



Міністерство освіти і науки України

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

КОНСТРУКТИВНІ СИСТЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД, ПОШКОДЖЕНИХ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

1. **ГАСЕНКО Антон Васильович** – д.т.н., доцент, професор кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».
2. **СЕМКО Павло Олександрович**, к.т.н., доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».
3. **УСЕНКО Дмитро Валерійович** – доктор філософії, доцент кафедри хімії та фізики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».
4. **ОКСЕНЕНКО Катерина Олександрівна**, аспірантка кафедри будівельних конструкцій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Метою роботи є розробка шляхом підбору, адаптації та удосконалення ресурсоощадних інженерних рішень та технологій відновлення конструктивної міцності сталезалізобетонних і трубобетонних несучих конструкцій, цегляних і спірально-фальцевих тонколистових сталевих огорожувальних конструкцій будівель та споруд, пошкоджених в результаті воєнних дій та терористичних актів.

Нові або оновлені методи та засоби, методика та методологія роботи. Учасниками конкурсного відбору створено 5 технологій на рівні TRL 6 – TRL 7: створено та протестовано бета-прототипи будівельних систем відновлення несучої здатності та експлуатаційної придатності в робочому середовищі, що підтверджується листами підтримки (впровадження) потенційних споживачів. На протестовані в робочому середовищі бета-прототипи будівельних систем отримано 6 патентів на корисну модель, в яких викладено основні принципи та концепції розроблених технологій, а також визначено перелік матеріалів, що відповідно класифікується як технології рівня TRL 1 – TRL 3. Розроблені принципи та концепції увійшли до нормативних документів, зокрема ДБН В.2.1-10:2018.

У результаті виконання роботи удосконалено методологію розрахунку і проектування конструктивних рішень відновлення міцності сталезалізобетонних і трубобетонних несучих конструкцій, цегляних і спірально-фальцевих тонколистових сталевих огорожувальних конструкцій будівель та споруд, пошкоджених в результаті воєнних дій. На основі вище зазначеної методики розроблено рекомендації (настанови) до відповідної державної нормативної бази з проектувальних рішень відновлення конструктивної міцності та експлуатаційної придатності пошкоджених воєнними діями будівельних конструкцій. Запровадження вище відмічених рекомендацій в практику проектування дасть змогу отримати типові конструктивні рішення, за допомогою яких можна буде здійснити їх улаштування в короткі терміни ремонту.

Наукова новизна роботи полягає у розв'язанні нагальних соціальних і економічних проблем держави, пов'язаних з капітальним ремонтом чи реконструкцією будівель і споруд, що зазнали ушкодження чи руйнування в результаті надзвичайних ситуацій, бойових дій та терористичних актів. У результаті виконання роботи:

вперше:

розроблено та експериментально підтверджено методику виготовлення попередньо напружених нерозрізних сталезалізобетонних конструкцій із зменшеною металоємністю, що можуть створюватися як під час нового будівництва, так і під час підсилення пошкоджених залізобетонних елементів сталевими профілями чи пошкоджених сталевих елементів обетонуванням;

передбачена можливість застосування фальцевих з'єднань ділянок відновлення сталевих огорожувальних самонесучих конструкцій спіральних силосів для сипучих матеріалів;

удосконалено:

типові ресурсощадні конструктивні рішення самонапружених сталезалізобетонних конструкцій, що мають підвищений рівень живучості при наднормових навантаженнях техногенного характеру;

конструкцію роз'ємних стиків несучих трубобетонних елементів, що відновлюються (заміняються) замість пошкоджених (зруйнованих чи частково деформованих) елементів;

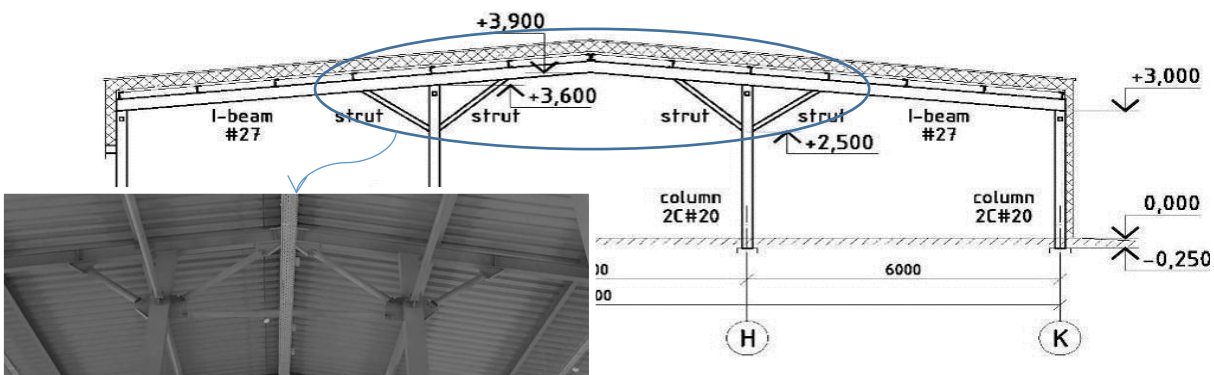
інженерну методику розрахунку міцності складно-навантаженої деформованої цегляної кладки при сумісній дії вертикального і горизонтального навантаження на основі теорії пластичності;

отримала подальший розвиток:

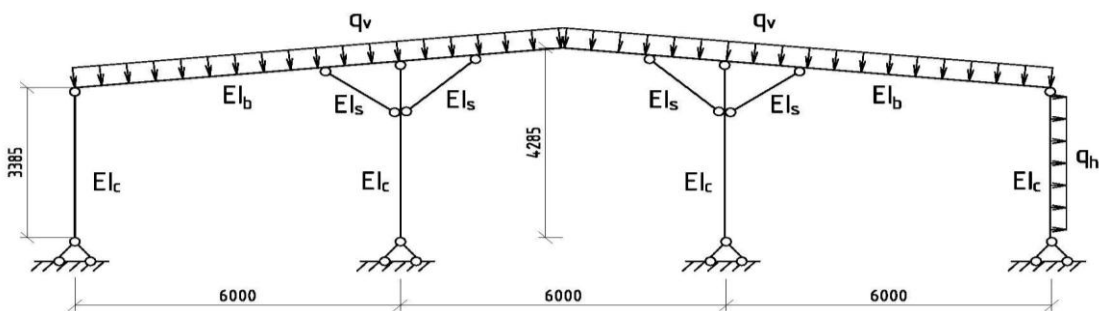
методика врахування попереднього напружено-деформованого стану компонентів сталезалізобетонних конструкцій.

Визначення раціональних параметрів рамно-підкісного сталевого каркасу

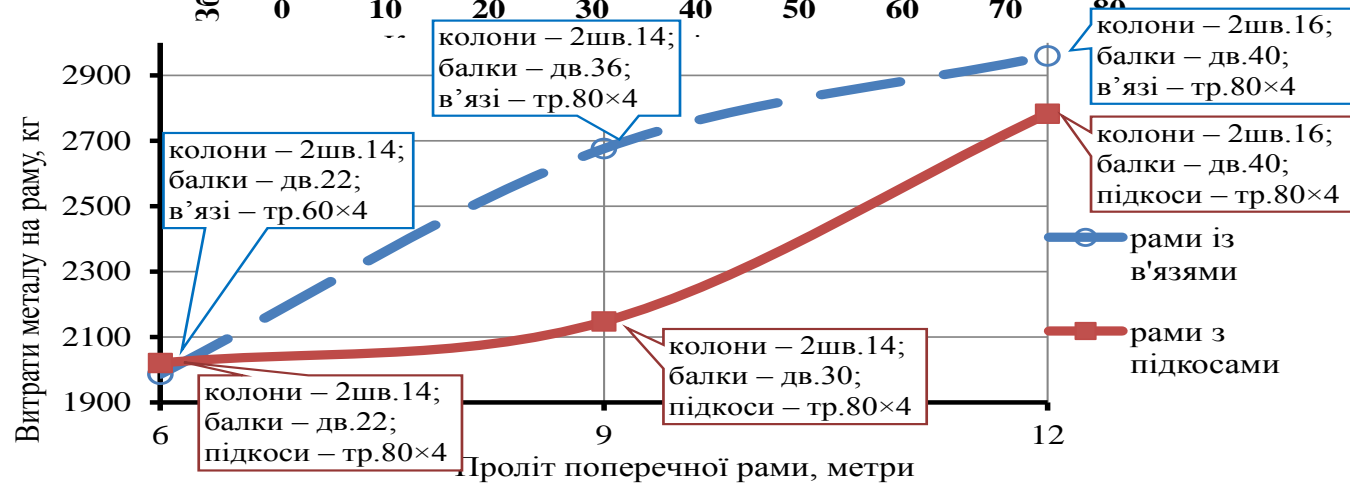
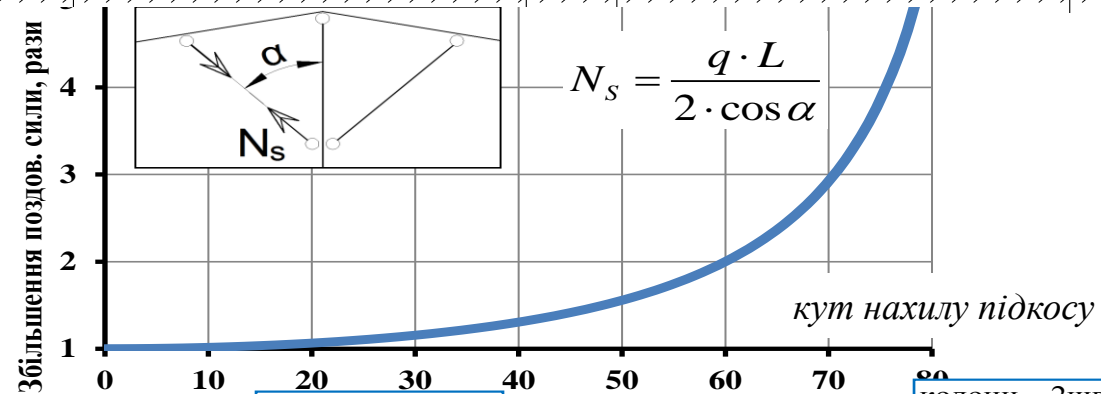
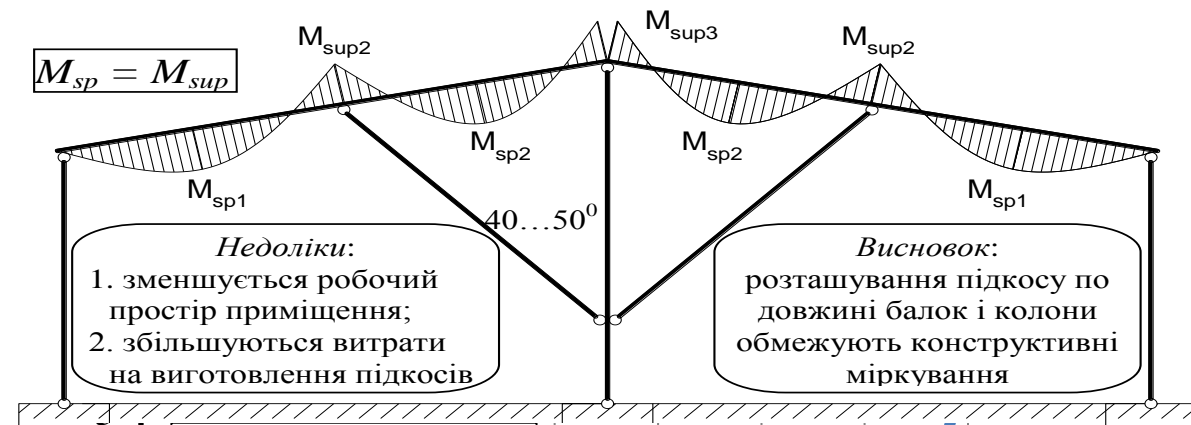
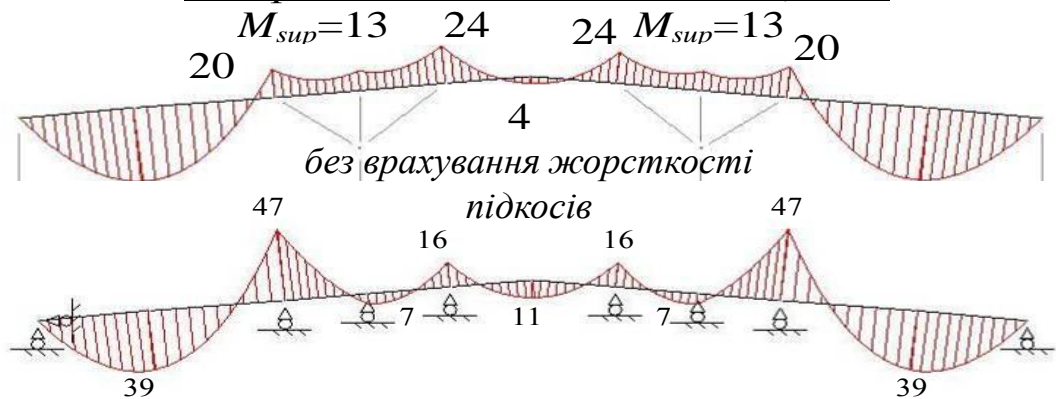
Конструктивний розріз поперечної рами будівлі з підкосами



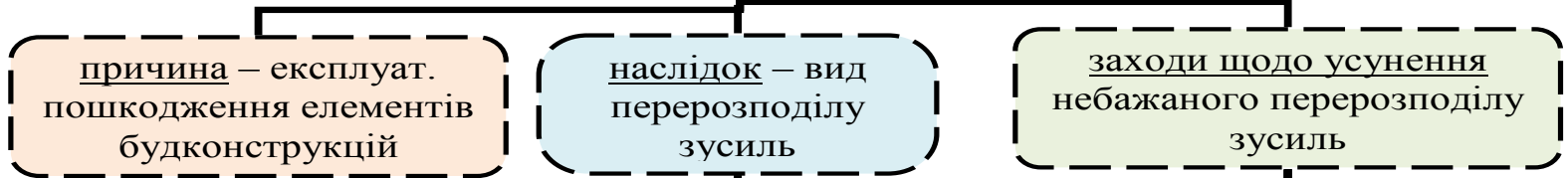
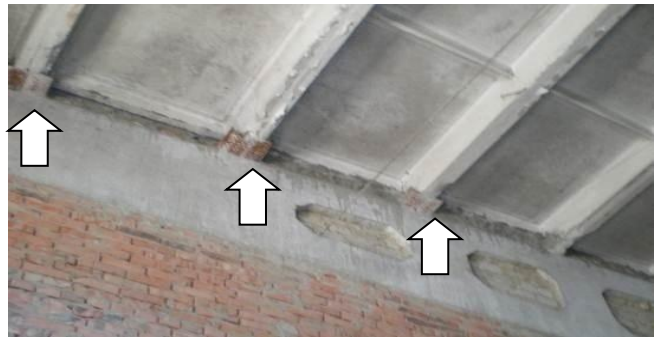
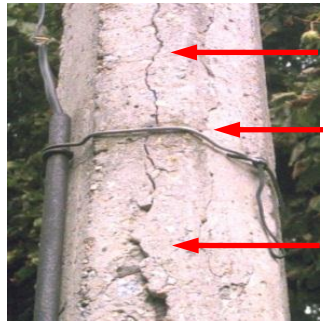
Розрахункова схема поперечної рами будівлі з підкосами



Епюра згинаючих моментів M , кНм



Перерозподіл зусиль у перерізах пошкоджених будівельних конструкцій під час їх експлуатації за малої зміни початкових параметрів



причина – експлуат. пошкодження елементів будконструкцій

наслідок – вид перерозподілу зусиль

заходи щодо усунення небажаного перерозподілу зусиль

утворення тріщин, руйнування захисного шару, виколи бетону з/б конструкцій

наявність технологічних отворів для пропуску труб

технологічні вирізи у стержневих сталевих елементах

зменшення ширини опорних площадок збірних з/б елементів

непроектне спирання несучих конструкцій

корозійні пошкодження сталевих елементів

відхилення планово-висотного положення

зменшення геометр. характ. перерізу через порушення зчеплення бетону і арм. стержнів

зменшення стиснутої зони перерізу (наприклад, бетону)

зменшення геометричних характеристик попер. перерізу

зміна статичної схеми роботи (зміна умов спирання)

зміна розрахункової схеми роботи конструкції

зменшення фізико-механічних характеристик сталей

виникнення додаткових косих навантажень

обетонування із додатк. армуванням пошкоджених ділянок

забетонування непроектних отворів у з/б конструкціях

обетонування або підсилення пошкодженої частини

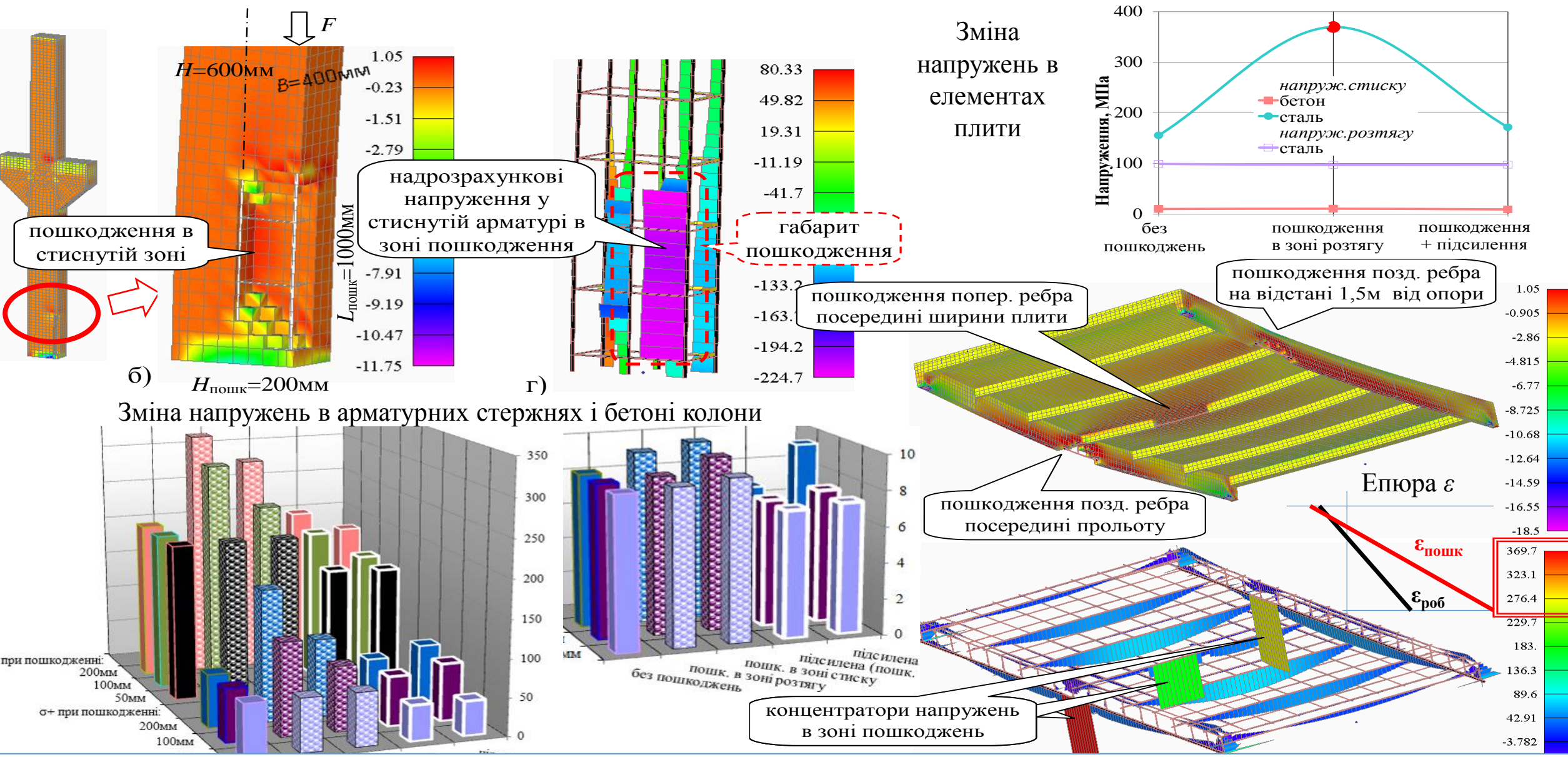
влаштування сталевих/бетонних опорних столиків

відновлення проектної розр. схеми

збільшення перерізу шляхом обетонування

відновлення перерізу наросуванням

Вплив розміру пошкодження на НДС залізобетонної колони та ребристої плити



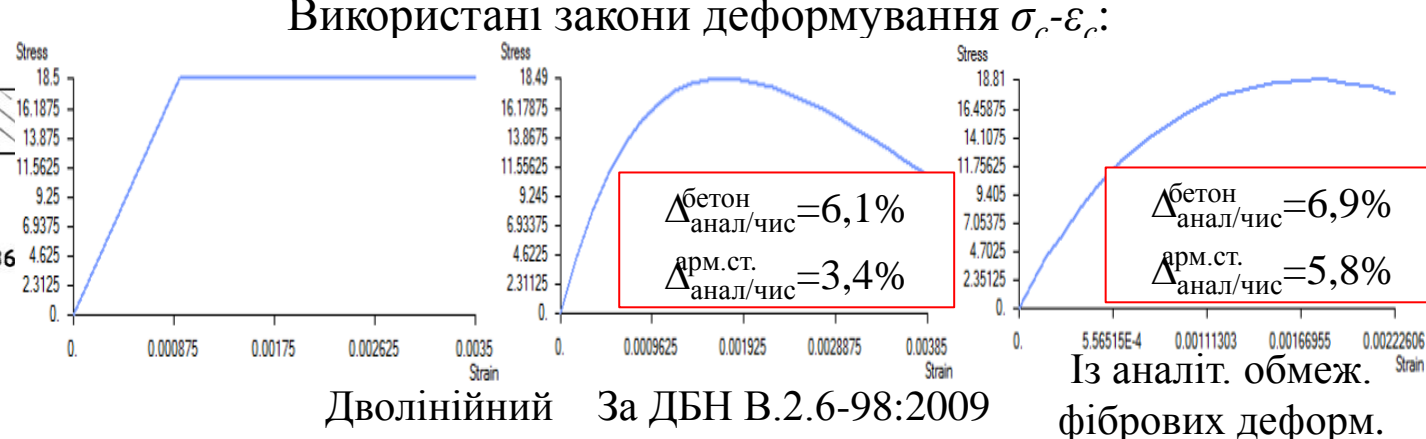
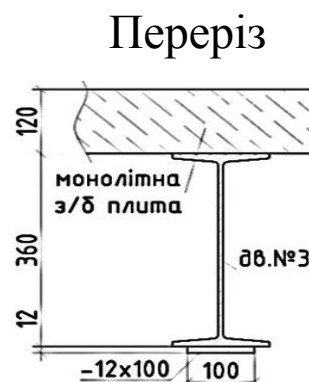
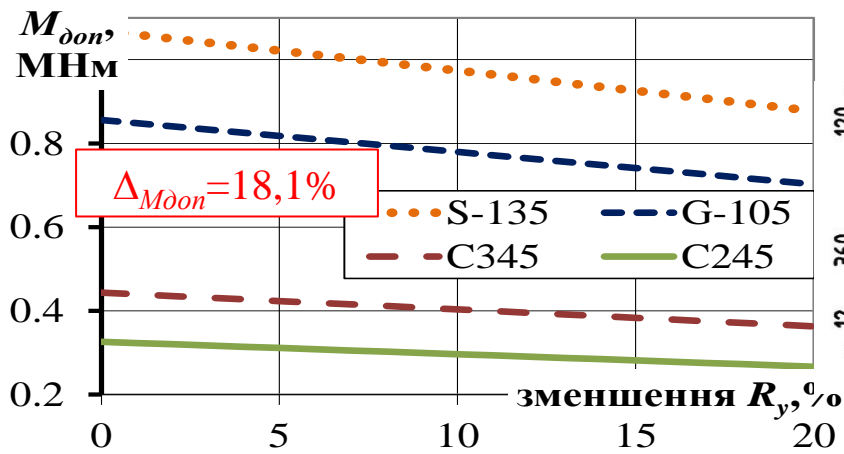
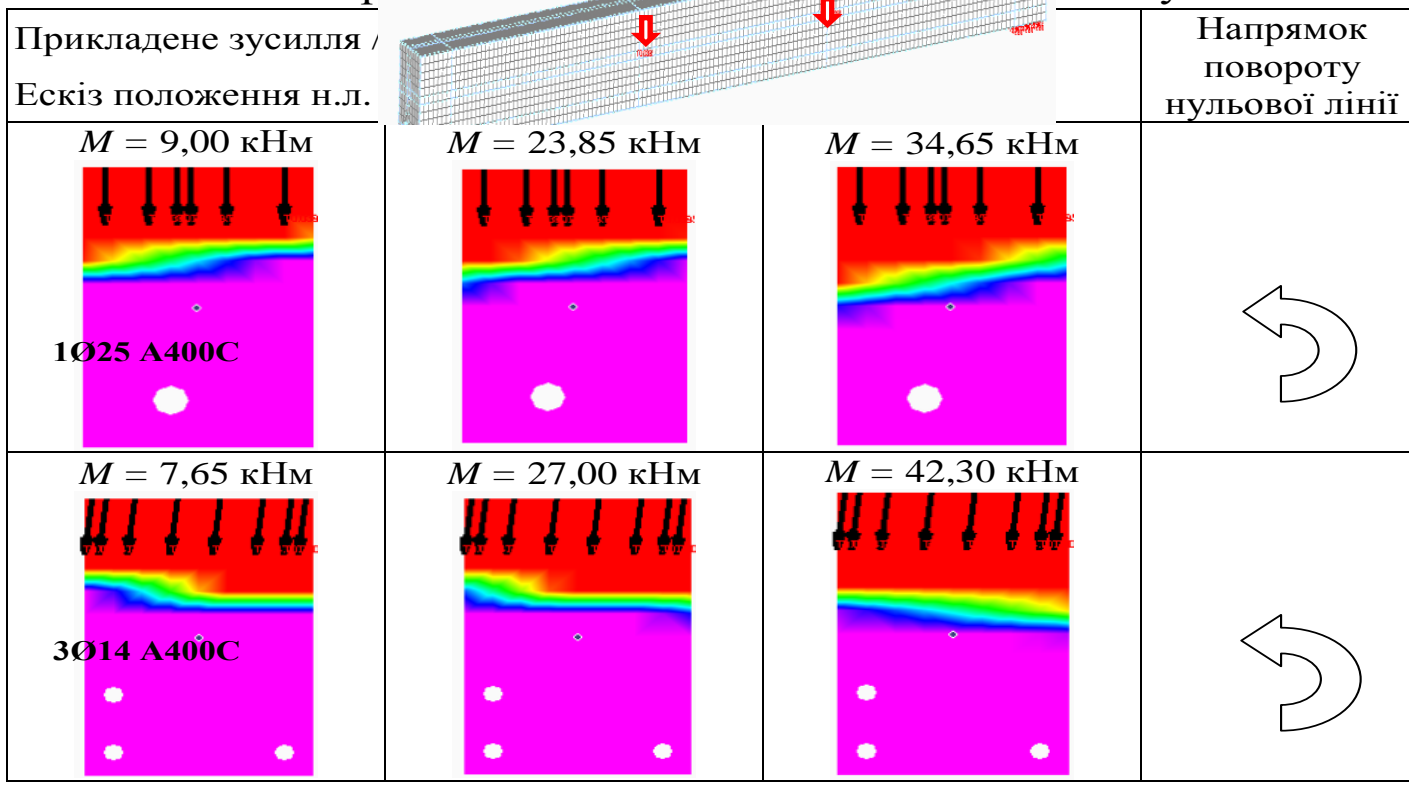
Вихідні умови СЕ аналізу. Сталь та бетон задані об'ємними СЕ із врахування фізичної нелінійності їх роботи. Для бетону врахована деформаційна анізотропія та можливість утворення тріщин при розтягу. Нелінійна задача вирішувалася кроково-ітераційним методом Ньютона-Рафсона.

Перерозподіл зусиль уточненням фізико-механічних властивостей матеріалів

Вплив корозії сталі на геом.характ. перерізу

Група зразків	Середнє арифметичне значення:		
	напружень		відносного видовження ϵ , %
	на межі текучості σ_T , МПа	на межі міцності σ_B , МПа	
S-135	931	1000	
S	970.5	1015.6	8.3
Sк	798.7	859.3	10.3
Δ , %	17.71	15.38	19.35
G-105	724	793	
G	814.6	876.5	9.43
Gк	742.1	812.0	10.22
Δ , %	8.90	7.36	7.67

Вплив діаграми деформування бетону у згинаючому ЗБЕ



Підсумки дослідження ресурсощадності перерозподілу зусиль

№ п/п	Причина, що викликає перерозподіл зусиль	Наслідок перерозподілу зусиль	Ефект
Розрахункові методи регулювання зусиль			
1	Влаштування нерозрізної схема роботи конструкцій	Зменшення прольотних і збільшення опорних згинаючих моментів	Можливість зменшення розмірів поперечного перерізу
2	Врахування фактичної жорсткості нерегулярних опор	Зменшення опорних згинаючих моментів	
3	Вибір оптимальних прольотів поперечної рами будівлі	Вирівнювання прольотних згинаючих моментів суміжних прольотів	
4	Зміна кута нахилу поздовжньої вісі конструкції відносно вісі навантаження	Досягнення мінімальних внутрішніх зусиль в конструкції	
5	Зміна типу опор	Оптимізація значень опорних реакцій; розвантаження прольотних частин	
6	Врахування дійсних діаграм роботи матеріалів	Визначення фактичного напружено-деформованого стану конструкцій	Визначення критичних точок перерізу
7	Врахування початкового НДС частин композитних конструкцій		
Силкові методи регулювання зусиль			
8	Попереднє напруження чи вигин окремих елементів комбінованого перерізу	Підвищення жорсткості конструкцій	Підвищення несучої здатності та жорсткості
9	Влаштування монолітної нерозрізної схеми роботи конструкцій	Підвищення загальної «живучості» конструкцій	
Перерозподіл зусиль під час експлуатації за малої зміни початкових параметрів			
10	Наявність послаблень чи отворів поперечного перерізу	Робота конструкцій на складні види деформацій	Перевантаження, зменшення несучої здатності
11	Зміна розрахункової схеми чи планово-висотного положення конструкцій	Виникнення додаткових навантажень	
12	Корозійні пошкодження сталевих елементів	Зменшення площі перерізу та фізико-механічних властивостей сталі	

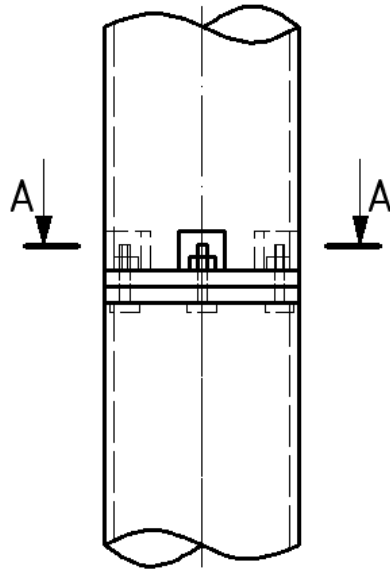
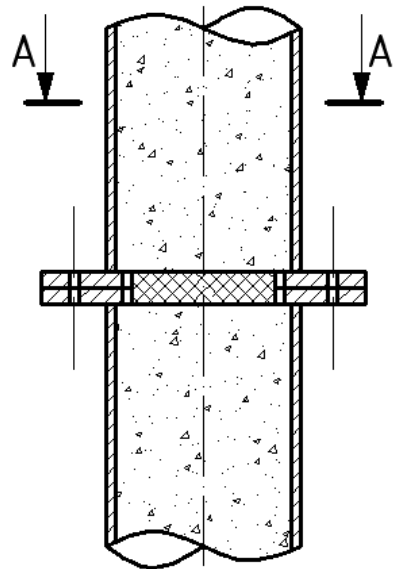
Актуальність теми досліджень стиків трубобетонних конструкцій

Роз'ємні стики актуальні для швидкомонтованих, багатопверхових каркасів, а також будівель, в життєвий цикл яких входить обов'язковий демонтаж (в тому числі з умов переміщення, тимчасовості).

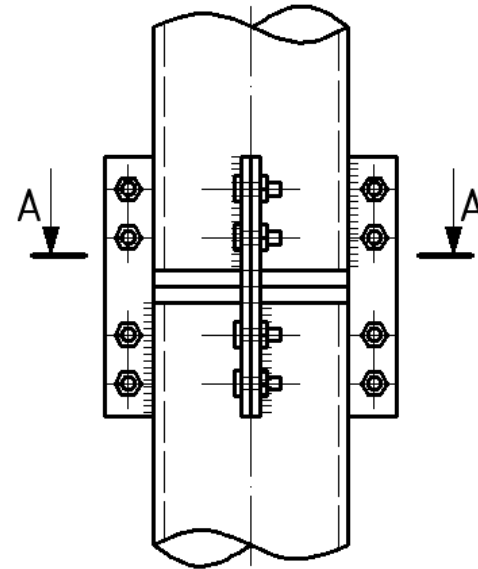
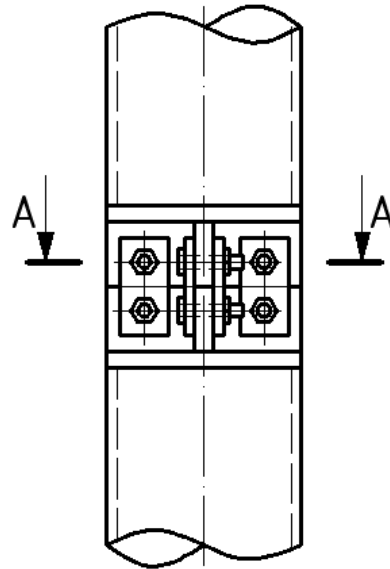


Пропозиції щодо нових конструкцій роз'ємних стиків

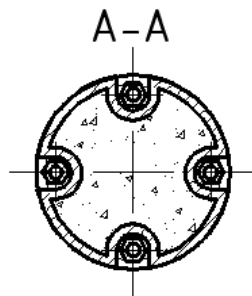
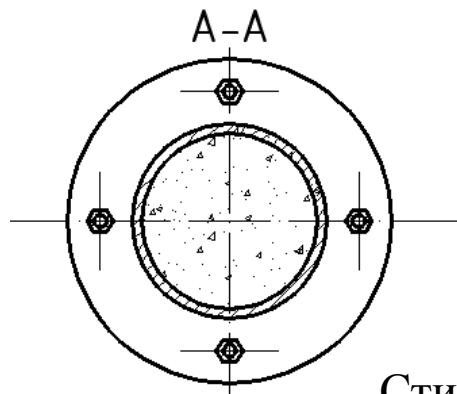
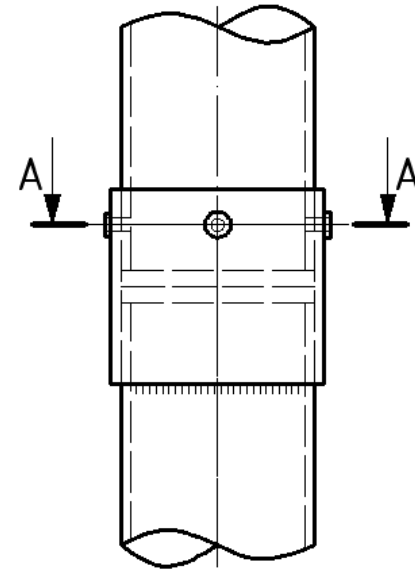
Стик із центруючою пластиною
патент на к.м. № 93769



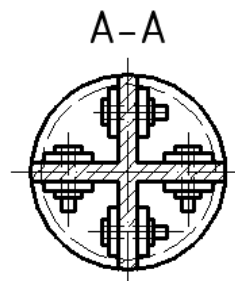
Стик із хрестоподібними вставками
патент на к.м. № 93770



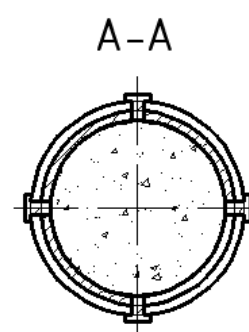
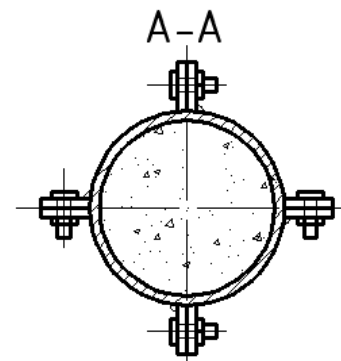
Стик зі сталеву муфтою
патент на к.м. № 93768



Стик із захованими болтами
патент на к.м. № 93767



Стик із повздовжніми ребрами
патент на к.м. № 93771



Зразки перед експериментальними випробуваннями

Серія ТБФ



Серія ТБР



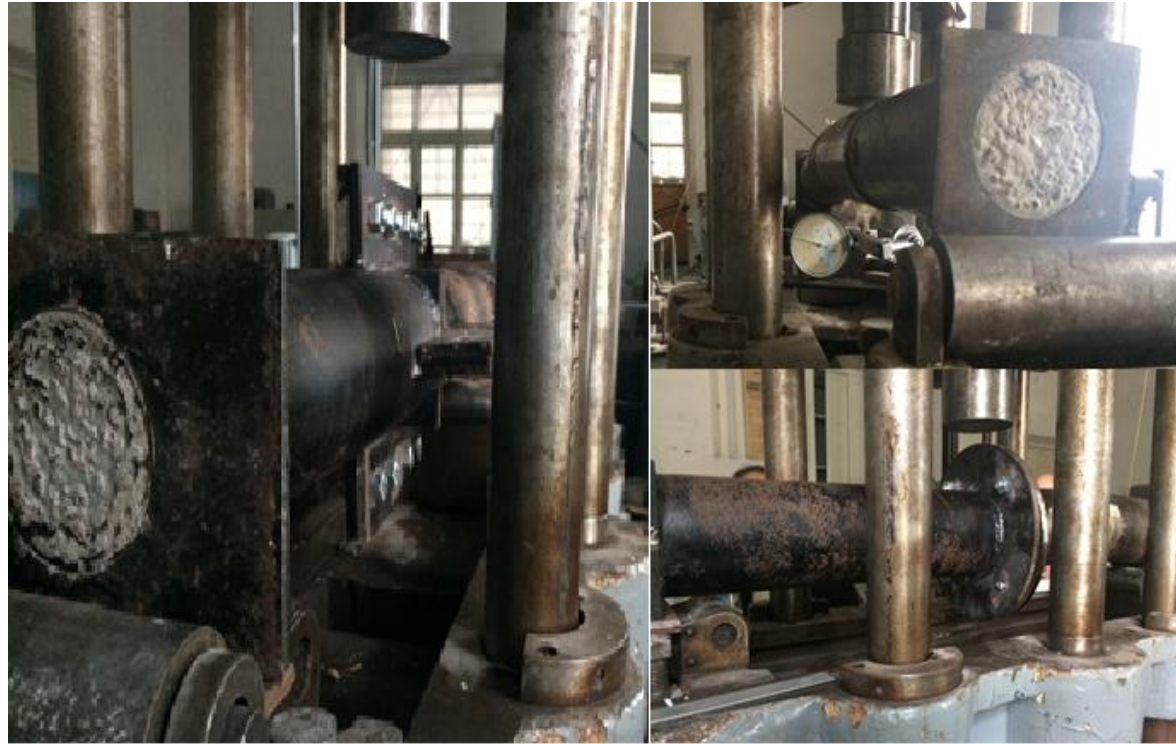
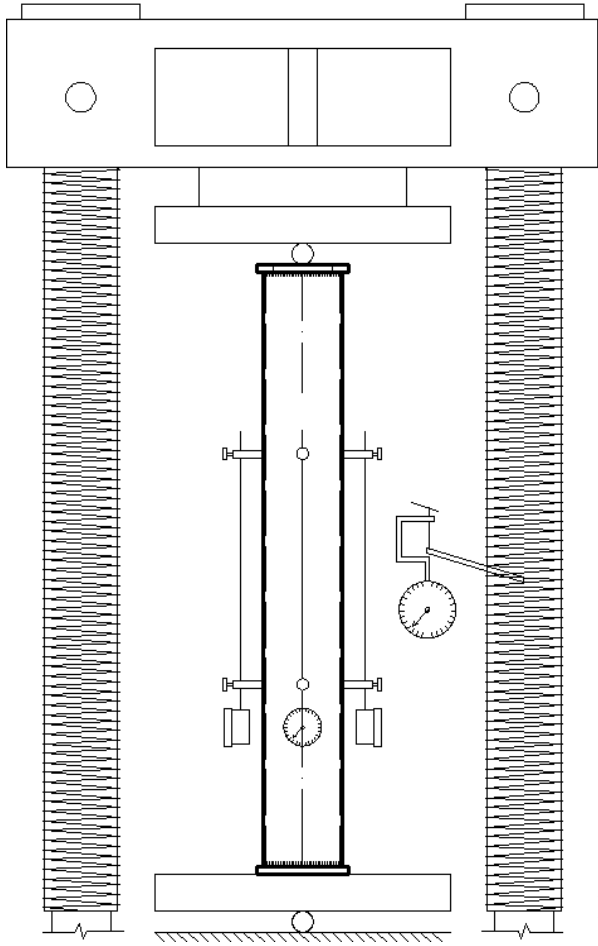
Спільним для всіх зразків є висота $h = 800$ мм; діаметр труби $D = 108$ мм; товщина стінки труби $t = 4$ мм; діаметр застосованих болтів $d = 12$ мм.

Серія ТБ



Серія ТБМ

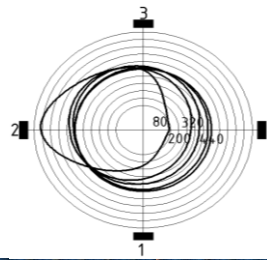
Експериментальні дослідження ТБК



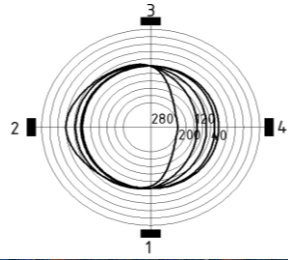
Зразки досліджувались на центральний, позacentровий стиск (із ексцентриситетами $e = 0,25$ та $0,5D$) та на згин. Також були визначені фізико-механічні властивості матеріалів – для сталі труби оболонки $R_y = 344$ МПа, $R_u = 484$ МПа; для бетонного заповнення – $f_{cm,cub} = 23,8$ МПа; для болтів $R_{bs} = R_{bt} = 300$ МПа.

Зразки після експерименту. Графіки деформацій по периметру перерізу

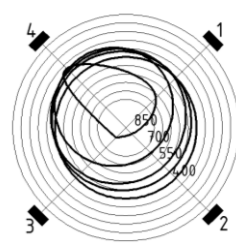
ТБ-2



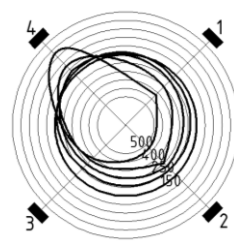
ТБ-3



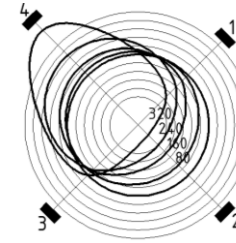
ТБР-1



ТБР-2



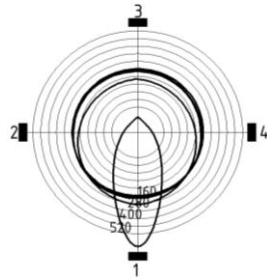
ТБР-3



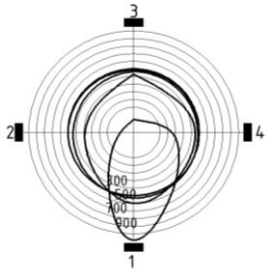
ТБФ-1

ТБФ-2

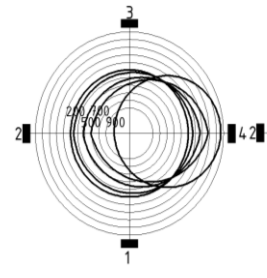
ТБФ-3



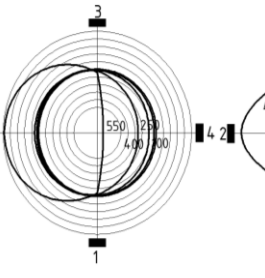
Т-1



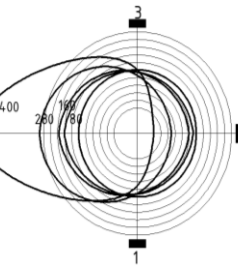
ТБ-1



ТБМ-1



ТБМ-2



ТБМ-3



Несуча здатність досліджуваних ТБК із роз'ємними стиками

Для центрального та позацентрального стиснутих елементів

Для згинаних елементів

Шифр зразка	Екск. нав., мм	Несуча здатність, кН		N_2/N_1	Коефіцієнти ефективності роботи		
		N_1	N_2		m_1	m_2	η
		Т-1	0		450	580	1,29
ТБ-1	0	730	950	1,30	1,15	1,49	1,98
ТБ-2	27	360	465	1,29	-	-	-
ТБ-3	54	300	326	1,09	-	-	-
ТБР-1	0	690	980	1,42	1,08	1,54	2,14
ТБР-2	27	410	580	1,41	-	-	-
ТБР-3	54	320	440	1,38	-	-	-
ТБМ-1	0	725	996	1,37	1,14	1,56	2,23
ТБМ-2	27	400	620	1,55	-	-	-
ТБМ-3	54	280	500	1,79	-	-	-
ТБФ-1	0	725	900	1,29	1,10	1,41	1,71
ТБФ-2	27	400	610	1,53	-	-	-
ТБФ-3	54	280	440	1,57	-	-	-

Шифр зразка	Руйнуюче навантаження N, кН	Момент M, кНм
ТБ	70	13,1
ТБМ	73	13,9
ТБР	168	33,6
ТБФ	78	15,6

При випробуванні трубобетонних елементів із роз'ємними стиками на стиск, як граничні, було обрано два критерії несучої здатності трубобетонного елемента. Першим критерієм був такий стан зразків, при якому деформації сталевих труби відповідають деформаціям сталі, що досягла межі текучості (N_1). Другим – стан, коли у трубобетонному елементі відбувається значний розвиток деформацій при сталому або незначному збільшенні навантажень на зразок, фактично цей стан відповідає руйнуванню трубобетонного елемента (N_2). Критерієм несучої здатності для стику було обрано момент досягнення межі текучості одного з його елементів.

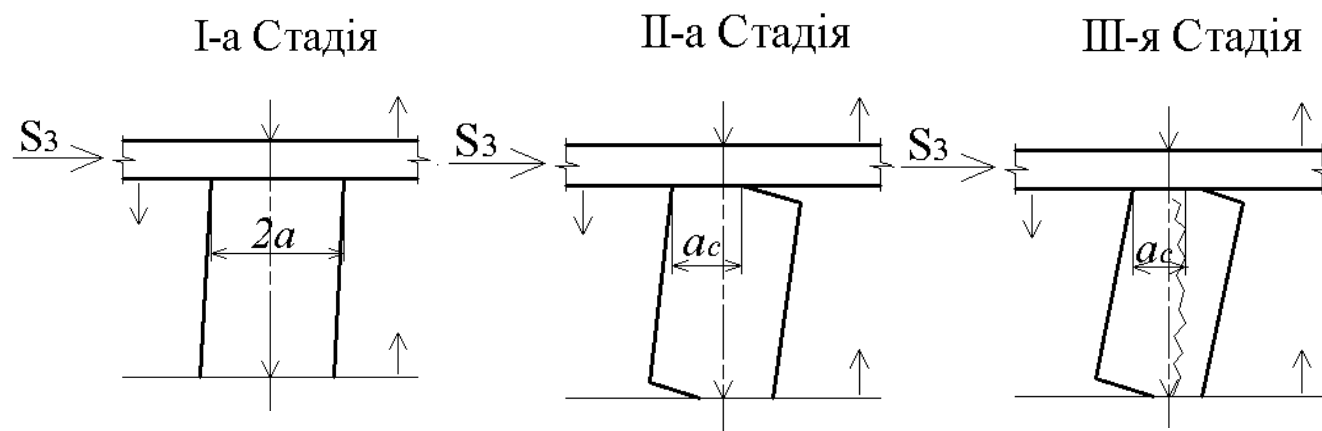
$$m_1 = \frac{N_1}{f_{yt}A_a + f_{ct}A_c} \quad m_2 = \frac{N_2}{f_{yt}A_a + f_{ct}A_c} \quad \eta = \frac{\sigma_c}{f_{ct}}$$

Характер руйнування цегляних стін при сейсмічних впливах



а)

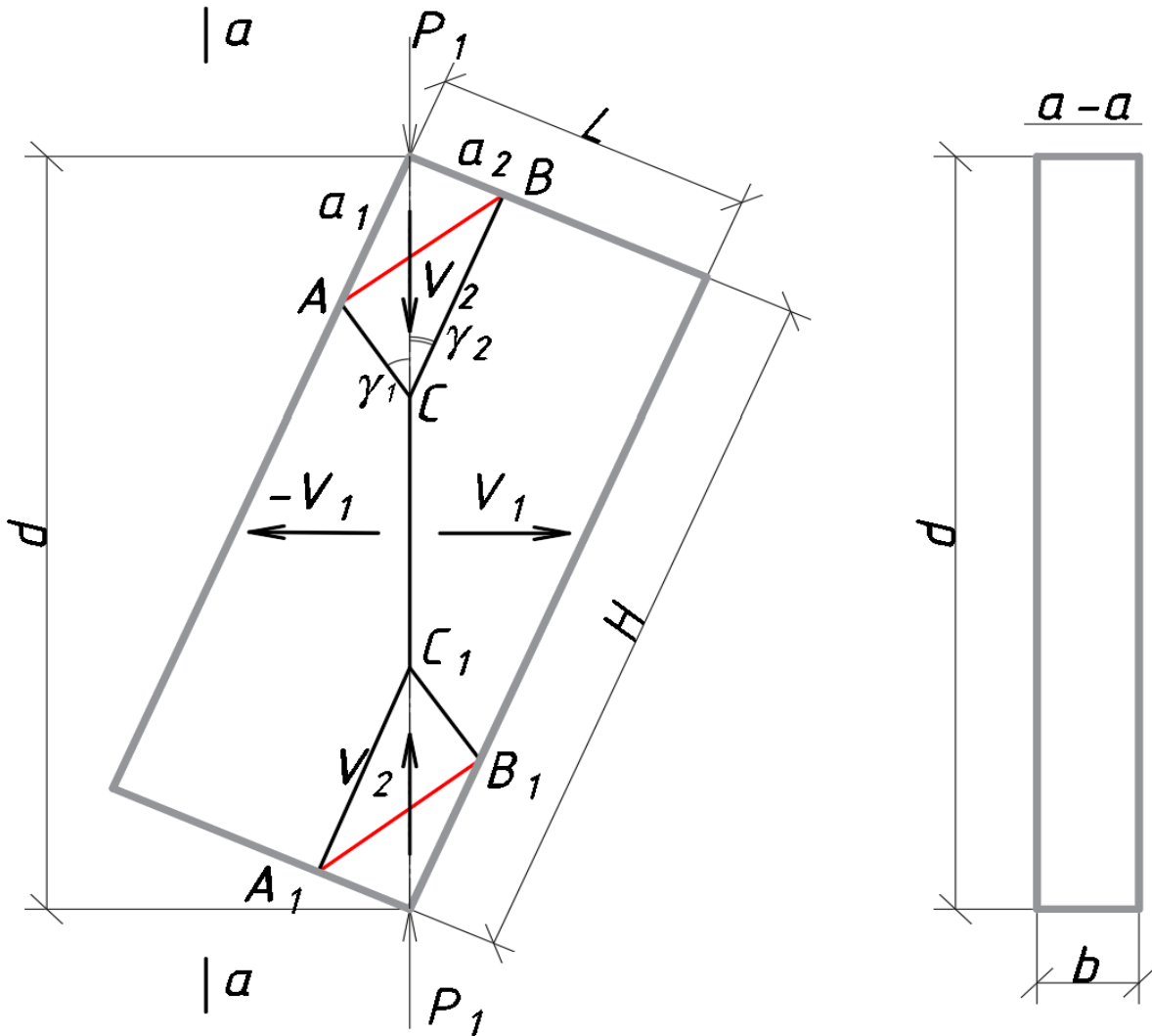
Робота простінків несучих стін при дії горизонтальної сейсмічної сили



б)

а – схема утворення тріщин; б – стадії деформування простінку третього поверху

Розрахунок міцності кам'яної кладки при діагональному розколюванні варіаційним методом у теорії пластичності



Кінематична схема руйнування зразка при діагональному розколюванні (загальний випадок)

Дано: f_d, f_t, L, H, a_1, a_2 .

Невідомі: $P_{1u}, \gamma_1, \gamma_2, k=V_1/V_2$.

Формула для визначення граничного навантаження у функції від невідомих параметрів:

$$\frac{P_{1u}}{mb\sqrt{a_1^2 + a_2^2}} = R_1 + R_2 + \left\{ \frac{f_t}{m} k \left(\frac{H}{\cos \alpha_1} - 2a_1 \left(\cos \alpha_1 + \frac{\sin \alpha_1}{\operatorname{tg} \gamma_1} \right) \right) \right\} \quad (1)$$

$$R_1 = \left[2B\sqrt{(k - \operatorname{tg} \gamma_1)^2 + 0,25(k\operatorname{tg} \gamma_1 + 1)^2} - (k - \operatorname{tg} \gamma_1) \right] \frac{a_1 \sin \alpha_1}{\operatorname{tg} \gamma_1 \sqrt{a_1^2 + a_2^2}},$$

$$R_2 = \left[2B\sqrt{(k - \operatorname{tg} \gamma_2)^2 + 0,25(k\operatorname{tg} \gamma_2 + 1)^2} - (k - \operatorname{tg} \gamma_2) \right] \frac{a_2 \sin \alpha_2}{\operatorname{tg} \gamma_2 \sqrt{a_1^2 + a_2^2}}.$$

$$B^2 = \left(1 + \chi / (1 - \chi)^2 \right) / 3 \quad \chi = \frac{f_t}{f_d} \quad m = f_d - f_t$$

Результати розрахунків засобом «Solver»

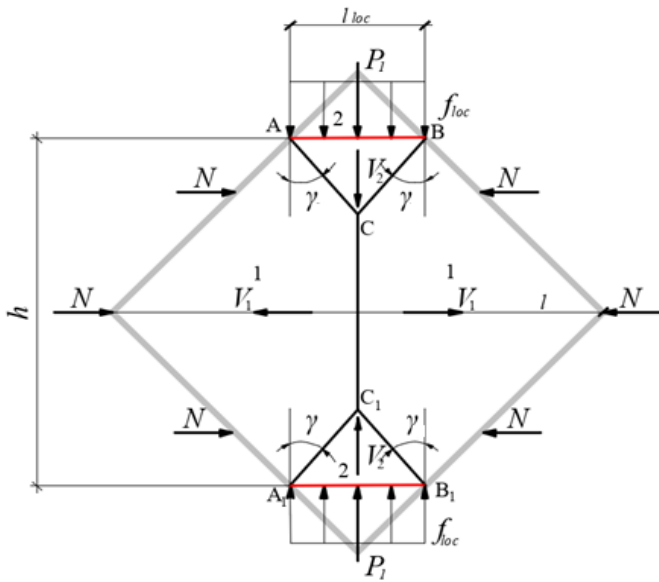
Табл. 1

χ	k	γ_1	γ_2	$P_{1u} / mb\sqrt{a_1^2 + a_2^2}$
0,104	0,896	34,49°	22,76°	1,533

Розрахунок міцності кам'яної кладки при діагональному розколюванні варіаційним методом у теорії пластичності

Дано: $f_d, f_t, L=H, a_1 = a_2, A_1, A_2, \sigma_y$

Невідомі: $P_{1u}, \gamma, k=V_1/V_2$.



Кінематична схема руйнування підсиленого елемента

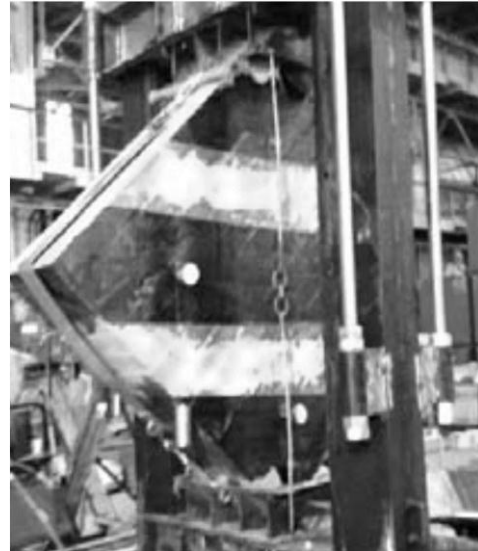
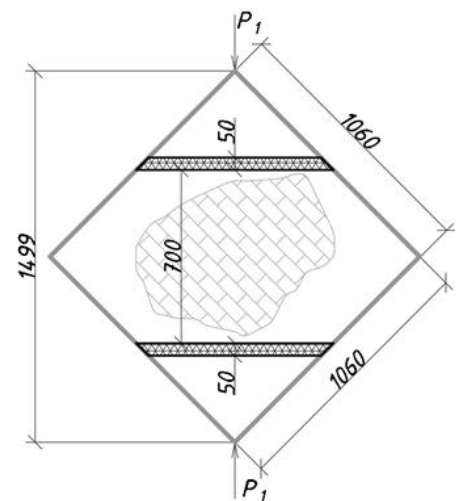
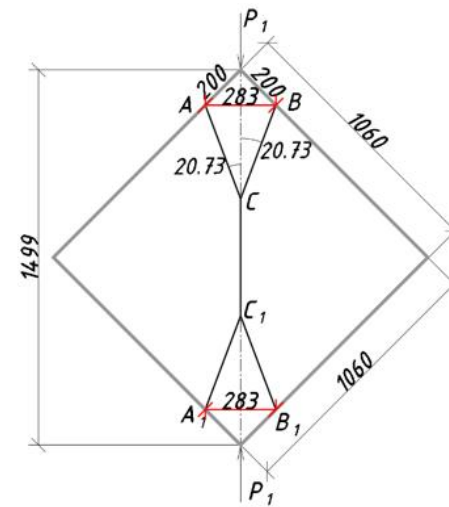
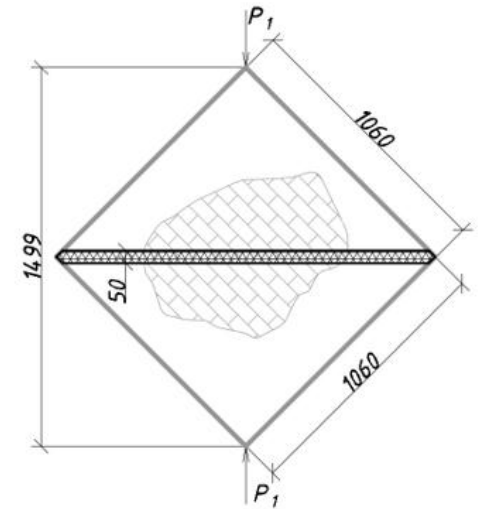
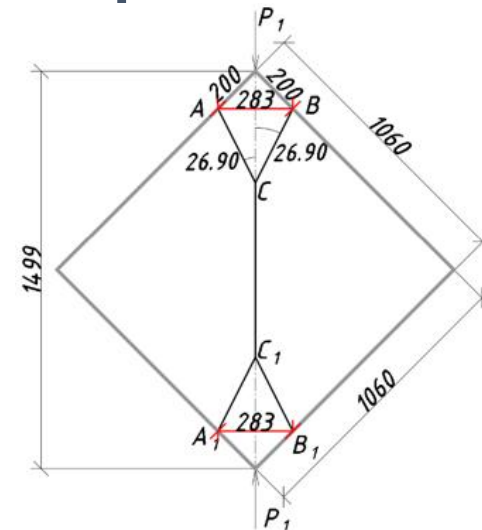


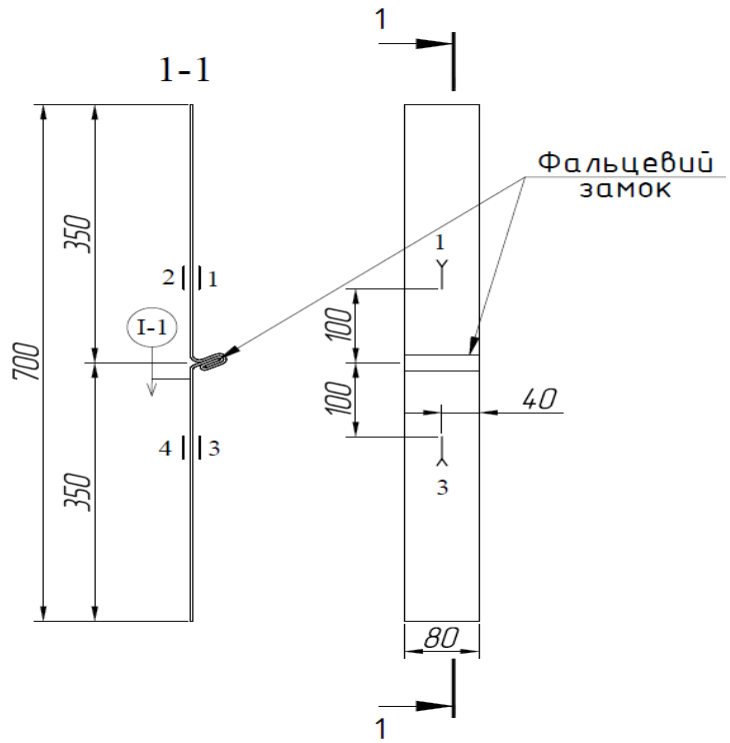
Схема підсиленого в трьох рівнях елемента



$$\frac{P_{1u}}{mbl_{loc}} = \frac{\left[2B\sqrt{(k - tg\gamma)^2 + 0,25(1 + ktg\gamma)^2} - (k - tg\gamma) \right]}{tg\gamma} + \frac{f_t k (\alpha tg\gamma - 1)}{mtg\gamma} + \frac{(2A_1 + A_2)\sigma_y k}{bl_{loc} m}$$

A_1 та A_2 - площі стрічок підсилення, σ_y напруження в стрічках на момент руйнування

Експериментальне дослідження фальцевого замку на розтягуючі навантаження






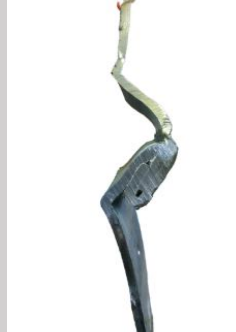


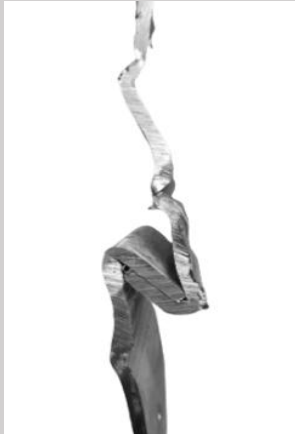

Розташування та нумерація тензодатчиків та індикаторів на зразках; 1 - 4 – тензодатчики; I-1 – індикатори годинникового типу
Експериментальний зразок

Загальний вигляд експериментального зразка у випробувальній машині

Етапи експерименту: закріплення зразка у випробувальній машині, ступеневе навантаження зразка розтягуючим навантаженням, збір даних з індикаторів годинникового типу та фіксація деформацій тензорезисторів на кожному ступені навантаження, навантаження зразка до повного розриву фальцевого замка.

Навантаження зразків виконувалось центральним розтягуючим навантаженням, яке прикладалося в статичному режимі в межах від 0 кН до 21 кН.

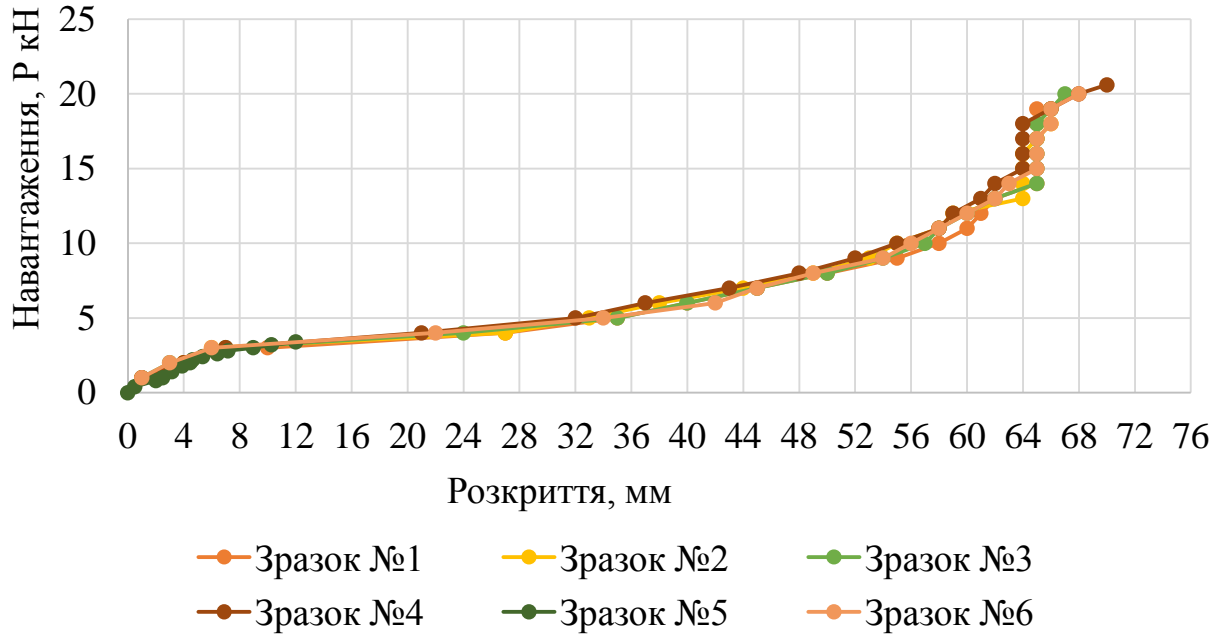
Таблиця – Етапи руйнування фальцевого замка в залежності від розтягуючого навантаження

Нав-ня, кН	0	2,5	4,5	8
Характер розкриття				
Нав-ня, кН	15	20	14	10
Характер розкриття				

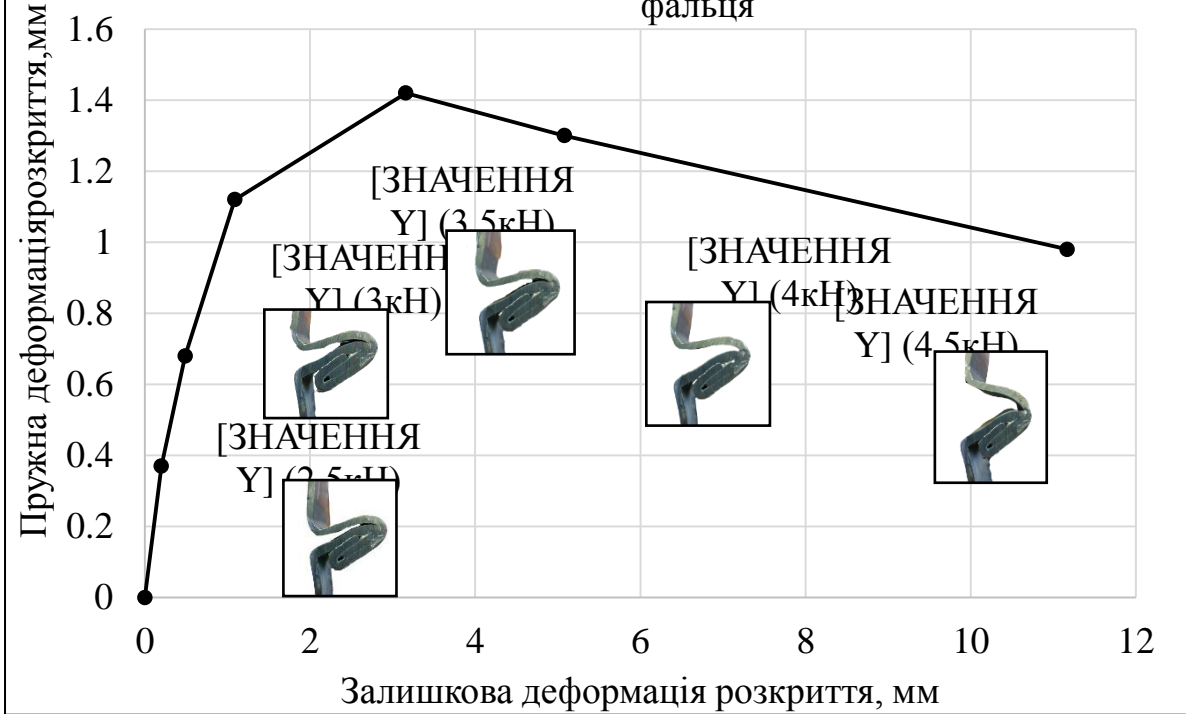
Зразок після руйнування



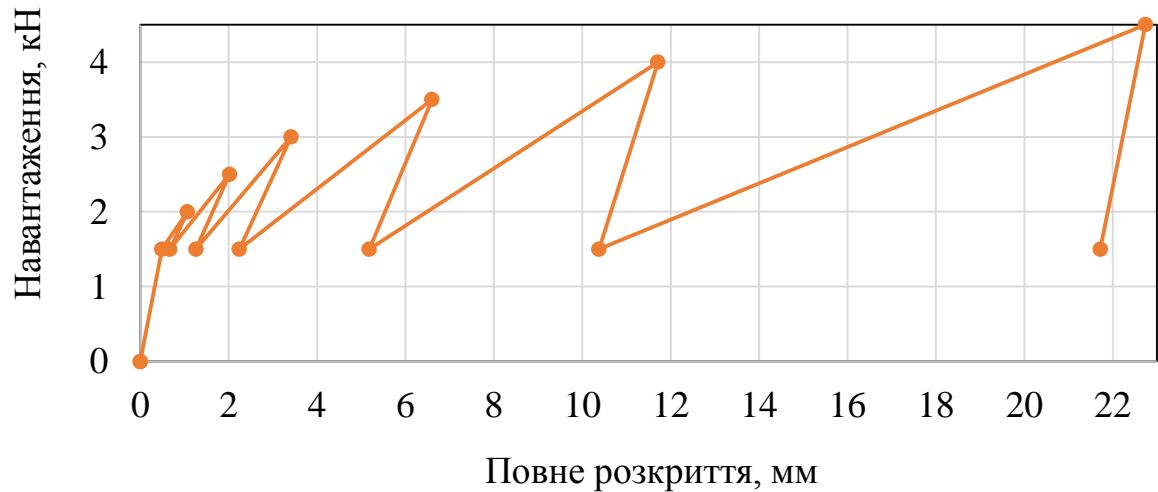
Характер розкриття фальцевого замка



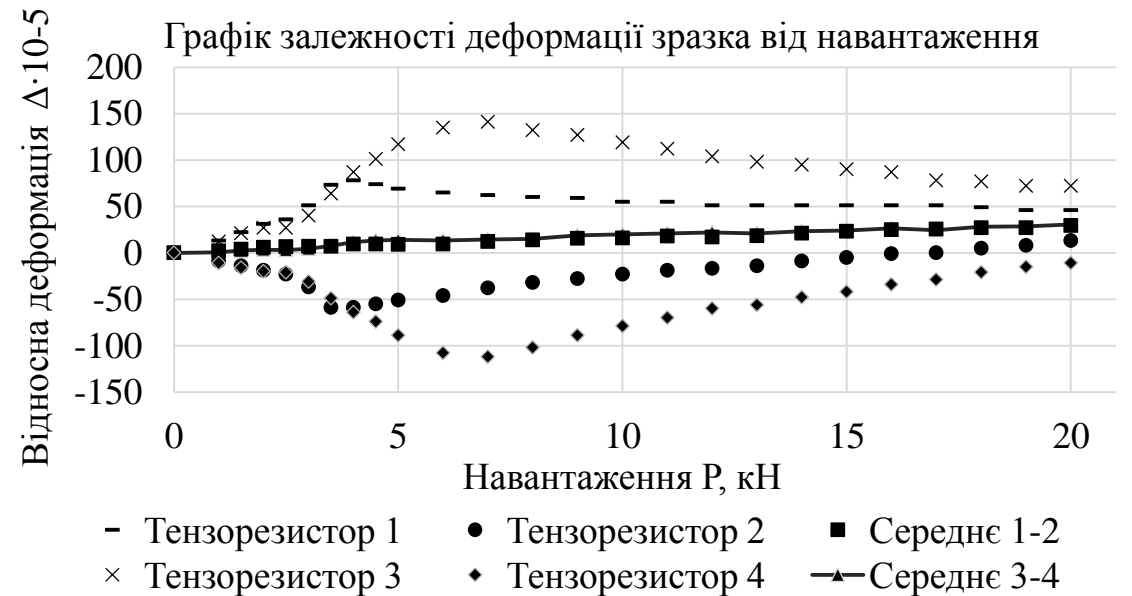
Графік залежності між пружним та залишковим розкриттям фальця



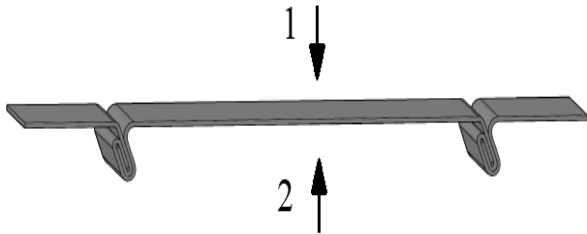
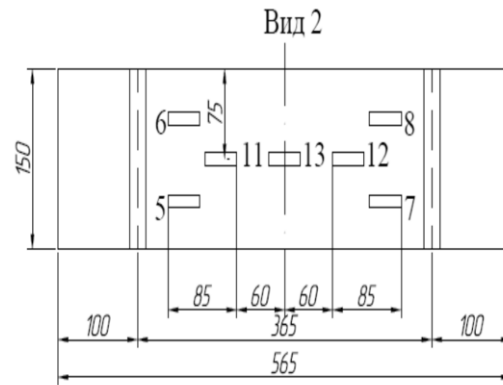
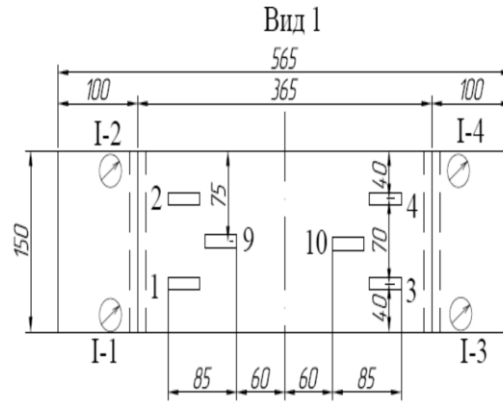
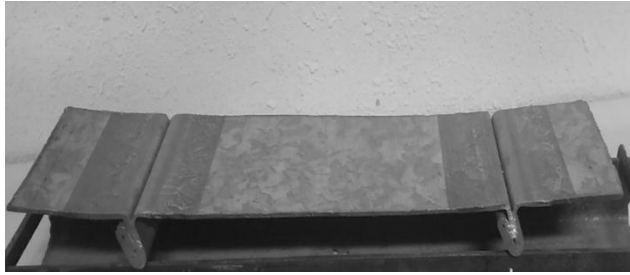
Графік залежності повного розкриття фальцевого замка від циклічного навантаження



Графік залежності деформації зразка від навантаження



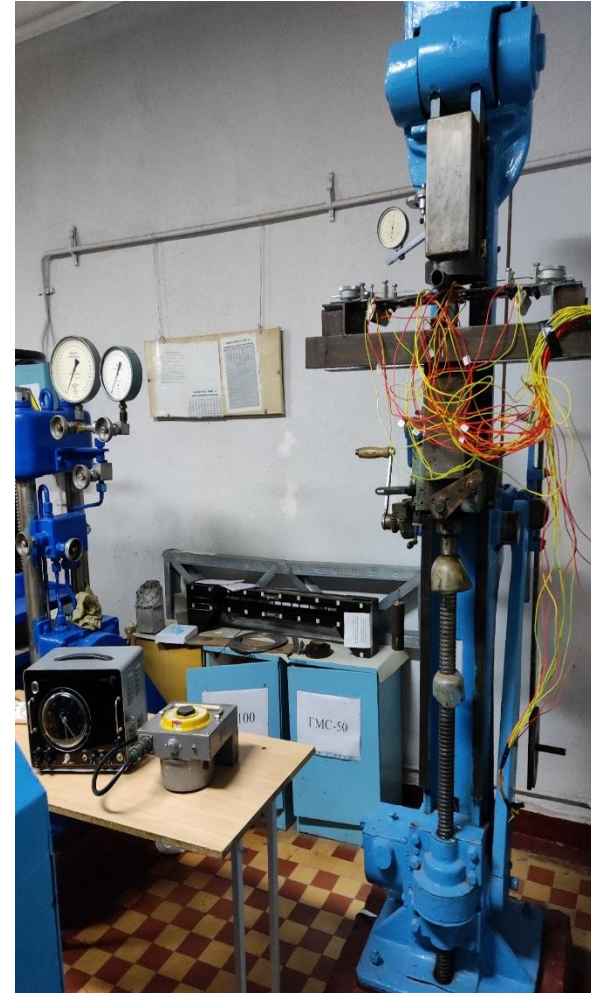
Експериментальне дослідження на згин міжфальцевої зони оболонки спіральньо-фальцевого силосу



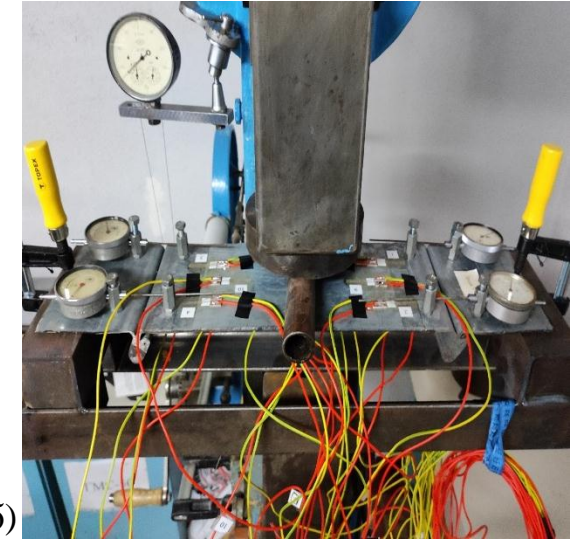
а)

б)

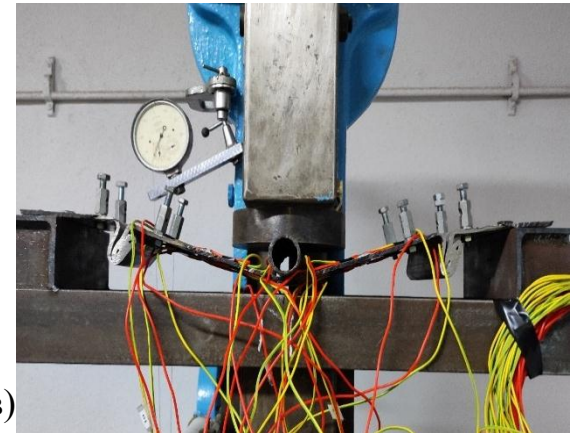
Експериментальний зразок: а - загальний вигляд; б – розташування та нумерація тензодатчиків та індикаторів на зразках; 1 - 13 – тензорезистори; I-1 - I-4 – індикатори годинникового типу.



а)



б)

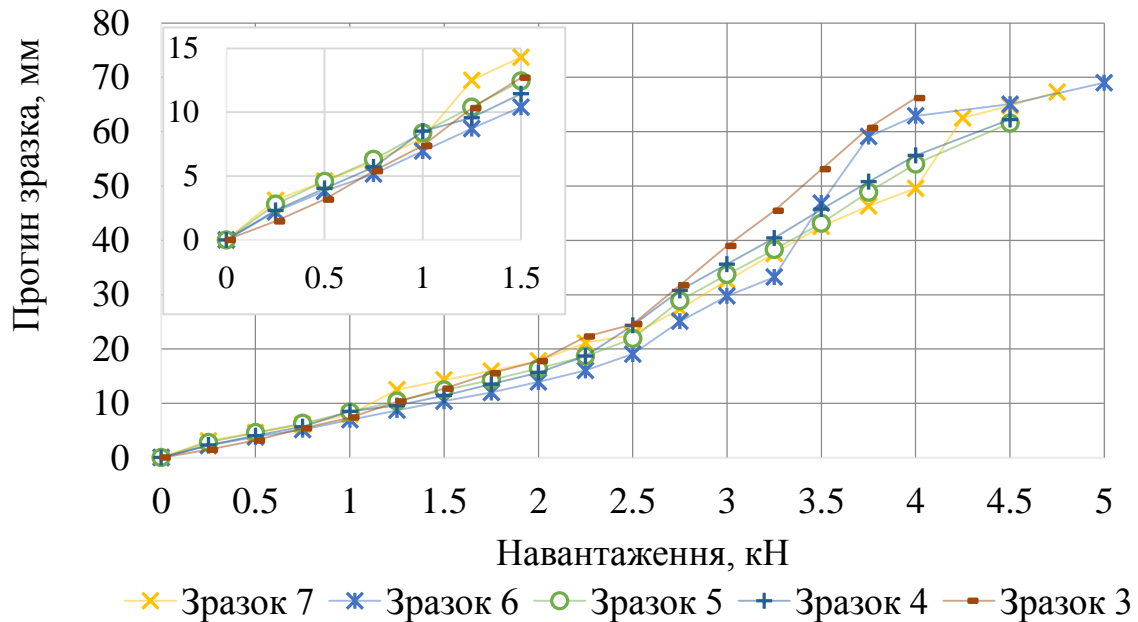


в)

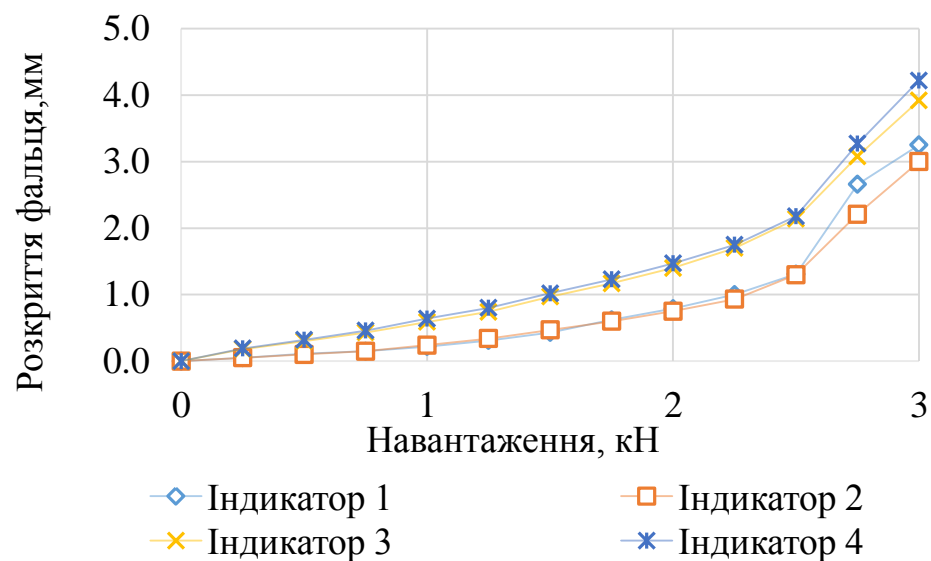
Експериментальний зразок у випробувальній машині:

а – загальний вигляд; б – вигляд до навантаження; в – вигляд після навантаження.

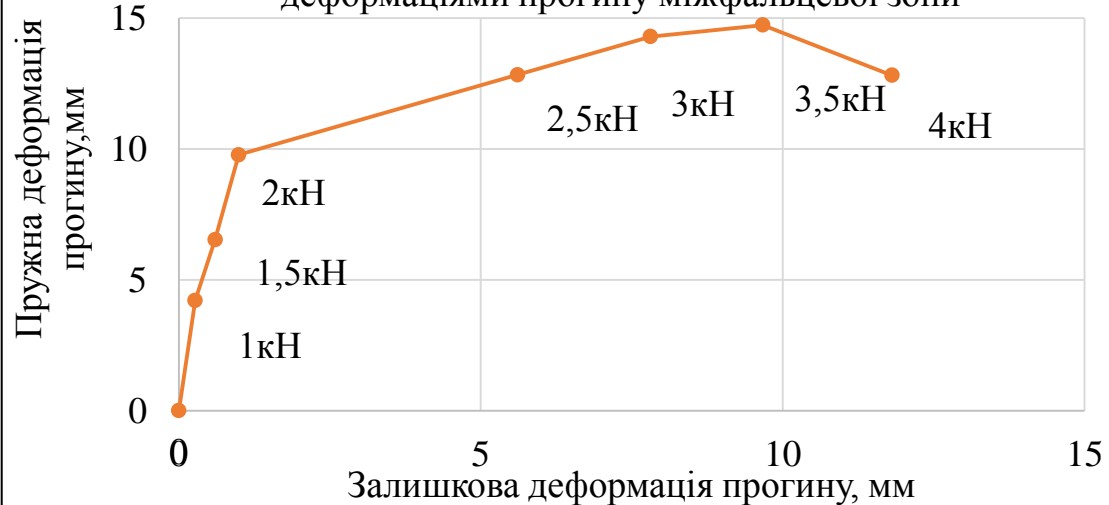
Характер прогину зразка у міжфальцевій зоні



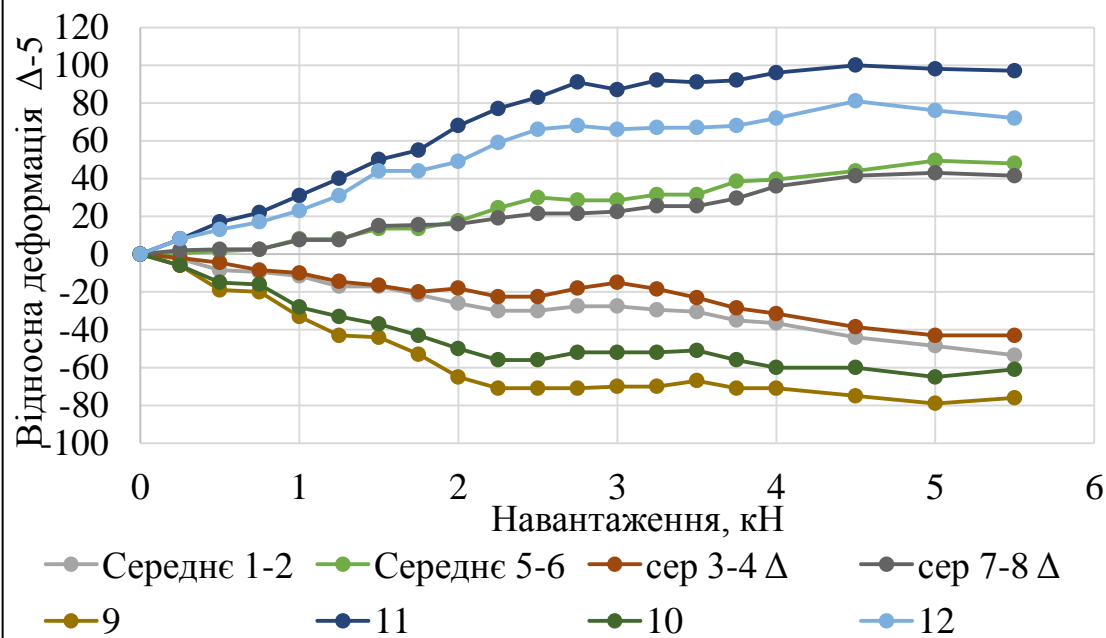
Характер розкриття фальцевого замка



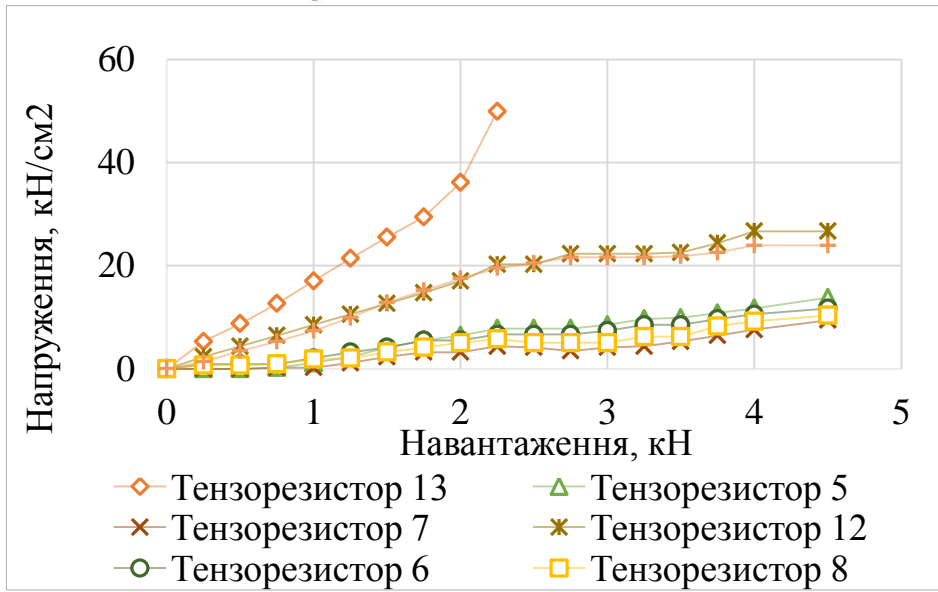
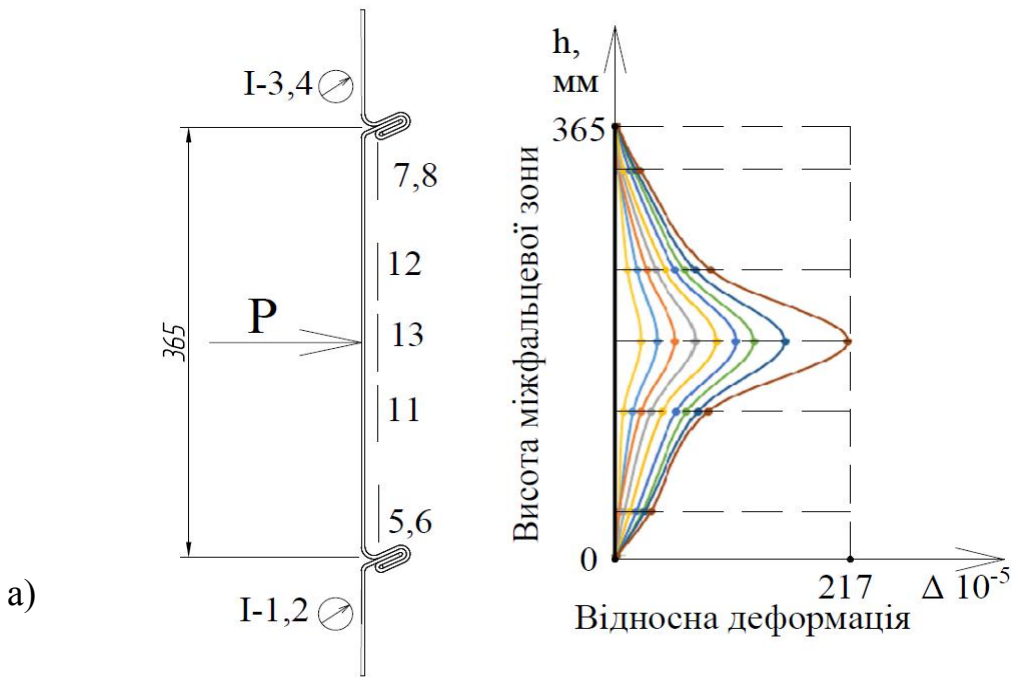
Графік залежності між пружними та залишковими деформаціями прогину міжфальцевої зони



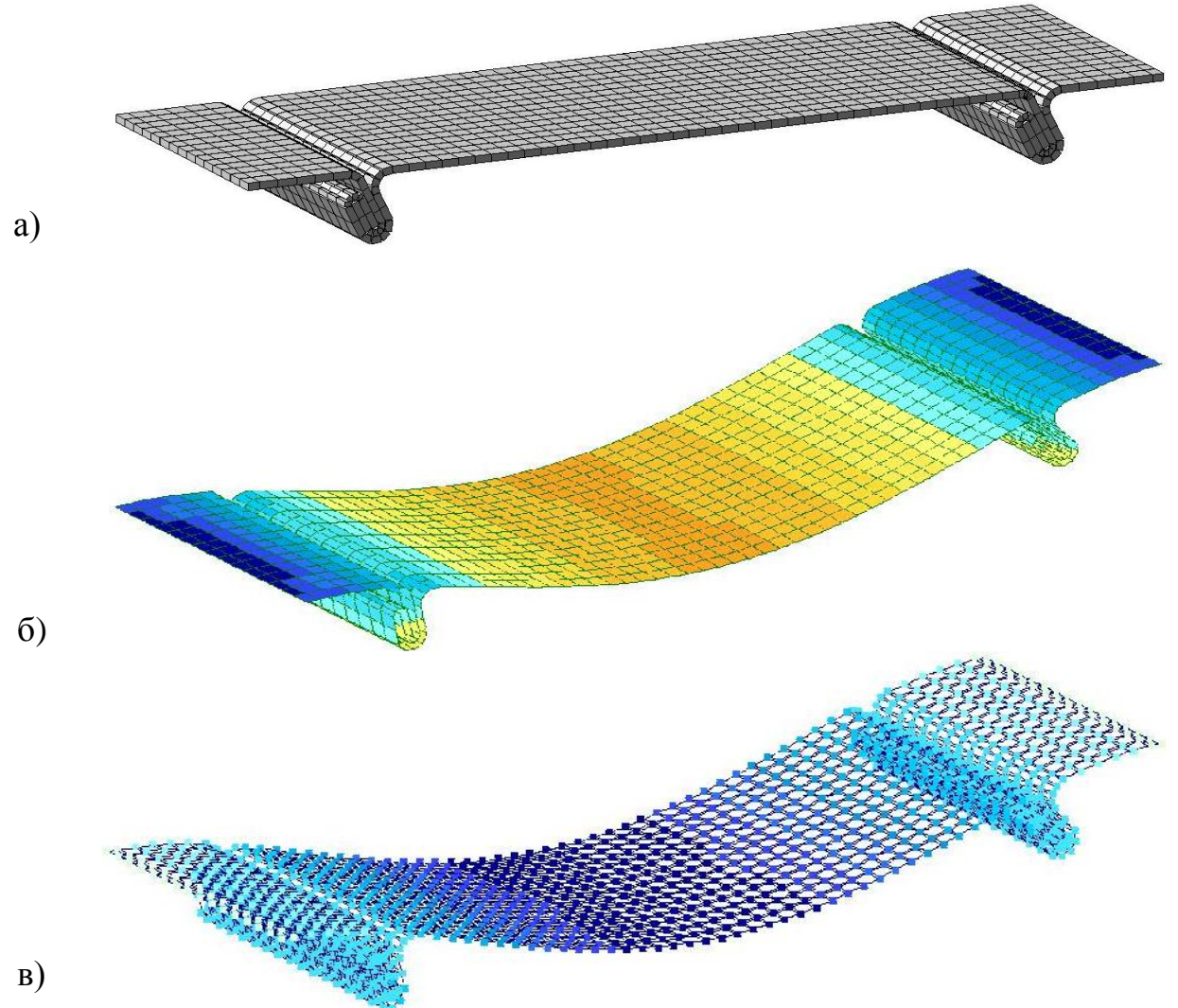
Графік залежності деформації зразка від навантаження



Порівняння результатів експериментального дослідження на згин міжфальцевої зони оболонки спірально-фальцевого силосу з розрахунком методом скінченних елементів в програмну комплексу ЛІРА-САПР



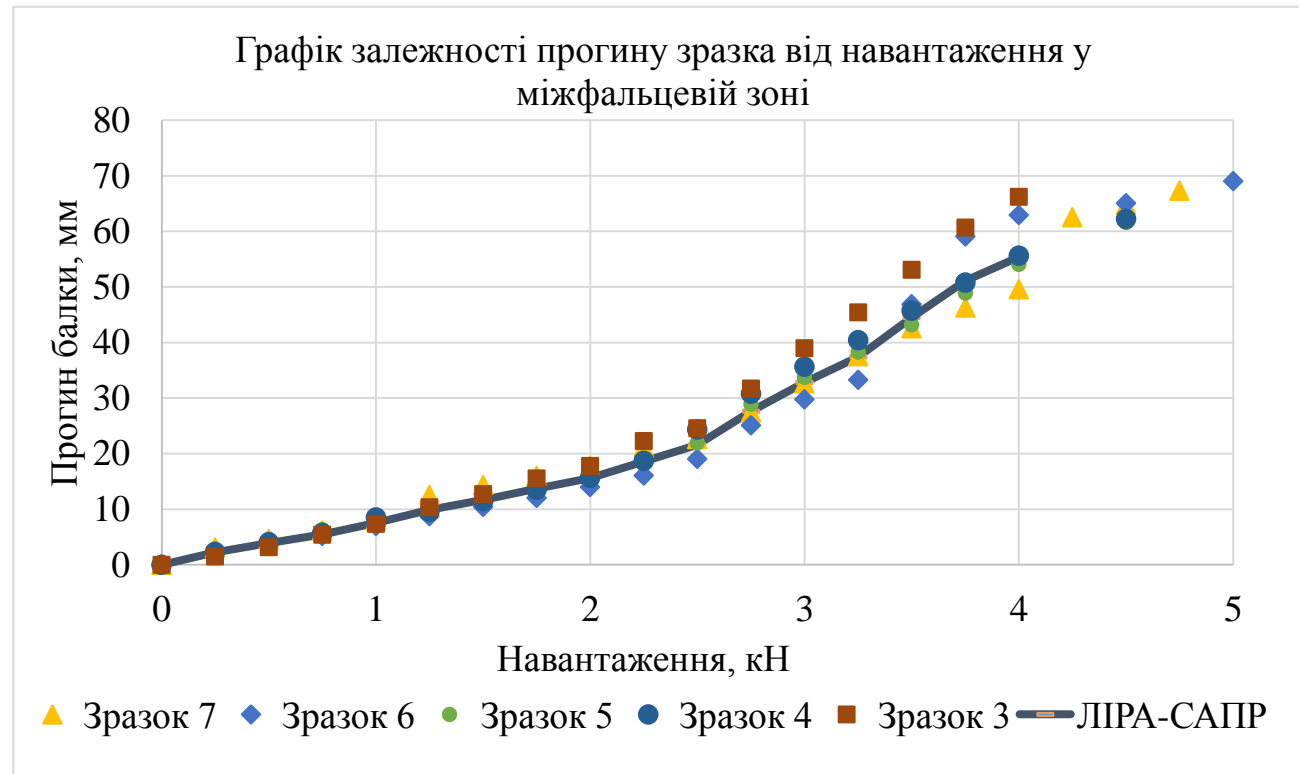
Напружено-деформований стан елемента стінки:
а – епюра деформацій; б – графік напружень.



Моделювання експериментального зразка в ЛІРА-САПР:
а) 3d – модель; б) ізополя напружень; в) мозаїка переміщень.

Таблиця – Порівняння результатів експерименту з розрахунками методом скінченних елементів в програмному комплексі ЛІРА-САПР

Експеримент (середнє значення 5-х зразків)		ЛІРА-САПР		Різниця, %
Нав-ня, кН	Переміщення, мм	Нав-ня, кг/см ²	Переміщення, мм	
0	0	0	0	0,0
0,25	2,378	0,1637	2,31	3,3
0,5	4,038	0,2779	3,91	3,2
0,75	5,738	0,395	5,45	5,0
1	7,842	0,5398	7,54	3,9
1,25	10,306	0,7094	9,91	3,8
1,5	12,256	0,8436	11,7	4,5
1,75	14,26	0,9816	13,7	3,9
2	16,32	1,1234	15,6	4,4
2,25	19,374	1,3336	18,6	4,0
2,5	22,506	1,5492	21,6	4,0
2,75	28,78	1,981	27,6	4,1
3	34,132	2,3494	32,8	3,9
3,25	38,984	2,6834	37,4	4,1
3,5	46,274	3,1852	44,5	3,8
3,75	53,132	3,6573	51,1	3,8
4	57,666	3,9694	55,4	3,9
4,25	63,41	4,3647	60,9	4,0



ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання роботи отримано наступні науково-практичні результати:

– розроблено типові ресурсощадні конструктивні рішення створення статично-невизначених самонапружених сталезалізобетонних конструкцій, що мають підвищений рівень живучості при наднормових форс-мажорних навантаженнях техногенного характеру;

– розроблено методику виготовлення та розрахунку попередньо напружених в одній площині сталобетонних прогонів із зменшеною металоємністю саме в цій площині, що створюються під час підсилення пошкоджених залізобетонних елементів сталевими профілями чи пошкоджених сталевих елементів обетонуванням;

– удосконалено конструкцію роз'ємних стиків несучих трубобетонних елементів, що відновлюються (заміняються) замість пошкоджених (зруйнованих чи частково деформованих) елементів;

– удосконалено інженерну методику розрахунку міцності складно-навантаженої деформованої цегляної кладки при сумісній дії вертикального і горизонтального навантаження на основі варіаційного методу теорії пластичності;

– передбачена можливість застосування фальцевих з'єднань ділянок відновлення сталевих огорожувальних самонесучих конструкцій спіральних силосів для сипучих матеріалів.