

Общество с ограниченной ответственностью
"Научно-инженерный центр
Тоннельной ассоциации"
(ООО "НИЦ Тоннельной ассоциации")



Limited Liability Company
"Research and Engineering Center
Tunnel Association"
Ltd ("SIC Tunnel Association")

129344, г.Москва, ул. Енисейская, д. 7, стр. 4, комн. 10
Тел: (495)656-65-47
Факс: (495)656-65-48
e-mail: nizta@inbox.ru



129344, Moscow, Eniseyskaya str., 7, build 4, room. 10
Tel: (495)656-65-47
Fax: (495)656-65-48
e-mail: nizta@inbox.ru

№ 093.3-2011-7716691200-П-087

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации»

д.т.н. _____ М.Г. Зерцалов

Наименование темы

**«Отчет по результатам испытаний блоков высокоточной обделки,
армированных стеклопластиковым каркасом PROZASKelt RWB и
стеклопластиковой фиброй PROZASK PF 6-40»
(Предварительная редакция)**

**Ответственный исполнитель
Инженер**

Е.А. Хотеев

Москва 2015 г.

Введение

Стеклопластики широко применяются при строительстве объектов метрополитена по всему миру: в странах Европы, в Панаме, на Филиппинах, в Канаде, в США, в Турции, в Саудовской Аравии. Имеющийся отечественный опыт применения стеклопластиковой арматуры связан преимущественно со строительством мостов, а также, в последние годы, со строительством дорог и малоэтажных объектов.

Широкому применению стеклопластиковой арматуры (СПА), относящейся к классу арматуры неметаллической композитной (АНК) на территории России препятствует отсутствие современной нормативной базы. Действующих нормативных документов явно недостаточно для широкого применения композитной арматуры в строительстве сложных и ответственных объектов.

В данной работе проводится исследование работы блоков тоннельной обделки, армированных стеклопластиковым каркасом PROZASKelt RWB, конструкционной стеклопластиковой фиброй PROZASK PF 6-40 и полипропиленовой микрофиброй PROZASK IGS. Специально изготовленные блоки с несущей способностью, определенной по расчету в соответствии с требованиями к реальному перегонному тоннелю Московского метрополитена, испытывались на внецентренное сжатие, что приводило к возникновению внутренних усилий в блоке, соответствующих значениям в реальной конструкции.

1. Цель работы

Целями данной работы являются:

- Определение эффективности фибрового армирования PROZASK PF 6-40 с точки зрения повышения трещиностойкости в условиях реальной конструкции;
- Определение расчетных характеристик блока, армированного стеклопластиковой арматурой PROZASKelt RWB в условиях внецентренного сжатия;
- Определение возможности и условий использования стеклопластиковой арматуры PROZASKelt RWB для армирования тоннельной обделки;
- определение областей эффективного использования стеклопластиковой арматуры PROZASKelt RWB и стеклопластиковой фибры PROZASK PF 6-40 в несущих строительных конструкциях.

2. Нормативные и литературные источники информации

1. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003»;
2. ГОСТ Р 52544-2006 «Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций»;
3. СП 52-103-2007 «Железобетонные монолитные конструкции зданий»;
4. СТО НОСТРОЙ 2.6.90-2013. Применение в строительных бетонных и геотехнических конструкциях неметаллической композитной арматуры;
5. Р-16-78. Рекомендации по расчету конструкций со стеклопластиковой арматурой. НИИЖБ Госстроя СССР;
6. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. Reported by ACI Committee 440;
7. Design Guidelines for FRP Reinforced Concrete Structures. University of Sheffield, UK.

3. Характеристика объекта исследования

Для исследования была использована сборная высокоточная обделка $D_{нар}/D_{вн}=6,0/5,4$ м, применяемая при строительстве перегонных тоннелей на участке от ст. «Речной вокзал» до ст. «Ховрино» Московского метрополитена.

Для испытаний были специально изготовлены 2 блока обделки со следующими характеристиками:

- Высота сечения блока $h = 300$ мм;
- Ширина сечения блока $b = 1400$ мм;
- Длина блока по оси 2984 мм;
- Бетон тяжелый класса по прочности на сжатие B45F300W12, $R_{b,n} = 32$ МПа, $R_b = 25$ МПа, $R_{bt,n} = 2,25$ МПа, $R_{bt} = 1,50$ МПа, $E = 37$ МПа. Марка бетонной смеси по подвижности П2.

Армировались блоки стеклопластиковой арматурой PROZASKelt RWB, 12+12Ø14, конструкционной стеклопластиковой фиброй PROZASK PF 6-40 в количестве 10 кг/м³, полипропиленовой микрофиброй PROZASK IGS в количестве 0,8 кг/м³.

Схема блока с указанием основных размеров и схемы армирования приведены на рис. 3.1-3.2.

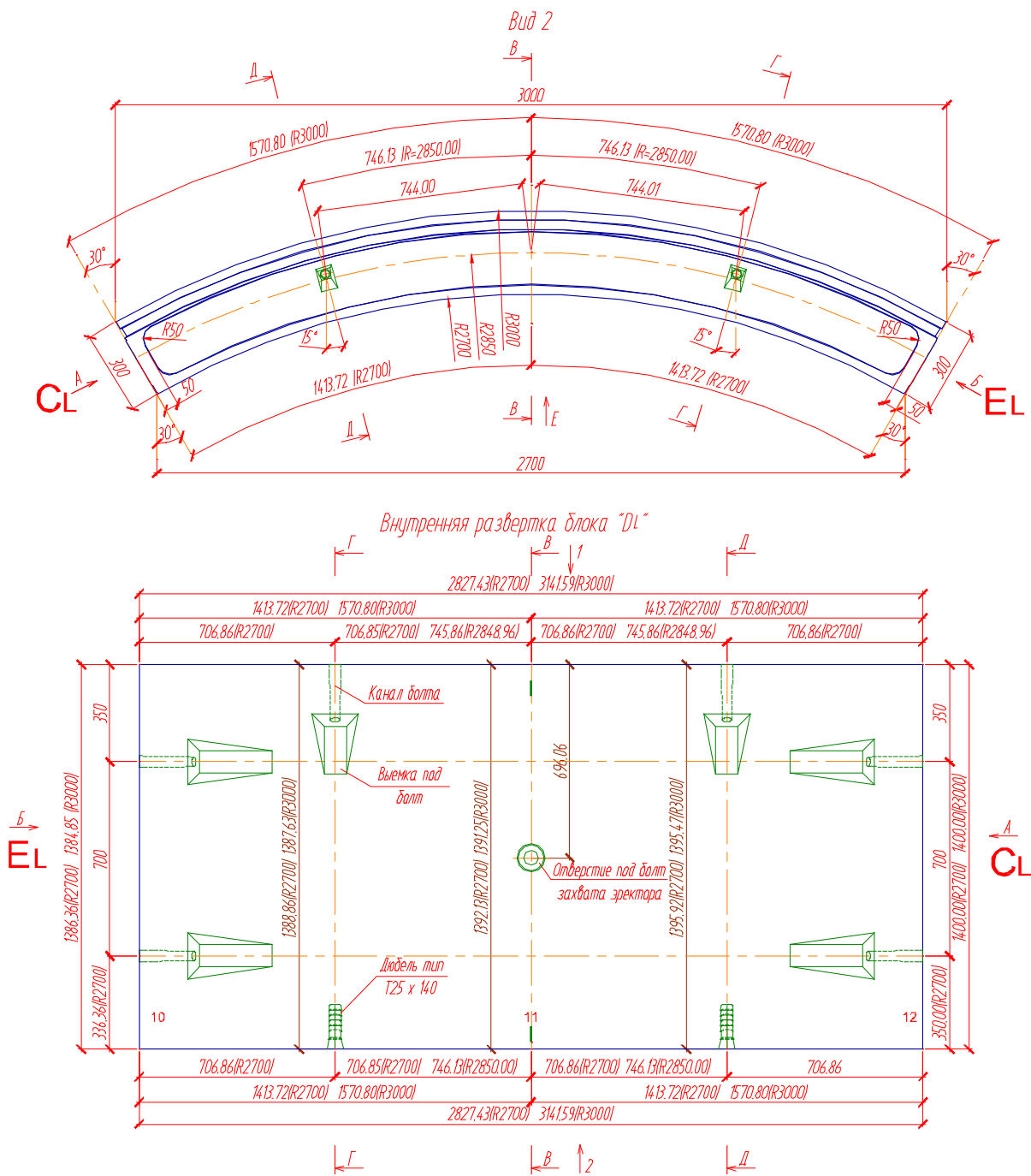


Рис.3.1. Опалубочный чертеж блока обделки.

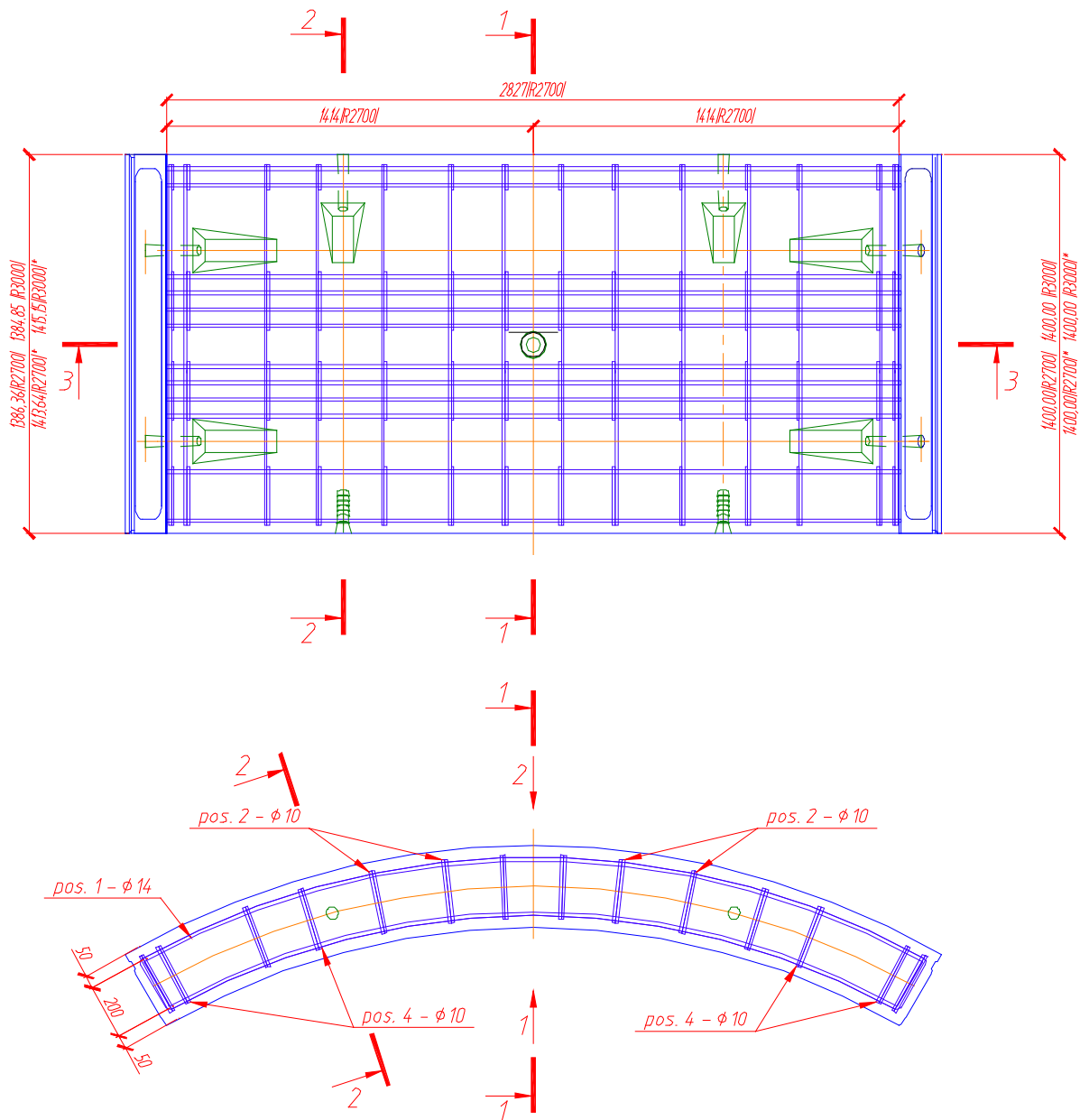


Рис.3.2. Схема армирования блока стеклопластиковой арматурой.

4. Основные этапы выполнения работы

4.1. Изготовление и испытание тестовых блоков тоннельной обделки

Изготовление экспериментальных блоков обделки проводилось силами ОАО "Моспромжелезобетон" при непосредственном участии представителей ООО "НИЦ Тоннельной ассоциации" и компании «ПРОЗАСК».

Испытания экспериментальных блоков обделки проводилось силами ОАО «НИИМосстрой» при непосредственном участии представителей ООО "НИЦ Тоннельной ассоциации" и компании «ПРОЗАСК».

При изготовлении тестовых блоков была применена бетонная смесь с добавлением полипропиленовой микрофибры PROZASK IGS в количестве 0,8 кг/м³м конструкционной стеклопластиковой фибры PROZASK PF 6-40 в количестве 10 кг/м³ с целью обеспечения в дальнейшем огнестойкости конструкции и повышения сопротивляемости бетона к образованию и раскрытию трещин. Принятая рецептура бетонной смеси неоднократно отработана заводом-изготовителем и обеспечивает бетон В45W12F300. Класс бетонной смеси по подвижности П2.

При формовании блоков была выявлена увеличенная вязкость бетонной смеси с микрофиброй, что может затруднить формование блоков. При этом, была обеспечена подвижность бетонной смеси П2, что соответствует применяемой в стандартном технологическом процессе.

Испытания блоков проводились по схеме двухточечного нагружения с обеспечением продольного обжатия на тестовом стенде, схема которого приведена на рис. 4.1.1. Вертикальная и горизонтальная сила прикладывались в соотношении 5:4.

По результатам предварительных расчетов были получены следующие характеристики прочности и трещиностойкости блоков обделки:

- момент трещинообразования – вертикальная нагрузка 25 т на испытательном стенде;
- момент потери несущей способности – вертикальная нагрузка 160 т на испытательном стенде.

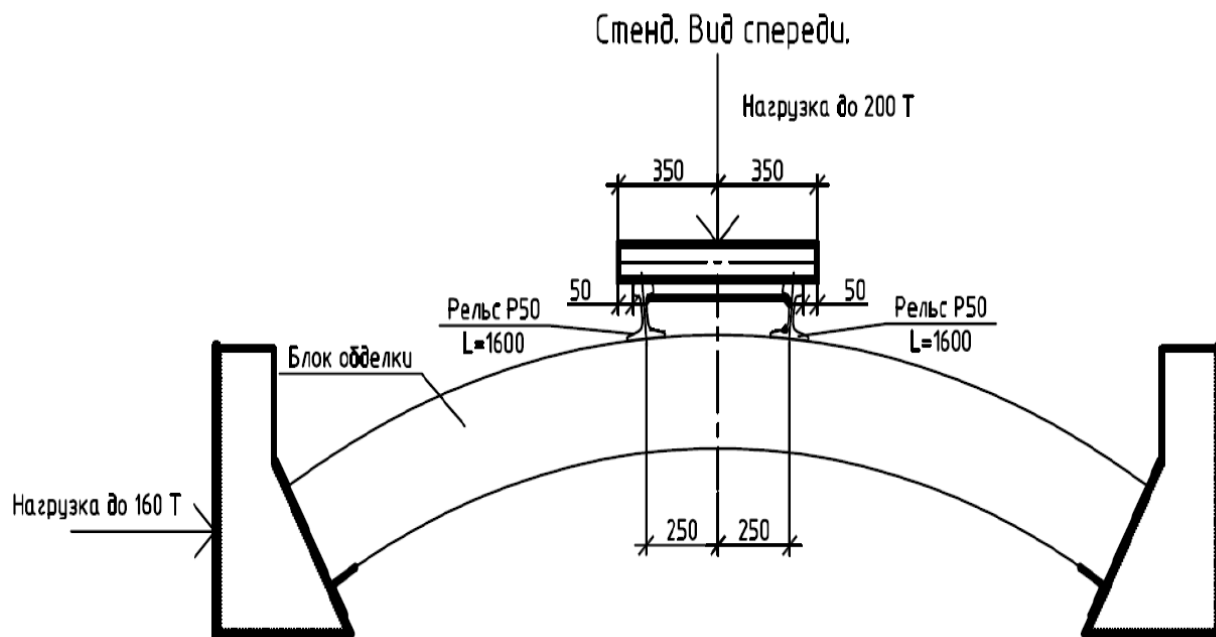


Рис.4.1.1. Схема тестового стенда.



Рис.4.1.2. Общий вид тестового стенда с установленным экспериментальным блоком обделки.

Деформации блоков приведены в таблице 4.1.1, 4.1.2 и на графиках 4.1.1, 4.1.2. По результатам испытания можно сделать следующие выводы:

- прочность блоков обеспечена. Разрушения (в т.ч. хрупкого) не наблюдается;
- раскрытие трещин при расчетной нагрузке достигало 1 мм, что превышает допустимое раскрытие для стеклопластбетонных конструкций, предусмотренное европейскими нормами и равное 0,5 мм при длительном действии нагрузки;
- деформации блока, армированного стеклопластиковой арматурой являлись полностью упругими, после снятия нагрузки наблюдалось закрытие образовавшихся трещин;
- трещиностойкость блоков по результатам испытаний превышает расчетную в 1,2 раза, что говорит об эффективности макрофибры с точки зрения повышения трещиностойкости, что подтверждает эффективность применения конструкционной фибры PROZASK PF 6-40.

Инженер



Е.А. Хотеев

Таблица 4.1.1. Деформации блока обделки №1 в ходе испытаний.

Ступень нагружения	Нагрузки, т		Прогибы, мм		
	Вертикальная	Горизонтальная	По стороне 1	По стороне 2	Средний
1	5	4	0,7	0	0,35
2	10	8	1	0,1	0,55
3	15	12	1,2	0,8	1
4	20	16	1,3	1,4	1,35
5	25	20	1,4	1,7	1,55
6	30	24	1,8	2,9	2,35
7	35	28	2,4	3,5	2,95
8	40	32	3	4,1	3,55
9	45	36	3,4	4,3	3,85
10	50	40	3,7	4,6	4,15
11	55	44	4,1	5,2	4,65
12	60	48	4,4	5,4	4,9
13	70	56	4,8	6,1	5,45
14	80	64	5,2	6,6	5,9
15	90	72	5,4	6,7	6,05
16	100	80	5,6	7,4	6,5
17	110	88	5,8	7,8	6,8
18	120	96	6,1	8,3	7,2
19	130	104	6,5	8,7	7,6
20	140	112	6,7	9,1	7,9
21	150	120	6,9	9,3	8,1
22	160	128	7,2	9,7	8,45

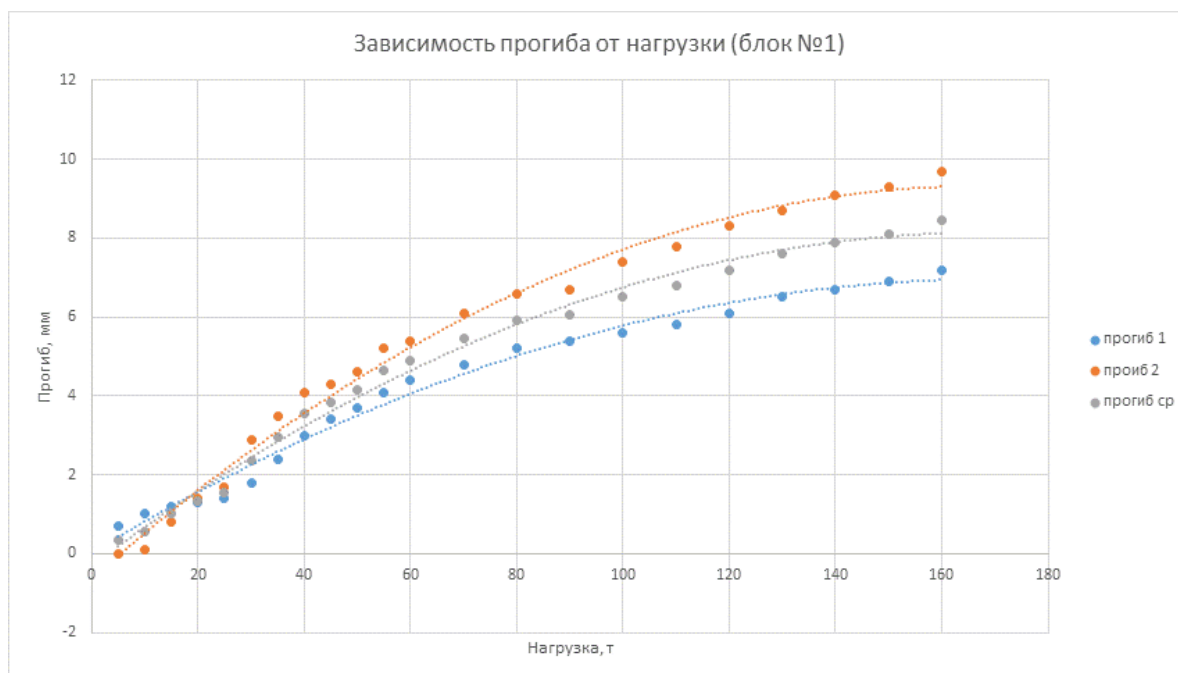


График 4.1.1. Прогибы в блоке №1

Таблица 4.1.2. Деформации блока обделки №2 в ходе испытаний.

Ступень нагружения	Нагрузки, т		Прогибы, мм		
	Вертикальная	Горизонтальная	По стороне 1	По стороне 2	Средний
1	5	4	0,5	0,6	0,55
2	10	8	0,9	1	0,95
3	15	12	1,3	1,1	1,2
4	20	16	1,7	1,5	1,6
5	25	20	1,9	1,7	1,8
6	30	24	2,6	2,3	2,45
7	35	28	3,1	2,7	2,9
8	40	32	3,4	2,7	3,05
9	45	36	3,6	2,8	3,2
10	50	40	4,1	3,3	3,7
11	55	44	4,5	-	4,5
12	60	48	4,7	-	4,7
13	70	56	5,5	-	5,5
14	80	64	6,1	-	6,1
15	90	72	6,4	-	6,4
16	100	80	7	-	7
17	110	88	7,7	-	7,7
18	120	96	8,3	-	8,3
19	130	104	8,4	-	8,4
20	140	112	8,5	-	8,5

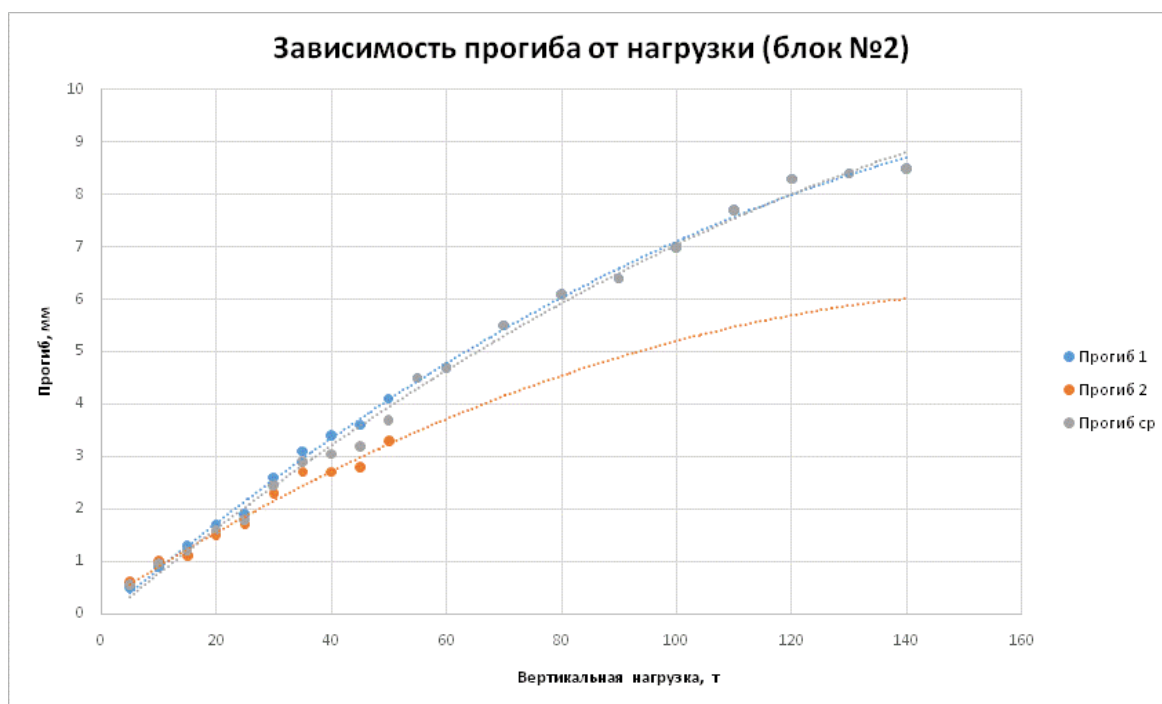


График 4.1.1. Прогибы в блоке №1

4.2. Численное моделирование работы блоков обделки

На основании полученных при испытаниях блоков данных была разработана расчетная модель блока обделки. Численные расчеты выполнялись в ПВК Z_Soilv13.11.

Численные расчеты выполнялись в несколько этапов:

- предварительное моделирование испытаний с учетом известных расчетных предпосылок для определения расчетных нагрузок при испытаниях;
- численное моделирование испытаний блока обделки, корректировка модели по результатам испытаний;
- моделирование работы блоков тоннельной обделки в кольце во вмещающем грунтовом массиве.

Этап 1. Предварительное моделирование испытаний с учетом известных расчетных предпосылок для определения расчетных нагрузок при испытаниях.

На данном этапе определялись нагрузки, которые необходимо обеспечить на тестовом стенде, при которых достигается предел прочности блока обделки.

Использованная на данном этапе модель, моделирующая блок объемными оболочечными элементами, по опыту предыдущих испытаний является оптимальной с точки зрения трудоемкости и точности получаемых результатов.

По результатам численного моделирования были получены значения внешних нагрузок и внутренних усилий, соответствующие моменту потери блоком несущей способности, а также моменту образования трещин в блоке.

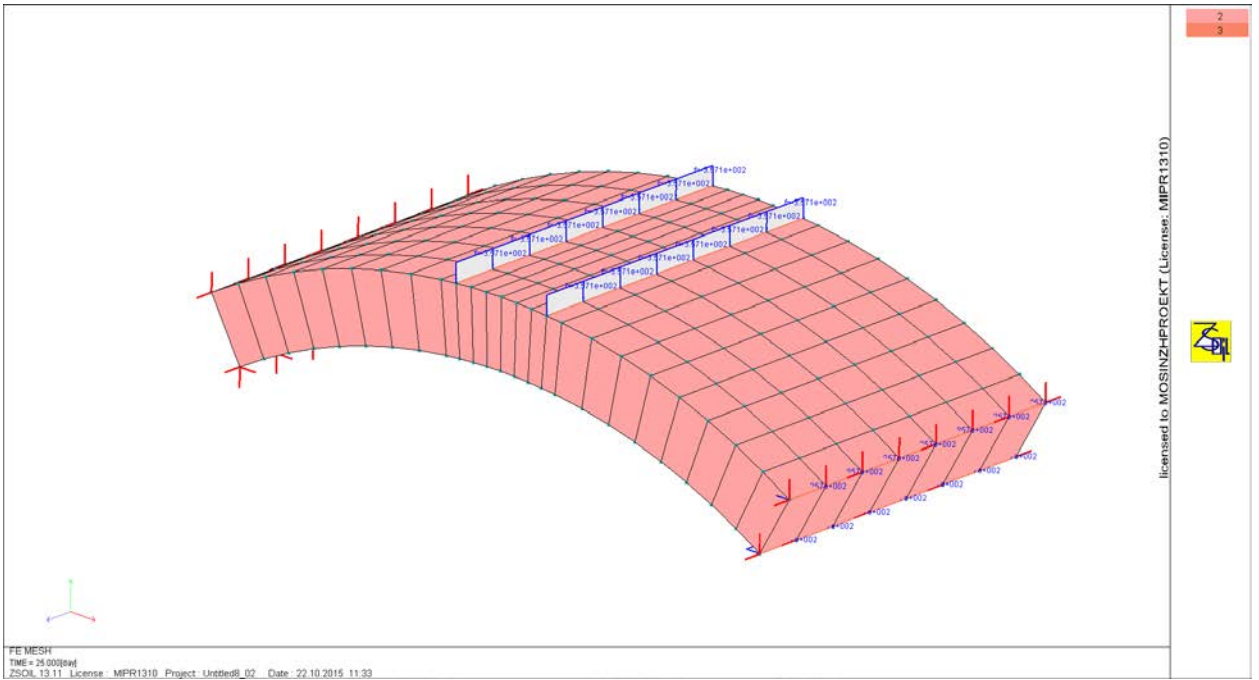


Рис. 4.2.1. Расчетная схема.

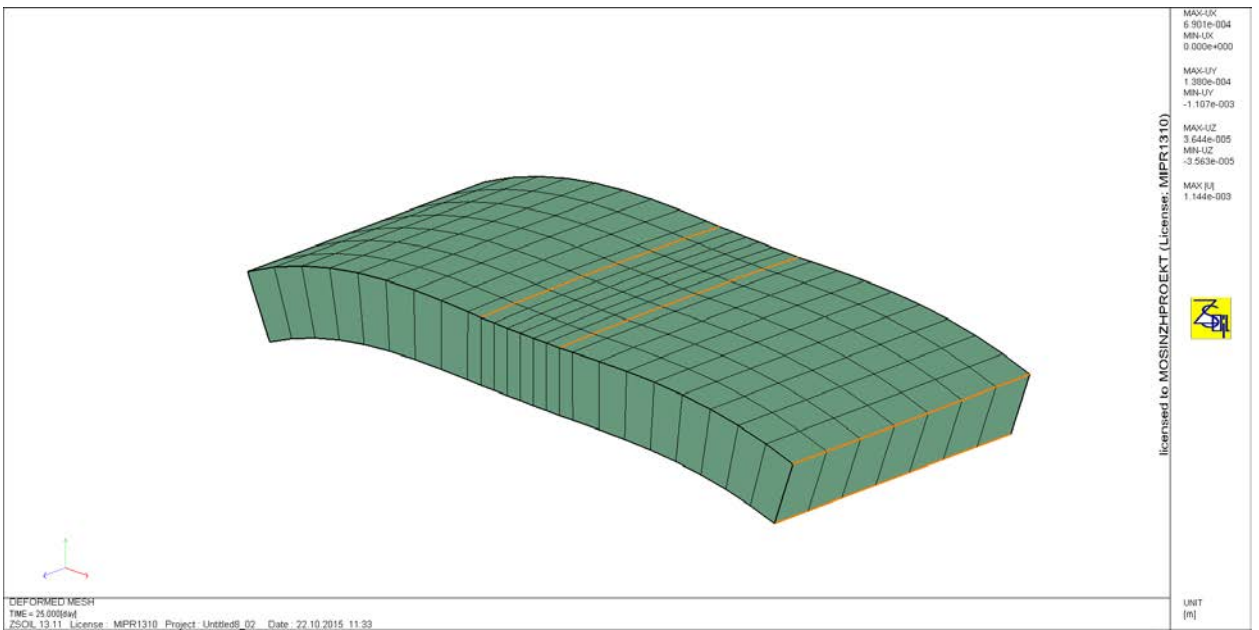


Рис. 4.2.2. Деформированная сетка (масштаб деформаций для наглядности увеличен).

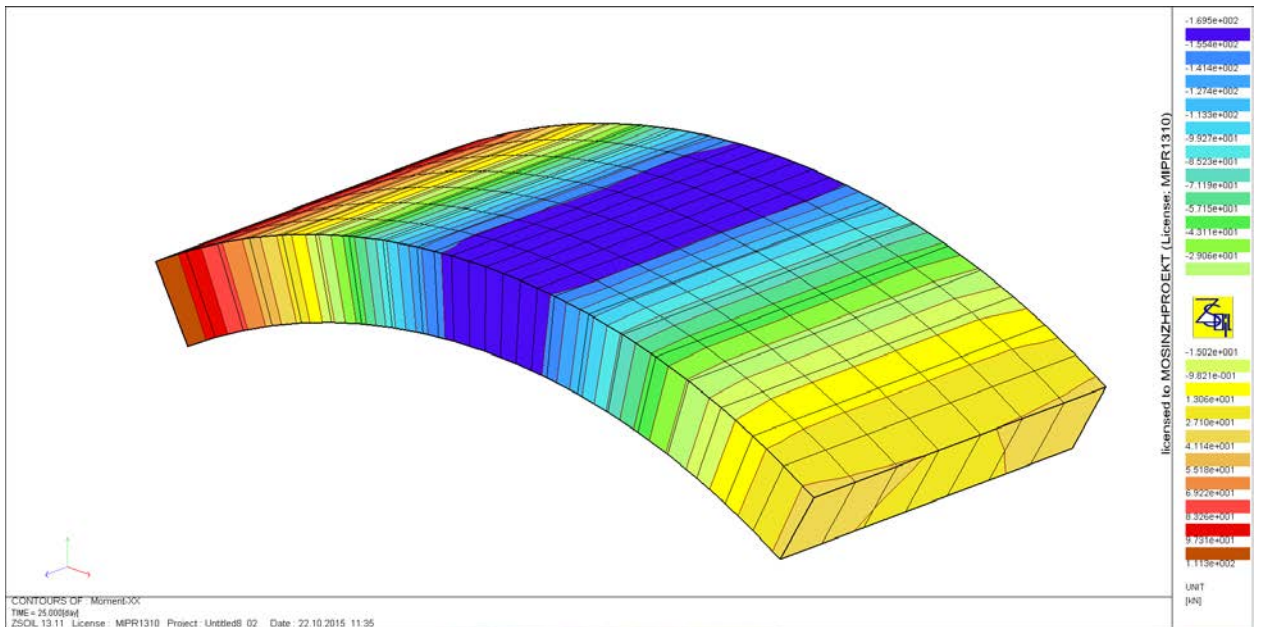


Рис. 4.2.3. Изгибающие моменты.

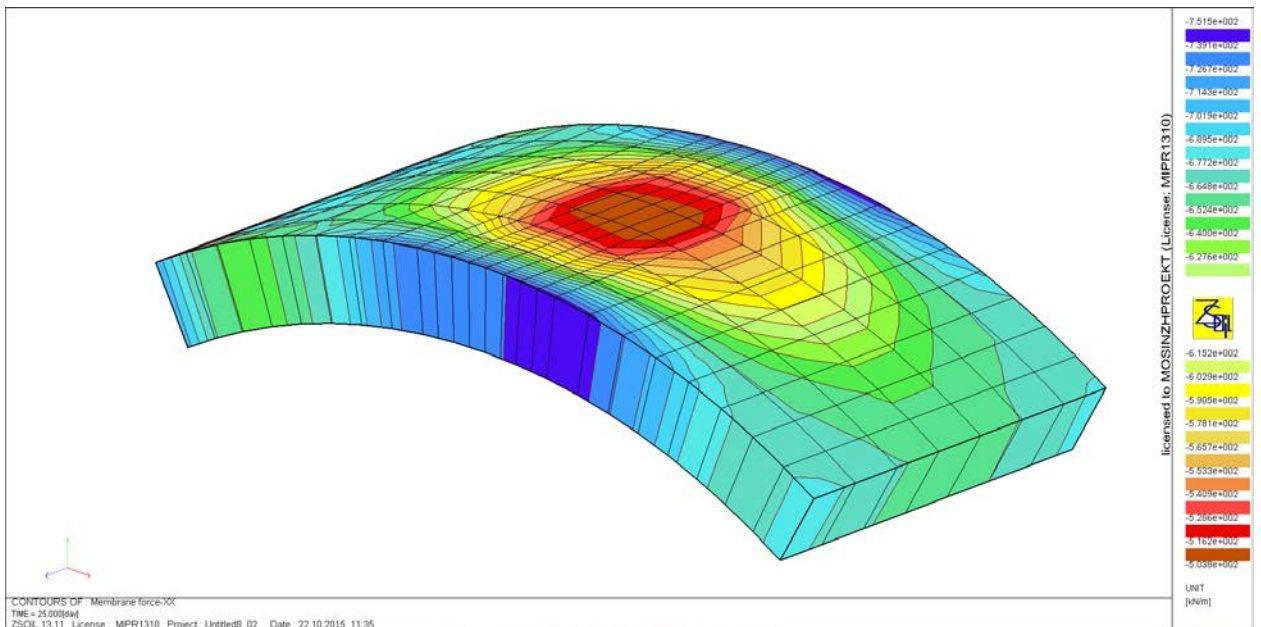


Рис. 4.2.4. Продольные силы.

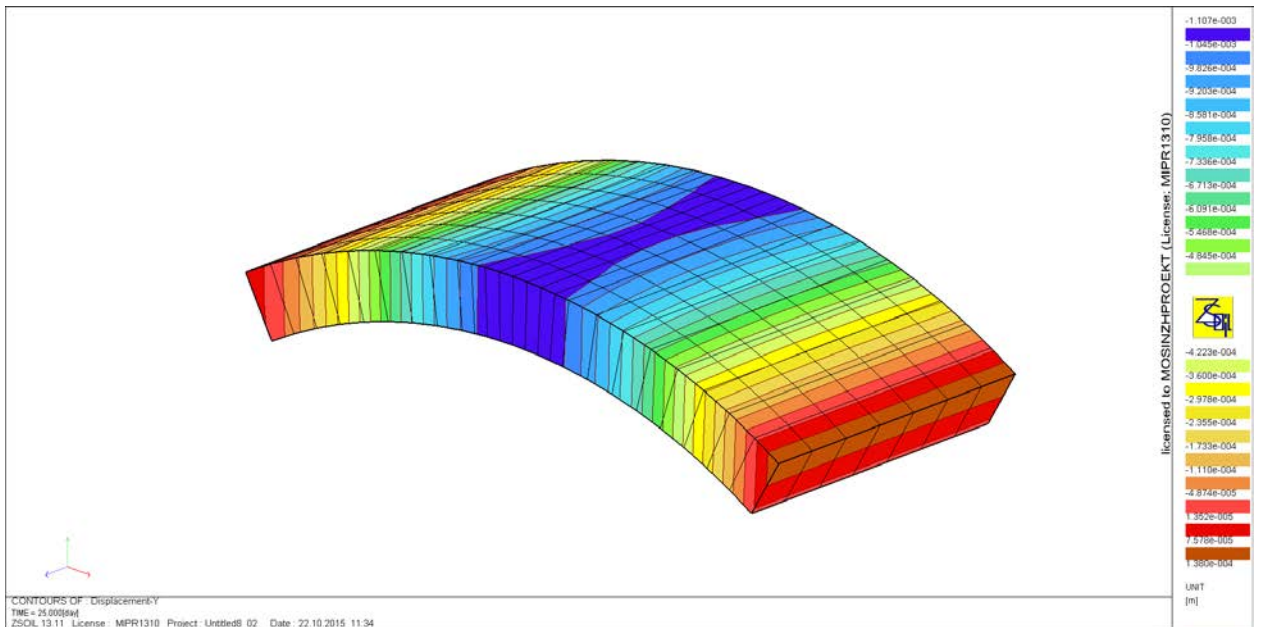


Рис. 4.2.5. Вертикальные перемещения.

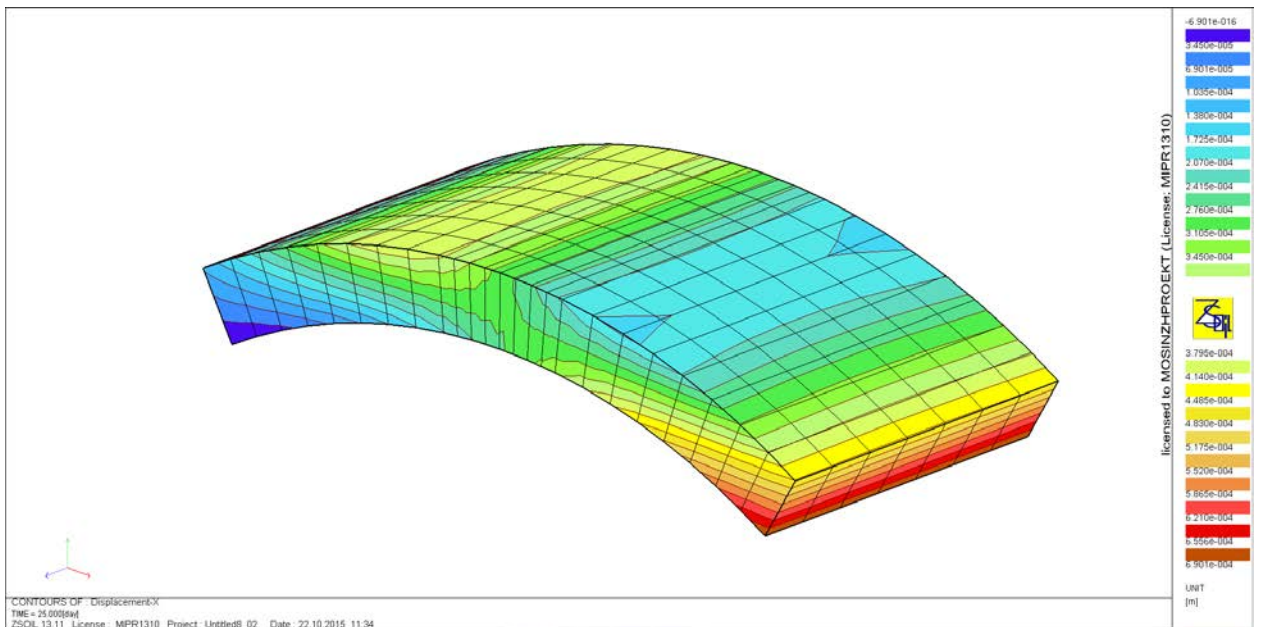


Рис. 4.2.6. Горизонтальные перемещения.

Этап 2. Численное моделирование испытаний блока обделки, корректировка модели по результатам испытаний.

По результатам выполненных экспериментов была выполнена корректировка расчетной модели. Путем снижения изгибной жесткости были получены значения деформаций блока, равные экспериментальным. Опытным путем было получено значение понижающего коэффициента, равное 0,16. Данное значение применимо для сжато-изгибаемых элементов. Для изгибаемых элементов значение коэффициента равно 0,1 (получено по результатам предыдущих экспериментов).

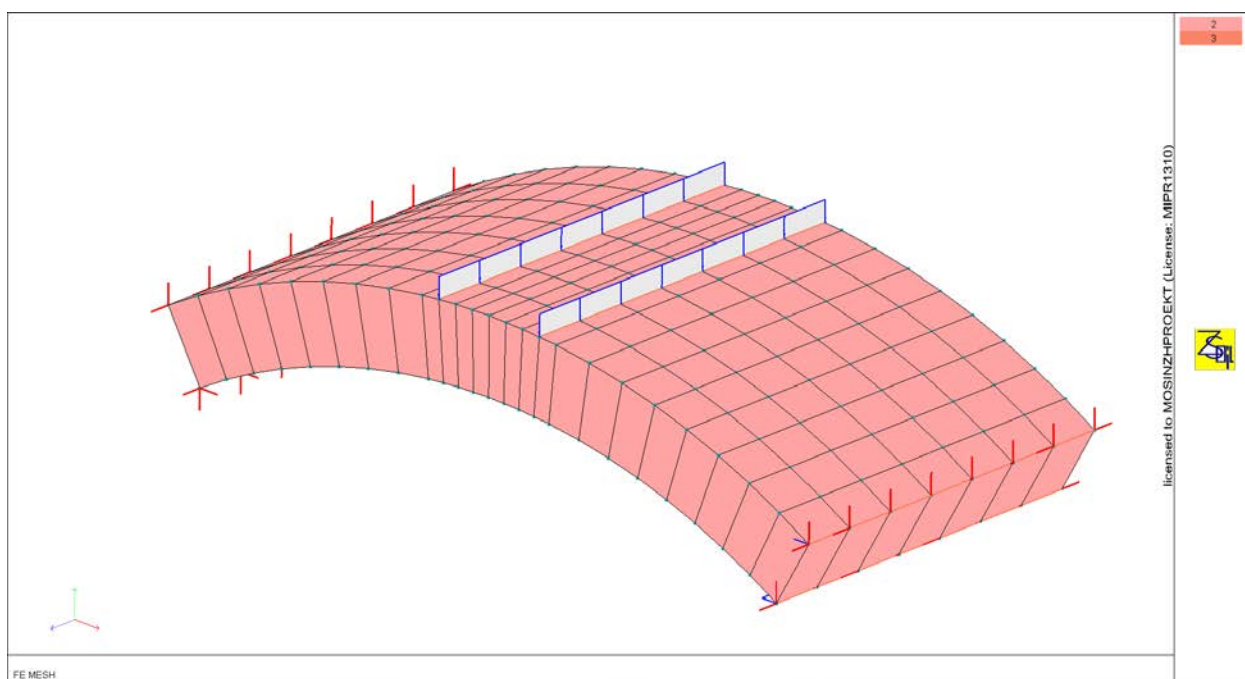


Рис. 4.2.7. Расчетная схема.

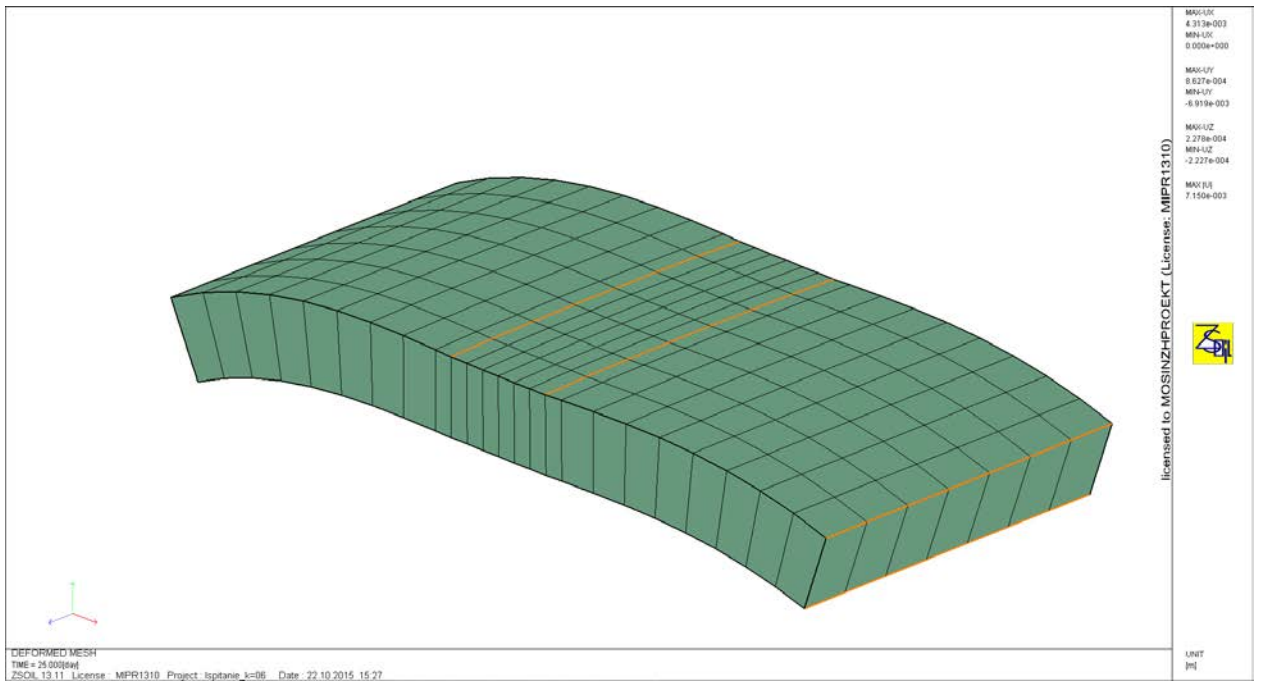


Рис. 4.2.8. Деформированная сетка (масштаб деформаций для наглядности увеличен).

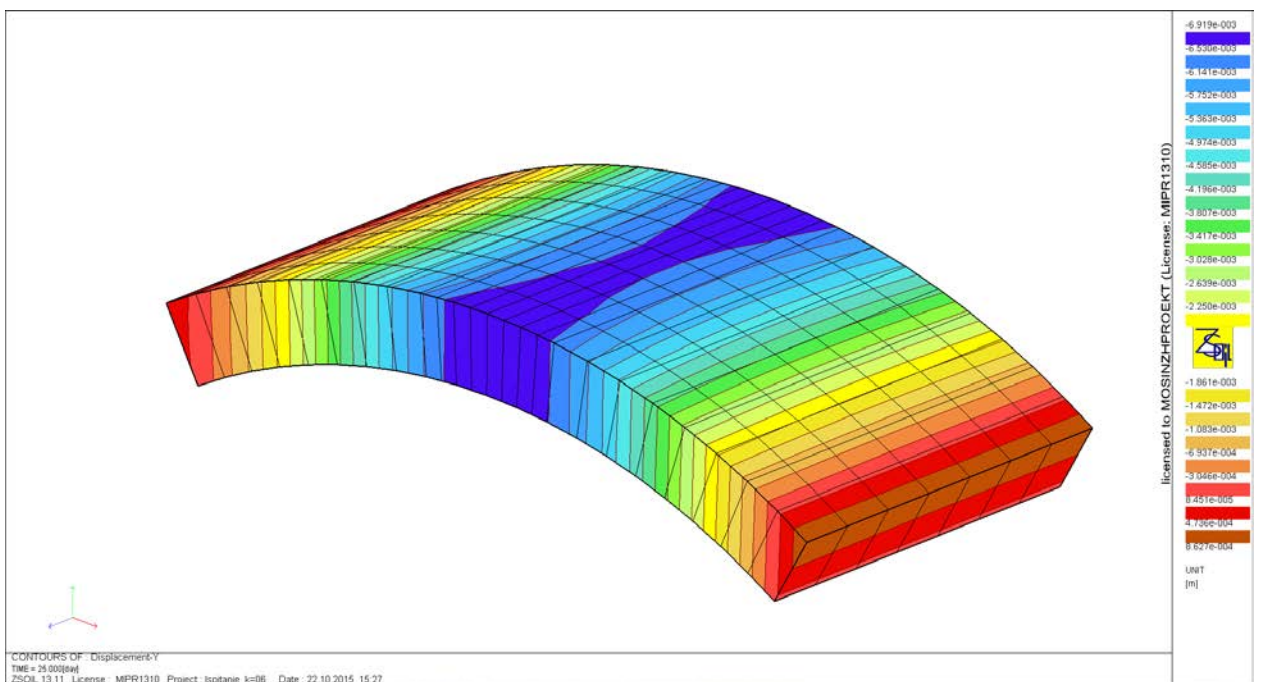


Рис. 4.2.9. Вертикальные перемещения при пониженном модуле упругости коэффициентом 0,16.

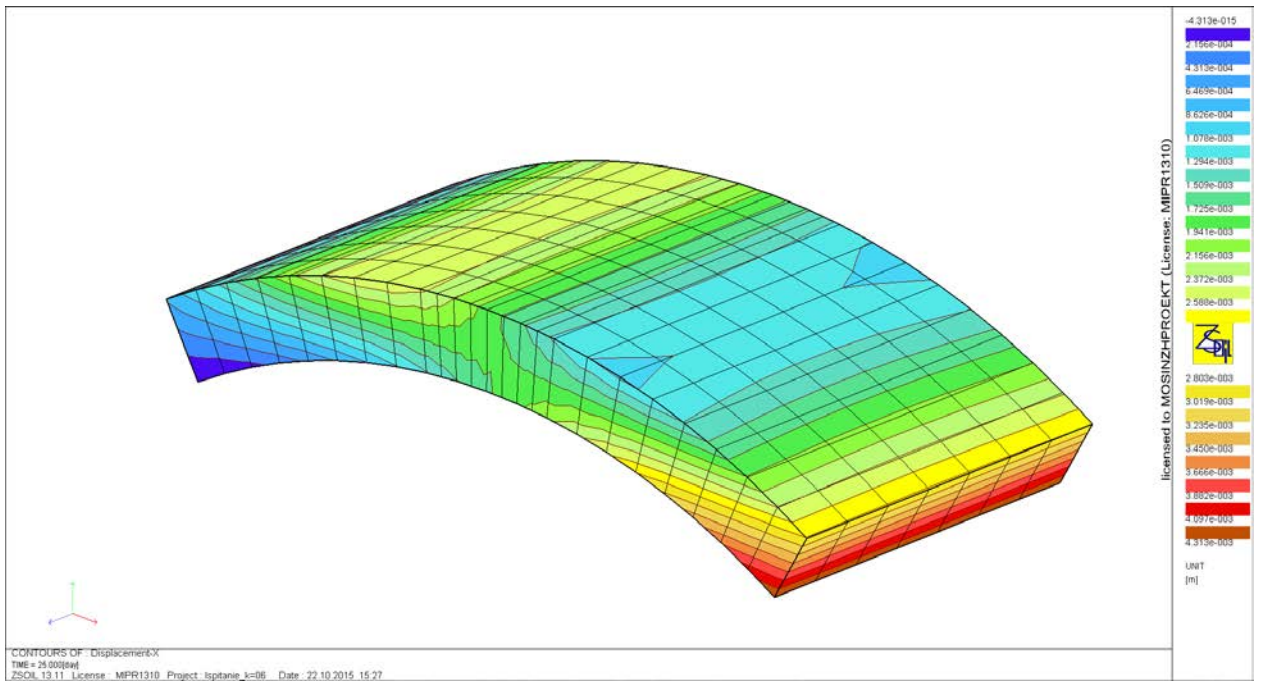


Рис. 4.2.10. Горизонтальные перемещения при пониженном модуле упругости коэффициентом 0,16.

Этап 3. Моделирование работы блоков тоннельной обделки в кольце во вмещающем грунтовом массиве.

Для определения возможности замены армирования блоков тоннельной обделки стальными каркасами на армирование стеклопластиковыми каркасами были выполнены сравнительные расчеты. В расчетах были учтены полученные по результатам испытаний расчетные предпосылки, а именно применена пониженная изгибная жесткость для блоков, армированных стеклопластиковой арматурой.

Изгибная жесткость снижалась также и для варианта обделки, армированной стальными каркасами.

Коэффициенты снижения изгибной жесткости были приняты соответственно 0,6 для стального армирования и 0,16 для стеклопластикового армирования.

Исходя из того, что продольная жесткость при этом снижаться не должна, были получены приведенные значения толщины и модуля упругости материала блоков. Значения подбирались исходя из соблюдения условий:

Результаты расчетов приведены на рис.4.2.11-4.2.17 и в таблицах 4.2.1-4.2.2.

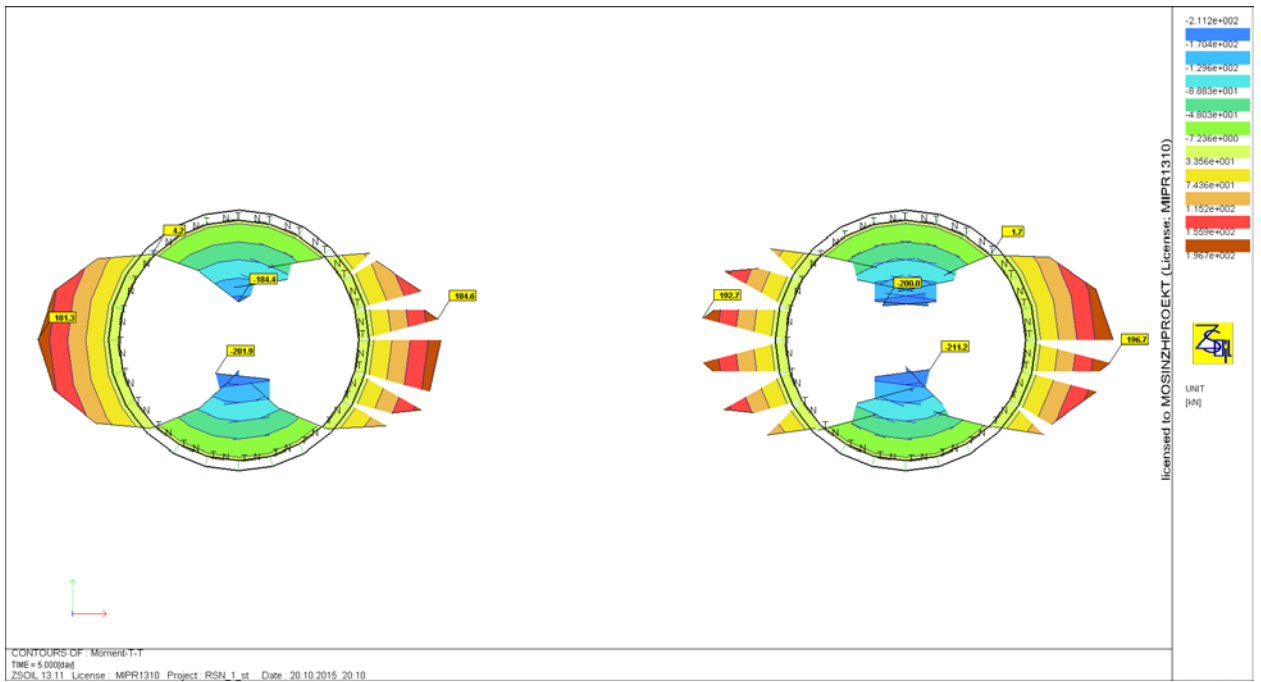


Рис. 4.2.11. Эпюры изгибающих моментов в обделке (стальное армирование).

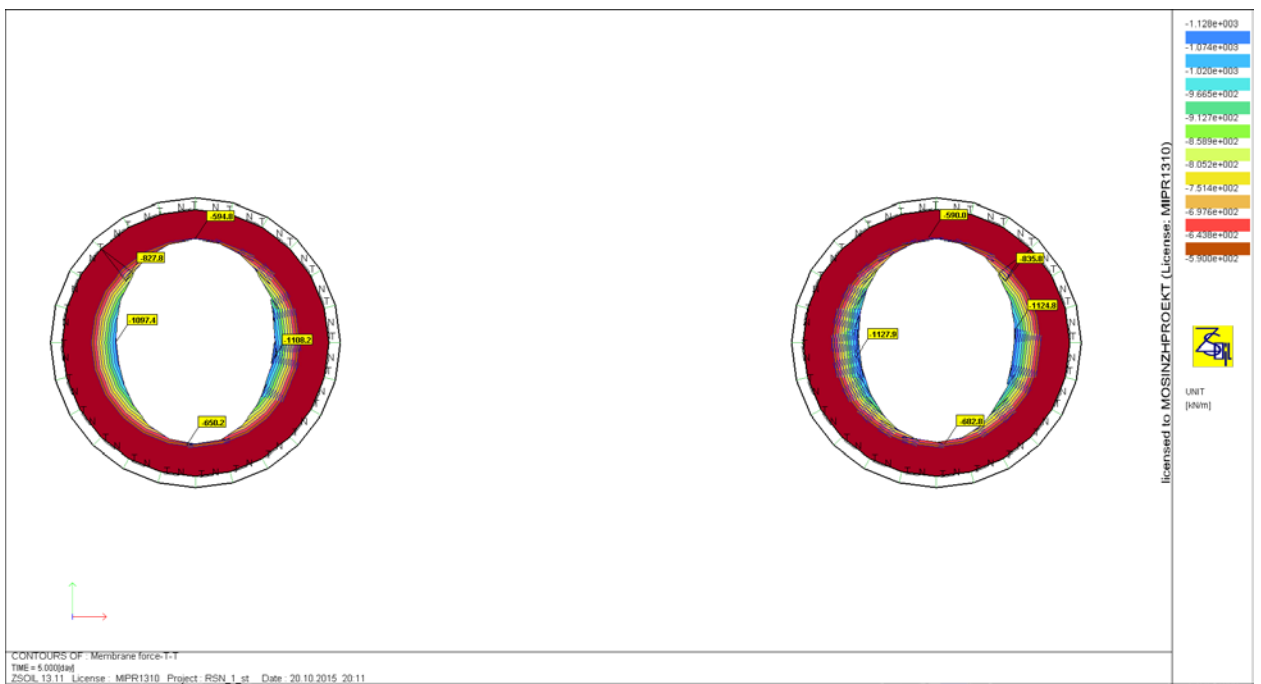


Рис. 4.2.12. Эпюры продольных сил в обделке (стальное армирование).

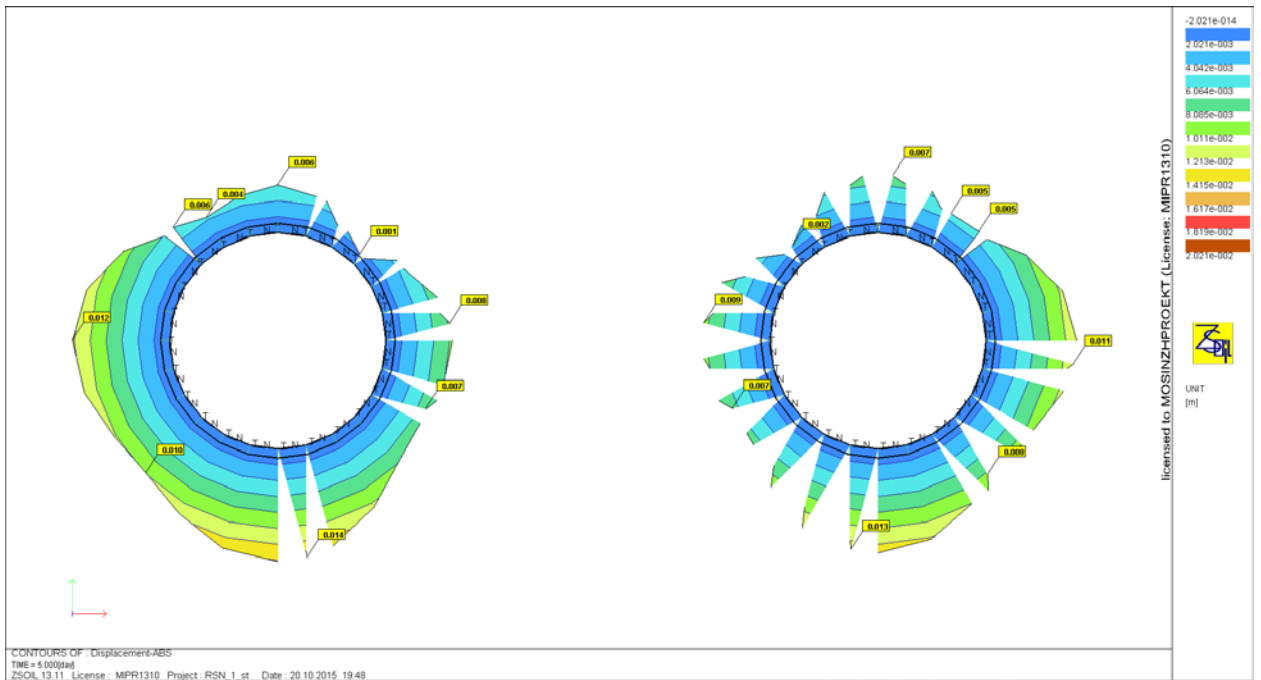


Рис. 4.2.13. Эпюры перемещений моментов в обделке (стальное армирование).

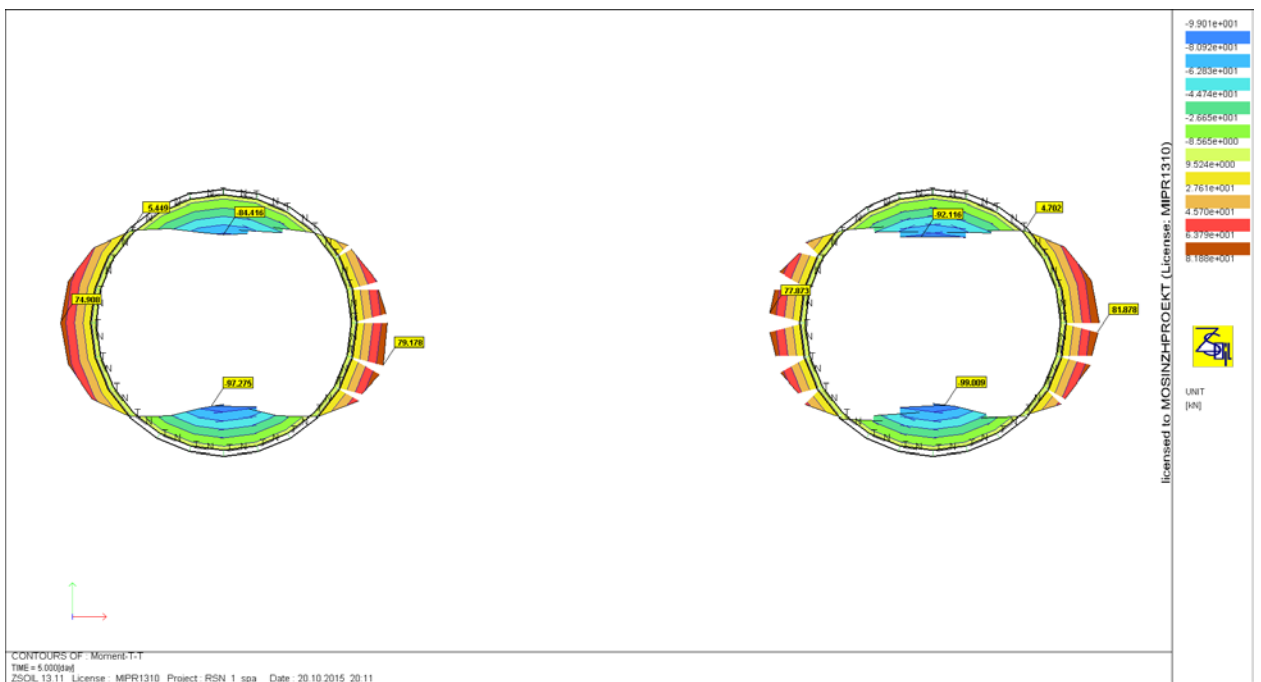


Рис. 4.2.14. Эпюры изгибающих моментов в обделке (стеклопластиковое армирование).

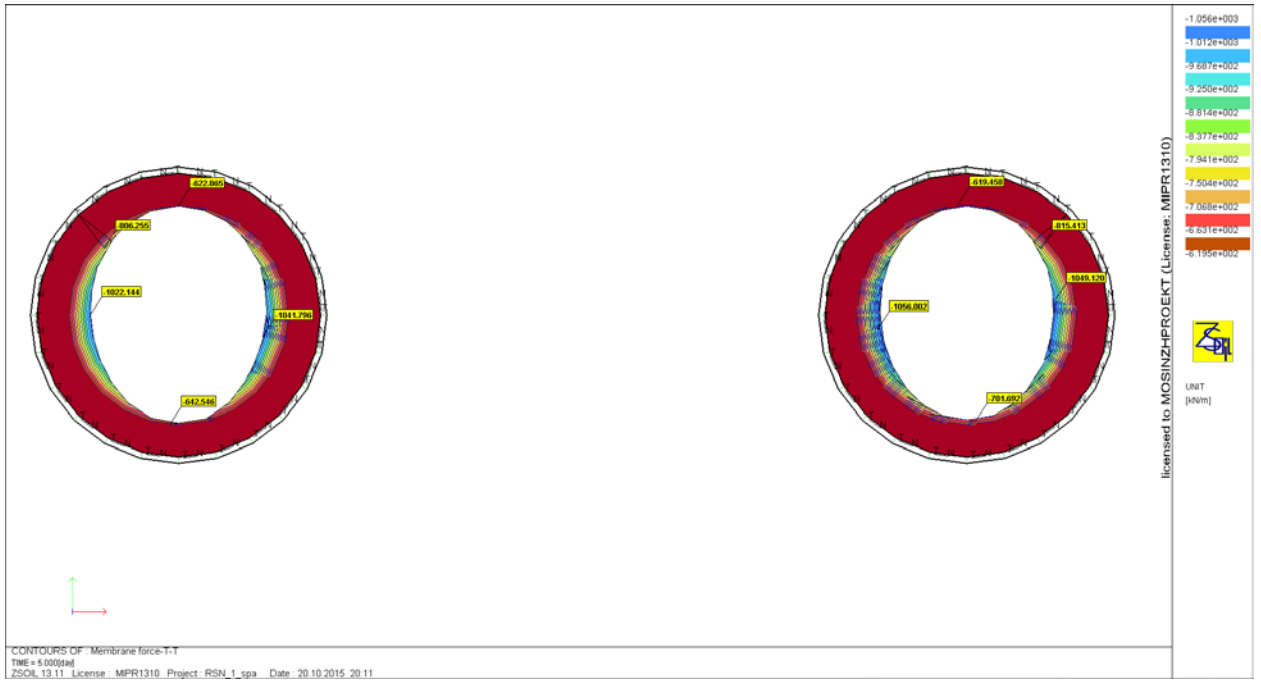


Рис. 4.2.15. Эпюры продольных сил в обделке (стеклопластиковое армирование).

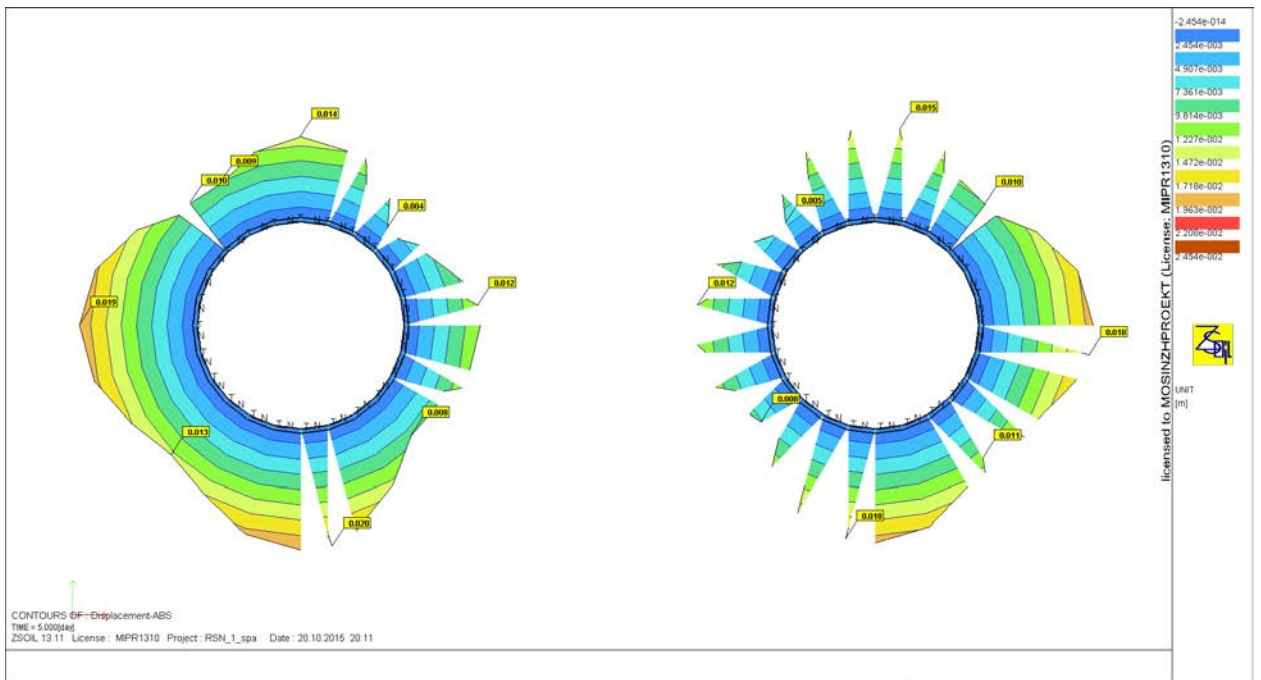


Рис. 4.2.16. Эпюры перемещений в обделке (стеклопластиковое армирование).

Таблица 4.2.1.

Сравнение внутренних усилий в конструкциях обделок.

Элемент конструкции	Стальное армирование		Стеклопластиковое армирование		Снижение изгибающего момента, %
	Внутренние усилия				
	Изгибающий момент, кНм	Продольная сила, кН	Изгибающий момент, кНм	Продольная сила, кН	
Свод	200,0	590,0	92,1	619,5	54,0
Горизонтальный диаметр	196,7	1124,8	81,9	1049,1	58,4
Лоток	211,2	682,8	99,0	701,7	53,2

Таблица 4.2.2.

Сравнение перемещений конструкций обделок.

Элемент конструкции	Перемещения, мм		Увеличение, %
	Стальное армирование	Стеклопластиковое армирование	
Свод	7,0	15,0	53,4
Горизонтальный диаметр	12,0	19,0	37,0
Лоток	14,0	20,0	30,0

По результатам расчета армирование блоков стеклопластиковой арматурой может быть уменьшено с 12 до 6 стержней рабочей арматуры, что даст экономические преимущества как по снижению материалоемкости, так и по трудозатратам на изготовление арматурных каркасов.

Инженер



Е.А. Хотеев

5. Выводы

На основании выполненных расчетов и испытаний блоков тоннельной обделки, армированных стеклопластиковым каркасом PROZASKelt RWB, конструкционной стеклопластиковой фиброй PROZASK PF 6-40 и полипропиленовой микрофиброй PROZASK IGS, можно сделать следующие выводы:

5.1. Расчет стеклопластбетонной обделки с полным модулем упругости бетона не отражает реальную работу конструкции. Необходимо вводить понижающие коэффициенты, учитывающие трещинообразование и проскальзывание на контакте бетона и арматуры. Понижающие коэффициенты изгибной жесткости, определенный для стеклопластбетонных конструкций, работающих в условиях внецентренного сжатия, опытным путем, составляет 0,16;

5.2. При испытании блоков тоннельных обделок следует добиваться реальных соотношений между продольной сжимающей силой и изгибающим моментом. Необходимо учитывать, что реальная тоннельная обделка испытывает сильное боковое обжатие, что приводит к возникновению в ней больших продольных сжимающих сил. Схема работы блока обделки при этом сильно отличается от изгибаемого элемента;

5.3. По результатам проведенных испытаний было установлено, что стеклопластиковая фибра способствует повышению трещиностойкости и сопротивляемости раскрытию трещин в стеклопластбетонных конструкциях. Принятая дозировка 10 кг/м³ стеклопластиковой фибры позволила увеличить нагрузку трещинообразования на 20% и уменьшить ширину раскрытия трещин на 50%.

Следует отметить, что максимальная рекомендованная дозировка стеклопластиковой фибры, рекомендованная изготовителем, составляет 18 кг/м³. Таким образом, имеется резерв для повышения трещиностойкости стеклопластбетонных конструкций.

5.4. Как показывают результаты расчета тоннельной обделки с учетом вмещающего грунтового массива и снижения изгибной жесткости, за счет перераспределения усилий, вызванного большим деформированием кольца обделки, удается добиться снижения изгибающего момента на 50-60%.

Деформации кольца при этом увеличиваются на 30-50%, однако, в абсолютных величинах не превышают 20 мм, что является допустимым для сборных высокоточных водонепроницаемых тоннельных обделок.

При этом, однако, возможно образование трещин, раскрытием до 0,5-0,7 мм.

5.5. Учитывая снижение изгибающего момента, возможно существенное облегчение стеклопластикового арматурного каркаса. На выходе это может привести к возникновению реального экономического эффекта от применения каркасов из композитной арматуры.

5.6. Образование в стеклопластбетонных блоках трещин раскрытием до 0,5-0,7 мм при проектных нагрузках должно быть регламентировано соответствующими нормативными документами. Такое раскрытие трещин является безопасным для композитной арматуры и принято в европейских стандартах на композитную арматуру.

5.7. Вопрос долговечности конструкций с СПА и СПФ, а также вопросы реологических свойств таких конструкций следует изучить дополнительно, в том числе, путем проведения испытаний на долговременную нагрузку.

5.8. Учитывая имеющиеся данные о работе СПА, СПФ, а также опираясь на мировой опыт их применения, наиболее перспективными для использования стеклопластиковых армирующих элементов представляются конструкции:

- временных крепей подземных выработок (особенно, учитывая характер НДС, шахтных стволов);
- конструкций коллекторных тоннелей;
- конструкций ограждений котлованов, особенно в местах врезки ТПМК;
- конструкций тоннельных обделок (после соответствующего экономического обоснования).

5.9. Применение СПА и СПФ в постоянных конструкциях возможно только после разработки и утверждения соответствующих нормативных документах (СТО, СП).

Инженер



Е.А. Хотеев