества элементов.

Профиля изгибались на специальном оборудовании. Перед монтажом профили сортировались согласно радиусам, производилась подгонка по длине дуги. Подготовленные профили нумеровались в соответствии с местом и порядком установки. На кольцевых элементах несущей рамы наносились оси установки профилей.

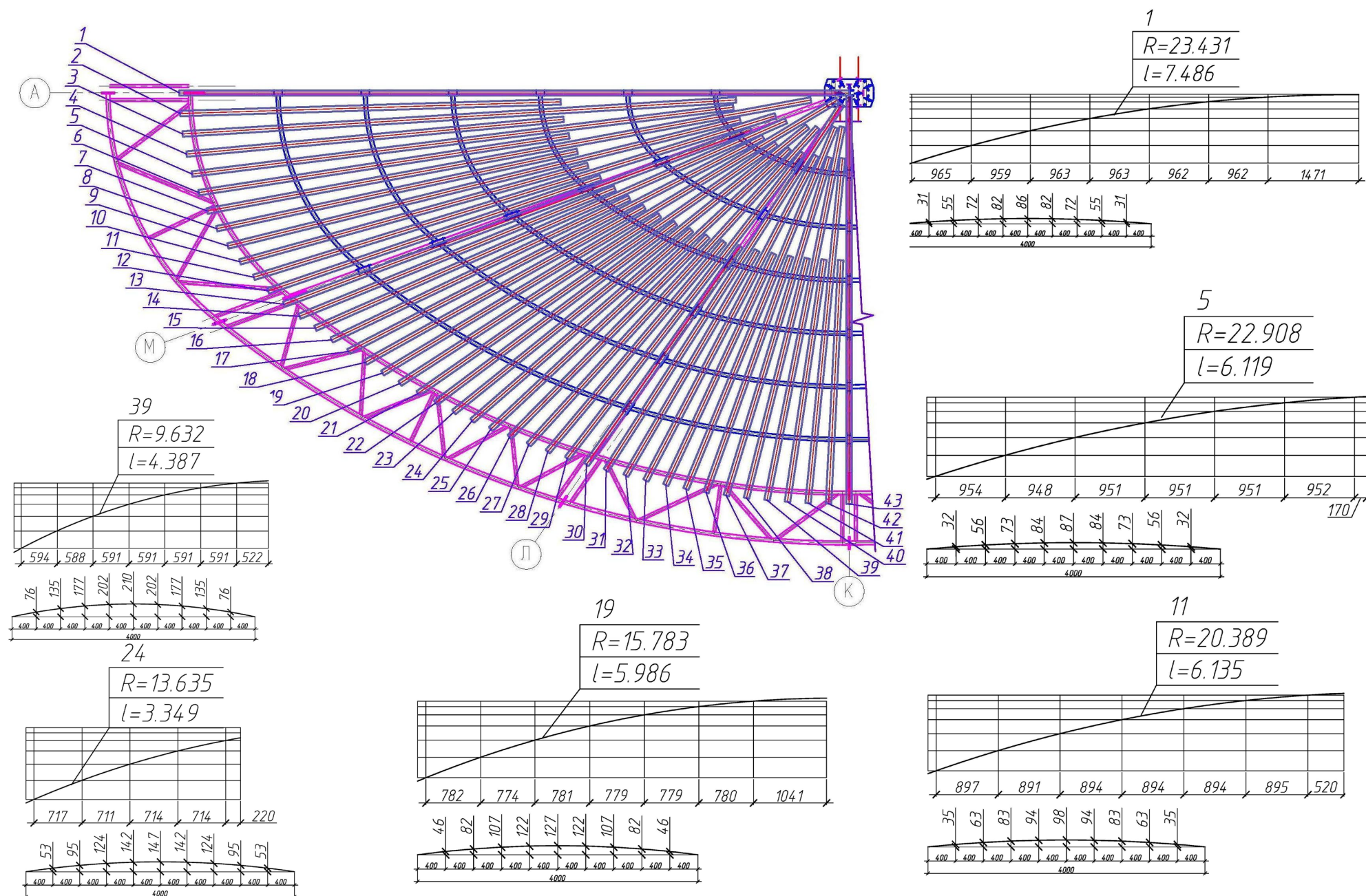


Рис.5.24. Проектирование и раскладка криволинейных вспомогательных профилей СД для повторяемой четверти купола

Крепление профилей CD осуществлялось к кольцевым элементам несущей рамы с помощью специального соединителя сделанного из стандартного соединителя для CD профилей типа «краб».

В процессе монтажа контролировались угловые размеры установки профилей, высотные ограничивались отметками установки кольцевых элементов несущей рамы.

Перед началом облицовки плиты складировались непосредственно на рабочем настиле, здесь же выполнялось и изготовление заготовок с учетом устройства стыков на профилях. Облицовка поверхности оболочки двухслойная из гипсокартонной плиты толщиной 12,5 мм с обязательным перехлестом стыков.

Для заполнения швов применялась шпаклевка Кнауф Фугенфюллер, в связи с этим на вырезанных элементах снималась фаска 45°. Крепление плит осуществлялось самонарезными винтами TN 25 для первого и TN 35 для второго слоев облицовки, с дополнительным проклеиванием между слоями клеем ПВА. Для дополнительного усиления поверхность проклеивалась стеклохолстом. Швы второго слоя облицовки армировались сетчатой лентой, дальнейшее выравнивание поверхности осуществлялось шпаклевкой Кнауф Мультифиниш.

На протяжении семи лет ГК оболочка работает с заданными эксплуатационными характеристиками без образования трещин.



Рис. 5.25 Монтаж гипсокартонной оболочки

ВЫВОДЫ ПО 5 РАЗДЕЛУ

Объектом для проектирования крупноразмерной эллипсоидной гипсокартонной оболочки является рекреационная зона внутреннего двора первого учебного корпуса Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка, Донецкая обл.).

1. На основании анализа конструктивного решения базового покрытия здания выполненного из стропильных конструкций и геометрии проектируемой крупноразмерной эллипсоидной оболочки, размеры которой в несколько раз превышают диаметры типовых куполов «Берлин» и «Мюнхен», было принято решение отойти от типовой конструктивной схемы несущего ребристо-кольцевого каркаса с равномерным шагом подвеской.

2. По результатам численного анализа НДС покрытия и с учетом ограниченности мест возможной подвески, технологических особенностей монтажа, податливости покрытия от снеговой нагрузки, возможных температурных перепадов в процессе эксплуатации была запроектирована оболочка положительной гауссовой кривизны с несущим каркасом из серповидных изогнутых ферм с горизонтальными решетчатыми связями.

3. Для исследования влияния типа опорных узлов несущего каркаса на напряженно-деформированное состояние ГК оболочки при численном моделировании использованы три типа опорных подвесок: шарнирно-неподвижная; шарнирно-подвижная; упругоподатливая с жесткостью в вертикальном направлении эквивалентно моделирующей поведение пластинчатого шарнира.

4. Оболочка смоделирована четырехугольными объемными конечными элементами, в узлах примыкания к радиальным и кольцевым ребрам с помощью треугольных элементов, шаг дискретизации вдоль кольцевого и радиального направлений принят $0.1 \div 0.14$ м, что обеспечивает соотношение сторон не более 2 и необходимую точность расчета. Задача решалась в линейной постановке, оболочка рассчитывалась на действие всех видов статических нагрузжений.

5. Анализ результатов полей приведенных напряжений показал:

- схема закрепления с шарнирно-неподвижными опорами более предпочтительна при 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 до границы трещинообразования в стыках гипсокартонной оболочки такого размера;

- при шарнирно-подвижных опорах величины приведенных напряжений составляют промежуточные значения между вариантами с шарнирно-неподвижными и упругоподатливыми опорами.

- результаты расчетов, как по первой так и по четвертой теориям прочности показывают, что использование пластинчатых шарниров и двухслойных элементов с двухфакторным усилением в виде одновременного использования клевого и винтового соединения, и дополнительного армирования в виде стеклохолста обеспечивает условия трещиностойкости изложенных в разделе 4.

6. Перед началом монтажа была произведена контрольная сборка каркаса на стендовой площадке. Сборка каркаса в проектное положение осуществлялась отдельными элементами, которые соединялись между собой на болтах. В первую очередь, фиксировался элемент вершины купола, к которому крепились радиальные элементы. Параллельно велась установка кольцевых элементов с соблюдением направления монтажа. На всех этапах осуществлялся контроль высотных отметок, линейных и угловых размеров.

7. Устройство тонкостенной двухслойной оболочки из влагостойких ГК плит Кнауф выполнялось после полного закрепления вспомогательного каркаса в проектное положение. Установка каждого из элементов обшивки начиналась от центра купола к внешнему краю, а крепление по принципу «от угла» по двум взаимно перпендикулярным направлениям. С целью равномерного распределения нагрузки крепление обшивки производилось одновременно с двух противоположных секторов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертации решена актуальная научная задача по разработке методики расчета и рекомендаций по проектированию крупноразмерных пологих гипсокартонных куполов на основании экспериментальных исследований с применением высокотехнологического оборудования и современных программных комплексов для численного моделирования НДС оболочек. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана и обоснована методика экспериментальных исследований деформативности стандартных и составных гипсокартонных элементов при одноосном растяжении, изгибе и чистом сдвиге при этом для замера и фиксации быстроменяющихся линейных деформаций в режиме реального времени была апробирована мобильная измерительная тензометрическая система.

2. Испытания на изгиб, растяжение и сдвиг стандартных образцов показали,:

- стандартные продольные образцы по сравнению с поперечными имеют модуль упругости выше в 1,25-1,55 раза, а относительную прочность в 2,5-2,8 раза;

- предел прочности при растяжении для продольных образцов составляет до 1,8 мПа и до 0,9 мПа у поперечных;

- модули сдвига для продольных и поперечных образцов при пределе пропорциональности различаются незначительно до 5 %, при этом прочность при сдвиге выше в 1.7 раза у продольных образцов.

3. Испытания на изгиб составных ГК элементов со стыком показали:

- для однослойных и двухслойных образцов со стыком предел трещиностойкости составлял 33-42% от предела их прочности на изгиб.

- усиление стеклохолстом приводит к резкому возрастанию пределу трещиностойкости в 1.8 раза, при одновременном использовании клеевого соединения и усиления стеклохолстом предел трещиностойкости достигает предела прочности при изгибе и разрушению образцов происходит как по стыку так и по цельному сечению.

4. Разработанная методика расчета тонкостенных гипсокартонных оболочек, базируется на структурно-феноменологическом подходе, гипсокартон, как плоско

армированный материал, представляется в виде сплошного однородного ортотропного тела, подчиняющегося закону Гука. Для перехода от комбинированного сечения с двухфакторным усилением к однородному ортотропному эквивалентному телу обладающего упругими характеристиками E_1 , E_2 , μ_{12} , μ_{21} полученных при одноосном растяжении эталонных образцов необходим подбор эквивалентной жесткости, который заключается в определении эквивалентной толщины при неизменных упругих константах.

5. При ограниченном количестве мест для возможной подвески, приходится отходить от типовых решений куполов и разрабатывать рациональную схему несущего каркаса. 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.

6. Результаты работы внедрены при проектировании крупноразмерного эллипсоидного купола размеры которого в несколько раз превышает типовые купола «Берлин» и «Мюнхен» и, в дальнейшем, могут быть использованы при разработке технических нормативов, конструкторской и технологической проектной документации по устройству уникальных криволинейных оболочек.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. DIN EN 13963-2005 Материал для заполнения стыков для гипсовых плит. Определения, требования и методы испытаний
2. DIN EN 520-2005 Плиты гипсовые под штукатурку. Определения, требования и методы испытания
3. ГОСТ 6266-97. Листы гипсокартонные. Технические условия. – М., 2001. – 21 с.
4. DIN 18180-2007 Плиты гипсокартонные. Типы и требования
5. ДБН В.1.2-2: 2006 «Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования»
6. ДСТУ Б В.2.7-95-2000 «Листи гіпсокартонні. Технічні умови»
7. Архитектурная физика: Учеб. для вузов спец. А 87 "Архитектура" / В.Н.Мицкевич, Л.И.Мариненко, И.К.Магалина и др. Под ред. Н.В.Оболенского. – М.: Стройиздат, 1997. – 448 с.
8. Бёкер Х. Гипсокартонные плиты для отделки зданий / Пер. с нем. В.Г.Бердичевского. Под ред. Ю.М.Веллера. – М.: Стройиздат, 1986. -176 с.
9. Горчаков Г.И. Строительные материалы: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа. 1981. – 412 с.
10. Хануш Х. Гипсокартонные плиты: Отделочные работы с применением сборных элементов / Пер. с нем. Ю.М. Веллера. – М.: Стройиздат, 1983. – 296 с.
11. Беккер Х. Гипсокартонные плиты для отделки зданий. / Пер. с нем. Бердичесвкого В.Г. Под ред. Ю.М. Веллера. – М.: Стройиздат, 1986. – 176 с.
12. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). Справочник. Под общ. ред. А.В. Ферронской. – М.: Издательство АСВ. – 488 с.
13. Буданов Б.А., Поплавский В.В. Технология монтажа каркасно-обшивных конструкций: учебник для нач.проф. образования – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 176 с.
14. Циприанович И.В., Старченко А.Ю. Комплектные системы сухого строительства. – К.: Издатель ОАО "Мастера", 1999. – 192 с.

15. Парикова Е.В., Фомичева Г.Н., Елизарова В.А. Материаловедение (сухое строительство): учебник для нач. проф. образования – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 304 с.
16. DIN 18182-2015 Приспособления для использования с гипсокартонными плитами. Часть 1. Профили из листовой стали.
17. Захарченко П.В., Долгий Е.М., Галаган Ю.О., Гавриш О.М., Гулін Д.В., Старченко О.Ю. Сучасні композиційні будівельно-оздоблювальні матеріали. Підручник. К.: КНУБА, 2005. 512 с., 111 іл.
18. Мокин А.А., Федулов А.А. Маркетинг строительных комплектных систем: метод. пособие для строителей У.Ц.ТИГИ Кнауф. – М.: 1997, – 30с.
19. Морин А.Л. Применение гипсокартонных листов в ремонтно-строительном производстве: Учеб. пособие. – К.:1987. – 50 с.
20. Палиев А.И., Комплектные системы ТИГИ Кнауф. – М.: А.О.'ТИГИ-МАРКЕТИНГ", 1996. – 101 с.
21. Комплектные системы строительства "сухим способом", строительство потолков, межкомнатных перегородок и облицовка стен гипсовыми панелями "Кнауф"- европейская сила в строительстве. – Кнауф: 1996.
22. Федулов А.А., Филиппов В.В., Лукоянов А.П. Комплектные системы для отделки помещений "сухим" способом: Мет. пособие для слушателей У.Ц.ТИГИ Кнауф. – М.: 1987. – 41 с.
23. Produkt- und systemkatalog: GEBR. KNAUF WEST-DEUTSHEGIPSWERKE, Ihhofen, 1998. – 146 с.
24. Конструкции с применением гипсоволокнистых листов, СП 55-102-2001. издание официальное, Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплекту (Госстрой России), – М.: 2003, – 48 с.
25. Комплектные системы Кнауф. Перегородки поэлементной сборки из гипсоволокнистых листов на металлическом и деревянном каркасах для жилых, общественных и производственных зданий. Выпуск 1. Серия 1.031.9-3.01. ЗАО НП "Челябинский Промстройпроект, 2001, – 75с.

26. Комплектные системы Кнауф. Обшивка из гипсоволокнистых листов ограждающих конструкций жилых, общественных и производственных зданий. Стены, мансардные помещения, коммуникационные шахты. Выпуск 1. Материалы для проектирования и рабочие чертежи узлов. Шифр М 25.41/2000, ОАО "ЦНИИпроизданий", М.: 2000, – 67 с.
27. Елизарова В.А. Технология монтажа каркасно-обшивных конструкций. Практикум: учеб. Пособие для нач. проф. образования – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 192 с.
28. Рекомендации по конструкторско-технологическим решениям облицовки стен листовыми материалами, устройству подвесных потолков и сборных перегородок / ЦНИИОМТП; КиевЗНИИЭП – М.: Стройиздат, 1987. – Материалы технического семинара фирмы AMF (Германия). 2001 г.
29. СП-101-2000. Ограждающие конструкции с применением гипсокартонных листов. – М.: Госстрой России, 2002. – 57 с.
30. Рекомендации по конструкторско-технологическим решениям облицовки стен листовыми материалами, устройству подвесных потолков и сборных перегородок / ЦНИИОМТП; КиевЗНИИЭП – М.: Стройиздат, 1987. – 120 с.
31. Системные решения устройства облицовок. "Хенкель Баутехник (Украина)", Киев, 2003
32. Brandschutz mit Knauf, Gipsbaustoffe Baukonstruktionen; neu bberarbeitete Auflage 1997, 64p.
33. Schallshutz mit Knauf, DIN 4109 (Ausgabe 89) Shallschutzaforderungen Ausfbrhrungbeisspile, Auflage 1992, 62p.
34. І.В. Ципріянович, О.Ю.Старченко, Д.В.Гулін. Криволінійні та ламані форми гіпсокартонних облицювань: підручник. – 1-ше вид. – К.: ВАТ «Майстри», 2009. – 224 с.
35. Гамм Х. Современная отделка помещений с использованием комплектных систем Кнауф: Учебное пособие. Изд. второе. – М.: Стройматериалы, 2002. – 90 с.

36. Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Веретенников В.И., Старченко АЮ., Гавриш А.М., Гулин Д.В., Пахомов И.А., Горохов А.Е. Подвесные потолки общественных зданий/Макеевка, РИС ОМС ДонГАСА, 2002. – 96 с.
37. Северинова Г.В. и Жаворонков П.Е. Устройство подвесных потолков. — М.: Стройиздат, 1978. – 64 с. – (ЦНИИОМТП).
38. Материалы Clariant. Трещинообразование строительных материалов из сухих смесей.
39. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 1. Элементы конструкций. / Под ред. В.В. Горева. – М.: Высшая школа, 2001.
40. Металлические конструкции. Общий курс. / Под ред. Г.С. Веденикова. – М.: Стройиздат, 1998.
41. Металлические конструкции: Спец. курс. / Под ред. Е.И. Белени. – М.: Стройиздат, 1982.
42. Проектирование металлических конструкции: Спец. курс. / Под ред. В.В. Бирюлева. – Л.: Стройиздат, 1990.
43. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. В 3 т. / Под ред. В.В. Кузнецова. – М.: Изд. АСВ, 1998.
44. Купола : расчет и проектирование / М. Е. Липницкий. – Л. : Стройиздат, 1973. – 129 с
45. Лебедева Н.В. Фермы, арки, тонкостенные пространственные конструкции учебное пособие. – М.: Архитектура – С.2006. 120с., ил.
46. Беленя Е.И. Предварительно-напряженные металлические несущие конструкции. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1975 – 415с.
47. Васильев А.А. Металлические конструкции. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1976. – 424 с.
48. Дыховичный Ю.А. Большепролетные конструкции сооружений Олимпиады-80 в Москве. – М.: Стройиздат, 1982. – 277 с.
49. Металлические конструкции. Спец. Курс. – 2-е изд./ Под ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1976. – 600 с.

50. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. – 2-е изд./ Под ред. Н.П. Мельникова. – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.
51. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. :с англ. / С.Л.Баженов [и др.] – Долгопрудный : Интеллект, 2010. – 347 с.: ил.
52. ASTM D790-07 Standart Test Method for Flexular Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 11 p.
53. ASTM D2764/D7264M-07 Standart Test Method for Flexular Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 11 p.
54. Стрелецкий Н.С., Стрелецкий Д.Н. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. – М.: Стройиздат, 1964. – 239 с.
55. Адамов А.А., Лаптев М.Ю., Горшкова Е.Г. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов // Консрукции из композиционных материалов. 2012. № 3. С. 72.
56. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований / В.Э. Вильдеман [и др.]; Пермский национальный исследовательский политехнический университет; Под ред. В.Э. Вильдемана. – Москва: Физматлит, 2012. – 203 с.
57. Александров А.В. Лащенко Б.Я., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы. - М.: Стройиздат, 1983.
58. Гольцев В.Ю. Методы механических испытаний и механические свойства материалов. Лабораторный практикум. / В.Ю. Гольцев, Е.Н. Пирогов – М.: МИФИ, 2008. – 160 с.
59. Тушинский Л.И. Методы исследования материалов / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.Н. Синдеев. М.: Мир, 2004. – 380 с.
60. Методы испытаний полимерных материалов, ООО «КОМЕФ» 2007.
61. Гольцев В.Ю. Методы механических испытаний и механических свойств материалов: Учебное пособие. / В.Ю.Гольцев. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 228 с.

62. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия, 1981.
63. ГОСТ 25.601-80 Расчеты и испытание на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Методы испытания плоских образцов на растяжение нормальной, повышенной и пониженной температурах – М.: Стандартинформ, 2005. – 16 с.
64. Савельев В.А. Устойчивость стальных куполов [Текст] / В.А. Савельев // Металлические конструкции: Работы школы профессора Н.С. Стрелецкого / МИСИ им. В. В. Куйбышева, Проектстальконструкция, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1966. – с. 325-339.
65. Липницкий М.Е Купола: расчет и проектирование [Текст] / М. Е. Липницкий. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1973. – 129 с.
66. Молев И.В. Сетчатые купола в современной строительной практике [Текст]: Учебное пособие / И.В. Молев – Горький: Издание ГГУ им. Н.И. Лобачевского, 1981. – 64 с.
67. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы) [Текст]: справочник / Под. ред. Ю.А. Дыховничного, Э.З. Жуковского. – М.: Высшая школа, 1991 – 542 с.
68. Тур В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности [Текст]: Учебное пособие / В.И. Тур. – М.: АСВ, 2004. – 96 с.
69. Дьяков И.Ф. Метод конечных элементов в расчетах стержневых систем [Текст]: учебное пособие / И.Ф. Дьяков. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 133 с.
70. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов: Учебное пособие – М.: Издательство Московского университета, 1984. – 336 с.
71. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т.2. – М.: Наука, 1978.
72. Чирас А.А. Строительная механика. – М.: Стройиздат, 1989.

73. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. – М.: Наука, 1989.
74. Баженов В.А., Дехтярюк С.С. Імовірнісні методи розрахунку конструкцій. Випадкові коливання пружних систем. – К.: ВІПОЛ, 2005.
75. Баженов В.А., Криксунов Э.З., Перельмутер А.В., Шишов О.В. Строительная информатика. Автоматизированное проектирование несущих конструкций зданий и сооружений. – М.: ИАСВ, 2006.
76. Безухов Н.И., Лужин О.В., Колкунов Н.В. Устойчивость и динамика сооружений в примерах и задачах. – М: Высш. шк., 1987
77. Бернштейн С.А. Очерки по истории строительной механики. – М.: ГИЛСА, 1957.^x
78. Гантпмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике. – М., 1966.
79. Гордеев В.Н., Лантпух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействий на здания и сооружения / Под общ. ред. А.В. Перельмутера. 2-е изд. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 476 с.
80. Исаханов Г.В., Гранат С.Я., Мельниченко Г.И., Шишов О.В. Строительная механика. Расчет стержневых систем на ЭВМ. – К.: Вища школа, 1990.
81. Попкович П.Ф. Теория упругости. – Л.: Оборонгиз, 1939.
82. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. – М.: Наука, 1986.
83. Рабинович И.М. Вопросы теории статического расчета сооружений с односторонними связями. – М.: Стройиздат, 1975.
84. Рабинович И.М. Курс строительной механики. Т. 1. Статически определимые системы. – М.: Стройиздат, 1950; Курс строительной механики. Т.2. Статически неопределимые системы. – М.: Стройиздат, 1954.
85. Сливкер В.И. Строительная механика. Вариационные основы. – М.: ИАСВ, 2005.
86. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.

87. Carrera E., Brischetto S., Nali P. Plates and Shells for Smart Structures: Classical and Advanced Theories for Modeling and Analysis, First Edition. // John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 322 p.
88. Атисков А. Ю., Баранова Д. А., Карпов В. В., Москаленко Л. П., Семенов А. А. Компьютерные технологии расчета оболочек. СПб.: СПбГАСУ, 2012. 184 с.
89. Абросимов Н.А. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций / Н.А. Абросимов, В.Г. Баженов. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. – 400с.
90. Амбарцумян С.А. Некоторые вопросы теории оболочек из композиционных материалов / С.А. Амбарцумян // Успехи механики. – 1983. – Т.6, вып.3-4.
91. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных оболочек / С.А. Амбарцумян.- М.:Физматлит, 1961. – 384с.
92. Амиро И.Я. Методы расчета оболочек. Т.2. Теория ребристых оболочек / И.Я. Амиро, В.А. Заруцкий. – Киев: Наукова думка, 1980. – 368с.
93. Анохин Н.Н. Численный анализ пологих ортотропных цилиндрических оболочек, находящихся в температурном поле / Н.Н. Анохин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – №2. – 2007. – С. 18-22.
94. Ворович И.И. Математические проблемы нелинейной теории пологих оболочек / И.И. Воронович. – М.: Наука, 1989. – 376с.
95. Карпов В.В. Прочность и устойчивость ортотропных оболочек / В.В. Карпов, А.А. Семенов // Материалы XX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1 – М.: ООО»ТР-принт», 2014. – С.92-93.
96. Баженов В.А., Сахаров А.С., Мельниченко Г.И., Чорный С.М. Метод конечных элементов в задачах строительной механики. – К: КДТУБА, 1994.
97. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987.
98. Гельфанд Н.М., Фомин С.В. Вариационное исчисление. – М., 1961.
99. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.
100. Ланцош К. Вариационные принципы механики. – М.: Мир, 1965.

101. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. 3-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 600 с.
102. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. Т.1. – М.: Изд-во СКАДСОФТ, 2007.
103. Постнве В. А., Хархурим ИЯ. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1974.
104. Пратусевич Я.А. Вариационные методы в строительной механике. – М.-Л.: ОГИЗ, 1948.
105. Розин Л.А. Задачи теории упругости и численные методы их решения. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998.
106. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975.
107. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1965.
108. Qu Y., Wu S., Chen Y., Hua H. Vibration analysis of ring-stiffened conical-cylindrical-spherical shells based on a modified variational approach // International Journal of Mechanical Sciences. – Vol.69.-2013. Pp.72-84. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.01.026>.
109. Дыховичный А.А., Вишневецкий А.И. Экспериментальные исследования упругих систем и математическое моделирование. – В кН.: Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будівельник, 1980, вып.36, с. 107-110
110. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.
111. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. – М.: Стройиздат, 1977.
112. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Мир, 1982.
113. Бате К. Д., Вилсон У. Л. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
114. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

115. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов: от интуиции к общности. – Сб. переводов «Механика». – М.: Мир, 1970. – №6. – С.90-103.
116. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
117. Абовский Н.П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек / Н.П. Абовский, Н.П. Андреев, А.П. Дегура; Под ред. Н.П. Абовского. – М.: Наука, 1978.-228 с.
118. Асеев А.В. Визуализация напряженно-деформированного состояния тонкостенных ребристых оболочек / А.В. Асеев, А.А. Макаров, А.А. Семенов // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №38(3). – С. 226-232.
119. Ашкенази Е.К. Вопросы анизотропии прочности / Е.К. Ашкенази // Механика полимеров, 1965, №2
120. Баранова Д.А. Сравнительный анализ расчета прочности и устойчивости подкрепленных оболочек на основе ПК Оболочка и ПК ANSYS / Д.А. Баранова, А.Л. Волынин, В.В. Карпов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2010. – Т.10, №4. – С.23-27.
121. Голушко С.К. Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек вращения / С.К. Голушко, Ю.В. Немировский. – М.: Физматлит, 2008. – 432с.
122. Жгутов В.М. Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. I / В.М. Жгутов // Инженерно-строительный журнал. – №7. – 2009. – С.55-64.
123. Игнатьев О.В. Вариационно-параметрический подход к расчету пологих оболочек ступенчато-переменной толщины / О.В. Игнатьев, И.А. Игнатьева, В.В. Карпов // Исследования по механике материалов и конструкций. – Вып.9. – СПб.: ПГУПС, 1996. – С. 44-54.
124. Карпов В.В. Компьютерные технологии расчета покрытий строительных сооружений оболочечного типа / В.В. Карпов // Вестник гражданских инженеров. – 2005. – Вып.2. – С. 17-25.

125. Семенов А.А. Исследование прочности и устойчивости тонкостенных пологих ортотропных оболочек / А.А. Семенов // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: межвуз. темат. сб. тр. Вып.19. – СПб.: СПбГАСУ, 2013. – С. 40-53.
126. Белозеров Л.Г. композитные оболочки при силовых и тепловых воздействиях / Л. Г. Белозеров, В.А. Киреев. – М.: Физматлит, 2003. – 388с.
127. Гольдденблат И.И. Критерий прочности анизотропных материалов / И.И. Гольденблат, В.А. Копнов // Механика, 1965, №6.
128. Тимошенко С.И История науки о сопротивлении материалов. – М.: ГИТТЛ, 1957.
129. Тимошенко С.П. Курс статики сооружений. – Л.: ГНТИ, 1931.
130. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Наука, 1966.
131. Семенов А. А., Овчаров А. А. Математическая модель деформирования ортотропных конических оболочек [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2014 №4. Режим доступа: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_79_Semenov.pdf 2383 (доступ свободный).
132. Киракосян Р. М. Об одной утонченной теории гладких ортотропных оболочек переменной толщины // Доклады национальной академии наук Армении. 2011. №2. С. 148-156.
133. Lindgaard E., Lund E. A unified approach to nonlinear buckling optimization of composite structures // Computers & Structures. 2011. Vol.89. No.3-4. Pp. 357-370.
134. Tomas A., Marti P. Shape and size optimization of concrete shells // Engineering Structures. 2010. Vol. 32. No.6. Pp. 1650-1658.
135. Bakouline N., Ignatiev O., Karpov V. Variation parametric research technique of variable by step width shallow shells with finite deflections // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2000. Vol.I. No.3. Pp. 1-6.

136. Амиро И. Я., Заруцкий В. А. Исследования в области устойчивости ребристых оболочек // Прикладная механика, 1983. Т.19. № 11. С. 3-20.
137. Игнатъев О. В., Карпов В. В., Филатов В. Н. Вариационно-параметрический метод в нелинейной теории оболочек ступенчато-переменной толщины. Волгоград : ВолгГАСА, 2001. 210 с.
138. Амбарцумян С. А. Общая теория анизотропных оболочек. – Москва: Наука, 1974. – 446 с.
139. Григоренко Я. М., Шевченко Ю. Н., Василенко А. Т. И др. Численные методы // Механика композитов: в 12 т. / Под общ. Ред. А. Н. Гузя. – Т.11. – Киев: А. С. К., 2002. – 448 с.
140. Григоренко Я. М., Влайков Г. Г., Григоренко А. Я. Численно-аналитическое решение задач механики оболочек на основе различных моделей. – Киев: Академперіодика, 2006. – 472 с.
141. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. – Москва: Наука, 1977. – 416 с.
142. Григоренко Я. М., Крюков Н. Н., Иванова Ю. И. Анализ напряженного состояния двояковыпуклых слоистых ортотропных оболочек при различной степени пологости // Прикл. Механика. – 2003. – 39, №6. – С.74-81.
143. Расчет напряженно-деформированного состояния слоистых прямоугольных в плане пологих ортотропных оболочек в уточненной постановке / А.Я. Григоренко, Н.П. Яремченко, С.Н. Яремченко [Электронный ресурс] // Доп. НАН України. — 2012. — № 2. — С. 76-82. Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/49034> (доступ свободный).
144. Образцов И. Ф., Васильев В. В., Бунаков В. Н. Оптимальное армирование оболочек вращения из композитных материалов. М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.
145. Тетерс Г. А., Рикардс Р. Б., Нарусберг В. А. Оптимизация оболочек из слоистых композитов. – Рига: Зинатне, 1978. – 240 с.
146. Сухинин С. Н. Прикладные задачи устойчивости многослойных композитных оболочек. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 248 с.

147. Семенов А.А. Алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных ортотропных оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. №1.
148. ГОСТ 9550-81 Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе
149. ГОСТ 21616-91: Тензорезисторы. Общие технические условия.
150. ГОСТ 20420-75 Тензорезисторы. Термины и определения.
151. ГОСТ Р 52728-2007 «Метод натурной тензометрии. Общие требования»
152. ГОСТ 18957-73 Тензометры для измерения линейных деформаций строительных материалов. Общие технические условия.
153. ГОСТ 8.051-81 Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм.
154. ГОСТ 8.543-86 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений деформации.
155. ГОСТ 12997-84 Изделия ГСП. Общие технические условия.
156. ГОСТ 18321-73 Статический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции.
157. ТУ-02/2062-01.01. Системы микропроцессорные многоканальные тензометрические ММТС-64.01. Технические условия.
158. Тарнопольский Ю.М. Пространственно-армированные композиционные материалы, 1987, 224 с.
159. Алфутов Н.А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов. – М.: Машиностроение, 1984, 264 с.
160. Григолюк Э.И. Многослойные армированные оболочки, 1988, 288 с.
161. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. – Рига: Зинатне, 1980. – 572 с.
162. Композиционные материалы. Справочник / Под, общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

163. Карпов А.Я., Ставиченко В.Г. Сравнительный анализ подходов к оценке прочности слоистых композиционных материалов // Пробл. Прочности, – 2008, – №4, – С. 36-42.
164. Механика композитов, В 12 т. / Под ред. А.Н. Гузя. – Т. 3. Статическая механика и эффективные свойства материалов / Под ред. Л. П. Хорошуна. – Киев: Наук. думка, 1993. – 390 с.
165. Рассказов А. О., Соколовская И. И., Шульга Н. А. Теория и расчет слоистых ортотропных пластин и оболочек. – Киев: Вища шк., 1986. – 191 с.
166. Кристенсен Р. Введение в механику композитов / Пер. с англ. под ред. Ю.М. Тарнопольского. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
167. Maksimyuk V. A., Storozhuk E. A., Chernyshtnko I. S. Nonlinear Deformation of Thin Isotropic and Orthotropic Shells of Revolution with Reinforced Holes and Rigid Inclusions // International Applied Mechanics. 2013. Volume 49, Issue 6. Pp. 685-692. DOI: 10.1007/s10778-013-0602-x.
168. Трещев А.А. Исследование НДС прямоугольной в плане оболочки положительной гауссовой кривизны из ортотропных материалов с учетом свойств разносопротивляемости / А.А. Трещев, М.Б. Шерешевский // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч.2. строительные науки. – С. 414-421.
169. Бережной Д.В. Многослойный ортотропный конечный элемент оболочек средней толщины / Д.В. Бережной, М.К. Сагдатуллин, А.И. Голованов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – №57.–С.9-19: ил.– Библиогр.: с. 19 (21 назв.). – ISSN 1999-8341.



**Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики**
**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»**

286123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,
тел.: +38 (062) 343-70-33, email: mailbox@donnasa.org, идент. код 02070795

от 16.04.2019 № 13-04/01-32
на № _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.006.02 при
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Косика Алексея Борисовича на тему «Трещиностойкость крупноразмерных пологих
гипсокартонных оболочек», предоставленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и
сооружения

Комиссия в составе: проректора по учебной работе, д.т.н., профессора Нездойминова В.И., декана строительного факультета, к.т.н., доцента Лозинского Э.А., начальника учебного отдела, к.э.н., доцента Сухины А.А. свидетельствует, что при подготовке магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» по программе «Теория и практика организационно-технологических и экономических решений» в лекционном материале по дисциплине «Инновационные технологии строительства с применением новых материалов» используются результаты теоретических и экспериментальных исследований по кандидатской диссертационной работе Косика Алексея Борисовича «Трещиностойкость крупноразмерных пологих гипсокартонных оболочек».

Члены комиссии:

Проректор по учебной работе,
д.т.н., профессор

Декан строительного факультета,
к.т.н., доцент

Начальник учебного отдела,
к.э.н., доцент



В.И. Нездойминов

Э.А. Лозинский

А.А. Сухина



Российская Федерация
Общество с ограниченной ответственностью
"Объединенная Дирекция проектных работ"
(ООО "ОДПР")

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая 132/37, оф. 8А
ОГРН 1166196089608, ИНН/КПП 6164109537/616401001
Тел. 8 (903) 433-47-36

Диссертационный совет Д 01.006.02
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
Академия строительства и архитектуры

«04» 09 2019 г. №226/19

СПРАВКА

О внедрении результатов диссертационной работы Косика Алексея Борисовича «Трещиностойкость крупноразмерных пологих гипсокартонных оболочек», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения.

При проектировании криволинейных гипсокартонных конструкций потолков в отделке интерьеров помещений объектов: Детская Хореографическая Школа в г. Ставрополь; реконструкция дворца спорта «СК Гольфстрим» в г. Мончегорске; строительство объектов непроизводственного назначения, входящих в состав Многофункционального комплекса футбольного стадиона ООО «Стадион «Спартак», а именно «Дошкольное образовательное учреждение №3 на 125 мест» в г. Москве для обеспечения гарантированной трещиностойкости, как основополагающего критерия сохранения эстетического вида отделываемых поверхностей, использованы результаты экспериментально-теоретических исследований упругих характеристик гипсокартонных плит и закономерностей деформирования составных образцов-моделей с различными вариантами усиления, полученные соискателем Косиком Алексеем Борисовичем.

В проектах применены обоснованные в работе соискателя технологичные варианты конструктивных решений гипсокартонных тонкостенных оболочек с повышенным пределом трещиностойкости стыков.

С уважением,
Генеральный директор



С.И. Колесник

