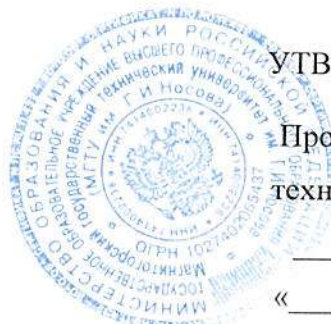


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОУ ВПО «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Г.И. НОСОВА»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по инновационным
технологиям и инвестициям

_____/С.И. Лукьянов /

« ____ » _____ 2011 г.

Заключение

по оценке несущей способности плит покрытия ПКЖ-13 ЛПЦ-4 ОАО
«ММК» и разработка практических рекомендаций по увеличению
несущей способности этих плит с использованием системы MBrace
концерна BASF

Тема № 2010-182

Руководитель ЛНДНЗ _____ М.Б. Пермяков

Руководитель темы _____ Ю.М. Круциляк

Ответственный исполнитель _____ А.А. Варламов

Магнитогорск, 2011 г

Содержание

1. Вводная часть	3
1.1 Основание для проведения работы	3
1.2 Сведения об экспертной организации	3
1.3 Сведения об исполнителях	3
2. Данные о заказчике	4
3. Цель и задачи работы	4
4. Методика проведения испытаний	5
4.1. Описание образцов испытанных в лаборатории	5
4.2. Методика усиления	7
4.3. Методика проведения испытания	8
5. Результаты испытаний	9
6. Анализ результатов испытаний изгибаемых элементов и выводы	12
7. Результаты расчета плиты ПКЖ-13	12
Заключение	15
Рекомендаций по увеличению несущей способности плит покрытия ПКЖ-13 с использованием системы MBrace концерна BASF	16
Приложения	
Приложение А Фотографии опытных образцов	17
Приложение Б Расчет ребристой плиты покрытия ПКЖ13	20
Приложение В Общие данные по плите покрытия ПКЖ13	44
Приложение Г Характеристики сечения плиты покрытия ПКЖ13	48
<u>Список нормативной, технической и методической документации</u>	<u>49</u>

1. Вводная часть

1.1. Основание для проведения работы

Работа выполнена на основании договора № от «__» _____ 2010 г. между ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и ООО «БАСФ Строительные системы».

1.2. Сведения об экспертной организации

Название экспертной организации:	ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»	
Юридический адрес:	455000 Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38	
Телефон:	Код города (3519)	22-41-46, 29-85-53, 29-84-41
Банковские реквизиты:	ИНН 7414002238, Отделение по г. Магнитогорску УФК по Челябинской области (МГТУ, л/счет 06073470480).	
	Банк получателя: РКЦ г. Магнитогорска, р/счет 40503810400001000001, БИК 047516000 Код дохода 07330201010010000130 КПП 744401001	
Руководитель организации:	ректор Колокольцев Валерий Михайлович	
Проректор по инновационным технологиям и инвестициям	Лукьянов Сергей Иванович	

1.3. Сведения об исполнителях

Исполнители: группа технического обследования:

Состав группы:

<i>Руководитель работ:</i>	Круциляк Юрий Михайлович доцент, кандидат технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»;
<i>Исполнители:</i>	Варламов Андрей Аркадьевич доцент, кандидат технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»;

2. Данные о заказчике

Организация заказчик:	ООО «БАСФ Строительные системы»
Юридический адрес:	142113, Московская область, Подольский район, д. Большое Толбино, ул. Промышленная, д.2
Почтовый адрес:	119017 Москва, Кадашевская наб., д.14, корп. 3
Телефон/факс	(495) 225-64-11, 225-64-36;
Банковские реквизиты:	ИНН 5074024703 КПП 507401001 Р/с 40702810200002102689 в ЗАО «КОММЕРЦБАНК (ЕВ-РАЗИЯ)» БИК 044525105 к/с 30101810300000000105 В ОПЕРУ Московского ГТУ Банка России
Руководитель организации:	Генеральный директор Ветлов Сергей Анатольевич.

3. Цель и задачи работы

3.1. Целью работы является определение несущей способности плит покрытия ПКЖ-13 с учетом фактических физико-механических характеристик материалов и армирования. Разработка рекомендаций по увеличению несущей способности этих плит с использованием системы MBrace концерна BASF.

3.2. Задачи работы:

3.2.1. Выполнение поверочных расчетов плиты покрытия по первой и второй группе предельных состояний с учетом реальных физико-механических характеристик материалов плит ПКЖ-13:

- выполнение поверочных расчетов по нормальным и наклонным сечениям;
- расчет полки плиты;
- расчет на образование трещин в продольных ребрах;
- расчет на раскрытие трещин;
- расчет по прогибам.

3.2.2. Отработка методики увеличения несущей способности бетонных и железобетонных элементов:

- выполнение поверочных расчетов с учетом усиления продольных ребер плиты ладелями, а плитной части (при необходимости) холстами и другим аналогичным материалом;
- отработка методики на лабораторных изгибаемых образцах по увеличению несущей способности по нормальным и наклонным сечениям с использованием системы MBrace концерна BASF.

3.2.3. Подготовка итогового отчета о проделанной работе.

4. Методика проведения испытаний

4.1. Описание образцов испытанных в лаборатории

Для отработки методики на лабораторных изгибаемых образцах по увеличению несущей способности по нормальным и наклонным сечениям с использованием системы MBrace концерна BASF в лабораторных условиях были проведены исследования на железобетонных перемычках размером 120x140x1600 мм, изготовленных по заказу на ЖБИ ЗАО «Стройкомплекс» г. Магнитогорск. Марка используемых перемычек 2ПБ 16-2П. Марка бетона М200.

Всего было испытано 10 перемычек по 5 разным схемам (см. рис. 4.1-4.5). В табл. 1. приведено разделение по количеству испытанных образцов для каждой схемы испытаний. Для выявления резервов работы конструкций по бетону заранее предполагалось переармирование образцов по нормальным сечениям.

Таблица 1

Количество испытанных образцов

Наименование Образцов	Количество образцов по схемам					Всего, шт.
	I схема (рис. 5.1)	II схема (рис. 5.2)	III схема (рис. 5.3)	IV схема (рис. 5.4)	V схема (рис. 5.5)	
Перемычки 2ПБ 16-2П	2 шт.	2 шт.	2 шт.	2 шт.	2 шт.	10

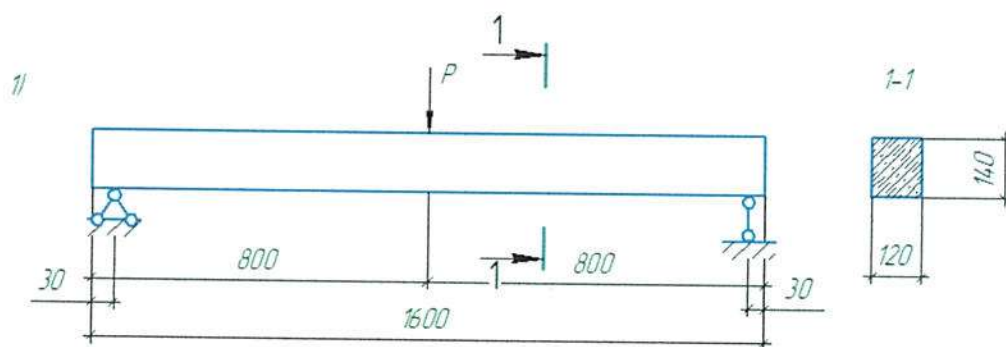


Рис. 4.1. Испытание перемычек без усиления.
Серия ПІІ

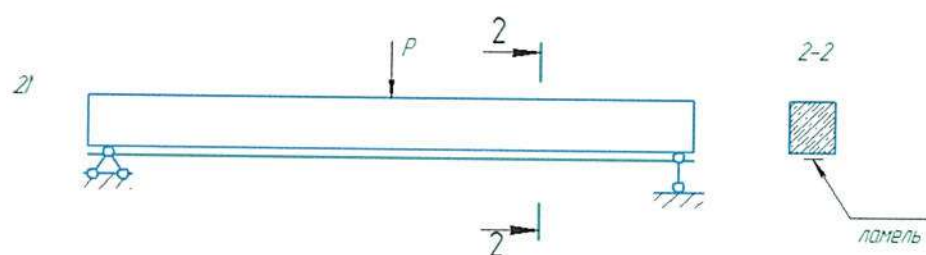


Рис. 4.2. Испытание перемычек с усилением ламелью по нормальным сечениям. Серия ПуІІ

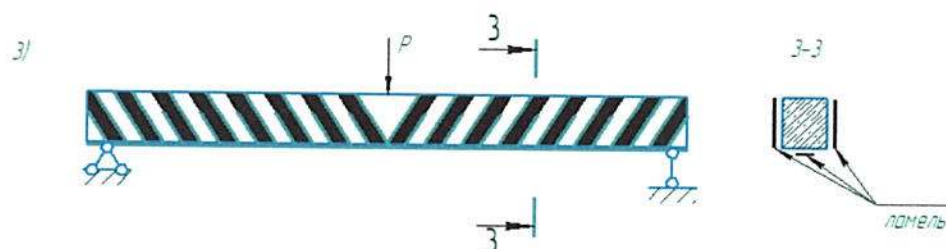


Рис. 4.3. Испытание перемычек с усилением ламелями по нормальным и наклонным сечениям. Серия ПуІІІ

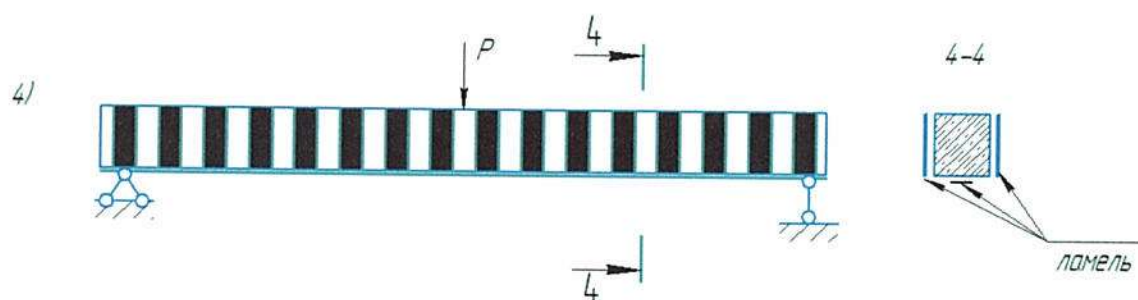


Рис. 4.4. Испытание перемычек с усилением ламелями по нормальным и наклонным сечениям (вар.2). Серия ПуІV

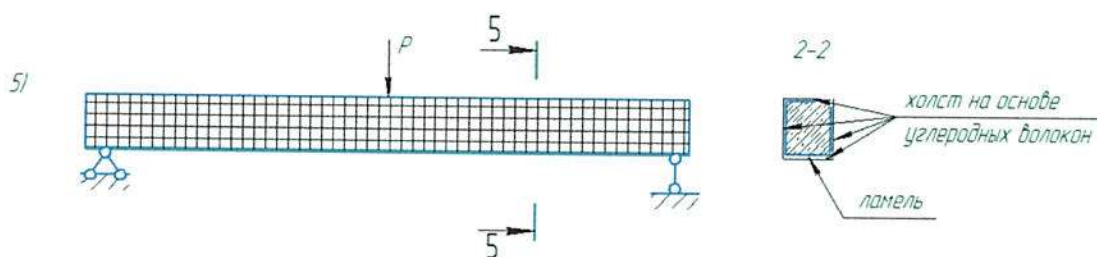


Рис.4.5. Испытание перемычек с усилением ламелью по нормальным сечениям и холстом по наклонным. Серия ПуV

4.2. Методика усиления

Методика усиления выполнялась в соответствии с рекомендациями концерна BASF. Поверхности железобетонных перемычек очищались от пыли и цементного молочка. Затем поверхности обрабатывались праймером (MBrace® Primer) состоящим из 2-х компонентной грунтовки, на эпоксидной основе для подготовки поверхности. Грунтовка пломбировала пористость и возможные воздушные пустоты и гарантировала хорошее сцепление последующих слоёв к поверхности. Температура материала перед смешением составляла 22 °С. Праймер наносился на поверхность бетона мягким валиком слоем 0,1 – 0,2 мм. Технические характеристики праймера приведены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства	Стандарты	Ед.изм.	Значения
Характеристика продукта MBRACE® PRIMER Comp. A MBRACE® PRIMER Comp. B	эпоксидная смола эпоксидный отвердитель		
Цвет	прозрачный		
Плотность после смешения (до +20. С)	UNE-EN ISO 2811-1	г/см3	1.08 ± 0.024
Содержание тв. в-ва		%	100
Температура применения (поверхность и материал)	-	°С	минимум +5 максимум +30
Прочность на изгиб (20°С) TS EN 196 (7 дней)	DIN 53504	Н/мм2	>20
Адгезионная прочность (7 дней) к бетону	UNE-EN ISO 178:2003 / A1: 2005	Н/мм2	> σ_{ic}
Температура нанесения		°С	+5 - +30
Время переработки при 7°С		час	8
21°С		час	2
32°С		мин	45
Толщина нанесения		мм	0,1 – 0,2
Адгезив наносить через		часы	12 – 24
Полный набор свойств при 20°С		сутки	7

После истечения 7 суток производилось усиление перемычек с использованием ламелей и холстов на основе однонаправленных углеродных волокон в соответствии со схемами, приведенными на рис. 4.2-4.5.

Технические характеристики клея MBRACE® LAMINATE ADESIVO на эпоксидной основе для стержней и ламината FRP (Fibers Reinforced Polymers) системы Mbrace® и клея ADESIVO SATURANT для холстов приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

MBRACE® LAMINATE ADESIVO комп. А	эпоксидная смола
MBRACE® LAMINATE ADESIVO комп. В	отвердитель
цвет	Серый
Плотность после смешения	1.58 ± 0.05 кг/л
вязкость	1500 – 2500 мПа.с
Прочность на сжатие(20°C) TS EN 196 (7 дней)	>40 Н/мм ²
Прочность на изгиб (20°C) TS EN 196 (7 дней)	>20 Н/мм ²
Адгезионная прочность (7 дней) к бетону	>3.0 Н/мм ²
к стали	>3.0 Н/мм ²
Температура применения	+5°C - +30°C
Время переработки (20°C)	30 мин
Полный набор заданных параметров при 20°C	7 дней

Таблица 4

MBRACE® ADESIVO SATURANT комп. А	Эпоксидная смола
MBRACE® ADESIVO SATURANT комп. В	отвердитель
цвет	Голубой
Плотность после смешения	1.02 ± 0.05 кг/л
вязкость	1500 – 2500 мПа.с
Прочность на сжатие(20°C) TS EN 196 (7 дней)	>60 Н/мм ²
Прочность на изгиб (20°C) TS EN 196 (7 дней)	>50 Н/мм ²
Адгезионная прочность к бетону (7 дней)	>3.0 Н/мм ²
Температура применения	+5°C - +30°C
Время переработки (20°C)	30 мин
Полный набор заданных параметров при 20°C	7 дней

4.3. Методика проведения испытания

Схема загрузки и расстановки приборов показана на рисунке 4.6. Испытания проводились на прессе РМ-20. Прогибы измерялись с использованием индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм. Деформации сжатия и растяжения фиксировались тензометрами Аистова на базе 100 мм. При этом фиксировались деформации как самого бетона так и деформации ламели (датчики ТА5 и ТА6). Загружение образцов проводили ступенями

равными 10% от предполагаемой разрушающей нагрузки с измерением показанием приборов в начале и конце ступени. Выдержка на каждой ступени составляла по 10 – 20 минут.

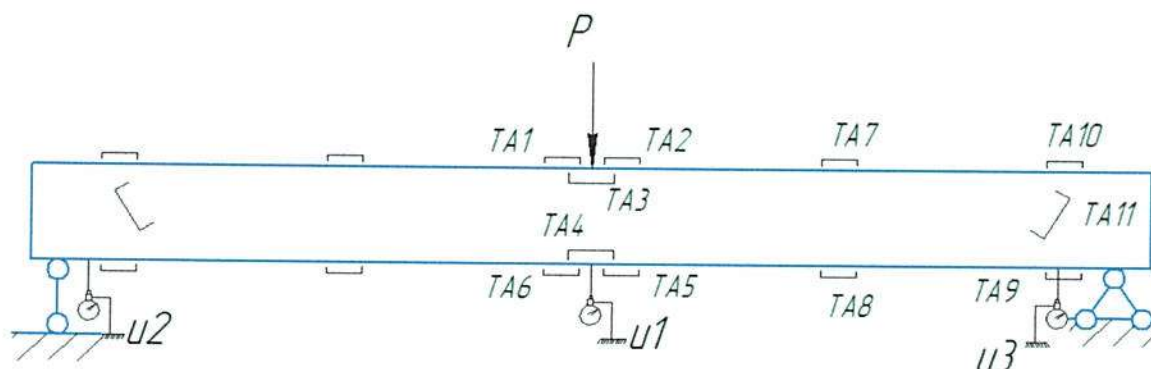


Рис. 4.6 Схема расстановки приборов
ТА – тензомер Аистова; И – индикатор часового типа;

5. Результаты испытаний

Обобщенные результаты испытаний сведены в таблицу 5. В таблице приведены и результаты расчета балок по методике «РУКОВОДСТВО ПО УСИЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ». Деформации и прогибы приведены на рис. 5.1-5.3.

Таблица 5

Результаты испытаний и расчета экспериментальных балок

Состояние плиты	Расчетное значение	Экспериментальное значение
Без усиления. Серия ПП		
Разрушающее усилие, по моменту, кН	4,2	4,0(3,8)
Разрушающее усилие по поперечной силе, кН	25,2	-
<i>Разрушение по нормальному сечению</i>		
С усилением: одна ламель внизу LamCF 165/3000/50x1,2. Серия ПуII		
Разрушающее усилие, по моменту, кН	40,7	-
Разрушающее усилие по поперечной силе, кН	25,2	-
Совместное действие момента и поперечной силы, кН	23,1	24,0 (25,8)
<i>Разрушение от совместного действия поперечной силы и момента при одновременном разрушении бетона сжатой зоны</i>		
С усилением: одна ламель внизу LamCF 165/3000/50x1,2 и наклонные ламели с шагом 50 мм. Серия ПуIII		
Разрушающее усилие, по моменту, кН	41,9	

Состояние плиты	Расчетное значение	Экспериментальное значение
Разрушающее усилие по поперечной силе в наклонном сечении, кН	358,3	-
Разрушение по моменту в наклонном сечении кН	35,6	36,5(35,0)
Разрушение от момента в наклонном сечении		
С усилением: одна ламель внизу LamCF 165/3000/50x1,2 и вертикальные ламели с шагом 50 мм Серия ПуIV		
Разрушающее усилие, по моменту, кН	41,9	
Разрушающее усилие по поперечной силе в наклонном сечении, кН	358,3	-
Разрушение по моменту в наклонном сечении кН	35,6	31,5(32,5)
Разрушение от среза бетона между ламелями		
С усилением: одна ламель внизу LamCF 165/3000/50x1,2 и тканью FibCF 230/49000.200q/5 одним слоем все сечение и двумя слоями в середине шириной 500 мм Серия ПуV		
Разрушающее усилие, по моменту, кН	45,7	-
Разрушающее усилие по поперечной силе, кН	89,3	-
Момент в наклонном сечении кН	29,2	30,2 (29,2)-

Примечание: в скобках приведены значения второго испытания

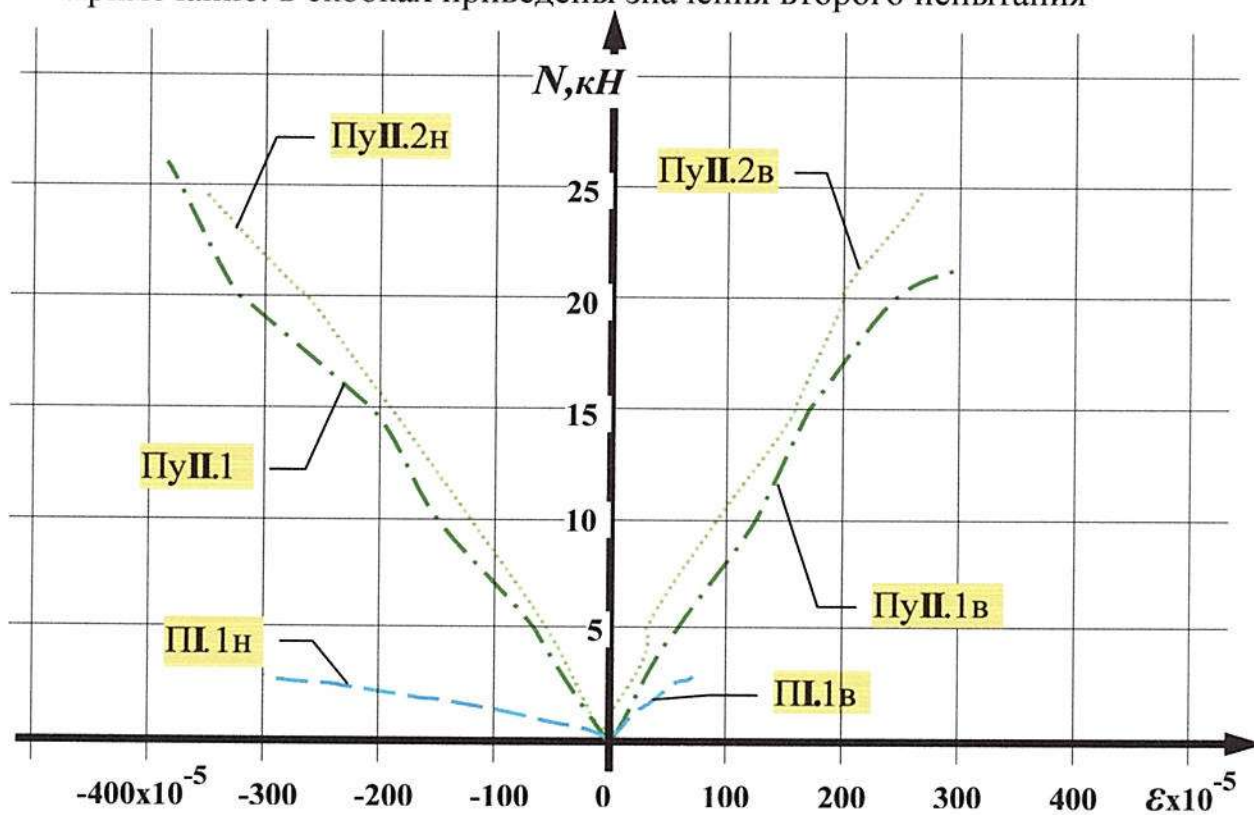


Рис.5.1. Относительные деформации нижних и верхних волокон балок

Пример : ПуII.1н – перемычка усиленная серии ПуII, образец 1, нижний датчик.

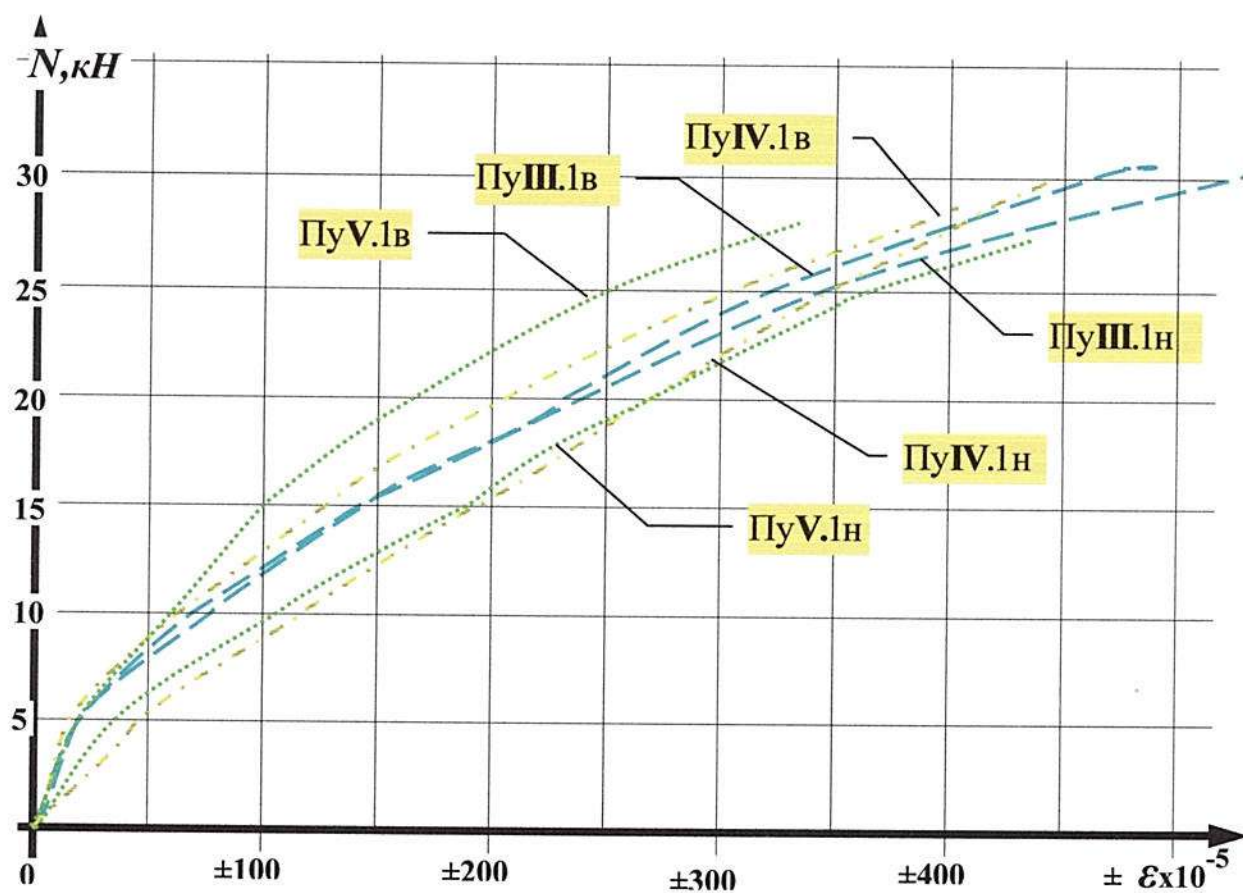


Рис.5.2. Относительные деформации нижних и верхних волокон балок.
Пример ПуV.1в — перемычка усиленная Серия ПуV, образец 1, верхний датчик.

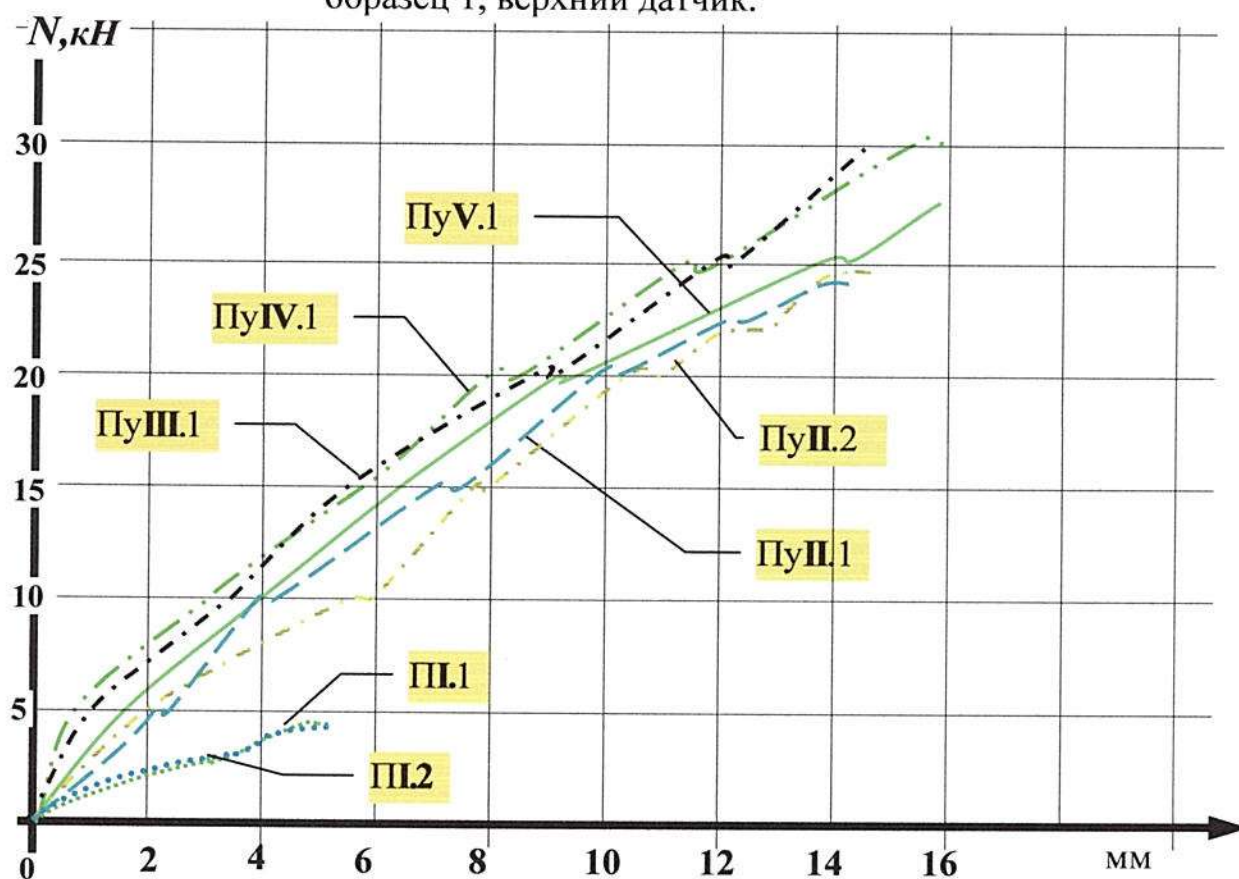


Рис. 5.3. Прогибы балок в середине пролета.

Разрушение всех усиленных образцов произошло от совместного действия момента и поперечной силы. Разрушение образцов усиленных на поперечную силу (рис. 4.3.-4.5) начиналось при нагрузке близкой к 25 кН и носило плавный характер. При этом происходило снижение нагрузки до 20 кН. В последующем происходило нарастание нагрузки с внезапным разрушением (хлопок) бетона. Отрыв ламели происходил после разрушения бетона. Фотографии образцов до и после разрушения приведены в приложении А.

6. Анализ результатов испытаний изгибаемых элементов и выводы

1. Результаты испытаний показали, что на всех этапах загрузжения (вплоть до разрушения) обеспечивалась совместная работа бетона и углепластика. В местах образования трещин деформации бетона и ламелей отличались между собой не более чем на 9%.
2. Напряжения в ламелях при разрушении составляли 1100 – 1200 мПа.
3. Наибольшие относительные деформации бетона сжатой зоны значительно превосходили деформаций при центральной сжатии и достигали значений $300...360 \times 10^{-5}$.
4. В процессе испытаний высота сжатой зоны уменьшалась. Распределение фибровых деформаций в нормальном сечении было близко к линейному.
5. Усиление образцов только по нормальному сечению привело к повышению их несущей способности в 6 раз. Дополнительное усиление образцов по наклонному сечению привело к увеличению несущей способности балок до 9 раз. Значительное увеличение несущей способности балок связано с изначальным низким процентом армирования.
6. Прогибы балок были пропорциональны действующей нагрузке.
7. Сравнение результатов испытаний и расчетов, выполненных по методике «РУКОВОДСТВО ПО УСИЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ», дало расхождение 10...13 %.

7. Результаты расчета плиты ПКЖ-13

Расчет плит производился по методике «РУКОВОДСТВО ПО УСИЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ». Расчет выполнялся без усиления и с последующим усилением композитными материалами системы MBrace концерна BASF. Предварительно, для уменьшения объема расчетов был проведен анализ усиления с использованием программы SKY-SAP разработанной концерном BASF. Ре-

результаты расчетов по программе приведены в таблице 6. Обобщенные результаты расчетов по методике Руководства приведены в таблице 7. Полные расчеты по Руководству приведены в Приложении.

Таблица 6

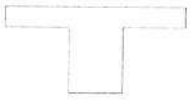
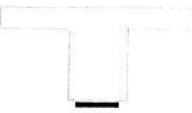
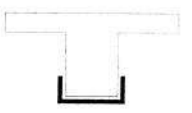
Результаты расчета плиты перекрытия по программе SKY-SAP

Состояние плиты	Расчетный момент, кНм	Расчетная поперечная сила, кН
Без усиления		
Усилия от внешней нагрузки проектные	97,6	66,4
Усилия от внешней нагрузки фактические	117,5	79,7
Расчетная несущая способность плиты	97,9(114)	145,9(152)
Усилия в полке плиты: от внешней нагрузки	0,61	6,9
Нагрузка, воспринимаемая полкой плиты	0,69	9,5
Усиление ламелями		
Снизу на ребре LamCF 165/3000/50x1,2	180,5(183,7)	145,9(152)
Снизу на ребре LamCF 165/3000/80x1,2	201,3	145,9
Снизу на ребре LamCF 165/3000/80x1,2, при износе продольной арматуры на 25%	151,4	145,9
Сбоку на ребре LamCF 165/3000/50x1,2	117,8	190
Усиление тканью		
FibCF 230/4900.200q/5 – один слой по нижней поверхности ребра и по боковой поверхности ребра на 250 мм	105,7	227
FibCF 300/4900.300q/5 - один слой по нижней поверхности ребра и по боковой поверхности ребра на 250 мм	127,7(170)	234,2(210)
FibCF 300/4900.300q/5- два слоя по нижней поверхности ребра и по боковой поверхности ребра на 50 мм	139	391
FibCF 300/4900.300q/5- три слоя по нижней поверхности ребра и два по боковой поверхности ребра на 100 мм при разрушении поперечной арматуры	159,7	269
FibCF 300/4900.300q/5- три слоя по нижней поверхности ребра и по боковой поверхности ребра на 150 мм при разрушении поперечной арматуры и наклонных трещинах в бетоне	183	391,7
Усиление тканью полки		
FibCF 230/4900.200q/5 – один слой по нижней поверхности	2,16	9,5

Примечание: в скобках приведены результаты расчетов по табл.7.

Таблица 7

Сводная таблица результатов расчетов по методике
 «РУКОВОДСТВО ПО УСИЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ»

Вариант усиления	Предельный момент, кН · м	Предельная поперечная сила, кН	Момент раскрытия трещин, кНм	Ширина раскрытия трещин, мм	Максимальный прогиб, мм	Схема усиления
Без усиления	114	152	74	0,12	20	
Усиление углепластиком-ламинатом, $t_f = 50 \text{ мм}$	183,7	152	74,4	0,243	33,9	
Усиление углепластиком-тканью Brase	170,5	210	74,6	0,19	30,4	

Результаты расчетов показывают эффективность усиления плиты по нормальным и наклонным сечениям с помощью системы MBrace концерна BASF. В большинстве рассмотренных случаев достаточно одного слоя материала для достижения поставленной цели усиления.

Заключение

1. Исходя из выполненных экспериментов и расчетов, система MBrace концерна BASF по расходу материалов эффективна при усилении изгибаемых конструкций.

2. Выполнение работ при усилении изгибаемых элементов со сложной геометрией (например, полки ребристых плит и т.д.), менее трудоемко с использованием холстов, по сравнению с ламелями.

3. Как показывают результаты сравнения испытаний и расчетов имеющаяся нормативная база концерна BASF правильно оценивает несущую способность усиленных изгибаемых элементов и позволяет запроектировать надежную систему усиления.

4. Для предварительного подбора усиления достаточно программы SKY-SAP. Для полной оценки несущей способности необходимо выполнять расчеты плит по методике «РУКОВОДСТВО ПО УСИЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ»

5. Излишнее усиление конструкций может привести к неожиданным схемам разрушения. Поэтому необходимо придерживаться рациональной степени усиления в диапазоне 10-60% от начальной несущей способности усиливаемой конструкции.

**Рекомендации по увеличению несущей способности плит
покрытия ПКЖ-13 с использованием системы MBrace
концерна BASF**

1. Вследствие высокой эффективности системы усиления **MBrace** при проектировании усиления конструкций плит покрытия необходим индивидуальный подход к каждой плите.
2. Проектирование усиления плит необходимо начинать с минимально тонкой ткани, постепенно увеличивая ее толщину и количество слоев.
3. Предварительный подбор вариантов усиления рекомендуется выполнять с помощью программы SKY-SAP разработанной концерном BASF.
4. Проектирование усиления при сохранном положении плит покрытия на здании можно выполнять и с полностью разрушенной основной арматурой при этом усиление обеспечивает несущую способность конструкции.
5. Не рекомендуется проектирование усиления конструкции на величину, превышающую 60% ее несущей способности. При увеличении этого порога необходимо проверять несущую способность конструкции на совместное действие момента и поперечной силы в опасных сечениях.
6. Для плиты покрытия **ПКЖ-13** в общем случае достаточно усиления по низу и боковой поверхности ребра одним слоем ткани FibCF 230/4900.200q/5. В местах образования снеговых мешков достаточно одного слоя ткани FibCF 300/4900.300q/5 или двух слоев FibCF 230/4900.200q/5.

Руководитель темы



/Ю.М. Круциляк/

Ответственный исполнитель темы

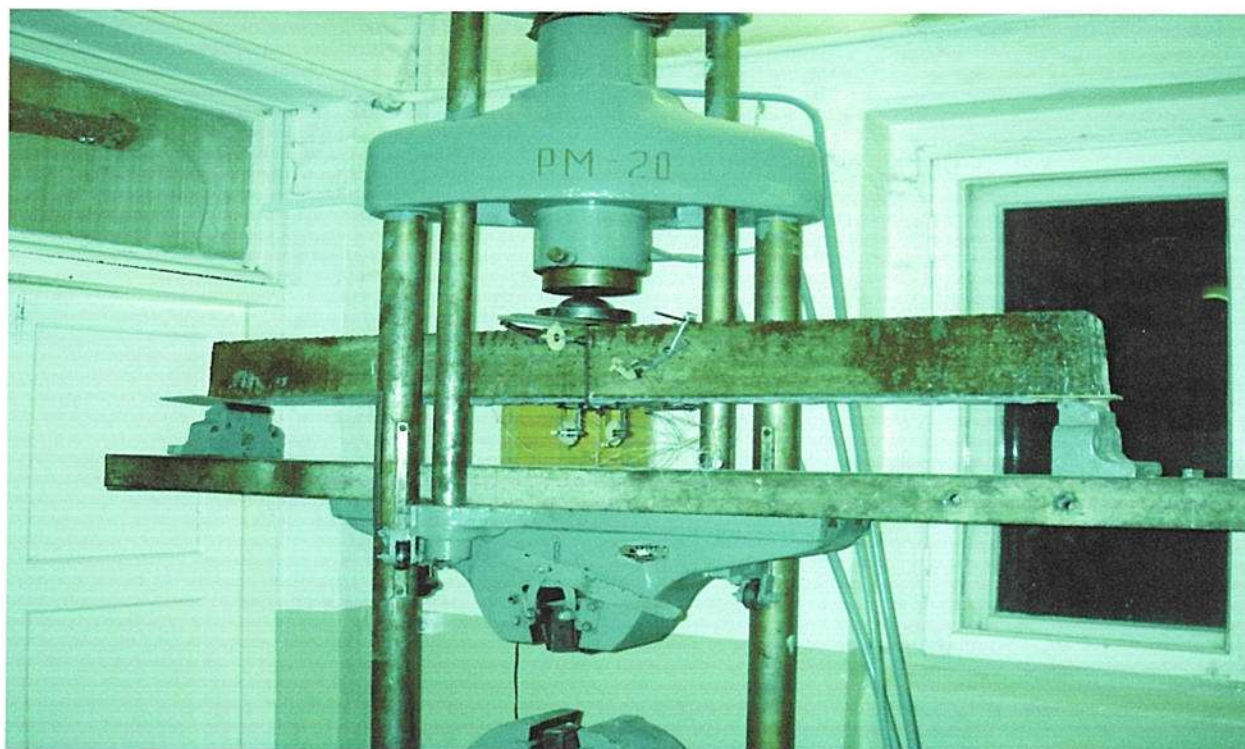


/А.А. Варламов/

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

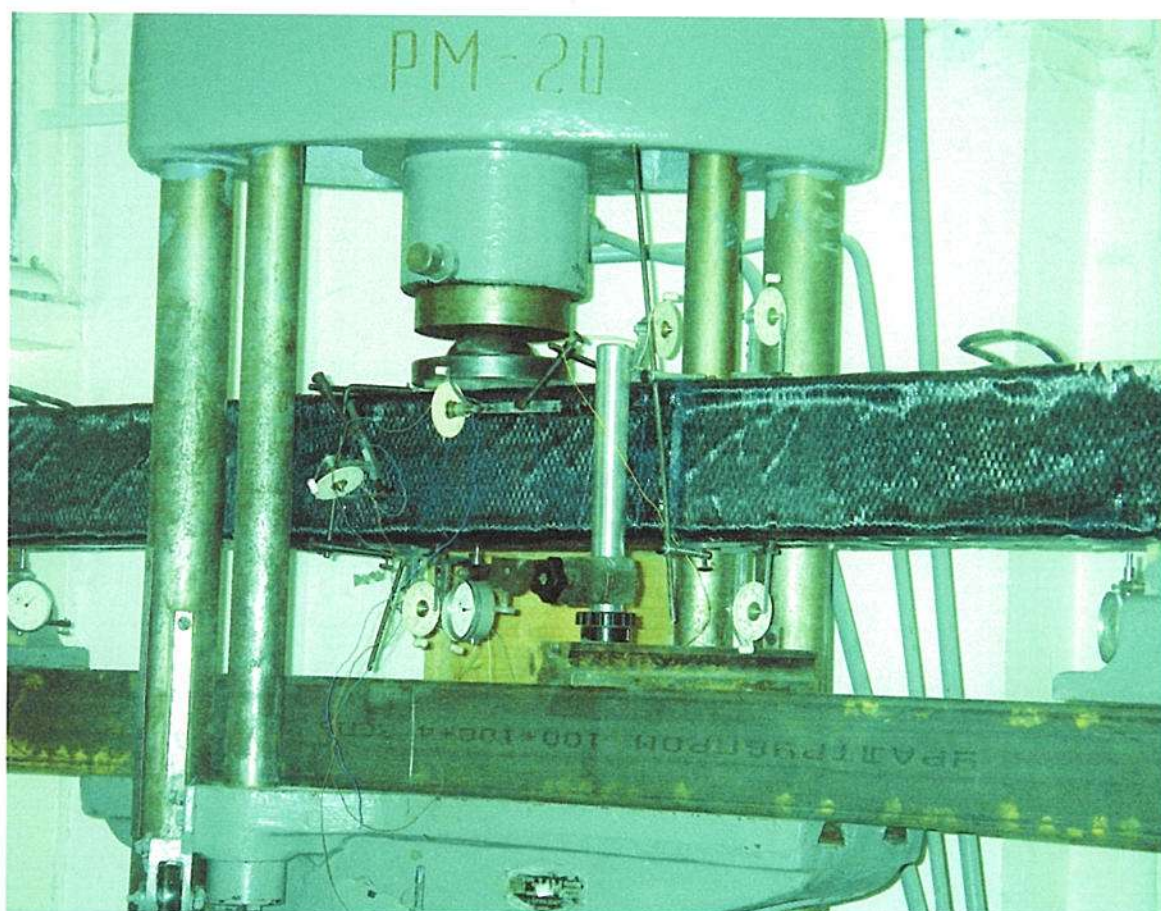
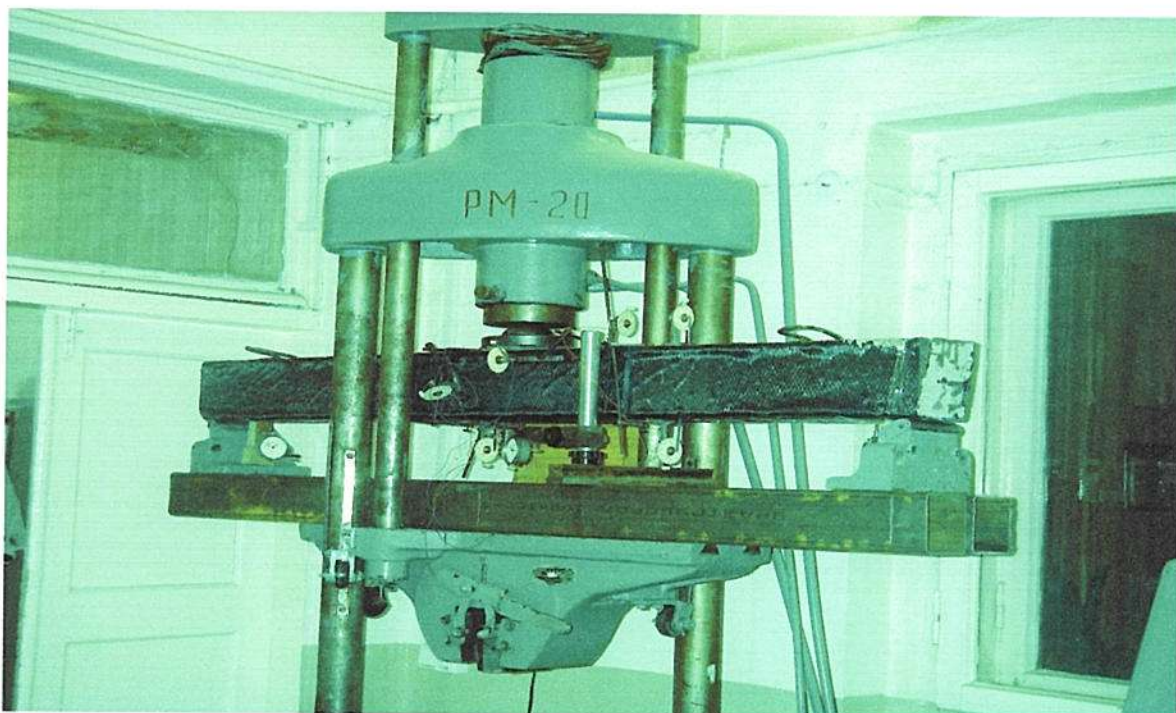
Фотографии опытных образцов



Общий вид перемычки перед испытанием (по схеме II)



Схема разрушения перемычки



Общий вид перемычки испытываемой по V схеме



Схема разрушения перемычек по III схеме усиления

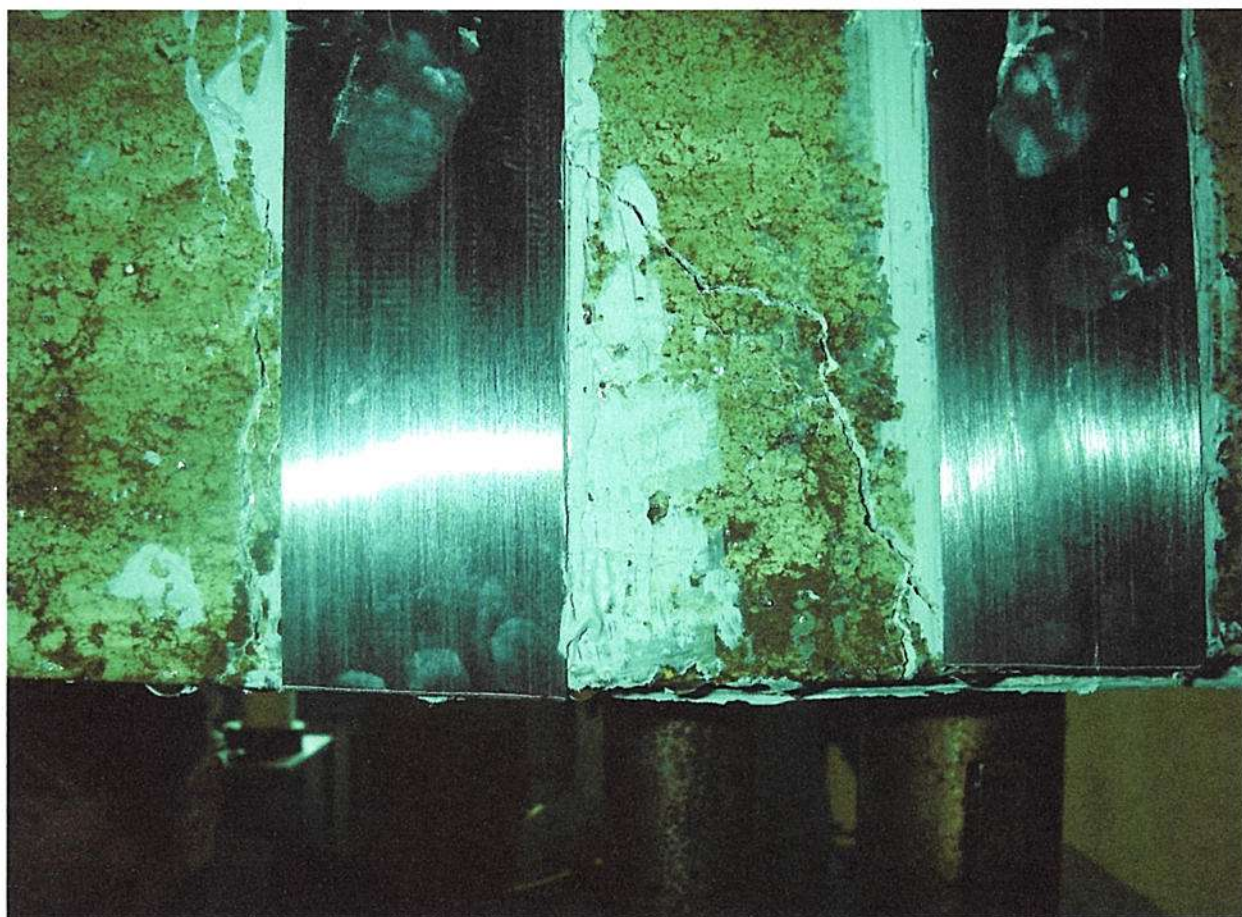


Схема разрушения перемычек по IV схеме усиления

РАСЧЕТ РЕБРИСТОЙ ПЛИТЫ ПОКРЫТИЯ

Характеристики материалов

Плита изготавливается из тяжелого бетона класса В30 по поточно-агрегатной технологии с электротермическим натяжением арматуры на упоры формы. Бетон подвергается тепловой обработке при атмосферном давлении. Расчетные характеристики бетона при коэффициенте условий работы $\gamma_{b2} = 0,9$:

$$R_b = 0,9 \cdot 17 = 15,3 \text{ МПа};$$

$$R_{b,ser} = 22 \text{ МПа};$$

$$R_{bt} = 0,9 \cdot 1,15 = 1,035 \text{ МПа};$$

$$R_{bt,ser} = 1,75 \text{ МПа},$$

$$E_b = 3,25 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Передаточная прочность бетона R_{bp} устанавливается не менее 11 МПа и такой, чтобы при обжатии уровень напряжения в бетоне составлял $\sigma_{bp} / R_{bp} \leq 0,95$;
принимаем: $R_{bp} = 0,8B = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ МПа}$.

Напрягаемая арматура продольных ребер плиты – из арматурной стали класса А – III (А-400) с расчетными характеристиками:

$$R_s = 355 \text{ МПа};$$

$$R_{sn} = R_{s,ser} = 400 \text{ МПа};$$

$$R_{sc} = 355 \text{ МПа},$$

$$E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Арматура полки плиты – обыкновенная арматурная проволока $\varnothing 5$ Вр-I (B500) ($R_s = 415 \text{ МПа}$).

Поперечная арматура каркасов продольных ребер - $\varnothing 5$ Вр-I (B500) ($R_{sw} = 300 \text{ МПа}$), продольная - $\varnothing 5$ Вр-I (B500) ($R_s = 415 \text{ МПа}$; $R_{sc} = 360 \text{ МПа}$).

Компоновка конструктивной схемы перекрытия

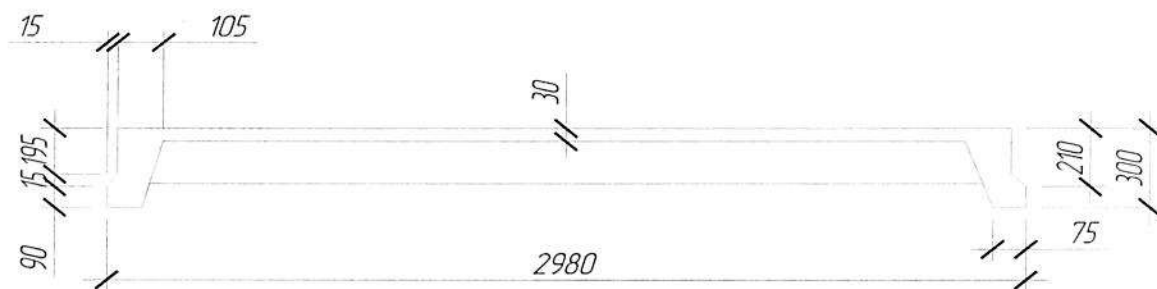


Рис. 1. Определение номинальных размеров ребристой панели

Номинальные размеры плиты в плане $b_n \times l_n = 3,0 \times 6,0$ м;
 высота поперечного сечения $h = 300$ мм;
 ширина продольных ребер понизу $b_l = 75$ мм,
 ширина продольных ребер поверху $b_l' = 105$ мм;
 толщина полки $h_f' = 30$ мм.

Конструктивные размеры сечения плиты (с учетом необходимых швов и зазоров между смежными плитами) составляют:

ширина понизу $b_{con} = 2980$ мм,
 ширина поверху $b_{con}' = 2980 - 2 \times 15 = 2950$ мм.

Конструктивная (проектная) длина панели с учетом зазоров $l_{con} = 5970$ мм.

Расчетный пролет панели $l_0 = 5900$ мм

Масса плиты 2,65 т

3. Определение геометрических характеристик приведенного сечения

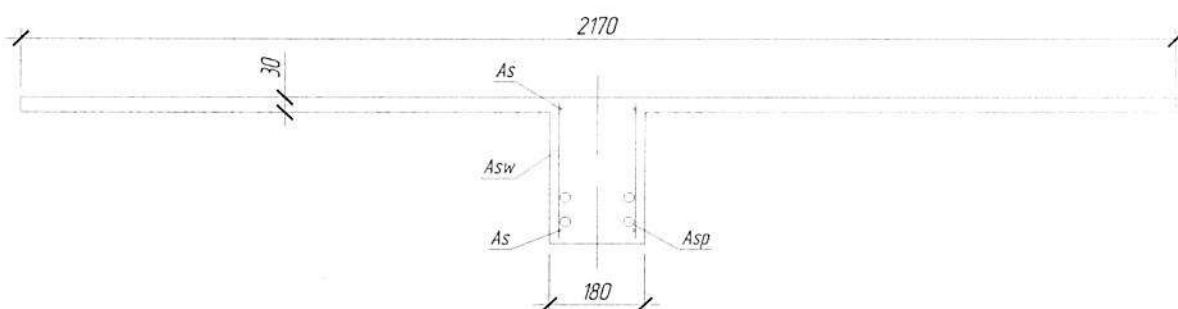


Рис. 2. Приведенное сечение плиты

$$A_{sp} = 4 \cdot 314 = 1256 \text{ мм}^2$$

$$A_s = 2 \cdot 19,6 = 39,2 \text{ мм}^2$$

$$A_s' = 2 \cdot 19,6 = 39,2 \text{ мм}^2$$

$$A_{sw} = 2 \cdot 19,6 = 39,2 \text{ мм}^2$$

Фактическое П-образное сечение плиты приводится к расчетному тавровому (рис. 2).

$$\frac{1}{6}l = \frac{1}{6}5970 = 995 \text{ мм}$$

$$\frac{1}{2}B = \frac{1}{2} \left(2980 - \frac{2(75+105)}{2} \right) = 1390 \text{ мм}$$

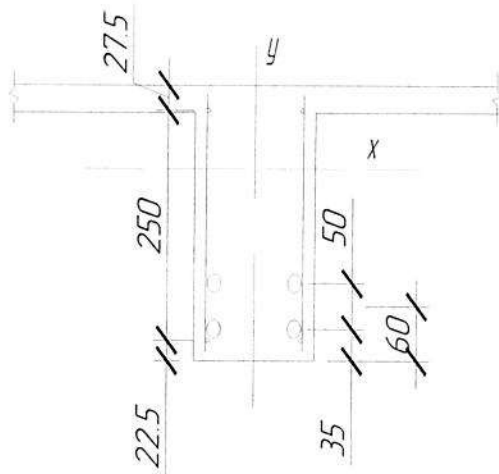
Принимаем из двух значений меньшее

$$b'_f = 995 \cdot 2 + 180 = 2170 \text{ мм}$$

$$b = 180 \text{ мм}$$

$$h = 300 \text{ мм}$$

$$h'_f = 30 \text{ мм}$$



1. Площадь приведенного сечения

$$A_{red} = A_b + \alpha \cdot A_{sp} + \alpha \cdot A_s + \alpha \cdot A'_s = b'_f \cdot h'_f + b(h - h'_f) + \alpha \cdot A_{sp} + \alpha \cdot A_s + \alpha \cdot A'_s = 2170 \cdot 30 + 180 \cdot (300 - 30) + 6,15 \cdot 1256 + 6,15 \cdot 39,2 + 6,15 \cdot 39,2 = 113700 + 7724,4 + 241,08 + 241,08 = 121906,6 \text{ мм}^2;$$

$$\text{где } \alpha = E_s / E_b = 2 \cdot 10^5 / 3,25 \cdot 10^4 = 6,15.$$

2. Статический момент сечения бетона относительно нижней грани плиты

$$S = 2170 \cdot 30 \times (300 - 0,5 \cdot 30) + 180 \cdot (300 - 30)^2 / 2 = 25114500 \text{ мм}^3.$$

3. Расстояние от центра тяжести приведенного сечения (Ц.Т.) до нижней грани:

$$y_0 = \frac{S + \alpha \cdot A_{sp} \cdot a_p + \alpha \cdot A_s \cdot a_s + \alpha \cdot A'_s \cdot (h - a'_s)}{A_{red}} = \frac{25114500 + 6,15 \cdot 1256 \cdot 60 + 6,15 \cdot 39,2 \cdot 22,5 + 6,15 \cdot 39,2(300 - 27,5)}{121906,6} = 210,4 \text{ мм}$$

$$y_{sp} = y_0 - a_{sp} = 210,4 - 60 = 150,4 \text{ мм}$$

$$y_s = y_0 - a_s = 210,4 - 20 = 190,4 \text{ мм}$$

$$y'_s = h - y_0 - a'_s = 300 - 210,4 - 15 = 74,6 \text{ мм}$$

4. Момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести

$$I_{red} = \frac{b_f (h_f')^3}{12} + b_f h_f' y_1^2 + \frac{b(h-h_f')^3}{12} + b(h-h_f') y_2^2 + \alpha \cdot A_{sp} \cdot y_{sp}^2 + \alpha \cdot A_s \cdot y_s^2 + \alpha \cdot A_s' \cdot y_s'^2 =$$

$$= \frac{2170 \cdot 30^3}{12} + 2170 \cdot 30 \cdot 74,6^2 + \frac{180 \cdot (300-30)^3}{12} + 180(300-30) \cdot 75,4^2 + 6,15 \cdot 1256 \cdot 150,4^2 + 6,15 \cdot 39,2 \cdot 74,6^2 = 11,235 \cdot 10^8 \text{ мм}^4$$

где $y_1 = h - y_0 - 0,5h_f' = 300 - 210,4 - 0,5 \cdot 30 = 74,6 \text{ мм}$;

$y_2 = y_0 - (h - h_f') / 2 = 210,4 - (300 - 30) / 2 = 75,4 \text{ мм}$.

Определение потерь предварительного напряжения

Потери определяют в соответствии с СП 52-102-2004, с коэффициентом точности натяжения $\gamma_{sp} = 1$. Для электротермического способа натяжения арматуры учитывают потери:

- первые – от релаксации напряжений в натянутой арматуре σ_1 и от быстронатекающей ползучести σ_6 ;
- вторые – от усадки σ_5 и ползучести σ_6 бетона.

Первые потери

1. $\sigma_1 = 0$ (для арматуры А 540 и ниже [1, п.2.27])

2. Проверка условия $\sigma_{bp} / R_{bp} \leq 0,95$, для чего вычисляем напряжение в бетоне на уровне центра тяжести приведенного сечения для стадии обжатия:

$$\sigma_{bp} = \frac{P_0}{A_{red}} + \frac{P_0 \cdot e_{op}}{I_{red}} \cdot y_0 = \frac{452160}{121906,6} + \frac{452160 \cdot 150,4}{11,235 \cdot 10^8} \cdot 150,4 = 15,23 \text{ МПа};$$

где $P_0 = A_{sp} \cdot (\sigma_{sp} - \sigma_1) = 1256 \cdot (360 - 0) = 452160 \text{ Н}$ – усилие обжатия с учетом потерь σ_1 от релаксации напряжений;

$$\sigma_{sp} = 0,9 R_{sn} = 0,9 \cdot 400 = 360 \text{ МПа (п.2.25 [1])}$$

$e_{op} = y_{sp} = 150,4 \text{ мм}$ – эксцентриситет усилия P_0 относительно центра тяжести приведенного сечения.

Тогда $\sigma_{bp} = 15,23 \text{ МПа} < 0,9 \cdot R_{bp} = 0,9 \cdot 24 = 21,6 \text{ МПа}$, т.е. требование п. 2.34 [1] выполняется.

3. Потери от усадки

$$\sigma_5 = 0,0002 \cdot 2 \cdot 10^5 = 40 \text{ МПа (для бетона класса В35 и ниже [1, п.2.31])}.$$

4. Потери от ползучести

Для определения потерь σ_6 от быстронатекающей ползучести вычисляют сжимающие напряжения в бетоне на уровне центра тяжести напрягаемой арматуры ($y = e_{op}$) от действия усилия обжатия P_0 с учетом разгружающего действия изгибающего момента M_{nw} от собственного веса плиты.

$$R_{bp} = 0,7 B = 0,7 \cdot 30 = 21 \text{ МПа}$$

По табл. 2.6. [1] $\varphi_{b,cr} = 2,5$

$$\alpha = E_s / E_b = 2 \cdot 10^5 / 3,25 \cdot 10^4 = 6,15$$

$$\mu = \frac{A_{sp}}{A} = \frac{1256}{113700} = 0,011$$

Вес плиты

$$q_w = \frac{2650 \cdot 0,01}{6} = 4,416 \text{ кН/м}$$

Момент от этой нагрузки в середине пролета

$$M = \frac{q_w \cdot l^2}{8} = \frac{4,416 \cdot 5,97^2}{8} = 19,67 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Напряжения в бетоне на уровне арматуры S (т.е. при $y_s = y_{sp} = 150,4$ мм)

$$\sigma_{bp} = \frac{P_0}{A_{red}} + \frac{P_0 \cdot e_{op} \cdot y_s}{I_{red}} - \frac{M \cdot y_s}{I_{red}} = \frac{452160}{121906,6} + \frac{452160 \cdot 150,4^2}{11,235 \cdot 10^8} - \frac{19,67 \cdot 10^6 \cdot 150,4}{11,235 \cdot 10^8} = 10,18 \text{ МПа};$$

Напряжения в бетоне на уровне арматуры S' (т.е. при $y_s = y'_s = 74,6$ мм)

$$\sigma'_{bp} = \frac{P_0}{A_{red}} - \frac{P_0 \cdot e_{op} \cdot y_s}{I_{red}} + \frac{M \cdot y_s}{I_{red}} = \frac{452160}{121906,6} - \frac{452160 \cdot 74,6^2}{11,235 \cdot 10^8} + \frac{19,67 \cdot 10^6 \cdot 74,6}{11,235 \cdot 10^8} = 0,16 \text{ МПа};$$

Потери от быстроснаходящей ползучести:

$$\sigma_6 = \frac{0,8 \cdot \varphi_{b,cr} \cdot \alpha \cdot \sigma_{bp}}{1 + \alpha \cdot \mu_{sp} \left(1 + \frac{e_{op} \cdot y_s \cdot A_{red}}{I_{red}} \right) (1 + 0,8 \varphi_{b,cr})} = \frac{0,8 \cdot 2,5 \cdot 6,15 \cdot 10,18}{1 + 6,15 \cdot 0,011 \left(1 + \frac{150,4^2 \cdot 121906,6}{11,235 \cdot 10^8} \right) (1 + 0,8 \cdot 2,5)} = 59,22 \text{ МПа}$$

$$\sigma'_6 = \frac{0,8 \cdot \varphi_{b,cr} \cdot \alpha \cdot \sigma'_{bp}}{1 + \alpha \cdot \mu_{sp} \left(1 + \frac{e_{op} \cdot y_s \cdot A_{red}}{I_{red}} \right) (1 + 0,8 \varphi_{b,cr})} = \frac{0,8 \cdot 2,5 \cdot 6,15 \cdot 0,16}{1 + 6,15 \cdot 0,011 \left(1 + \frac{74,6^2 \cdot 121906,6}{11,235 \cdot 10^8} \right) (1 + 0,8 \cdot 2,5)} = 1,96 \text{ МПа}$$

Вторые потери:

– для арматуры S равны:

$$\Delta \sigma_{sp2} = \sigma_5 + \sigma_6 = 40 + 59,22 = 99,22 \text{ МПа}$$

– для арматуры S' равны:

$$\Delta \sigma'_{sp2} = \sigma_5 + \sigma'_6 = 40 + 1,96 = 41,96 \text{ МПа}$$

Суммарная величина потерь напряжения:

$$\Delta \sigma_{sp1} + \Delta \sigma_{sp2} = 99,22 \text{ МПа} < 100 \text{ МПа, принимаем } 100 \text{ МПа}$$

Напряжение σ_{sp} с учетом всех потерь равно:

$$\sigma_{sp} = 360 - 100 = 260 \text{ МПа}$$

Усилие обжатия с учетом всех потерь

$$P = A_{sp} \cdot \sigma_{sp2} - \Delta \sigma_{sp2} \cdot A_s - \Delta \sigma'_{sp2} \cdot A'_s = 260 \cdot 1256 - 99,22 \cdot 39,2 - 41,96 \cdot 39,2 = 320335 \text{ Н} = \underline{320 \text{ кН}}.$$

Эксцентриситет усилия Р равен:

$$e_{op} = \frac{\sigma_{sp} \cdot A_{sp} \cdot y_{sp} - \sigma_s \cdot A_s \cdot y_s - \sigma'_s \cdot A'_s \cdot y'_s}{P} = \frac{100 \cdot 1256 \cdot 150,4 - 99,22 \cdot 39,2 \cdot 150,4 - 41,96 \cdot 39,32 \cdot 74,6}{320335} = 56,11 \text{ мм.}$$

Определение максимального изгибающего момента

$$h_0 = 300 - 60 = 240 \text{ мм}$$

$$R_b \cdot b'_f \cdot h'_f + R_{sc} \cdot A'_s = 15,3 \cdot 2170 \cdot 30 + 360 \cdot 39,2 = 1010142 \text{ Н} > \gamma_{s3} \cdot R_s \cdot A_{sp} + R_s \cdot A_s = 1 \cdot 355 \cdot 1256 + 415 \cdot 39,2 = 462148 \text{ Н}$$

Граница сжатой зоны проходит в полке, расчет производится как для прямоугольного сечения шириной b'_f (п.3.17,а [1]).

$$\xi_1 = \frac{R_s \cdot A_s + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b \cdot h_0} = \frac{355 \cdot 1256 + 415 \cdot 39,2 - 360 \cdot 39,2}{15,3 \cdot 2170 \cdot 240} = 0,056$$

По табл. 3.1 при классе арматуры А 400 и при $\frac{\sigma_{sp}}{R_s} = \frac{260}{360} = 0,722$ находим

$$\xi_R = 0,66.$$

Поскольку $\xi_1 = 0,056 < \xi_R = 0,66$, расчет ведем из условия (3.4), определяем высоту сжатой зоны x по формуле (3.5)

$$\frac{\xi_1}{\xi_R} = \frac{0,056}{0,66} = 0,085 < 0,6 \Rightarrow \gamma_{s3} = 1,1$$

$$x = \frac{\gamma_{s3} \cdot R_s \cdot A_{sp} + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b} = \frac{1,1 \cdot 355 \cdot 1256 + 415 \cdot 39,2 - 360 \cdot 39,2}{15,3 \cdot 2170} = 14,84 \text{ мм}$$

$$R_b \cdot b \cdot x(h_0 - 0,5 \cdot x) = 15,3 \cdot 2170 \cdot 14,84(240 - 0,5 \cdot 14,84) = 114 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм} = 114 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Расчет прочности наклонных сечений на действие поперечных сил

$$h_0 = 300 - 60 = 240 \text{ мм}$$

Поперечные стержни из проволоки 4Ø5 Вр-I (В500) ($R_{sw} = 300 \text{ МПа}$) $A_{sw1} = 4 \cdot 19,6 = 78,4 \text{ мм}^2$ с шагом 50 мм.

Вначале выясняют необходимость расчета поперечного армирования путем проверки условий:

$$Q_{\max} = Q_b + Q_{sw}$$

Интенсивность хомутов

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{S_w} = \frac{300 \cdot 78,4}{50} = 470,4 \text{ Н / мм,}$$

$$A_1 = b \cdot h = 180 \cdot 300 = 54000 \text{ мм}^2$$

$$\frac{P}{R_b \cdot A_1} = \frac{320335}{15,3 \cdot 54000} = 0,388$$

$$\varphi_n = 0,1 + 1,6 \cdot \frac{P}{R_b \cdot A_1} - 1,16 \left(\frac{P}{R_b \cdot A_1} \right)^2 = 1 + 1,6 \cdot 0,388 - 1,16 \cdot 0,388 = 1,171;$$

$$0,25 \cdot \varphi_n \cdot R_{bt} \cdot b = 0,25 \cdot 1,171 \cdot 1,035 \cdot 180 = 54,54 \text{ H / мм} < q_{sw} 58,8 \text{ H / мм},$$

$$M_b = 1,5 \cdot \varphi_n \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0^2 = 1,5 \cdot 1,171 \cdot 1,035 \cdot 180 \cdot 240^2 = 18,85 \cdot 10^6 \text{ H} \cdot \text{мм},$$

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2} R_{bt} b h_0^2}{c} = \frac{1,5 \cdot 1,035 \cdot 180 \cdot 240^2}{240} = 67068 \text{ H}$$

$$Q_{sw} = 0,75 q_{sw} \cdot c = 0,75 \cdot 470,4 \cdot 240 = 84672 \text{ H}.$$

$$Q_{\max} = Q_b + Q_{sw} = 67068 + 84672 = 151740 \text{ H} \approx \underline{152 \text{ кН}}$$

Расчет плиты по предельным состояниям второй группы
Рабочие чертежи плиты представлены в приложение А
Характеристики материала

Бетон

$$R_b = 0,9 \cdot 17 = 15,3 \text{ МПа} = 153 \text{ кг/см}^2$$

$$R_{bt} = 0,9 \cdot 1,15 = 1,035 \text{ МПа} = 10,35 \text{ кг/см}^2$$

$$R_{b,ser} = 22 \text{ МПа} = 220 \text{ кг/см}^2$$

$$R_{bt,ser} = 1,75 \text{ МПа} = 17,5 \text{ кг/см}^2$$

$$E_b = 32,5 \cdot 10^3 \text{ МПа} = 325000 \text{ кг/см}^2$$

Арматура

Напрягаемая Ø20 АIIIвт (А400)

$$R_{sp} = R_{scp} = 355 \text{ МПа} = 3550 \text{ кг/см}^2$$

$$R_{sp,ser} = 400 \text{ МПа} = 4000 \text{ кг/см}^2$$

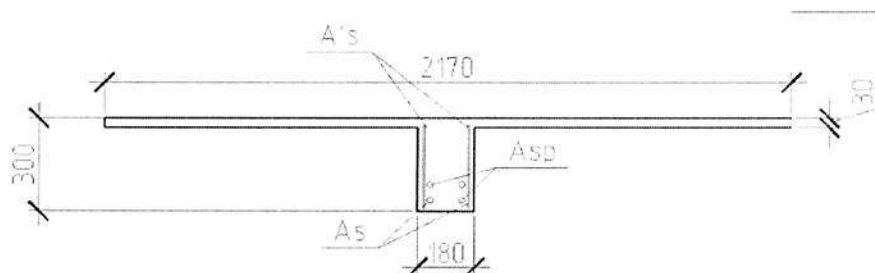
Ненапрягаемая Ø5 В-I (В500)

$$R_s = R_{sc} = 415 \text{ МПа} = 4150 \text{ кг/см}^2$$

$$R_{s,ser} = 500 \text{ МПа} = 5000 \text{ кг/см}^2$$

$$R_{sw} = 300 \text{ МПа} = 3000 \text{ кг/см}^2$$

Усилие предварительного обжатия $P = 32 \text{ тс}$



А).

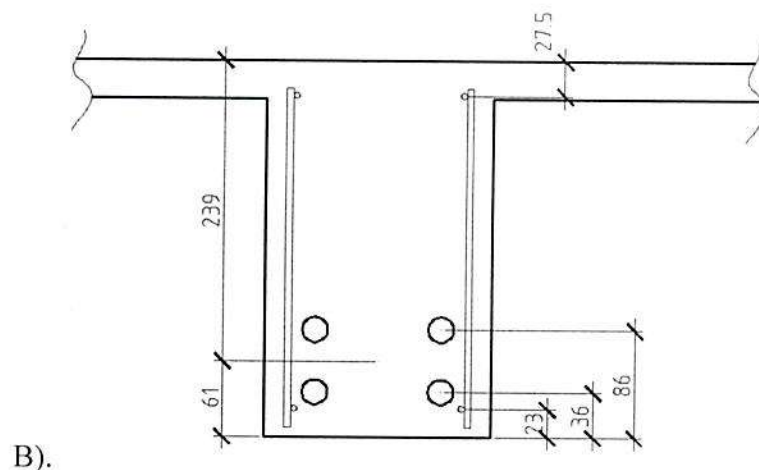


Рис.3. Приведенное сечение плиты

Характеристики сечения (геометрические характеристики сечения см. приложение Б)

$$F = 1137 \text{ см}^2$$

$$I_x(I_z) = 92622,1 \text{ см}^4$$

$$A_{sp} = 4 \cdot 3,14 = 12,56 \text{ см}^2$$

$$A_s = A'_s = 2 \cdot 0,196 = 0,392 \text{ см}^2$$

Коэффициент приведения арматуры к бетону

$$\alpha = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_b} = 6,15$$

Характеристики приведенного сечения к бетону

$$A_{red} = 1219,07 \text{ см}^2$$

$$I_{red} = 112350 \text{ см}^4$$

$$y = 21,04 \text{ см}$$

$$y_{sp} = e_{op} = y - a_p = 21 - 6,1 = 15,04 \text{ см}$$

$$y_s = y - a_s = 19,04 \text{ см}$$

$$y'_s = y - a'_s = 7,46 \text{ см}$$

Момент сопротивления приведенного сечения

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y} = \frac{112350}{21,04} = 5340 \text{ см}^3$$

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до ядровой точки

$$r = \frac{W_{red}}{A_{red}} = \frac{5340}{1219,07} = 4,38 \text{ см}$$

Расчет по образованию трещин

Момент образования трещин

Момент образования трещин предварительно напряженных изгибаемых элементов без учета неупругих деформаций растянутого бетона определяют как для сплошного упругого тела по формуле

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W \pm P e_{lp},$$

$e_{лр} = e_{ор} + r$ - расстояние от точки приложения усилия предварительного обжатия P до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется;

$e_{ор}$ - то же, до центра тяжести приведенного сечения.

$$M_{crz} = 1,3 \cdot 5340 \cdot 17,5 + 32000 \cdot (14,94 + 4,38) = 7,4 \text{ т} \cdot \text{м} = 74 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Ширина раскрытия нормальных трещин

$$\alpha_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \Psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s$$

где σ_s - напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки

l_s - базовое (без учета влияния вида поверхности арматуры) расстояние между смежными нормальными трещинами;

Ψ_s - коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами; принят $\Psi_s = 1$;

φ_1 - коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки, принят 1,4 - при продолжительном действии нагрузки;

φ_2 - коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры, принят равным 0,5 - для арматуры периодического профиля и канатной;

φ_3 - коэффициент, учитывающий характер нагружения, принят равным 1,0 - для элементов изгибаемых и внецентренно сжатых;

Напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки определяется по формуле:

$$\sigma_s = \frac{M_s / z - P}{A_{sp} + A_s},$$

где z - плечо внутренней пары сил, равное $z = \zeta \cdot h_0$, а коэффициент ζ определяется по табл.4.2 [2];

$$M_s = M + P e_{sp}$$

$$e_{sp} = a_p - a_s = 6,1 - 2,25 = 3,85 \text{ см}$$

$$M_s = (11,4 \cdot 10^5 + 32000 \cdot 3,85) \cdot 10^{-5} = 11,52 \text{ тм}$$

$$\zeta = f(\varphi_f, \mu a_{s1}, e_s / h_0)$$

$$\varphi_f = \frac{(b_f' - b) h_f' + a_{s1} A_{sp}' + a_{s1} A_s'}{b h_0}; e_s = \frac{M_s}{P}; \mu a_{s1} = \frac{a_{s1} A_{sp}' + a_{s1} A_s'}{b h_0}$$

$$\varphi_f = \frac{(217 - 18) \cdot 3 - 13,64 \cdot 0,392}{18 \cdot 24,02} = 1,39;$$

$$\frac{e_s}{h_0} = \frac{11,52 \cdot 10^3}{24,02 \cdot 32000} = 1,5;$$

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}} = \frac{2 \cdot 10^6}{146666,7} = 13,64;$$

$$E_{b,red} = \frac{E_{b,ser}}{\varepsilon_{b,red}} = \frac{220}{0,0015} = 146666,7 \text{ кз/см}^2;$$

$$\mu\alpha_s = \frac{6,15 \cdot (12,56 + 0,392)}{18 \cdot 24,02} = 0,409$$

По таблице 4.2. [2] определяем:

при $\mu\alpha_s = 0,3 - \zeta = 0,82$

при $\mu\alpha_s = 0,5 - \zeta = 0,81$

отсюда при $\mu\alpha_s = 0,409 - \zeta = 0,815$

$$z = \zeta \cdot h_0 = 0,815 \cdot 24 = 19,56 \text{ см}$$

$$\sigma_s = \frac{\frac{(11,52 \cdot 10^3)}{19,56} - 32000}{12,56 + 0,392} = 2076,6 \text{ кз/см}^2 < R_{s,ser} - \sigma_s = 5000 - 2076,6 = 2923,4 \text{ кз/см}^2$$

Значение базового расстояния между трещинами l_s определяют по формуле:

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s + A_{sp}} d_s$$

где A_{bt} - площадь сечения растянутого бетона.

При этом высота растянутой зоны бетона принимается не менее $2a$ и не более $0,5h$.

Для таврового сечения высоту растянутой зоны определяем по формуле

$$y_1 = k \cdot y_0$$

где y_0 - высота растянутой зоны бетона, определяемая как для упругого материала по приведенному сечению при коэффициенте приведения арматуры к бетону $\alpha = E_s/E_b$;

k - поправочный коэффициент, учитывающий неупругие деформации растянутого бетона и равный, для таврового сечения с полкой в сжатой зоне - 0,9.

$$y_0 = \frac{S_{red}}{A_{red} + P / R_{bt,ser}}$$

где S_{red} - статический момент приведенного сечения относительно растянутой грани;

$$S_{red} = 1137 \cdot 22,0884 + 6,15 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 3,6 + 6,15 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 8,6 + 6,15 \cdot 0,392 \cdot 2,25 + 6,15 \cdot 0,392 \cdot (30 - 2,75) = 24464,8 \text{ см}^3;$$

$$y_0 = \frac{24464,8}{1219,07 + \frac{32000}{17,5}} = 8,027;$$

$$y_f = 0,9 \cdot 8,027 = 7,22 < 2a = 2 \cdot 6,1 = 12,2 \text{ см}$$

Принимаем $y_f = 12,2 \text{ см} < 0,5h = 15 \text{ см}$.

Площадь растянутого бетона

$$A_{b,r} = 12,2 \cdot 18 = 219,6 \text{ см}^2.$$

Так как диаметры стержней растянутой арматуры различны значение d_s принимается равным:

$$d_s = \frac{n_1 d_{s1}^2 + \dots + n_k d_{sk}^2}{n_1 d_{s1} + \dots + n_k d_{sk}},$$

где $d_{s1}, \dots, d_{sk}$ - диаметры стержней растянутой арматуры;
 $n_1, \dots, n_k$ - число стержней с диаметрами соответственно $d_1, \dots, d_k$.

$$d_s = \frac{2 \cdot 0,5^2 + 4 \cdot 2^2}{2 \cdot 0,5 + 4 \cdot 2} = 1,83 \text{ см};$$

$$l_s = 0,5 \frac{219,6}{0,392 + 12,56} \cdot 1,83 = 15,51 \text{ см} < 40d_s = 40 \cdot 1,83 = 73,2 \text{ см}$$

$$l_s = 15,51 \text{ см} < 40 \text{ см}$$

Ширина раскрытия трещин:

$$a_{cr,c} = 0,5 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot \frac{2076,6}{2 \cdot 10^6} \cdot 15,51 = 0,12 \text{ мм} < [a_{cr,c} = 0,3 \text{ мм}]$$

Расчет по деформациям

Прогиб

Кривизна изгибаемого предварительно напряженного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне.

Для двутаврового сечения при $h'f=3 \text{ см} \leq 0,3h_0=0,3 \cdot 24=7,2 \text{ см}$ и $a's=2,75 \text{ см} < 0,2h_0=0,2 \cdot 24=4,8 \text{ см}$ кривизну определяем по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{\varphi_c b h_0^3 E_{b,red}}$$

где φ_c - коэффициент, определяемый по табл.4.5[2] в зависимости от φ_f , μa_{s2} , e_s/h_0 .

$$\varphi_f = \frac{(b_f' - b)h_f' - (A_{sp}' + A_s)\alpha_{s1}}{b h_0^2}; \quad \frac{e_s}{h_0} = \frac{M_s}{P h_0}$$

$$\alpha_{s2} = \frac{E_s}{\psi_s E_{b,red}}; \quad \mu = \frac{A_{sp} + A_s}{b h_0}$$

$$\varphi_f = \frac{(217 - 18) \cdot 3 - 13,64 \cdot 0,392}{18 \cdot 24,02} = 1,37;$$

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{\sigma_{s,ser}}{\sigma_s}$$

Где $\sigma_{s,ser}$ определяется также как и для σ_s , только для момента M_{ser}

$$M_s = (7,4 \cdot 10^5 + 32000 \cdot 3,85) \cdot 10^{-5} = 8,632 \text{ тм}$$

$$\frac{e_s}{h_0} = \frac{8,632 \cdot 10^5}{24,02 \cdot 32000} = 1,12;$$

По таблице 4.2. [2] определяем для $\frac{e_s}{h_0} = 1,1; :$

$$\text{при } \mu\alpha_s = 0,3 - \zeta = 0,83$$

$$\text{при } \mu\alpha_s = 0,5 - \zeta = 0,82$$

$$\text{отсюда при } \mu\alpha_s = 0,409 - \zeta = 0,825$$

для $\frac{e_s}{h_0} = 1,2; :$

$$\text{при } \mu\alpha_s = 0,3 - \zeta = 0,82$$

$$\text{при } \mu\alpha_s = 0,5 - \zeta = 0,81$$

$$\text{отсюда при } \mu\alpha_s = 0,409 - \zeta = 0,815$$

$$\text{Тогда для } \frac{e_s}{h_0} = 1,12; \mu\alpha_s = 0,409; \varphi_f > 0,8 - \zeta = 0,823$$

$$z = \zeta \cdot h_0 = 0,823 \cdot 24 = 19,752 \text{ см}$$

$$\sigma_{s,ser} = \frac{\frac{(8,632 \cdot 10^5)}{19,752} - 32000}{12,56 + 0,392} = 903,5 \text{ кг/см}^2 < R_{s,ser} - \sigma_s = 5000 - 903,5 = 4096,5 \text{ кг/см}^2$$

$$\psi_s = 0,85 - 0,8 \frac{903,5}{2076,6} = 0,65$$

$$\alpha_{s2} = \frac{2 \cdot 10^6}{0,65 \cdot 146666,7} = 20,98;$$

$$\mu\alpha_{s2} = \frac{(12,56 + 0,392) \cdot 20,98}{18 \cdot 24} = 0,63$$

Находим φ_c при $\varphi_f = 1,37; \mu\alpha_{s2} = 0,63; e_s/h_0 = 1,5$

$$\text{при } \mu\alpha_s = 0,6 - \varphi_c = 0,56$$

$$\text{при } \mu\alpha_s = 0,7 - \varphi_c = 0,59$$

$$\text{отсюда при } \mu\alpha_s = 0,63 - \varphi_c = 0,569.$$

Кривизна изгибаемого элемента:

$$\frac{1}{r} = \frac{11,4 \cdot 10^5}{0,569 \cdot 18 \cdot 24^3 \cdot 146666,7} = 0,000055;$$

Прогиб элемента:

Для свободно опертых или консольных элементов максимальный прогиб определяют по формуле

$$f = S^2 \left(\frac{1}{r} \right)_{\max},$$

где S - коэффициент, зависящий от расчетной схемы элемента и вида нагрузки, определяемый по правилам строительной механики; при действии равномерно распределенной нагрузки значение S принят равным: $\frac{5}{48}$ - для свободно опертой балки и $\left(\frac{1}{r} \right)_{\max}$ - полная кривизна в сечении с наибольшим изгибающим моментом от нагрузки, при которой определяют прогиб, вычисляемая согласно п.4.3.3[1].

$$f_{\text{ult}} = \frac{5}{48} l^2 \cdot \left(\frac{1}{r} \right)_{\max} = \frac{5}{48} 591^2 \cdot 0,000055 = 2 \text{ см} < \left[\frac{6000}{150} = 4 \text{ см} \right]$$

Усиление плиты арматурой ФАП

Усиление углепластиком -ламинатом

Характеристика материала

Марка фирмы производителя	Тип	Т олщи- на, мм	Ш ири-на, мм	, ГПа	k , МПа
MBrace®LamCF165/3000.50x 1,2.100m	высоко- прочное угле- родное	1 2	5 0	65	000

Расчетная прочность на растяжение ФАП с учётом коэффициентов надежности условия работы $C_E=0,95$ и $\gamma_f = 1,1$, определяется по выражению:

$$R_R = \frac{C_E R_f}{\gamma_f},$$

$$R_{fz} = \frac{0,95 \cdot 3000}{1,1} = 2454,5 \text{ МПа} = 24545 \text{ кг/см}^2$$

а расчетная деформация растяжения при $\gamma_f = 1,1$:

$$\varepsilon_R = \frac{C_E \varepsilon_f}{\gamma_f}$$

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = \frac{3000}{165000} = 0,018$$

$$\varepsilon_{fz} = \frac{0,95 \cdot 0,018}{1,1} = 0,015$$

Расчетные значения модуля упругости при растяжении E_{ft} принимаются равными их нормативным значениям:

$$E_f = E_f = \frac{R_f}{\varepsilon_f}$$

Коэффициента условия работы ФАП k_m ,

$$k_m = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{60 \varepsilon_{f,2}} \left(1 - \frac{n E_f t_f}{360000} \right) \leq 0,9 \\ \frac{1}{60 \varepsilon_{f,2}} \left(\frac{360000}{n E_f t_f} \right) \leq 0,9 \end{array} \right\}$$

Первое выражение используется при $n E_f t_f < 180000$

$$n \cdot E_f \cdot t_f = 1 \cdot 165000 \cdot 0,12 = 19800 < 180000;$$

$$k_m = \frac{1}{60 \cdot 0,015} \left(1 - \frac{19800}{360000} \right) = 1,05 > 0,9 \rightarrow k_m = 0,9$$

Допустимые предельные расчетные деформации ФАП определяются:

$$\varepsilon_{fu} \leq k_m \varepsilon_{ft}$$

$$\varepsilon_{fu} = 0,9 \cdot 0,015 = 0,0135$$

Допустимый уровень напряжений в ФАП определяется по закону Гука:

$$\sigma_{fu} \leq E_f \varepsilon_{fu} \quad R_{fu} = \sigma_{fu}$$

Расчетная прочность внешнего армирования ФАП R_{fu} принимается равной значению σ_{fu} .

$$\sigma_{fu} = R_{fu} = 165000 \cdot 0,015 = 2227,5 \text{ МПа} = 22275 \text{ кг/см}^2$$

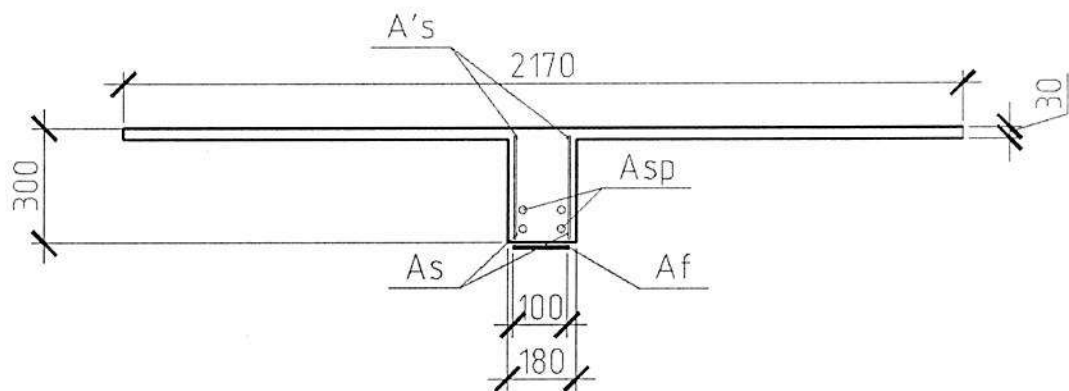


Рис.4. Схема усиления приведенного сечения

Усилятся продольные ребра плиты углепластиком -ламинатом шириной 50мм.

Характеристики поперечного сечения ФАП:

$$t_f = 1,2 \text{ мм}; A_f = 50 \cdot 2 \cdot 0,12 = 1,2 \text{ см}^2.$$

Расчет плиты по предельным состояниям второй группы

Относительная высота сжатой зоны $\zeta_1 = 0,056$;

Значение граничной высоты сжатой зоны $\zeta_R = 0,66$;

Значение $\zeta_{f,R}$ определяют по формуле:

$$\zeta_{f,R} = \frac{x_{f,R}}{h} = \frac{\omega}{1 + \frac{R_{fu}}{\varepsilon_{du1} E_f} \left(1 - \frac{\omega}{1,1} \right)}$$

ε_{bu1} принимается равным ε_{b2} для продолжительного действия нагрузки, в соответствии с п. 5.1.12 [3], $\varepsilon_{bu1} = \varepsilon_{b2} = 0,0048$;

ω принимается равным $\omega = 0,85 - 0,008R$

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot 15,3 = 0,7276;$$

$$\varepsilon_{fR} = \frac{0,7276}{1 + \frac{2227,5}{4,8 \cdot 10^{-3} \cdot 165000} \left(1 - \frac{0,7276}{1,1}\right)} = 0,373$$

$\zeta_1 < \zeta_{fR} < \zeta_R$ - разрушение усиленного сечения происходит по арматуре и ФАП

$$x = \frac{R_{fu}A_f + R_{sp}A_{sp} + R_sA_s + R_{sc}A_s}{R_b b}$$

$$x = \frac{22275 \cdot 1,2 + 3550 \cdot 12,56}{153 \cdot 217} = 2,15 \text{ см} < a_s = 2,75 \text{ см}$$

$$x = \frac{R_{fu}A_f + R_{sp}A_{sp} + R_sA_s + R_{sc}A_s}{R_b b_f}$$

$$x = \frac{22275 \cdot 1,2 + 3550 \cdot 12,56 + 2 \cdot 0,392 \cdot 4150}{153 \cdot 217} = 2,25 \text{ см} < a_s = 2,75 \text{ см}$$

тогда предельный изгибающий момент равен:

$$M_{ult} = R_{fu}A_f(h - 0,5x) + R_{sp}A_{sp}(h_0 - 0,5x) + R_sA_s(h - a_s - 0,5x) + R_{sc}A_s(a_s - 0,5x)$$

$$\begin{aligned} M_{ult} &= 22275 \cdot 1,2 \cdot (30 - 0,5 \cdot 2,25) + 4150 \cdot 0,392 \cdot (30 - 2,25 - 0,5 \cdot 2,25) + 3550 \cdot \\ &\quad \cdot 12,56 \cdot (24 - 0,5 \cdot 2,25) + 4150 \cdot 0,392 \cdot (2,75 - 0,5 \cdot 2,25) = 183,7 \text{ кНм} \\ &= 183,7 \text{ кНм} \end{aligned}$$

Расчет плиты по предельным состояниям второй группы

Характеристики сечения (геометрические характеристики сечения см. приложение Б)

$$F = 1137 \text{ см}^2$$

$$I_x(I_z) = 92622,1 \text{ см}^4$$

$$A_{sp} = 4 \cdot 3,14 = 12,56 \text{ см}^2$$

$$A_s = A'_s = 2 \cdot 0,196 = 0,392 \text{ см}^2$$

Коэффициент приведения арматуры к бетону

$$\alpha = \frac{E_s}{E_b} = 6,15$$

Коэффициент приведения ФАП к бетону

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_b} = \frac{165000}{3,25 \cdot 10^4} = 5,08$$

Характеристики приведенного сечения к бетону

$$A_{red} = 1137 + (12,56 + 2 \cdot 0,392) \cdot 6,15 + 1,2 \cdot 5,08 = 1225,16 \text{ см}^2$$

$$\begin{aligned} S_{red} &= 1137 \cdot 22,0884 + [2 \cdot 3,14 \cdot 3,6 + 2 \cdot 3,14 \cdot 8,6 + 0,392 \cdot 2,25 + 0,392 \cdot (30 - 2,75)] \\ &\quad \cdot 6,15 + 1,2 \cdot 0,06 \cdot 5,08 = 25656,46 \text{ см}^3 \end{aligned}$$

$$y = \frac{S_{red}}{A_{red}} = \frac{25656,45}{1225,16} = 20,94 \text{ см}$$

Момент инерции и площадь приведенного сечения рассчитывается с учетом внешней арматуры ФАП:

$$I_{red} = I + I_s \alpha_s + I'_s \alpha'_s + I_f \alpha_f$$

$$A_{red} = A + A_s \alpha_s + A'_s \alpha'_s + A_f \alpha_f$$

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_s}$$

Момент инерции приведенного сечения

$$\begin{aligned} I_{red} &= 92622,1 + 1137(22,0884 - 20,94)^2 + 6,15 \\ &\quad \cdot [2 \cdot 3,14 \cdot (20,94 - 3,6)^2 + 2 \cdot 3,14 \cdot (20,94 - 8,6)^2 + 0,392 \\ &\quad \cdot (20,94 - 2,25)^2 + 0,392(30 - 20,94 - 2,75)^2] + 1,2(20,94 - 0,06)^2 \cdot 5,08 \\ &= 115259,07 \text{ см}^4 \end{aligned}$$

Момент сопротивления приведенного сечения

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y} = \frac{115259,07}{20,94} = 5504,25 \text{ см}^3$$

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до ядровой точки

$$r = \frac{W_{red}}{A_{red}} = \frac{5504,25}{1225,16} = 4,49 \text{ см.}$$

Расчет по образованию трещин

Момент образования трещин

Момент образования трещин предварительно напряженных изгибаемых элементов без учета неупругих деформаций растянутого бетона определяют как для сплошного упругого тела по формуле

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W \pm P e_{лр},$$

$e_{лр} = e_{ор} + r$ - расстояние от точки приложения усилия предварительного обжатия P до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется;

$e_{ор}$ - то же, до центра тяжести приведенного сечения.

$$e_{ор} = y - a_p = 20,94 - 6,1 = 14,84 \text{ см}; e_{лр} = 14,84 + 4,49 = 19,33 \text{ см}$$

$$M_{crc} = 1,3 \cdot 5504,25 \cdot 17,5 + 32000 \cdot 19,33 = 7,44 \text{ т} \cdot \text{м} = 74,4 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Ширина раскрытия нормальных трещин

$$\alpha_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \Psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s$$

$$\Psi_s = 1; \varphi_1 = 1,4; \varphi_2 = 0,5; \varphi_3 = 1,0$$

Напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки определяется по формуле:

$$\sigma_s = \frac{M_z / z - P}{A_{сп} + A_s + A_f}$$

где z - плечо внутренней пары сил, равное $z = \zeta \cdot h_0$, а коэффициент ζ

определяется по табл.4.2 [2];

$$M_s = M + P e_{sp}$$

$$e_{sp} = a_p - a_s = 6,1 - 2,25 = 3,85 \text{ см}$$

$$M_s = (18,37 \cdot 10^5 + 32000 \cdot 3,85) \cdot 10^{-5} = 19,833 \text{ тм}$$

$$\zeta = f(\varphi_f, \mu \alpha_s, e_s / h_0)$$

$$\varphi_f = \frac{(217 - 18) \cdot 3 + 13,64 \cdot 0,392}{18 \cdot 24,02} = 1,39;$$

$$\frac{e_s}{h_0} = \frac{19,833 \cdot 10^5}{24,02 \cdot 32000} = 2,58;$$

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}} = \frac{2 \cdot 10^6}{146666,7} = 13,64;$$

$$\alpha_{f1} = \frac{E_f}{E_{b,red}} = \frac{165 \cdot 10^4}{146666,7} = 11,25;$$

$$E_{b,red} = \frac{E_{b,ser}}{\epsilon_{b,red}} = \frac{220}{0,0015} = 146666,7 \text{ кг/см}^2;$$

$$\mu \alpha_s = \frac{6,15 \cdot (12,56 + 0,392) + 1,2 \cdot 11,25}{18 \cdot 24,02} = 0,44$$

По таблице 4.2. [2] определяем:

при $\mu \alpha_s = 0,3 - \zeta = 0,82$

при $\mu \alpha_s = 0,5 - \zeta = 0,81$

отсюда при $\mu \alpha_s = 0,44 - \zeta = 0,816$

$$z = \zeta \cdot h_0 = 0,816 \cdot 24 = 19,584 \text{ см}$$

$$\sigma_s = \frac{\frac{(19,833 \cdot 10^5)}{19,584} - 32000}{\frac{12,56 + 0,392 + 1,2}{105 \text{ кг/см}^2}} = 4894,8 \text{ кг/см}^2 > R_{s,ser} - \sigma_s = 5000 - 4894,8$$

Ограничим максимальный момент

Принимаем $\sigma_s = 250 \text{ МПа}$,

тогда

$$M_s = [\sigma_s \cdot (A_{sp} + A_s + A_f) + P] \cdot z = [2500 \cdot (12,56 + 0,392 + 1,2) + 32000] \cdot 19,584 = 13,2 \text{ тм}$$

$$M_{изг} = M_s - P \cdot e_{sp} = 13,2 \cdot 10^5 - 32000 \cdot 3,85 = 11,96 \text{ тм}$$

$$\frac{e_s}{h_0} = \frac{13,2 \cdot 10^5}{24,02 \cdot 32000} = 1,21;$$

Значение базового расстояния между трещинами l_s определяют по формуле:

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s + A_{sp} + A_f} d_s$$

где A_{bt} - площадь сечения растянутого бетона.

При этом высота растянутой зоны бетона принимается не менее $2a$ и не более $0,5h$.

Для таврового сечения высоту растянутой зоны определяем по формуле

$$y_t = k \cdot y_0$$

где y_0 - высота растянутой зоны бетона, определяемая как для упругого материала по приведенному сечению при коэффициенте приведения арматуры к бетону $\alpha = E_s/E_b$;

k - поправочный коэффициент, учитывающий неупругие деформации растянутого бетона и равный, для таврового сечения с полкой в сжатой зоне - 0,9.

$$y_0 = \frac{S'_{red}}{A_{red} + P/R_{bt,ser}}$$

$$y_0 = \frac{25656,46}{1225,16 + \frac{32000}{17,5}} = 8,4;$$

$$y_t = 0,9 \cdot 8,4 = 8,56 \leq 2a = 2 \cdot 6,1 = 12,2 \text{ см}$$

$$\text{Принимаем } y_t = 12,2 \text{ см} < 0,5h = 15 \text{ см.}$$

Площадь растянутого бетона

$$A_{bt} = 12,2 \cdot 18 = 219,6 \text{ см}^2.$$

$$d_s = \frac{2 \cdot 0,5^2 + 4 \cdot 2^2}{2 \cdot 0,5 + 4 \cdot 2} = 1,83 \text{ см};$$

$$l_s = 0,5 \frac{219,6}{0,392 + 12,56 + 1,2} \cdot 1,83 = 14,2 \text{ см} \leq 40d_s = 40 \cdot 1,83 = 73,2 \text{ см};$$

$$l_s = 14,2 \text{ см} \leq 40 \text{ см}$$

Ширина раскрытия трещин:

$$\sigma_{cre} = 0,5 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot \frac{2500}{2 \cdot 10^6} \cdot 14,2 = 0,124 \text{ мм} < [\sigma_{cre} = 0,3 \text{ мм}]$$

Если не ограничивать момент

$$\sigma_{cre} = 0,5 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot \frac{4894,8}{2 \cdot 10^6} \cdot 14,2 = 0,243 \text{ мм} < [\sigma_{cre} = 0,3 \text{ мм}]$$

Расчет по деформациям

Прогиб

Кривизна изгибаемого предварительно напряженного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне.

Для двутаврового сечения при $h'f=3 \text{ см} \leq 0,3h_0=0,3 \cdot 24=7,2 \text{ см}$ и $a's=2,75 \text{ см} < 0,2h_0=0,2 \cdot 24=4,8 \text{ см}$ кривизну определяем по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{\varphi_c b h_0^3 E_{b,red}}$$

где φ_c - коэффициент, определяемый по табл.4.5[2] в зависимости от φ_f , μa_{s2} , e_s/h_0 .

$$\varphi_f = \frac{(b'_f - b)h'_f - (A'_{sp} + A_s)a_{s1}}{b h_0}, \quad \frac{e_s}{h_0} = \frac{M_s}{P h_0}$$

$$a_{s2} = \frac{E_s}{\psi_s E_{b,red}}, \quad \mu = \frac{A_{sp} + A_s}{b h_0}$$

$$\varphi_f = \frac{(217 - 18) \cdot 3 - 13,64 \cdot 0,392}{18 \cdot 24,02} = 1,37;$$

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{\sigma_{s,crs}}{\sigma_s}$$

Где $\sigma_{s,crs}$ определяется также как и для σ_s , только для момента M_{crs}

$$M_{crs} = (7,44 \cdot 10^5 + 32000 \cdot 3,85) \cdot 10^{-5} = 8,67 \text{ тм}$$

$$\frac{e_s}{h_0} = \frac{8,67 \cdot 10^5}{24,02 \cdot 32000} = 1,128;$$

По таблице 4.2. [2] определяем для $\frac{e_s}{h_0} = 1,1$;

при $\mu\alpha_s = 0,3 - \zeta = 0,83$

при $\mu\alpha_s = 0,5 - \zeta = 0,82$

отсюда при $\mu\alpha_s = 0,44 - \zeta = 0,823$

для $\frac{e_s}{h_0} = 1,2$;

при $\mu\alpha_s = 0,3 - \zeta = 0,82$

при $\mu\alpha_s = 0,5 - \zeta = 0,81$

отсюда при $\mu\alpha_s = 0,44 - \zeta = 0,816$

Тогда для $\frac{e_s}{h_0} = 1,128$; $\mu\alpha_s = 0,409$; $\varphi_f > 0,8 - \zeta = 0,821$

$$z = \zeta \cdot h_0 = 0,821 \cdot 24,02 = 19,7 \text{ см}$$

$$\sigma_{s,crs} = \frac{\frac{(8,67 \cdot 10^5)}{19,752} - 32000}{12,56 + 0,392 + 1,2} = 804,5 \text{ кг/см}^2 < \sigma_{s,crs} - \sigma_s = 5000 - 804,5$$

$$= 4195,5 \text{ кг/см}^2$$

$$\sigma_{st} = 0,85 - 0,8 \frac{804,5}{2500} = 0,59$$

$$\sigma_{st} = \frac{2 \cdot 10^5}{0,59 \cdot 146666,7} = 23,01;$$

$$\sigma_{st} = \frac{(12,56 + 0,392) \cdot 23,01}{18 \cdot 24} = 0,69$$

Находим φ_c при $\sigma_{st} = 1,37$; $\sigma_{st} = 0,69$; $\sigma_{st}/h_0 = 1,5$

при $\sigma_{st} = 0,6 - \sigma = 0,56$

при $\sigma_{st} = 0,7 - \sigma = 0,59$

отсюда при $\sigma_{st} = 0,63 - \sigma = 0,587$.

Кривизна изгибаемого элемента:

$$\frac{1}{r} = \frac{11,96 \cdot 10^5}{0,587 \cdot 18 \cdot 24^2 \cdot 146666,7} = 0,0000558;$$

Прогиб элемента:

Для свободно опертых или консольных элементов максимальный прогиб определяют по формуле

$$f = Sl^2 \left(\frac{1}{r} \right)_{\max},$$

$$\Delta_{\max} = \frac{5}{48} \Delta^2 \cdot \left(\frac{1}{r} \right)_{\max} = \frac{5}{48} 591^2 \cdot 0,0000558 = 2,03 \text{ см} < \left[\frac{6000}{150} = 4 \text{ см} \right]$$

Если не ограничивать момент

$$\Delta_{\max} = 0,85 - 0,8 \frac{504,5}{4894,8} = 0,72$$

$$\Delta_{\max} = \frac{2 \cdot 10^5}{0,72 \cdot 146666,7} = 18,94;$$

$$\Delta_{\max} = \frac{(12,56 + 0,392) \cdot 18,94}{18 \cdot 24} = 0,57$$

Находим φ_c при $\Delta_{\max} = 1,37$; $\Delta_{\max} = 0,69$; $\Delta_{\max}/h_0 = 1,5$

при $\Delta_{\max} = 0,5 - \Delta = 0,51$

при $\Delta_{\max} = 0,6 - \Delta = 0,56$

отсюда при $\Delta_{\max} = 0,63 - \Delta = 0,54$.

Кривизна изгибаемого элемента:

$$\frac{1}{r} = \frac{18,37 \cdot 10^2}{0,54 \cdot 18 \cdot 24^2 \cdot 146666,7} = 0,000093;$$

Прогиб элемента:

$$\Delta_{\max} = \frac{5}{48} \Delta^2 \cdot \left(\frac{1}{r} \right)_{\max} = \frac{5}{48} 591^2 \cdot 0,000093 = 3,39 \text{ см} < \left[\frac{6000}{150} = 4 \text{ см} \right]$$

Усиление углепластиком – тканью (холстом)

2.MBrace FibCF230/4900.300g/5.100m

Марка фирмы производителя	Тип	Толщина, мм	Ширина, мм	Модуль упругости, ГПа	Прочность на растяжение, МПа	Поверхностная плотность, г/м ²
MBraceFibCF230/4900.300g/5.100m	высокопрочное углеродное	0,166	500	300	4900	300

Для усиления на нижнюю растянутую поверхность бетона наклеивается один слой углеродной ткани шириной 150 мм. Расчетный модуль упругости $E_f = E_n = 300000$ МПа.

Определение максимального изгибающего момента

Предельная деформация растяжения

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = \frac{4900}{300000} = 0,0163$$

Коэффициент надежности по материалу для расчета по предельным состояниям первой группы (п. 3.9) $\gamma_f = 1,1$

Коэффициент условий работы (табл. 3.1) $C_E = 0,9$

Расчетная прочность по формуле (3.1) равна

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = \frac{4900}{300000} = 0,0163$$

Тогда расчетная деформация растяжения по формуле (3.2) равна

$$\varepsilon_{ft} = \frac{C_E \cdot \varepsilon_f}{\gamma_f} = \frac{0,9 \cdot 0,0163}{1,1} = 0,0133$$

Расчетный модуль упругости $E_f = E_{ft} = 300000$ МПа

Проверяем условие (4.1) для отслаивания

$$nE_{ft}t_f = 1 \cdot 300000 \cdot 0,166 = 49800 < 180000$$

$$k = \frac{1}{60\varepsilon_{ft}} \left(1 - \frac{nE_{ft}t_f}{360000} \right) = \frac{1}{60 \cdot 0,0133} \left(1 - \frac{49800}{360000} \right) = 1,08$$

Так как κ_m не должен превышать 0,9, принимаем $\kappa_m = 0,9$.

Поскольку начальные деформации бетона не учитываются, то

$$\varepsilon_{fu} = \kappa_m \cdot \varepsilon_{ft} = 0,9 \cdot 0,0133 = 0,012$$

$$\text{Из (4.4) } \sigma_{fu} = E_f \cdot \varepsilon_{fu} = 300000 \cdot 0,012 = 3600 \text{ МПа}$$

Расчетная прочность углеткани по формуле (4.5) равна $R_{fu} = \sigma_{fu} = 3600$ МПа.

Определяем предельное значение относительной высоты сжатой зоны бетона для внешней арматуры $\alpha = 0,85$

$$\omega = \alpha - 0,008R_b = 0,85 - 0,008 \cdot 15,3 = 0,728$$

В формулу для ξ_{Rf} (4.13) подставляем значение прочности R_{fu}

$$\xi_{Rf} = \frac{\omega}{1 + \frac{R_f}{\varepsilon_{bu1} E_f} \left(1 - \frac{\omega}{1,1} \right)} = \frac{0,728}{1 + \frac{3600}{0,002 \cdot 300000} \left(1 - \frac{0,728}{1,1} \right)} = 0,240$$

Площадь сечения внешней арматуры

$$A_f = n b t_f = 1 \cdot 150 \cdot 0,166 = 24,9 \text{ мм}^2$$

Определим значение x по выражению (4.17):

$$x = \frac{R_{fu} \cdot A_f + R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} = \frac{3600 \cdot 24,9 + 355 \cdot 1256}{15,3 \cdot 2170} = 16,13 \text{ мм}$$

$$\xi_f = \frac{x}{h} = \frac{16,13}{320} = 0,054 > \xi_{Rf},$$

следовательно напряжение по внешней арматуре меньше расчетного.

Предельный изгибающий момент по (4.20):

$$M_{ult} = A_f R_f (h - 0,5x) + \Sigma A_s R_s (h - 0,5x) = 29,4 \cdot 3600 (300 - 0,5 \cdot 16,3) + 1256 \cdot 355 \cdot (300 - 0,5 \cdot 16,3) + 2 \cdot 39,2 \cdot 415 \cdot (300 - 0,5 \cdot 16,3) = 170,5 \text{ кНм}$$

Расчет прочности наклонных сечений на действие поперечных сил

Принимаем трехсторонние U-образные хомуты из однонаправленной углеродной ткани в один слой, наклеиваемые перпендикулярно продольной оси балки ($\alpha = 90^\circ$) с шагом $S_f = 200$ мм.

предел прочности при растяжении: $R_f = 4900$ МПа,
 относительное удлинение при разрыве: $\delta = 2,1$ %,
 модуль упругости: $E_f = 300000$ МПа.

$n=1$; $w_f=100$ мм;

$$A_{f,sh}=4n \cdot t_f \cdot w_f=4 \cdot 1 \cdot 0,166 \cdot 100=66,4 \text{ мм}^2.$$

Предельная деформация растяжения

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = \frac{4900}{300000} = 0,0163$$

Коэффициент надежности по материалу для расчета по предельным состояниям первой группы (п. 3.9) $\gamma_f=1,1$

Коэффициент условий работы (табл. 3.1) $C_E = 0,9$

Расчетная прочность (3.1)

$$R_{fj} = \frac{C_E \cdot R_f}{\gamma_f} = \frac{0,9 \cdot 4900}{1,1} = 4009 \text{ МПа}$$

Тогда расчетная деформация растяжения (3.2)

$$\varepsilon_{fj} = \frac{C_E \cdot \varepsilon_f}{\gamma_f} = \frac{0,9 \cdot 0,0163}{1,1} = 0,0133$$

Из таблицы (4.1) коэффициент запаса по схеме наклейки $\psi_f = 0,85$.

Полагая, что хомуты приклеиваются по всей высоте стенки балки,
 $d_f=h_0=240$ мм.

Из выражения (4.60) эффективная длина анкеровки:

$$L_f = \frac{23300}{(n_f E_f)^{0,58}} = \frac{23300}{(1 \cdot 0,166 \cdot 300000)^{0,58}} = 44 \text{ мм}$$

Коэффициент k_1 находится из выражения (4.61):

$$k_1 = \left(\frac{R_b}{27} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{15,3}{27} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,685$$

Коэффициент k_2 находится из выражения (4.62):

$$k_2 = \frac{d_f - L_f}{d_f} = \frac{240 - 44}{240} = 0,817$$

Коэффициент запаса по сцеплению k_v вычисляется по выражению (4.59):

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_f}{11900 \varepsilon_{fj}} = \frac{0,685 \cdot 0,817 \cdot 44}{11900 \cdot 0,0133} = 0,156$$

Предельная расчетная деформация по выражению (4.58):

$$\varepsilon_{fe} = k_v \cdot \varepsilon_{fj} = 0,156 \cdot 0,0133 = 0,002$$

Тогда расчетное напряжение

$$\sigma_{fu} = \varepsilon_{fe} E_f = 0,002 \cdot 300000 = 621 \text{ МПа}$$

Поперечная сила, воспринимаемая хомутами из углеткани:

$$\psi_f Q_f = \psi_f \frac{A_{f,sh} \sigma_{fu} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{S_f} = 0,85 \frac{66,4 \cdot 621 \cdot 1 \cdot 240}{200} = 58213 \text{ Н}$$

Тогда общая поперечная сила:

$$Q_b + Q_{sw} + Q_f = 67068 + 84672 + 58213 = 209953 \text{ Н} \approx \underline{210 \text{ кН}}$$

Расчет по предельным состояниям второй группы

Расчет по образованию трещин

$$M_{crc} = \gamma \cdot W_{red} R_{bt,ser} + P(e_{op} + r);$$

$$I_{red} = \frac{b_f (h_f')^3}{12} + b_f h_f' y_1^2 + \frac{b(h-h_f')^3}{12} + b(h-h_f') y_2^2 + \alpha \cdot A_{sp} \cdot y_{sp}^2 + \alpha \cdot A_s \cdot y_s^2 +$$

$$\alpha \cdot A_s' \cdot y_s'^2 + \alpha_f \cdot A_f \cdot y_f^2 =$$

$$= \frac{2170 \cdot 30^3}{12} + 2170 \cdot 30 \cdot 74,6^2 + \frac{180 \cdot (300-30)^3}{12} + 180(300-30) \cdot 75,4^2 + 6,15 \cdot 1256 \cdot 150,4^2 +$$

$$+ 6,15 \cdot 39,2 \cdot 190,4^2 + 6,15 \cdot 39,2 \cdot 74,6^2 + 9,23 \cdot 24,9 \cdot 210,4^2 = 11,34 \cdot 10^8 \text{ мм}^4$$

$$\alpha_f = E_f / E_b = 3 \cdot 10^5 / 3,25 \cdot 10^4 = 9,23$$

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_0} = \frac{11,34 \cdot 10^8}{210,4} = 5388184 = 5,4 \cdot 10^6 \text{ мм}^3;$$

$$r_t = \frac{W_{red}}{A_{red}} = \frac{5,4 \cdot 10^6}{121906,6 + 24,9 \cdot 9,23} = 44,2 \text{ мм};$$

$$\gamma = 1,3 - \text{для тавра}$$

$$M_{crc} = \gamma \cdot W_{red} R_{bt,ser} + P(e_{op} + r) = 1,3 \cdot 5,4 \cdot 10^6 \cdot 1,75 + 320000(150,4 + 44,2) = 74,6 \text{ кНм}$$

Ширина раскрытия трещин

$$\alpha_{cre} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s$$

$$\psi_s = 1;$$

$$\varphi_1 = 1,4; \quad \varphi_2 = 0,5; \quad \varphi_3 = 1,0;$$

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s + A_{sp} + A_f} \cdot d_s$$

$$y_t = k \cdot y_0 = 0,95 \cdot 84,1 = 79,9 \text{ мм} < 2a = 2 \cdot 60 = 120 \text{ мм.}$$

$$S_{red} = 2170 \cdot 30 \times (300 - 0,5 \cdot 30) + 180 \cdot (300 - 30)^2 / 2 + 6,15 \cdot 1256 \cdot 60 +$$

$$+ 6,15 \cdot 39,2 \cdot 22,5 + 6,15 \cdot 39,2 \cdot (300 - 27,5) + 9,23 \cdot 24,9 \cdot 0 = 25649149 \text{ мм}^3.$$

$$y_0 = \frac{S_{red}}{A_{red} + \frac{P}{R_{bt,ser}}} = \frac{25649,149}{1221,364 + \frac{32000}{17,5}} = 8,41 \text{ см}$$

$$\text{Принимаем } y_t = 120 \text{ мм} < \frac{1}{2} h = 150 \text{ мм.}$$

$$A_{bt} = 120 \cdot 180 = 21600 \text{ мм}^2$$

$$d_s = 18,3 \text{ мм}$$

$$l_s = 0,5 \frac{21600}{39,2 + 1256 + 24,9} \cdot 18,3 = 147,5 \text{ мм}$$

$$\sigma_s = \frac{M_s / z - P}{A_{sp} + A_s + A_f}$$

$$M_s = M - N_p \cdot e_{sp} = 170500000 - 320000 \cdot 38,5 = 158,20 \text{ кНм}$$

$$e_{sp} = 61 - 22,5 = 38,5 \text{ мм}$$

$$z = \zeta \cdot h_0$$

$$\varphi_f = \frac{(b'_f - b)h'_f - \alpha'_s A'_s}{bh_0} = 1,37$$

$$\frac{A_{sp} \cdot a_p + A_s \cdot a_s + \alpha \cdot A_f \cdot a_f}{A_{sp} + A_s + A_f} = \frac{2 \cdot 314 \cdot 36 + 2 \cdot 314 \cdot 86 + 39,2 \cdot 22,5 + 1,5 \cdot 24,9 \cdot 0}{1256 + 39,2 + 24,9 \cdot 1,5} = 58,2 \text{ мм}$$

$$e_s = \frac{M_s}{P} = \frac{158200000}{320000} = 494, \text{ мм}$$

$$\frac{e_s}{h_0} = \frac{494}{240} = 2,06$$

$$\mu\alpha_{s1} = \frac{\alpha_{s1} \cdot A_{sp} + \alpha_{s1} \cdot A_s + \alpha_{f1} \cdot A_f}{bh_0} = \frac{13,64(1256 + 2 \cdot 39,2) + 20,45 \cdot 24,9}{180 \cdot 240} = 0,433$$

$$\rightarrow \zeta = 0,817$$

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}} = \frac{200000}{14670} = 13,64$$

$$\alpha_{f1} = \frac{E_f}{E_{b,red}} = \frac{300000}{14670} = 20,45$$

$$E_{b,red} = \frac{R_{b,ser}}{\varepsilon_{b1,red}} = \frac{22}{0,0015} = 14670 \text{ МПа}$$

$$z = \zeta \cdot h_0 = 0,817 \cdot 240 = 196 \text{ мм}$$

$$\sigma_s = \frac{158200000 / 196 - 320000}{1256 + 39,2 + 39,2 + 24,9} = 358 \text{ МПа}$$

$$a_{crc} = 1,4 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{358}{200000} \cdot 147,5 = 0,19 \text{ мм}$$

$$\psi = 1 - 0,8 \frac{\sigma_{crc}}{\sigma_s} = 1 - 0,8 = 0,2$$

Определение прогиба плиты

$$f = \frac{5}{48} \cdot \left(\frac{1}{r} \right)_{\max} \cdot l_0^2,$$

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{\varphi_c \cdot b \cdot h_0^3 \cdot E_{b,red}} = \frac{170500000}{0,56 \cdot 180 \cdot 240^3 \cdot 14670} = 0,0000084$$

$$\varphi_f = 1,37$$

$$\mu\alpha_{s2} = \frac{\alpha_{s2} \cdot A_{sp} + \alpha_{s2} \cdot A_s + \alpha_{f2} \cdot A_f}{bh_0} = \frac{20,98(1256 + 2 \cdot 39,2) + 31,46 \cdot 24,9}{180 \cdot 240} = 0,67$$

$$\alpha_{s2} = \frac{E_s}{\psi \cdot E_{b,red}} = \frac{200000}{0,65 \cdot 14670} = 20,98$$

$$\alpha_{f1} = \frac{E_f}{\psi \cdot E_{b,red}} = \frac{300000}{0,65 \cdot 14670} = 31,46$$

$$E_{b,red} = \frac{R_{b,ser}}{\varepsilon_{b1,red}} = \frac{22}{0,0015} = 14670 \text{ МПа}$$

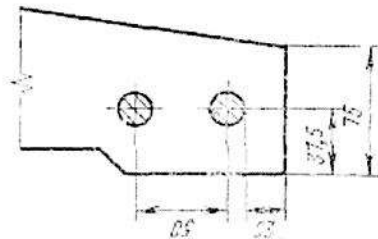
$$\frac{e_s}{h_0} = \frac{248}{240} = 1,03$$

$$\rightarrow \varphi_c = 0,56$$

$$f = \frac{5}{48} \cdot \left(\frac{1}{r} \right)_{\max} \cdot l_0^2 = \frac{5}{48} \cdot 0,0000084 \cdot 5910^2 = 30,4 \text{ mm}$$

Общие данные по плите ПКЖ13

Расположение напрягаемой арматуры

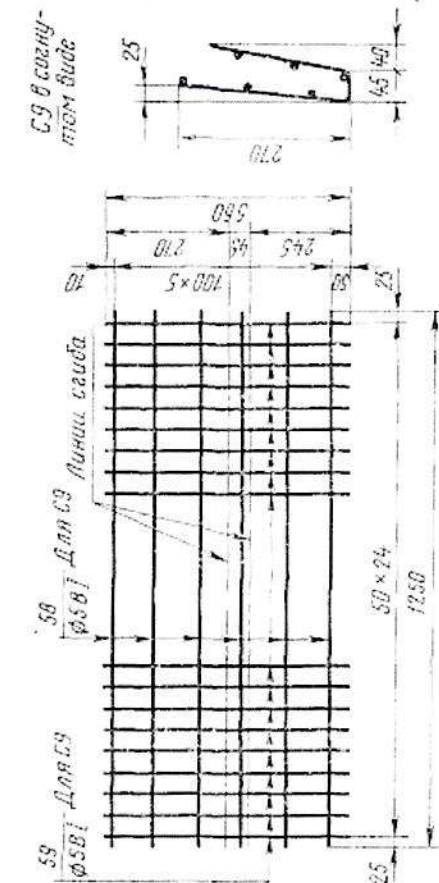
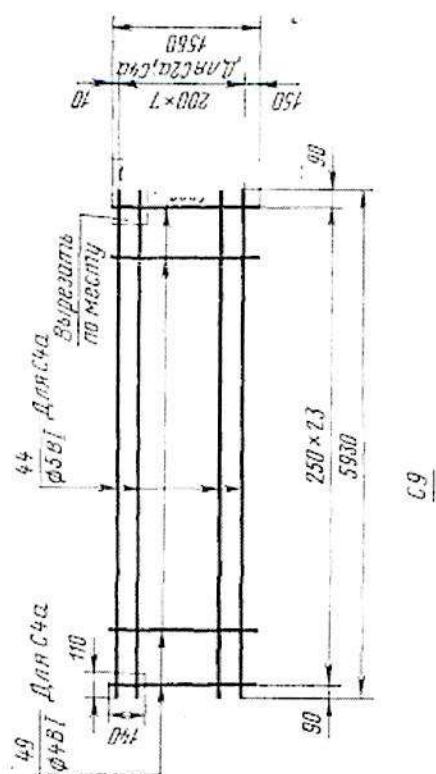


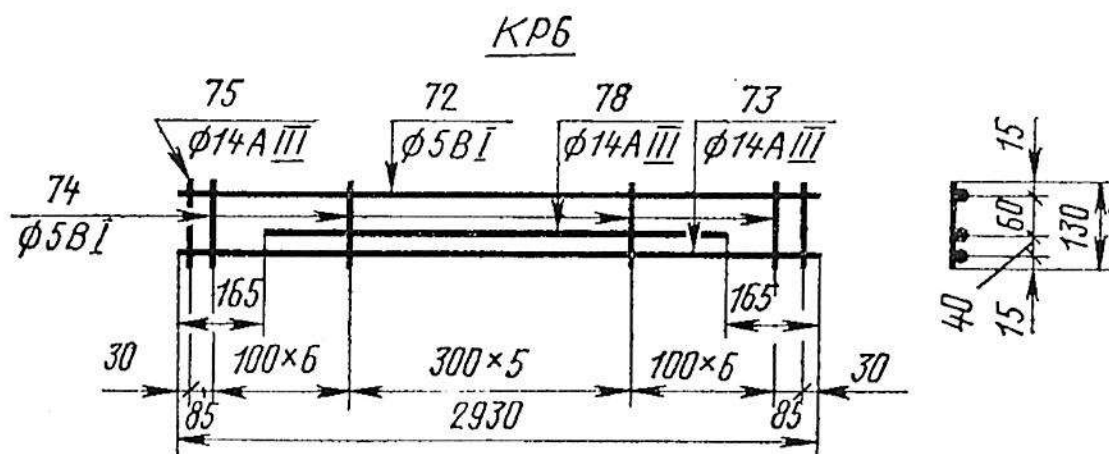
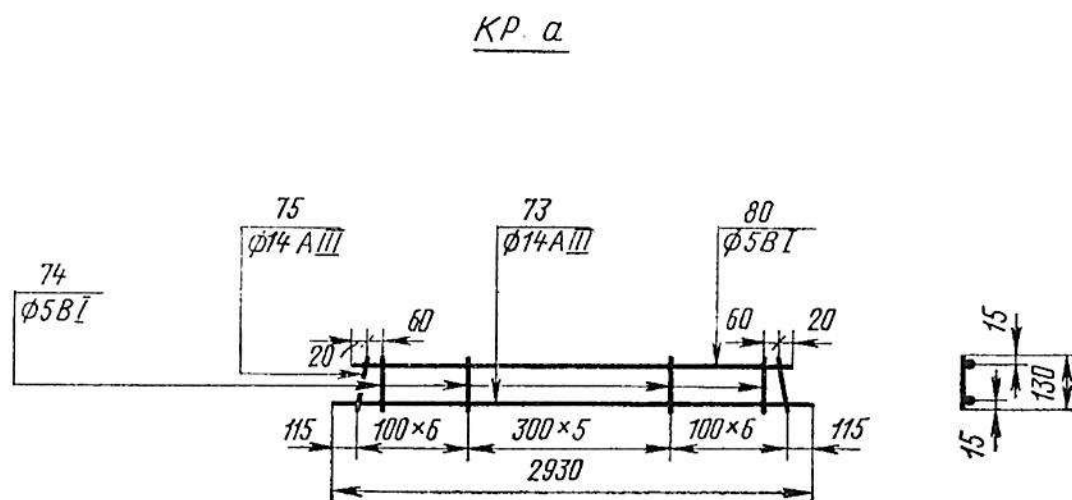
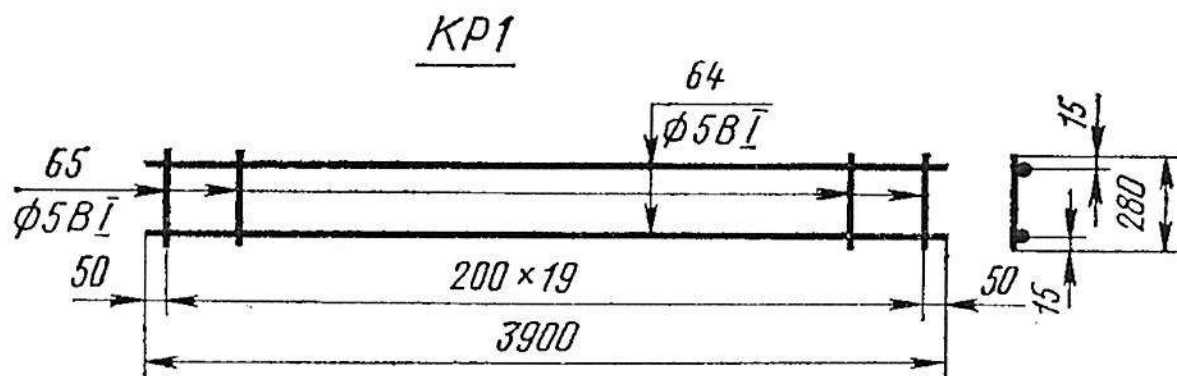
Данные по испытанию

Марка плиты	Контрольная равномерно распределенная нагрузка, кПа (кгс/м²), по проверке прочности		Контрольная равномерно распределенная по проверке трещиностойкости			
			Возраст бетона к моменту			
			3-7	14	28	100
ПГ-6АIIIвГ	C = 1.35	C = 1.4	C = 1.6			
	10,79(1100)	---	14,22(1450)	7,85(800)	7,65(780)	5,98(610)
нагрузка, кПа (кгс/м²)						
по проверке жесткости						
испытания плит (в сутках)						
3-7	14	28	100	3-7	14	28
6,18(630)	5,79(590)	5,39(550)	4,90(500)	2,3	2,1	1,9
						1,6

Показатели плиты

Класс напрягаемой арматуры	Марка плиты, изготовленной из бетона	Расчетная равномерно распределенная нагрузка, кПа (кгс/м²)						Расход материалов	Масса плиты, т	
		тяжелого	из пористых заполнителей	с учетом массы плиты		без учета массы плиты, тяжелого				
				при коэффициенте		при коэффициенте				
				$n > 1$	$n = 1$	$n > 1$	$n = 1$			
A-IIIв	ПГ-6AIIIвТ	---	9,81(1000)	7,45(760)	8,09(825)	5,88(600)				
Показатели плит, предназначенных для работы в условиях воздействия агрессивных газовых сред										
Класс напрягаемой арматуры	Марка плиты при стесненном состоянии	Слабоагрессивной	среднеагрессивной	Расчетная равномерно распределенная нагрузка, кПа (кгс/м²)				Марка бетона по прочности на сжатие	Расход материалов	Масса плиты, т
				с учетом массы плиты		без массы веса плиты				
				при коэффициенте		при коэффициенте				
				$n > 1$	$n = 1$	$n > 1$	$n = 1$			
A-IIIв	ПГ-6AIIIвТ-Н	ПГ-6AIIIвТ-П	9,81(1000)	7,45(760)	8,09(825)	5,88(600)	4220AIIIв	M400	160	2,05





49

Список нормативной, технической и методической документации

1. СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия», М., 1988;
2. СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции», М., 2004;
3. *«Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами».* ООО «Интераква, НИИЖБ
4. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003)..Пособие от 01.01.2005 N 52-101-2003.. М.2005.
5. СП 52-102-2004 Предварительно напряженные железобетонные конструкции
Свод правил (СП) от 24.05.2004 N 52-102-2004
6. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. Постановление Госстроя России от 25.12.2003 N 215
7. SKY-SAP2007. Проект S/W для применения комплектов усиливающих материалов системы MBrace®. Материалы на основе углепластика (FRP материалы). BASF.
8. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.