

ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ЛОБЯК ОЛЕКСІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК [624.016:624.074].001.24

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН
СТАЛЕБЕТОННОГО МЕМБРАННОГО ПОКРИТТЯ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків-2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі будівельної механіки і гідравліки Харківської державної академії залізничного транспорту Міністерства транспорту України.

Науковий керівник:

- доктор технічних наук, професор

Чихладзе Елгуджа Давідович завідувач кафедрою будівельної механіки і гідравліки Харківської державної академії залізничного транспорту.

Офіційні опоненти:

– доктор технічних наук, професор

Астанін В'ячеслав Валентинович, професор кафедри механіки Національного авіаційного університету;

– кандидат технічних наук, доцент

Більченко Анатолій Васильович, доцент кафедри “Мости, конструкції і будівельна механіка” Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Провідна установа:

– Харківський державний технічний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій.

Захист відбудеться 27 грудня 2001 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 при Харківській державній академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківської державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий 22 листопада 2001 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради канд. техн. наук, доцент

Ватуля Г. Л.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Задачі зниження металоємності, вартості і трудомісткості будівництва мембранних покриттів на плоскому, прямокутному в плані, опорному контурі можуть бути успішно вирішені шляхом використання бетонного шару як стабілізуючого елемента, а сталобетону – як опорного контуру. Цьому сприяє багатофункціональне і раціональне застосування матеріалів у конструкції покриття й опорного контуру, що виражається в наступному: в опорному контурі – сполученням функцій робочої арматури з захисними та ізоляційними властивостями, підвищенням міцності бетону, що досягається за рахунок ефекту обійми, спроможністю перетину контуру працювати при позацентровому стиску і вигині; у конструкції прольотної частини покриття – використанням бетонного шару одночасно як стабілізатора і несучого елемента, спроможністю сталевих листів сприймати розтягуючі зусилля одночасно в усіх напрямках у площині.

Для підвищення ефективності і більш широкого поширення в практиці проектування і будівництва сталобетонних мембранних покриттів необхідно удосконалення конструкцій таких покриттів і розробка нових методів їхнього розрахунку.

Метою роботи є розробка нових конструктивних рішень стабілізованих мембранних покриттів на плоскому, прямокутному в плані, опорному контурі, що відповідають вимогам ефективності й економічності стосовно до реконструкції і нового будівництва, а також розробка математичного й обчислювального апарату для оцінки їх напружено-деформованого стану.

Задачі досліджень. Для досягнення поставленої в роботі мети були визначені наступні задачі:

1. Розробити модель мембранного покриття, прольотна конструкція якої дозволяла б забезпечити спільну роботу тонкого листа (мембрани) і бетонного шару, що об'єднує в собі якості стабілізатора і несучого елемента.
2. На підставі створеної моделі розробити теоретичні принципи розрахунку конструкції моделюємого мембранного покриття.
3. Розробити математичний апарат розрахунку конструкції сталобетонного мембранного покриття на піддатливому сталобетонному опорному контурі, прольотна конструкція якого працює спільно зі стабілізуючим його бетонним шаром.
4. Експериментально на моделях вивчити особливості роботи сталобетонного мембранного покриття з різною піддатливістю контуру.
5. На підставі теоретичних і експериментальних досліджень зробити оцінку ступеня впливу спільно працюючого з листом бетону на роботу прольотної конструкції і всього покриття в цілому.
6. Упровадити результати проведених досліджень у практику проектування і розрахунку конструкцій мембранних покриттів.

Об'єкт дослідження. Зниження металоємності, вартості і трудомісткості будівництва

сталебетонного мембранного покриття на плоскому прямокутному контурі.

Предмет дослідження. Напружено-деформований стан сталебетонної мембрани і сталебетонного опорного контуру, обумовлений з урахуванням піддатливості контуру і піддатливості контакту зрушення між тонким листом і бетоном.

Методи дослідження. Визначення напружено-деформованого стану сталебетонного мембранного покриття здійснюється теоретичним і експериментальним шляхом. Теоретичні принципи досліджень ґрунтуються на положеннях теорії деформування сталебетону, у яких бетон приводиться до умовно ізотропного матеріалу, зв'язки мембрани з бетоном вважаються абсолютно твердими в поперечному напрямку і піддатливими в подовжньому. Для експериментального дослідження поставленої задачі випробовувались моделі сталебетонного мембранного покриття з різними характеристиками піддатливості сталебетонного опорного контуру.

Наукова новизна. Наукову новизну даних досліджень визначають наступні результати:

1. Розроблено конструкцію прямокутного в плані сталебетонного мембранного покриття на плоскому сталебетонному опорному контурі.
2. Розроблено й експериментально апробовано методику оцінки напружено-деформованого стану сталебетонного мембранного покриття на піддатливому опорному контурі.
3. Отримано експериментальні дані про несучу спроможність і деформації, що виникають в опорному контурі та прольотній конструкції, моделей сталевих і сталебетонних мембранних покриттів.
4. Отримано результати порівняльного аналізу експериментальних даних при випробуванні моделей сталевих і сталебетонних мембранних покриттів на піддатливому сталебетонному опорному контурі. На підставі отриманих результатів оцінено ступінь впливу бетону мембрани на напружено-деформований стан мембранного покриття в цілому.

Практичне значення отриманих результатів. На підставі отриманих експериментальних і теоретичних даних з'являється можливість подальшого удосконалювання конструкцій сталебетонних мембранних покриттів із забезпеченням їхньої ефективності й експлуатаційної надійності.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у вигляді програми розрахунку НДС сталебетонного мембранного покриття в проектному інституті Харківметропроект і в навчальному процесі Харківської державної академії залізничного транспорту.

Особисто отримані здобувачем результати.

1. На підставі літературних джерел виконано аналіз конструктивних рішень і методів розрахунку мембранних покриттів цивільних і промислових будівель у взаємозв'язку з характером їх роботи і методами стабілізації.
2. Розроблено моделі сталебетонного мембранного покриття з прольотною конструкцією, що

дозволяє забезпечити спільну роботу листа і бетонного шару, що об'єднує в собі якості стабілізатора і несучого елемента.

3. Проведено експериментальні дослідження роботи моделей сталевого і сталебетонного мембранного покриття, і отримано результати їхнього порівняльного аналізу.

4. Розроблено методичку розрахунку сталебетонного мембранного покриття на піддатливому сталебетонному опорному контурі.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на:

1. Другій науково-технічній конференції “Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди” (м. Рівне, 1999 р.).

2. Науково-технічних конференціях Харківської державної академії залізничного транспорту (1998-2000 р.р.).

3. Міжнародній науково-практичній конференції “Качество, безопасность, энерго- и ресурсосбережение в промышленности строительных материалов и строительства на пороге XXI века” (м. Белгород, 2000 р.).

4. Міжнародній науково-практичній конференції “Башенные сооружения: материалы, конструкции и технологии” (м. Макіївка, 2001 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано у 5 наукових працях.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатка і нараховує 183 сторінок машинописного тексту, у тому числі: 103 рисунка, 5 таблиць, 15 сторінок додатків. Перелік використаних джерел нараховує 114 праць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі дисертації подано огляд літературних джерел присвячених опису існуючих видів конструктивних рішень будівель і споруд з мембранними покриттями.

Унаслідок незначної згинальної жорсткості і мінливості форми мембранних покриттів від дії зовнішнього навантаження її первісна поверхня має потребу в стабілізації. Один з найбільш простих способів стабілізації є збільшення ваги прольотної конструкції завдяки використанню укладення на її поверхню шару бетону. Огляд накопиченого матеріалу на цю тему показав, що питання урахування бетону в роботі мембранного покриття вивчені недостатньо. Більш того, при застосуванні бетону як стабілізатора не забезпечувався його зв'язок з мембраною, що обмежувало використання його несучої спроможності і деформативності. Разом з тим, огляд літературних джерел показав, що недостатньо вивчені і питання, котрі пов'язані з можливістю застосування як бортового елемента мембранного покриття конструкцій з зовнішнім листовим армуванням.

Об'єктом більш детального дослідження в цьому розділі є конструкція покриття на плоскому прямокутному контурі. Особливість роботи таких покриттів докладно вивчалася теоретично й експериментально в роботах Л. І. Гольденберга, П. Г. Єремєєва, А. М. Людковського, В. Г. Гордєєва, В. В. Ленського, В. Б. Микуліна, В. И. Трофімова, Д. В. Ладиженського, А. П. Скалоухова, В. А. Пермякова, А. С. Григор'єва, В. А. Щадрина, В. В. Карлина, Г. А. Аюбова, А. А. Светова, М. А. Іванова, А. Е. Сутягіна, А. С. Манвелова, М. И. Аляутдинова, В. Л. Кулікова, К. Н. Ілієва, А. Я. Прицкера та інших авторів.

У підрозділі “Розрахунок мембранних оболонок” розглянуті аналітичні і чисельні методи розрахунку мембранних оболонок з їхніми характерними достоїнствами і недоліками. Аналітичні методи дають рішення задачі в замкнутому вигляді, у чому їхнє безсумнівне достоїнство. Разом з тим, вірогідність одержуваних аналітичними методами результатів залежить від ступеня збігу прийнятих деформаційних передумов (форми скривлення контуру і мембрани) і дійсного деформування конструкції, що розраховується. Існуючі чисельні способи розрахунку виконуються методом скінченних елементів або за допомогою стержневої апроксимації, при якій континуальна система приводиться до дискретної. У порівнянні з аналітичними, ці методи мають великі можливості і дозволяють, у більшості випадків, одержати досить надійні рішення, що і дозволяють їхнє використання на стадії робочого проектування. Питання розрахунку мембранних оболонок досліджувалися так само в роботах А.В. Олександрова, Н.Н. Шапошникова, М. Р. Фельдмана, В.Б. Зилєва, Б.Я. Лашеникова, О.О. Андрєєва, В.И. Малого, И. Л. Должикова, В. М. Мельникова, В. А. Ніколенкова, И. А. Шарапан, В.Г. Рекач, Л.А. Розина, В.П. Петрова, В.М. Картвелішвілі та інших авторів.

Другий розділ дисертації присвячено теоретичному дослідженню напружено-деформованого стану сталобетонного мембранного покриття на плоскому прямокутному контурі.

Вплив піддатливості контакту тонкого листа з бетоном (піддатливість зв'язків зрушення) у кожному перетині враховується введенням параметра λ_i , величина якого відповідно до рис. 1 визначається залежністю:

$$\lambda_i = \frac{(\varepsilon_{si}^* - \Delta\varepsilon_{si})}{\varepsilon_{si}^*} = \frac{[k_i(\delta/2 + x_{ti}) - \Delta\varepsilon_{si}]}{k_i(\delta/2 + x_{ti})}, \quad (1)$$

де $\Delta\varepsilon_{si}$ – величина відносного зрушення по контакті мембрани з бетоном; k_i – кривизна перетину; x_{ti} – відстань від нижньої кромки перетину до нейтральної поверхні; $i=1,2$.

Рис. 1. Напруження і деформації в перетині сталобетонної мембрани

Опис процесу деформування бетону мембрани, що піддається двохосьовому розтягнанню, виробляється відповідно до підходу, прийнятому у роботах Е.Д. Чихладзе. Для конкретних видів напруженого стану (співвідношень напружень на головних площадках $\eta = \sigma_1 / \sigma_2$) експериментальні діаграми деформування бетону апроксимуються аналітичною залежністю у вигляді полінома:

$$\sigma_{bti} = \sum_{k=1}^n A_{tik} (\varepsilon_{bti}'')^k \left(\frac{z}{\bar{x}_{ti}} \right)^k, \quad (2)$$

де A_{tik} – невідомі коефіцієнти, що визначаються з умови мінімуму квадратичних відхилень експериментально отриманих значень напружень; \bar{x}_{ti} – висота розтягнутої зони бетону, що визначається за умовою виходу з роботи тих волокон, величина деформацій у яких перевищує гранично припустимі значення; z – відстань від нейтральної поверхні до розглянутого волокна.

Як вихідні експериментальні діаграми деформування бетону в умовах плоского напруженого стану для апроксимації залежності (2) використані дані німецького дослідника Г. Купфера.

Вираз для напружень у тонкому листі визначається відповідно до закону Гука для плоского напруженого стану:

$$\begin{aligned} \sigma_{s1} &= E_s (\varepsilon_{s1}^* \lambda_1 + \nu_s \varepsilon_{s2}^* \lambda_2) / (1 - \nu_s^2) \\ \sigma_{s2} &= E_s (\varepsilon_{s2}^* \lambda_2 + \nu_s \varepsilon_{s1}^* \lambda_1) / (1 - \nu_s^2) \end{aligned}, \quad (3)$$

де E_s, ν_s – відповідно, модуль пружності і коефіцієнт поперечних деформацій тонкого листа, а $\varepsilon_{si}^* = \varepsilon_{si} / \lambda_i$.

Величина погонного згинального моменту і подовжнього зусилля по висоті перетину обчислюються за прийнятими законами розподілу напружень у бетоні й у тонкому листі, що відповідно з рис. 2 записуються в такий спосіб:

$$M_i = \int_0^{\bar{x}_{ti}} \sigma_{bti} z dz - \int_0^{x_{ti}-h_b} \sigma_{bti} z dz + \sigma_{si} A_s (x_{ti} + \delta/2), \quad (4)$$

$$N_i = \int_0^{\bar{x}_{ti}} \sigma_{bti} dz - \int_0^{x_{ti}-h_b} \sigma_{bti} dz + \sigma_{si} A_s, \quad (5)$$

де A_s – площа тонкого листа на одиниці ширини перетину; δ – товщина мембрани.

Обчислення інтегралів супроводжується уведенням величини узагальненого інтегрального модуля деформації, обумовленого відповідно до виразу:

$$\bar{E}_{bti} = 3 \sum_{k=1}^n \frac{A_{tik} (\varepsilon_{bti}^n)^{k-1}}{(k+2)} \quad (6)$$

Приведення бетону до умови ізотропного миттєво-пружного суцільного середовища виконується відповідно до умови переходу:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{bt} &= E_{bt} (1 - \nu_{bt} \eta) \\ \nu_{bt} &= \eta \left(1 - \frac{\bar{E}_{bt1}}{\bar{E}_{bt2}} \right) / \left(1 - \eta^2 \frac{\bar{E}_{bt1}}{\bar{E}_{bt2}} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

де $\eta = \sigma_2 / \sigma_1$ вважається відомою величиною і сталою в процесі деформування; E_{bt} – модуль пружності приведенного середовища; ν_{bt} – коефіцієнт поперечних деформацій бетону.

Уведення величини узагальненого інтегрального модуля деформації враховує вплив поперечних зусиль на деформації в подовжньому напрямку і є характеристикою еквівалентного по твердості лінійно деформованого перетину. Фізичний зміст останнього виразу тотожний змісту інтегрального модуля деформацій, поняття якого введено В. М. Бондаренком. Однак, на відміну від нього, запропоноване рішення дає більш строгу оцінку деформаційних властивостей перетину відповідно до реальної діаграми $\sigma_i - \varepsilon_i$ деформування бетону і деформованим станом перетину.

Рис. 2. Елемент сталобетонної мембрани

Після перерахованих перетворень, угруповань і введення деяких позначень вирази (4) і (5) приводяться до наступного вигляду:

$$\begin{vmatrix} M_1 \\ M_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{1M} & D_{vM} \\ D_{vM} & D_{2M} \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{Bmatrix}; \begin{vmatrix} N_1 \\ N_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{1N} & D_{vN} \\ D_{vN} & D_{2N} \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

де $k_i = \varepsilon_{bti}'' / \bar{x}_{ti} = \varepsilon_{bti}' / (x_{ti} - h_b) = \varepsilon_{si}^* / (x_{ti} + \delta / 2)$ – кривизна в i -тому перетині сталобетонної мембрани;

Вираз (8) представляє собою фізичне рівняння вигину і розтягання малого елемента сталобетонної мембрани в місцевій системі координат ($i=1,2$). Жорсткості $D_{iM}, D_{iN}, D_{vM}, D_{vN}$, що входять у ці рівняння, а також положення нульової поверхні x_{ti} , що визначається з умови рівності нулю проєкцій усіх сил діючих у перетині на горизонтальну площину, є безупинними функціями деформованого стану перетину, тобто однозначно визначаються значеннями k_i ($i=1,2$).

Рівняння вигину і розтягання малого сталобетонного елемента в ортогональній системі

координат x і y визначаються на підставі умов перетворення тензора і мають вигляд:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11M} & D_{12M} & D_{13M} \\ D_{21M} & D_{22M} & D_{23M} \\ D_{31M} & D_{32M} & D_{33M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ 2k_{xy} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11N} & D_{12N} & D_{13N} \\ D_{21N} & D_{22N} & D_{23N} \\ D_{31N} & D_{32N} & D_{33N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ 2k_{xy} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

де D_{ijM} , D_{ijN} – жорсткості, які визначаються відповідно до виразів, що відображають перехід тензора із системи координат i, j в x, y .

Рівняння рівноваги нескінченно малого елемента, завантаженого крім поперечного навантаження ще і силами, що діють у середовищній площині, напруження в якій значно впливають на вигин, як і в теорії вигину ізотропних пластинок при великих прогинах, має вигляд:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} = - \left(q(x, y) + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (10)$$

Фізичні рівняння (8), рівняння рівноваги (10) і геометричні залежності для кривизн, що визначені відповідно до лінійної теорії пружності, представляють повну систему рівнянь, що визначає напружено-деформований стан малого елемента сталобетонної мембрани.

Як чисельний метод розв'язання отриманої системи рівнянь використовується метод скінченних різниць, що вважається одним з найефективніших методів рішення задач вигину пластинок, пристосований для різних умов обпирання, різного навантаження і різних обрисів контуру пластинки.

Відповідно до прийнятого методу на поверхні пластинки обирається 81 точка, що представляють собою вузли скінченно-різницевої сітки. Для кожної з цих точок записують вихідні рівняння, у яких часткові похідні замінюють наближеними значеннями пошукової функції прогинів у вузлах сітки. У результаті, безупинне розв'язання замінюють його дискретними значеннями, а диференціальне рівняння зводять до системи алгебраїчних.

Після визначених перетворень і угруповань вирішальне рівняння представляється у вигляді залежності відносно 20 невідомих значень функції прогинів мембрани в межах розглянутої точки з координатами i, j і має наступний вигляд:

$$\sum_{k=0}^{20} B_k w_k + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 B_n_i B_n_j D_{(i,j)n} = q(x, y), \quad (11)$$

де B, B_n – коефіцієнти, що представляють собою функцію жорсткостей рівняння (9); k – номер вузла сітки в розглянутому околі точки з координатами i, j ; w_k – невідомі значення прогинів.

При наявності кінцевого числа точок мембрани, записуючи рівняння (11) для кожної з них, у результаті виходить система нелінійних алгебраїчних рівнянь, розв'язання якої зводиться до

навантаження. При цьому, вичерпання несучої спроможності мембрани оцінюється з залученням енергетичного критерію, а контуру – або по граничних напруженнях у бетоні, або в сталевій обоймі за тим же енергетичним критерієм.

Чисельна реалізація описуваних обчислень виконувалася з використанням програмного пакета “Borland Pascal 7”. Програма складається з основної частини (Plate) і трьох додаткових модулів (Intface, Beton, Gauss), що виконують закінчену послідовність операцій.

У третьому розділі дисертації описано проведені експериментальні дослідження роботи сталобетонних мембранних покриттів. Метою проведеного випробування було встановлення закономірностей деформування, тріщиноутворення і вичерпання несучої спроможності елементів моделі квадратного в плані мембранного покриття зі стабілізацією сталевих листів і варіюванням піддатливості опорного контуру.

Моделювання запропонованого типу покриття виконувалося за умови аналогічного конструктивного рішення існуючим реально мембранним покриттям. Одним з таких прикладів є мембранна оболонка на плоскому прямокутному контурі одного з цехів заводу “Компресор” (Москва), розроблена в 1982 р. за проектом інституту ПроектНДІспецхіммаш і НДІЗБ. Прямокутне покриття з замкнутим трубобетонним опорним контуром розміром у плані 60×81 м, перекрито мембраною товщиною 4 мм.

Дані дослідження проводилися на лабораторній базі кафедри “Будівельна механіка і гідравліка” Харківської державної академії залізничного транспорту і склалися з двох етапів. На першому етапі проводилися дослідження моделей покриття без стабілізації мембрани (серія М), а на другому як стабілізатор була присутня бетонна стяжка (серія МБ).

Модель мембранного покриття з розмірами в плані 1×1 м, складалася з наступних основних частин: сталевих мембран, опорного контуру і сполучної деталі, що представляє собою опорний столик, який лежить на жорстко прикріплених до контуру ребрах (див. рис. 3).

Мембрана, виконана із суцільного сталевих листів товщиною 1 та 1.5 мм, приварювалася до сполучної деталі по всій довжині по обидві. Для моделей серії МБ мембрана виконувалася в комбінації з бетоном, товщина якого складала 20 мм.

Зв'язок мембрани з бетоном виконувався завдяки встановленню на її поверхню анкерної сітки з гладкої дротової арматури $d=2$ мм класу Вр-1 і кроком сітки 100 мм. У кожному вузлі анкерної сітки виконувався її зв'язок з мембраною за допомогою методу “холодного зварювання”.

Опорний контур моделей виконувався у вигляді горизонтальної сталобетонної замкнутої рами коробчатого перетину. Відповідно до поставлених задач в моделях кожної серії передбачалася своя піддатливість опорного контуру, що характеризувалася відносними параметрами “ \bar{n} ” і “ \bar{k} ”, приведеними у табл. 1:

$$\bar{n} = \frac{(EI)_k}{E\delta a^3}; \quad \bar{k} = \frac{(EA)_k}{E\delta a}, \quad (13)$$

де $(EI)_k$ і $(EA)_k$ - згинальна і подовжня жорсткості; E, δ – модуль пружності і товщина мембрани; a – половина сторони квадратного плану покриття; \bar{n}, \bar{k} - відповідно відносна згинальна і подовжня жорсткості контуру.

Таблиця 1– Жорсткісні характеристики елементів моделей і дані про руйнування

Серія	Розміри перетину контуру (мм)	Піддатливості опорного контуру		Розміри мембрани (мм)	Поява перших тріщин (кН)	Продавлення бетону (кН)	Несуча здатність (кН)
		\bar{n} , (10-3)	\bar{k}				
М1	60×40	0.57	3.25	900×900	-	-	40.6
М2	120×53	55.4	11.7	840×840	-	-	21.4
МБ1	80×80	15.6	4.8	880×880	14.5	28.6	31.4
МБ2	100×70	24.5	5.6	860×860	16.2	32.7	33.5
МБ3	100×47	36.8	7.1	860×860	15.4	-	-

Пристрій, що навантажує, представляє самоурівноважену систему, що складається з постаменту, до якого моделі випробовуваної конструкції кріпилися в чотирьох кутах, і рами, що навантажується, із закріпленням у центрі домкратом.

У ході випробовувань фіксувалися відносні деформації мембрани тензодатчиками, з базою 20 мм на сталевому листі, і в тих же точках з базою 50 мм на бетоні. Тензодатчики, у кількості двох штук, наклеювалися у вигляді прямокутних розеток по діагоналі. Відносні деформації опорного контуру замірялися в перетині розміщеному посередині його прольоту по трьох гранях. Переміщення мембрани й опорного контуру замірялися в горизонтальній і вертикальній площинах, для чого використовувалися прогиноміри системи Максимова, з ціною розподілу 0.1 мм, і індикатори годинникового типу, з ціною розподілу 0.01 мм. Прогиноміри встановлювалися посередині контуру по одному в обох площинах і вимірювали найбільші його прогини. Індикатори розміщувалися на опорному контурі на відстані 1/8, 2/8 і 3/8 довжини мембрани від його центра в

обох площинах і на мембрані в кількості чотирьох штук на відстані $1/8$, $2/8$, $3/8$ і $4/8$ довжини мембрани від її кромки для визначення в ній вертикальних прогинів по осях симетрії.

За отриманими результатами експериментальних досліджень моделей сталевих (серія М) і сталобетонного (серія МБ) мембранного покриття проведено порівняльний аналіз отриманих даних по серіях, а також аналіз характеру напружено-деформованого стану окремо для кожної моделі.

Аналіз отриманих результатів при випробуванні моделей серії М показує, що збільшення піддатливості опорного контуру приводить до значного зростання прогинів мембрани і до змін у напружено-деформованому стані моделей. Характер зміни напружень у мембрані свідчить про зсув зони їхніх максимальних значень від центра мембрани до кутів покриття зі збільшенням піддатливості контуру. У напрямку перпендикулярному діагоналі мембрани зі збільшенням піддатливості контуру в кутових зонах виникають стискальні зусилля. Треба зазначити, що в моделі М1 факт появи стискаючих напружень привів до місцевої втрати стійкості листа, що виявлялося в утворенні хвиль, які виходять з кута покриття.

У результаті випробування дослідних моделей сталобетонного мембранного покриття (серія МБ) були отримані дані про характер їхнього напружено-деформованого стану під навантаженням. На рис. 4 представлені лінії прогинів мембрани при різних значеннях навантаження.

Аналіз діаграм “навантаження-прогин” дозволяє виявити порушення лінійності розвитку прогинів у мембрані зі стабілізатором при навантаженнях, близьких до граничного. Порушення лінійності викликано розвитком кільцевих тріщин навколо штампа, що призвело в результаті до продавлювання бетону. Поява цих тріщин спостерігалася вже при навантаженні 14-15 кН (див. табл. 1). При наступному навантаженні зона утворення тріщин зміщалася від центра мембрани до контуру. Поява першого розкриття тріщин спостерігалася в приконтурній зоні. Тріщини, що тут з'являлися, мали деяке розгалуження в кутах мембрани. Розкриття тріщин спостерігалася не повсюдно, що пояснюється більш аргументально станом зв'язків між листом і бетоном. Для оцінки стану зв'язків на момент виникнення граничних деформацій, модель МБ3 до руйнування не доводилася. Випробування були припинені при навантаженні 33 кН. Видалення бетону на $1/4$ поверхні мембрани дало пояснення про характер розвитку тріщин у бетоні. Тріщини, що з'являлися, мали розкриття тільки в місцях збережених зв'язків, а в місцях відсутності тріщин зв'язок між бетоном і листом виявився зруйнованим.

Рис. 4. Лінії прогинів моделі МБ1 при різному навантаженні

Розвиток деформацій у бетоні по діагоналі мембрани приведено на рис. 5 (подовжні і поперечні датчики), аналіз якого виявляє нелінійний характер їхнього розвитку під навантаженням.

Як показує аналіз отриманих залежностей, у подовжньому напрямку діагоналі переважно виникають деформації, що розтягують, зростаючи від кутів мембрани до центра. Так, уже при

навантаженні 10-15 кН усі подовжні датчики показували тільки розтягання. Ближче до кутових зон виникає швидко загасаючий стиснутий стан. У кутових зонах поперечного напрямку виникає яскраво виражений стиск, що погоджується з деформаціями листа.

Рис. 5. Графіки залежностей відносних деформацій від навантаження при випробуванні моделі МБ1 (датчики на бетоні)

Розвиток деформацій у мембрані по її діагоналі приведено на рис.6 (подовжні датчики) і 7 (поперечні датчики).

Рис. 6. Графіки залежностей подовжніх відносних деформацій мембрани від навантаження при випробуванні моделі МБ1

На отриманих діаграмах деформування сталевого листа проглядається дві ділянки, розділених стрибком у показаннях датчиків. Стрибок деформацій викликаний продавлюванням бетону і спрямований у бік розвитку деформацій у сталевому листі, що особливо яскраво проглядається на ділянках, наближених до центра мембрани. Після продавлювання бетону деформації в мембрані зросли, у залежності від місця розміщення датчиків, на 35-70%. Крім того, подальший розвиток цих деформацій мав більш інтенсивний характер зростання.

Рис. 7. Графіки залежностей поперечних відносних деформацій мембрани від навантаження при випробуванні моделі МБ1

Проведений аналіз характеру деформування складеного перетину стабілізованої (серія МБ) мембрани (до моменту продавлювання) і нестабілізованої (серія М) дозволив оцінити вплив бетону на прогини мембрани при різній піддатливості опорного контуру. Результати порівняльного аналізу були отримані графічно, для чого будувалися залежності зміни прогинів мембрани від відносних жорсткостей контуру (подовжньої \bar{k} і згинальної \bar{n}). При цьому точки, що відповідно до серій МБ, лінійно апроксимувалися, і по отриманих графіках визначався вигляд функцій (див. рис. 8).

Після інтегрування і виконання визначених перетворень були сформульовані висновки, що використання в мембранному покритті даного стабілізуючого шару бетону дозволяє зменшити значення прогинів прольотної конструкції на величину близьку до 40%.

Рис. 8. Графіки залежностей зміни прогинів мембрани від відносної згинальної (а) і подовжньої (б) твердості опорного контуру

Спільний аналіз характеру напруженого стану складеного перетину стабілізованої (до продавлювання бетону) і нестабілізованої мембрани дозволив оцінити вплив бетону на розподіл напружень у мембрані при різній піддатливості опорного контуру. Результати порівняльного аналізу отримані за аналогією з прогинами, а побудовані графіки приведені на рис. 9.

Рис. 9. Графіки залежностей зміни відносних деформацій у центрі мембрани (а) і її кутах (б) від піддатливості опорного контуру

Як і раніше, виконана оцінка впливу бетону на напруження в центральній і кутовій області мембрани показала, що використання в мембранному покритті даного стабілізуючого шару бетону дозволяє зменшити напруження в цих зонах відповідно на 19% і 70%.

Проведені експериментальні дослідження дозволили перевірити правильність передумов, закладених в основу методики розрахунку сталобетонних мембранних покриттів із квадратним планом, а також оцінити точність пропонованих розрахункових формул. З цією метою були проведені обрахування експериментальних моделей даного мембранного покриття на ЕОМ за розробленою програмою.

За результатами рахунку були отримані дані про напруження і прогини елементів покриття на всьому діапазоні навантаження, при цьому умовою завершення рахунку було вичерпання несучої спроможності мембрани або опорного контуру. У даній роботі результати обчислень приведені у вигляді контурних графіків із зображенням однорівневих ліній головних нормальних напружень у бетоні (див. рис. 10, 11). Такі ж графіки побудовані для головних нормальних напружень і прогинів мембрани, які подані в дисертації. Для зіставлення результатів на цих же графіках наносилися й експериментальні точки.

Рис. 10. Головні напруження в бетоні при навантаженні 16 кН

Як видно з отриманих графіків розподілу напружень по площі бетону (див. рис. 11), граничний стан, що спостерігається у центральній частині прольотної конструкції, не відбивається на його роботі в кутових зонах.

Рис. 11. Головні напруження в бетоні і мембрані при навантаженні 30 кН

За результатами рахунку, поява перших граничних деформацій бетону виникала в центрі мембрани при навантаженнях 15–17 кН, що добре погоджується з експериментальними даними (див. табл. 1). Встановлено, що з поступовим виходом бетону з роботи спостерігається збільшення

росту напружень і прогинів у сталевому листі. Як видно, пропонується методика дає цілком прийнятні результати. Погрішність не перевищує точності інженерних розрахунків (7-9%).

У четвертому розділі наводяться дані про практичне використання результатів дисертаційної роботи. Методика розрахунку сталобетонного мембранного покриття і його конструкція прийняті у використанні в проектних рішеннях об'єктів ВАТ Харківметропроект. Крім того, отримані в дисертації рішення реалізовані в навчальному процесі при дипломному проектуванні на кафедрі “Будівельна механіка і гідравліка” Харківської державної академії залізничного транспорту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Показано, що значна частина існуючих мембранних покриттів має потребу в стабілізації її первісної поверхні. Необхідність у стабілізації мембранних систем визначається незначною згинальною жорсткістю і мінливістю форми їхньої поверхні від дії зовнішнього навантаження.

2. Один із способів стабілізації мембранних систем полягає в збільшенні ваги прольотної конструкції за допомогою укладання на її поверхні шару бетону. Огляд накопиченого матеріалу на цю тему показав, що питання урахування бетону в роботі мембранного покриття вивчені недостатньо. Так само мало вивченими залишаються питання, зв'язані з роботою піддатливого сталобетонного опорного контуру.

3. Розроблено конструкцію моделі сталобетонного мембранного покриття, що складається з тонкого сталевих листа (мембрани), покладеного на його поверхні шару бетону, анкерних зв'язків, що з'єднують мембрану і бетон, і сталобетонного опорного контуру прямокутного поперечного перерізу.

4. Розроблено методику розрахунку сталобетонних мембранних покриттів, що дозволяє врахувати піддатливість сталобетонного опорного контуру, геометричну нелінійність конструкції і фізичну нелінійність матеріалів, що входять до її складу (бетону).

5. Розроблено обчислювальний апарат розрахунку напружено-деформованого стану сталобетонного мембранного покриття з піддатливим сталобетонним контуром. В якості численного методу застосовано метод скінченних різниць. Система отриманих нелінійних рівнянь розв'язується методом найшвидшого спуску. Лінеаризація нелінійної сторони здійснюється за допомогою методу послідовних наближень.

6. Експериментально досліджені конструкції моделей сталевих і сталобетонних мембранних покриттів з різними жорсткісними характеристиками опорного контуру. В результаті встановлені закономірності деформування, тріщиноутворення і вичерпання несучої спроможності мембрани, стабілізуючого шару бетону і бортового елемента.

7. Показано, що використання в якості стабілізатора бетонної стяжки, яка з'єднується з тонким листом анкерними зв'язками, дозволяє зменшити прогини прольотної конструкції на величину близьку до 40%, значення нормальних напружень в центрі прольоту мембрани – на 19%, і на 70% - в кутових зонах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лобяк А.В. Напряженно-деформированное состояние элемента сталебетонной мембраны // Зб. наук. праць “Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди”. – Рівне: РДТУ, 1999. - Вип. 3. - С. 184-188.
2. Лобяк О.В. Розрахунок сталебетонної мембрани // Зб. наук. праць. – Харків: ХарДАЗТ, 2000. - Вип. 42. - С. 107-112.
3. Лобяк А.В. Расчет сталебетонной мембраны // Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. “Качество, безопасность, энерго- и ресурсосбережение в промышленности строительных материалов и строительстве на пороге XXI века”. – Белгород: БелГТАСМ, 2000. – Ч. 3. – С. 173-178.
4. Лобяк О.В. Експериментальне дослідження роботи сталебетонного мембранного покриття з квадратним планом // Зб. наук. праць. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. - Вип. 45. - С. 128-135.
5. Лобяк А.В. Работа мембранного покрытия со стабилизацией стального листа бетонным слоем // Вісник ДонДАБА. – Вип. 2001-5(30). – С. 133-137.

АНОТАЦІЯ

Лобяк О.В. Напружено-деформований стан сталебетонного мембранного покриття. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Харківська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2001.

Дисертація присвячена задачі зниження металоємності, вартості і трудомісткості будівництва сталебетонних мембранних покриттів на плоскому прямокутному контурі. Розроблено конструкцію моделі сталебетонного мембранного покриття, що складається з тонкого сталевих листа (мембрани), покладеного на його поверхні шару бетону, анкерних зв'язків, що з'єднують мембрану і бетон, і сталебетонного опорного контуру. На підставі розроблених моделей були виготовлені і випробувані дослідні зразки. В усіх дослідних зразках застосовувався сталебетонний опорний

контур з різною піддатливістю. При випробуванні моделей були отримані і проаналізовані дані про характер деформування, тріщиноутворення і вичерпання несучої спроможності стабілізованої мембрани, шару бетону і бортового елемента.

Розроблено методику розрахунку сталобетонних мембранних покриттів, що дозволяє врахувати піддатливість сталобетонного опорного контуру, геометричну нелінійність конструкції і фізичну нелінійність матеріалів, що входять до її складу. На підставі розробленої методики розрахунку був побудований обчислювальний апарат розрахунку напружено-деформованого стану сталобетонного мембранного покриття з піддатливим сталобетонним контуром, що дає цілком прийнятні результати. Погрішність не перевищує точності інженерних розрахунків (7-9%).

Ключові слова: сталобетонне мембранне покриття, сталобетонний опорний контур, піддатливість, напружено-деформований стан, несуча здатність, мембрана, бетонна стяжка, стабілізація.

АННОТАЦІЯ

Лобяк А.В. Напряженно-деформированное состояние сталобетонного мембранного покрытия. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2001.

Значительная часть существующих мембранных покрытий нуждается в стабилизации ее первоначальной поверхности. Необходимость в стабилизации мембранных систем определяется незначительной изгибной жесткостью и изменчивостью формы их поверхности от действия внешней нагрузки. Один из способов стабилизации мембранных систем заключается в увеличении веса пролетной конструкции посредством укладки на ее поверхности слоя бетона. Обзор литературных источников показал, что вопросы учета бетона в работе мембранного покрытия изучены недостаточно. Также мало изученными остаются вопросы, связанные с работой податливого сталобетонного опорного контура.

Диссертация посвящена задаче снижения металлоемкости, стоимости и трудоемкости строительства сталобетонных мембранных покрытий на плоском, прямоугольном в плане, опорном контуре и заключается в разработке новых конструктивных решений, отвечающих требованиям эффективности и экономичности применительно к реконструкции и новому строительству, а также разработке математического и вычислительного аппарата для оценки их напряженно-деформированного состояния.

Разработана методика расчета сталобетонных мембранных покрытий, позволяющая учесть

податливость сталебетонного опорного контура, геометрическую нелинейность конструкции и физическую нелинейность входящих в нее материалов (бетона). При этом описание деформирования бетона мембраны, подверженного двухосному растяжению, производится в соответствии с подходом, основанным на приведении бетона к условно изотропному материалу с обычными интегральными характеристиками – модулем упругости и коэффициентом поперечных деформаций, а совместная работа бетона и листа сопровождается введением параметра, учитывающего влияние податливости их контакта.

На основании разработанной методики расчета был построен вычислительный аппарат расчета напряженно-деформированного состояния сталебетонного мембранного покрытия с податливым сталебетонным контуром. В качестве численного метода решения данной задачи используется метод конечных разностей. Система полученных нелинейных уравнений решается методом наискорейшего спуска (градиента). Линеаризация нелинейной стороны осуществляется при помощи метода последовательных приближений.

Разработана конструкция модели сталебетонного мембранного покрытия, состоящая из тонкого стального листа (мембраны), уложенного на его поверхности слоя бетона, анкерных связей, соединяющих мембрану и бетон, и сталебетонного опорного контура прямоугольного поперечного сечения. На основании разработанных моделей были изготовлены и испытаны 5 опытных образцов, в 3 из которых, пролетная конструкция была выполнена в составе с бетонным слоем. Во всех опытных образцах применялся сталебетонный опорный контур с различной податливостью.

При испытании моделей были получены и проанализированы данные о характере деформирования, трещинообразования и исчерпания несущей способности мембраны, стабилизирующего слоя бетона и бортового элемента. Полученные результаты показали, что использование в качестве стабилизатора бетонной стяжки, соединенной с тонким листом анкерными связями, позволяет уменьшить прогибы пролетной конструкции на величину близкую к 40%, значения возникающих в мембране нормальных напряжений – на 19% в центре пролета и 70% – в угловых зонах.

Ключевые слова: сталебетонное мембранное покрытие, сталебетонный опорный контур, податливость, напряженно-деформированное состояние, несущая способность, мембрана, бетонная стяжка, стабилизация.

ANNOTATION

Lobyak A.V. Stress-strained state of steel-concrete membrane. – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of candidate of technical sciences by speciality 05.23.01 – building

constructions, buildings and structures. – Kharkov State Academy of Railway Transport, Kharkov, 2001.

In the dissertation author depicts the questions of cost, labour and materials consumption decreasing during the construction of steel-concrete membranes and proposes new progressive and economically proved structures.

Pliability of steel-concrete supporting contour, geometric non-linearity of the structure and physical non-linearity of incoming materials were analyzed and accounted during the elaboration of calculation methodology. Utilizing such methodology author proposed new tools for stress-strained determination of steel-concrete membrane with pliable steel-concrete supporting contour.

The author developed models of steel-concrete membrane and steel-concrete supporting contour. The character of deformation, crack formation and carrying capacity depletion of membrane, concrete layer and edge element were analyzed during the tests.

Key words: steel-concrete membrane, steel-concrete supporting contour, pliability, stress-strained state, carrying capacity, concrete layer.

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАННИЙ СТАН
СТАЛЕБЕТОННОГО МЕМБРАННОГО ПОКРИТТЯ

Лобяк Олексій Вікторович

Відповідальний за випуск Романенко В. В.

Підписано до друку 20.11.2001 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір для розмножувальних апаратів.

Друк офсетний. Умовн.-друк. арк. 1,0. Обл.-вид. арк. 1,25.

Замовлення № 571. Тираж 100. Безкоштовно.

Видання ХарДАЗТу. Свідоцтво № 112 від 06.07.2000 р.

61050, м. Харків - 50, майд. Фейєрбаха, 7

Друк. ХарДАЗТу, 61050, м. Харків - 50, майд. Фейєрбаха, 7