ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ

У К Р А В Т О Д О Р

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЇ АРМАТУРИ У МОСТОБУДУВАННІ

КОВАЛЬ Петро Миколайович,
провідний науковий співробітник відділу управління станом мостів, к. т. н., професор

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна»

Мета і завдання

Мета роботи: експериментально-теоретичне дослідження роботи під навантаженням бетонних і фібробетонних згинаних елементів, армованих композитною базальтопластиковою арматурою.

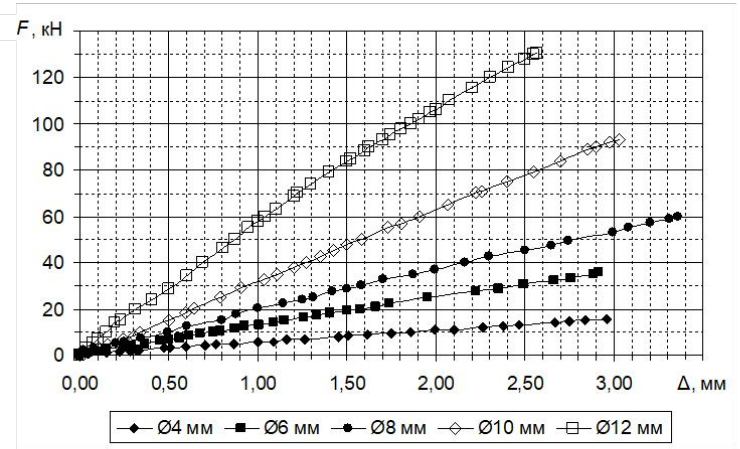
Завдання дослідження:

- ► експериментально дослідити напружено-деформований стан, характер руйнування, міцність, ширину розкриття нормальних тріщин і прогини балкових згинаних базальтобетонних елементів з різними відсотками армування;
- ► виконати експериментальні дослідження впливу на роботу балкових згинаних базальтобетонних елементів базальтової фібри;
- ► провести експериментальні дослідження впливу малоциклових навантажень високого рівня на ширину розкриття нормальних тріщин та прогинів балкових згинаних базальтобетонних елементів.

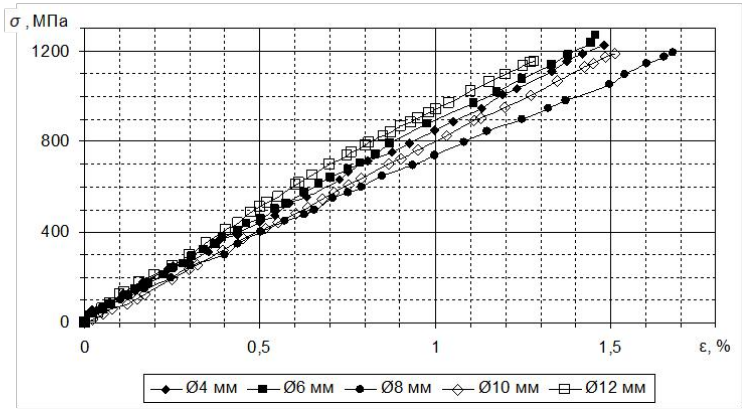
Вироби з базальту

Базальтова фібра

Стержні базальтопластикової арматури
із спіральною обмоткою



а)



б)

Діаграми "навантаження *F* – видовження зразка Δ" (а) та "напруження *σ* – відносна деформація *ε*" базальтопластикової арматури різних діаметрів при випробуванні осьовим розтягом

Дослідження і нормативні документи

Дослідженням бетонних конструкцій, армованих композитною арматурою, займалися такі вчені, як А. М. Бамбура, А. Я. Барашиков, Ю. М. Вильдановський, Ю. А. Клімов, Д. В. Кузеванов, К. В. Михайлов, І. І. Овчинников, О. С. Солдатченко, L. Bank, V. B. Brik, E. Fares, Б. М. Ониськів та В. М. Канюк.

- ✓ **Зарубіжні нормативні документи з проектування конструкцій з композитною арматурою**

- ✓ **США**
- ✓ ► ACI 440.1R-06 (2006) “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars,” ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich
- ✓ **КАНАДА**
- ✓ ► CAN/CSA-S806-02, “Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers”, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (May 2002);
- ✓ ► CAN/CSA-S6-06 “Canadian Highway Bridge Design Code” Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (December 2006)
- ✓ **ЯПОНІЯ**
- ✓ ► Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials, Concrete Engineering Series 23, ed. by A. Machida, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan, 1997
- ✓ **ІТАЛІЯ**
- ✓ ► CNR-DT 203/2006 - "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars.
- ✓ **ЄВРОСОЮЗ**
- ✓ ► Purpose and justification for new design standards regarding the use of fibre-reinforced polymer composites in civil engineering, support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, EUR 22864 EN – 2007

Програма експериментальних досліджень балкових згинаних базальтобетонних елементів

№ п/п	Тип зразка	Маркування	Кількість зразків	Спосіб випробування
1)	Бетонні куби 100×100×100	КС	24	Неперервний стиск
2)	Бетонні призми 150×150×600	ПРС-150	8	Стиск
3)	Бетонні призми 100×100×400	ПРС-100	6	Стиск
4)	Бетонні призми 150×150×600	ПРЗ-150	6	Згин
5)	Бетонні призми 100×100×400	ПРЗ-100	6	Згин
6)	Арматура, ∅ :	4	6	Статичний розтяг
		6	6	
		8	6	
		10	6	
		12	6	
7)	Базальтобетонні балки	I-4БО	2	Згин одноразові навантаження
		II-6БО	2	
		III-8БО	2	
		IV-10БО	2	
		V-12БО	2	
		VI-13БО	2	
8)	Базальтобетонні балки	I-4БМ	2	Згин малоциклові навантаження
		II-6БМ	2	
		III-8БМ	2	
		IV-10БМ	2	
		V-12БМ	2	
		VI-13БМ	2	

Програма експериментальних досліджень балкових згинаних базальтофібробетонних елементів

№ п/п	Тип зразка	Маркування	Кількість зразків	Спосіб випробування
1)	Бетонні куби 100×100×100	КС	24	Неперервний стиск
2)	Бетонні призми 150×150×600	ПРС-150	8	Стиск
3)	Бетонні призми 100×100×400	ПРС-100	6	Стиск
4)	Бетонні призми 150×150×600	ПРЗ-150	6	Згин
5)	Бетонні призми 100×100×400	ПРЗ-100	6	Згин
6)	Базальтофібробетонні балки	I-4БОф	2	Згин одноразові навантаження
		II--6БОф	2	
		III-8БОф	2	
		IV-10БОф	2	
		V-12БОф	2	
		VI-13БОф	2	
7)	Базальтофібробетонні балки	I-4БМф	2	Згин малоциклові навантаження
		II--6БМф	2	
		III-8БМф	2	
		IV-10БМф	2	
		V-12БМф	2	
		VI-13БМф	2	

Дослідженння арматури і бетону

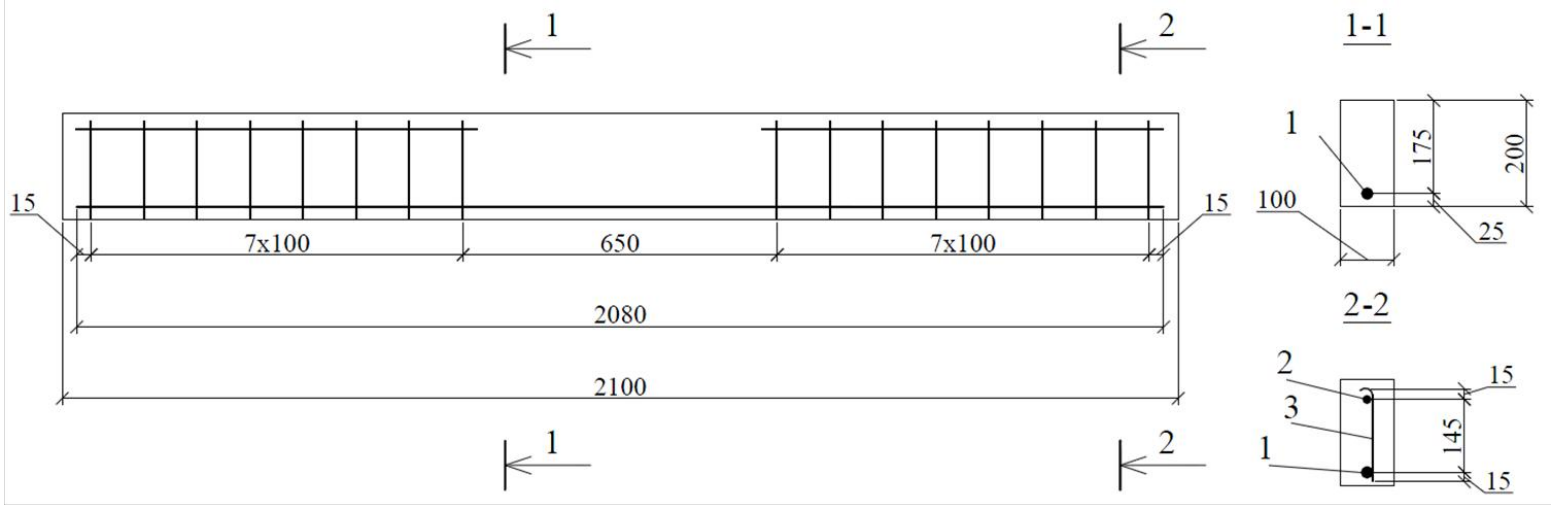
Усереднені значення результатів випробувань статичним розтягом зразків базальтопластикової арматури

№ зразка	Середнє арифмет. значення внутр. діаметру арматури d, мм	Початкова розрах. довжина зразка l_0, мм	Видовження зразка після руйнування Δl, мм	Зусилля руйнування P_{max}, кг	σ_T, Мпа	σ_B, Мпа	E_H, Мпа	Відносне видовження δ, %
1	4,06	139	3,05	1428	876	1100	47905	2,18
2	6,18	140	3,05	3320	860	1105	48932	2,13
3	8,26	141	3	6025	842	1124	44755	2,12
4	10,4	140	2,95	9073	824	1068	46125	2,1
5	12,48	140	2,6	12216	806	998	45378	1,88

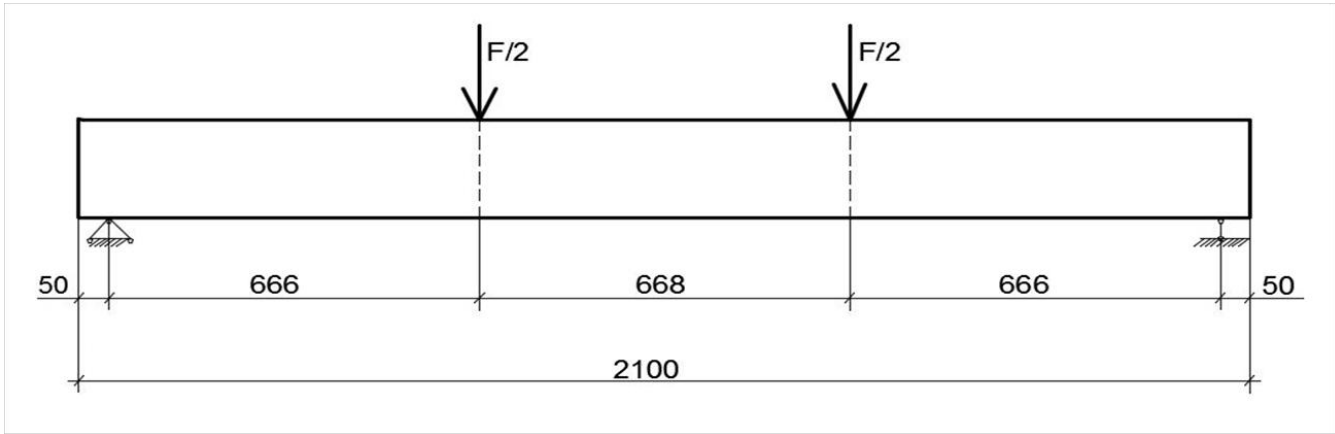
Результати визначення фізико-механічних характеристик базальтофібробетону

№ з/п	Серія зразків	Результати випробувань кубів 100×100×100 мм	Результати випробувань призм 100×100×400 мм				
		Середня для серії, міцність бетону на стиск R, МПа	Наванта-ження, Н	Міцність бетону на розтяг при згині $R_{t.b.}$, МПа	Міцність бетону на розтяг при згині $R_{t.b.}$, приведене до базового зразка, МПа		Відно-шення $R_{t.b.}/R$
					Зразка	Середнє	
1	К	46,6	13000	3,9	3,59	3,58	0,08
			12900	3,87	3,56		
2	Ф-2	46,0	14850	4,46	4,10	4,15	0,09
			15150	4,55	4,19		
3	Ф-4	45,8	16750	5,03	4,63	4,66	0,1
			16950	5,09	4,68		
4	Ф-6	47,1	17550	5,27	4,85	4,76	0,1
			16900	5,07	4,66		

Дослідні балки



Конструкція базальтобетонної балки:
1 - 1∅(4,6,8,10,12,13) АНПБ; 2 - 2∅6А-1; 3 - 16∅6А-1



Статична схема випробування базальтобетонних балок

Випробування балок

Загальний вигляд базальтобетонної балки у випробувальному стенді

Результати експериментальних досліджень згинаних базальтобетонних елементів при дії одноразових навантажень

Серія	Марка	Руйнівне навантаження M_u^{test}, кНм	Момент утворення тріщин M_{crc}, кНм	Прогин f при M_u^{test}, мм	Характер руйнування
I	БО1	2,67	2,67	1,39	Розрив арматури розтягнутої зони
	БО2	2,67	2,67	1,27	
II	БО1	4,00	2,67	12,82	Розрив арматури розтягнутої зони
	БО2	3,67	3,33	16,5	
III	БО1	9,30	3,00	35,8	Розрив арматури розтягнутої зони та роздроблення бетону стиснутої зони
	БО2	8,00	3,33	37,8	
IV	БО1	12,00	2,33	47,82	Розрив арматури розтягнутої зони та роздроблення бетону стиснутої зони
	БО2	11,00	3,00	42,01	
V	БО1	13,00	2,33	33,44	Роздроблення бетону стиснутої зони
	БО2	14,00	2,67	33,92	
VI	БО1	14,67	2,67	37,53	Роздроблення бетону стиснутої зони
	БО2	13,30	2,67	41,13	

а)

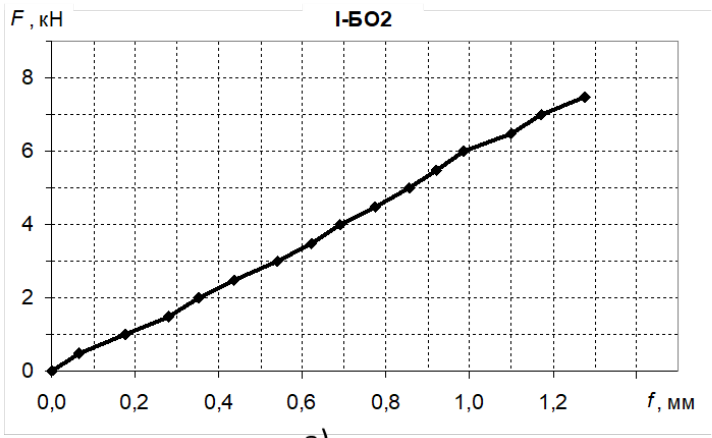
б)

в)

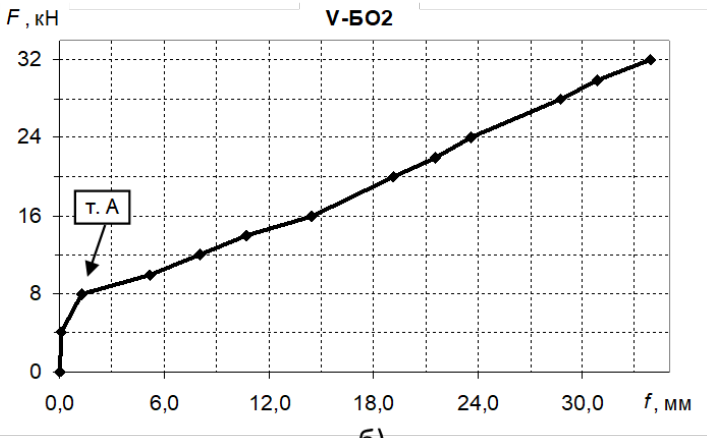
Характер руйнування дослідних зразків

а) – розрив базальтопластикової арматури;
б) – розрив повздовжньої розтягнутої базальтопластикової арматури і роздроблення стиснутої зони бетону;
в) - роздроблення бетону стиснутої зони

Результати випробувань балок



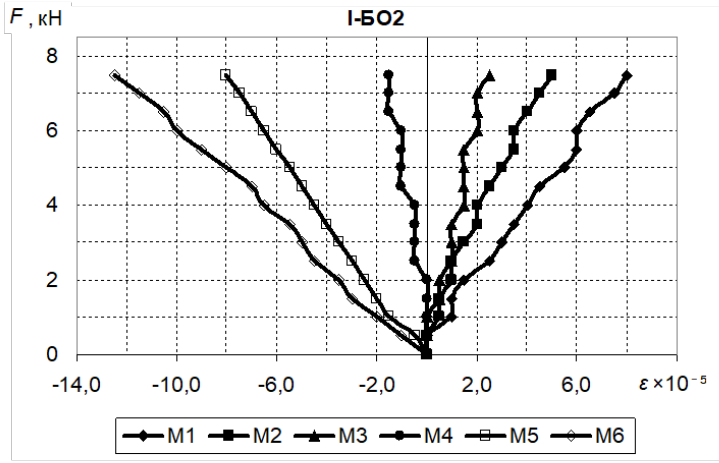
а)



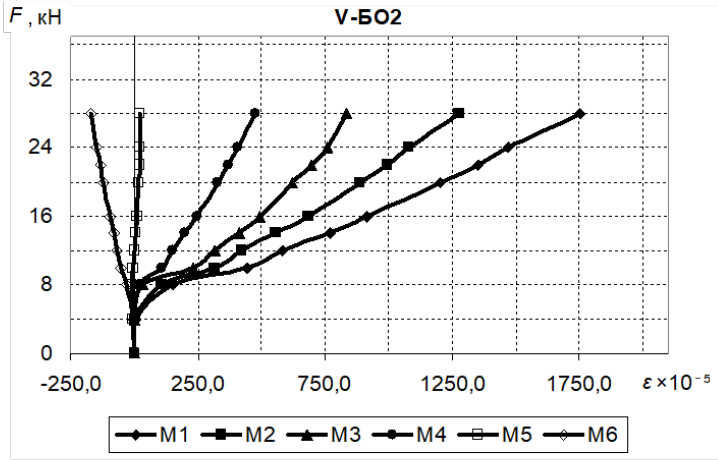
б)

Графіки прогинів базальтобетонних балок I-БО2 (а) та V-БО2 (б)

т. А - зміна кута нахилу кривої прогину при тріщиноутворенні



а)

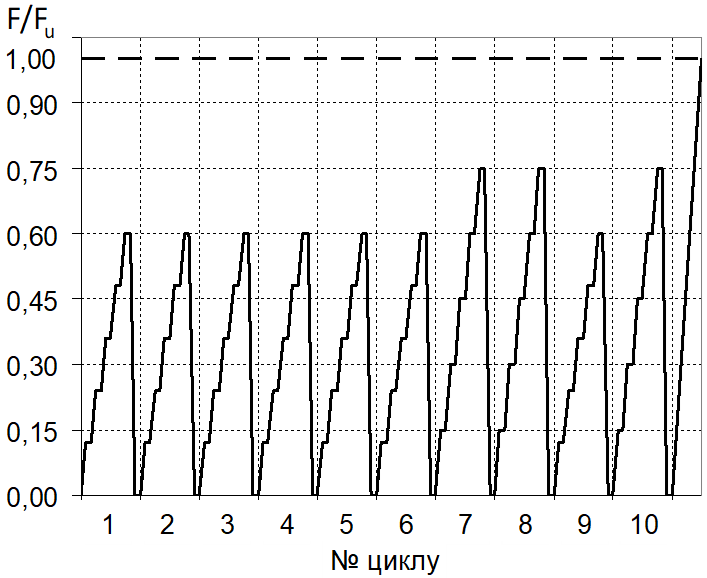


б)

Графіки відносних деформацій базальтобетонних балок I-БО2 (а) та V-БО2 (б)

Малоциклові навантаження

Графік зміни малоциклового навантаження в залежності від номера циклу

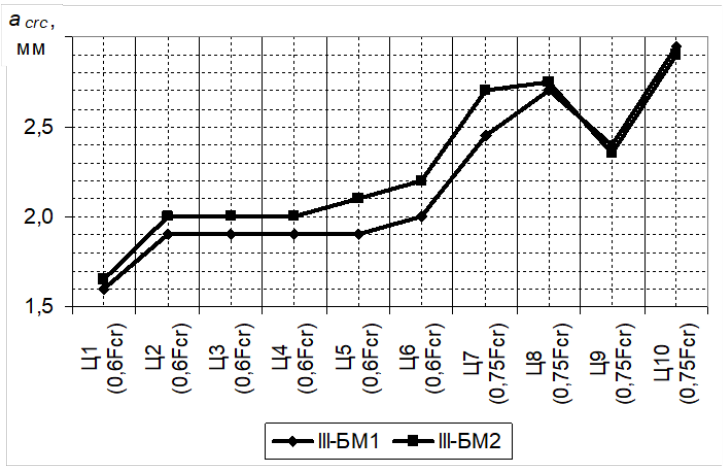


F - значення навантаження в циклі;
F_u - значення руйнівного статичного навантаження серії

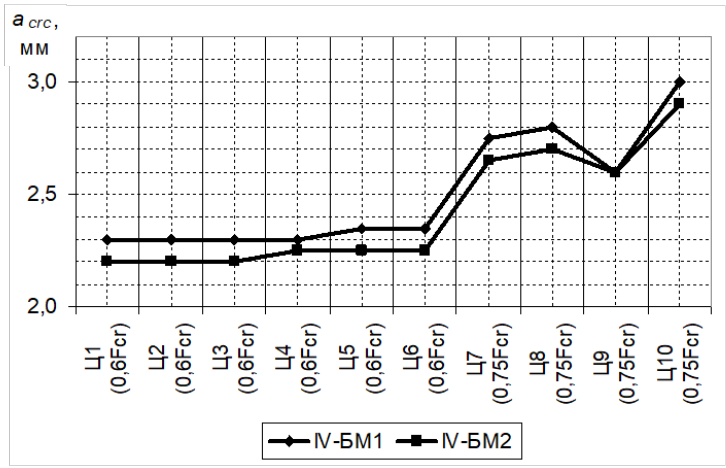
Порівняння руйнівних згинальних моментів базальтобетонних балок при одноразових і малоциклових навантаженнях

Серія	Руйнівний згинальний момент		$(M_{u\ од}-M_{u\ мц})/M_{u\ од}\times100\%$
	При одноразовому навантажені, $M_{u\ од}$, кН·м	При малоциклових навантаженнях, $M_{u\ мц}$, кН·м	
I	2,67	2,75	-3,0%
II	3,835	4,415	-15,12%
III	8,65	9,3	-7,51%
IV	11,5	12	-4,34%
V	13,5	11,65	13,70%
VI	13,985	13,67	2,25%

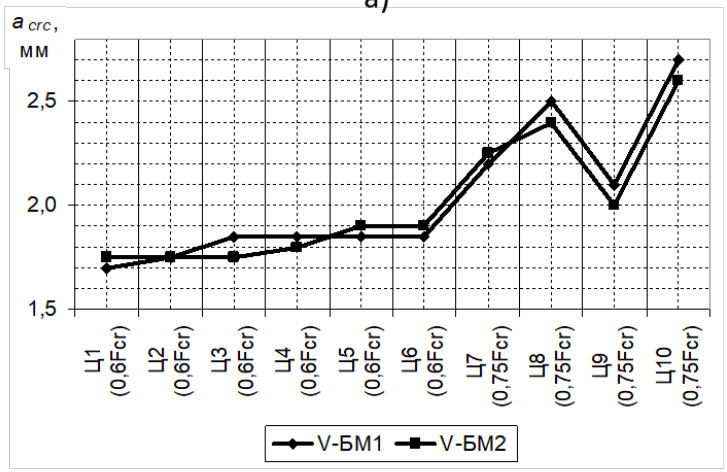
Результати досліджень



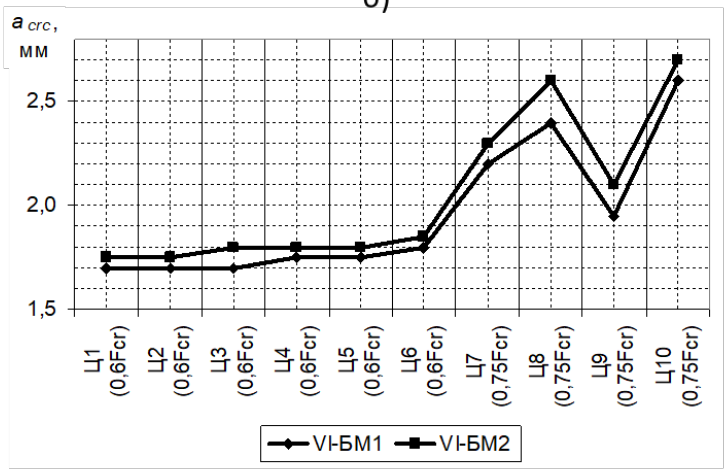
а)



б)



в)



г)

Графіки максимальної ширини розкриття тріщин базальтобетонних балок по циклах
а) – серія III-БМ; б) – серія IV-БМ; в) – серія V-БМ; г) – серія VI-БМ

Базальтофібробетонні балки

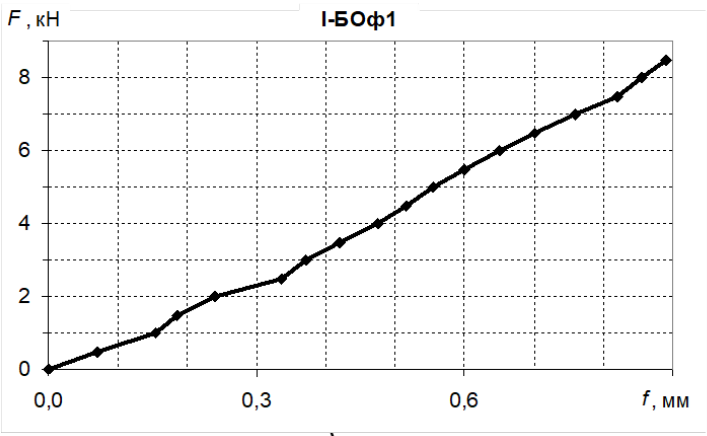
Результати експериментальних досліджень згинаних базальтофібробетонних елементів при дії одноразових навантажень

Серія	Марка	Руйнівний момент M_u^{test}, кНм	Момент утворення тріщин M_u^{test}, кНм	Прогин f при M_u^{test}, мм	Характер руйнування
I	БОф1	2,83	2,83	0,68	Розрив арматури розтягнутої зони
	БОф2	2,67	2,67	0,72	
II	БОф1	5	3,33	4,6	Розрив арматури розтягнутої зони
	БОф2	5	3	6,39	
III	БОф1	8	3,17	38,75	Розрив арматури розтягнутої зони та роздроблення бетону стиснутої зони
	БОф2	9,3	3,67	32,6	
IV	БОф1	12	3,83	36,7	Розрив арматури розтягнутої зони та роздроблення бетону стиснутої зони
	БОф2	13	3	39,26	
V	БОф1	14,67	3,5	33,44	Роздроблення бетону стиснутої зони
	БОф2	13,3	3,67	28,07	
VI	БОф1	15	3,5	33,63	Роздроблення бетону стиснутої зони
	БОф2	14	3,33	30,27	

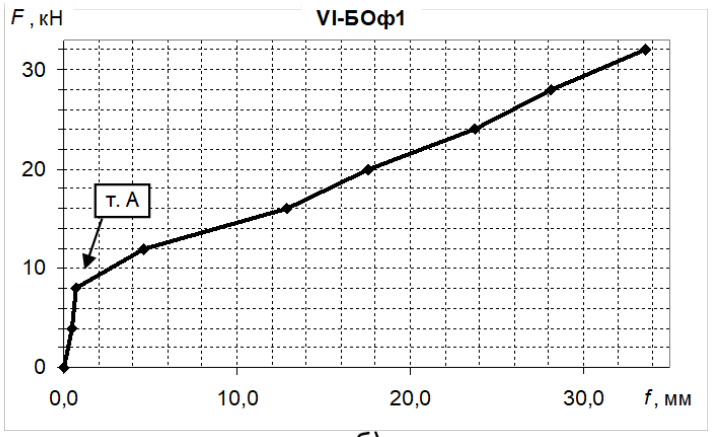
Порівняння моментів утворення тріщин і руйнівних моментів базальтобетонних і базальтофібробетонних балок

Серія	Момент утворення тріщин		$(M_{crc\ бб}-M_{crc\ бфб})/M_{crc\ бб}\times100\%$	Руйнівне навантаження		$(M_{u\ бб}-M_{u\ бфб})/M_{u\ бб}\times100\%$
	$M_{crc\ бб}$	$M_{crc,\ бфб}$		$M_{u\ бб}$	$M_{u\ бфб}$	
I	2,67	2,75	-3,0	2,67	2,75	-3,0%
II	3	3,165	-5,5	3,835	5	-30,37%
III	2,83	3,42	-29,5	8,65	8,65	0%
IV	2,665	3,415	-37,5	11,5	12,5	-8,70%
V	2,5	3,585	-54,25	13,5	13,985	-3,59%
VI	2,67	3,415	-37,25	13,985	14,5	-3,68%

Базальтофібробетонні балки



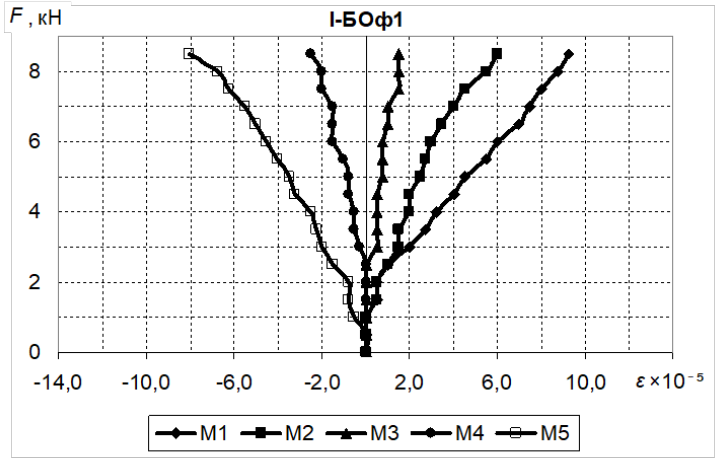
а)



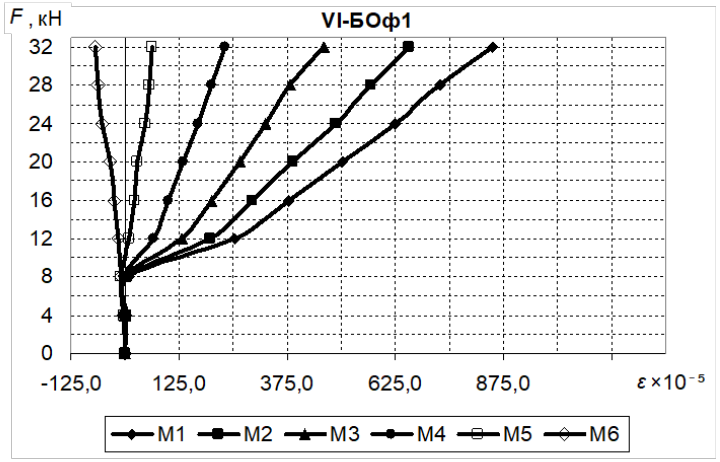
б)

Графіки прогинів базальтобетонних балок I-БОф1 (а) та VI-БОф1 (б)

т. А - зміна кута нахилу кривої прогину при тріщиноутворенні



а)



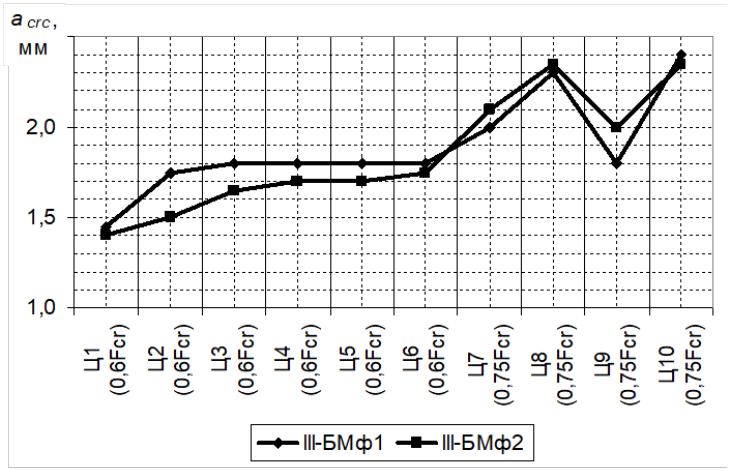
б)

Графіки відносних деформацій базальтобетонних балок I-БОф1 (а) та VI-БОф1 (б)

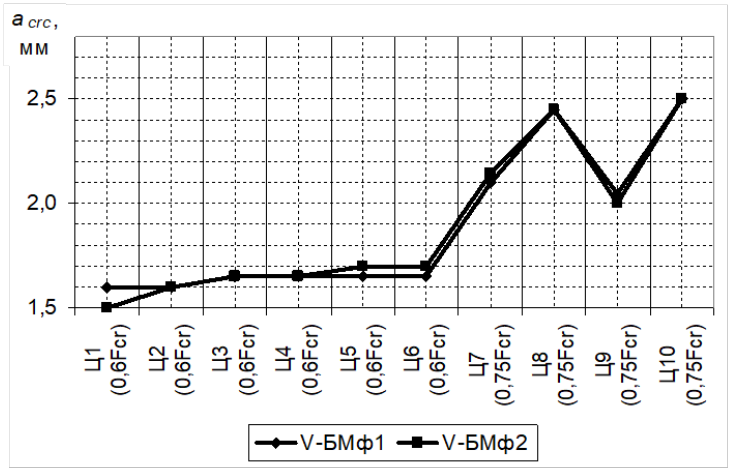
Базальтофібробетонні балки

Порівняння руйнівних навантажень при одноразових і малоциклових навантаженнях базальтофібробетонних балок

Серія	Руйнівний момент		$(M_{u\ од}-M_{u\ мц})/M_{u\ од}\times100\%$
	При одноразовому навантажені $M_{u\ од}$, кНм	При малоциклових навантаженнях $M_{u\ мц}$, кНм	
I	2,75	2,915	-6%
II	5	4,79	4,2%
III	8,65	8,5	1,73%
IV	12,5	12,5	0%
V	13,985	14,335	-2,50%
VI	14,5	13,835	4,59%



а)

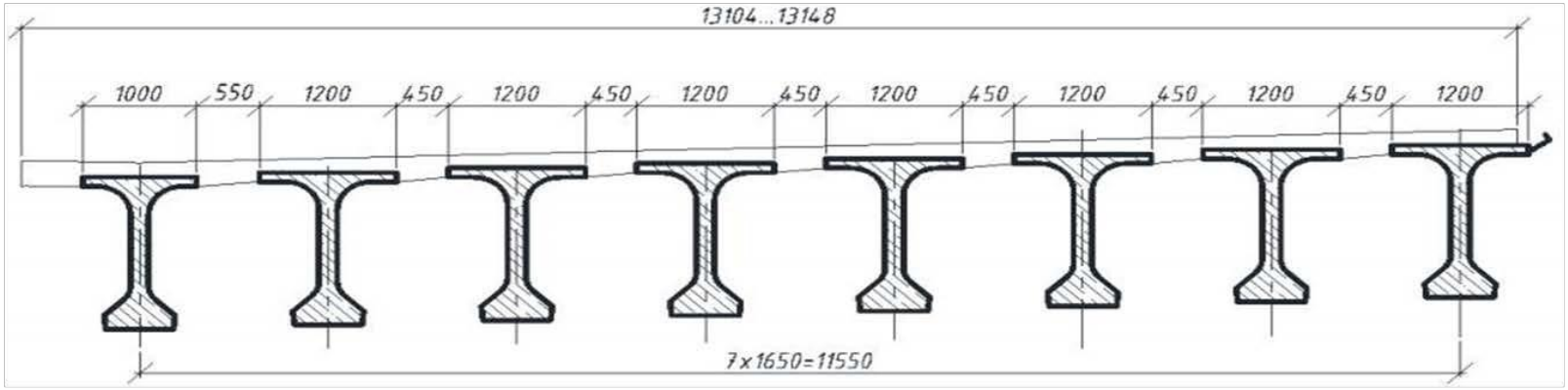


б)

Графіки максимальної ширини розкриття тріщин базальтобетонних балок по циклах
а) – серія III-БМф; б) – серія V-БМф

Ефективність використання базальтопластикової арматури при армуванні бетонних конструкцій мостів

В проекті мостового переходу в Полтавській області через р. Войниха було запропоновано замінити металеве армування плити проїзної частини моста сталевою арматурою на армування базальтопластиковою арматурою. Згідно приведених даних, вартість арматури на об'єкті при використанні базальтопластикової арматури зменшується **на 24,6%.**



Порівняння вартості заміненої сталевої арматури із прийнятою базальтопластиковою у плиті проїзної частини

Позиція	Вага, кг	Вартість, грн.*	Позиція	Вага, кг	Кількість п.м.	Вартість, грн
Ø14 А-III	4868,24	70589,48	Ø10 АКБ800	595,57	4024,15	55653,99
Ø10 А-III	2955,32	42852,14	Ø6 АКБ800	268,26	4790,30	29891,47
Загальна сума	7823,56	113441,62		863,83		85545,46

Висновки

Отримано нове вирішення науково-технічного завдання з експериментально-теоретичного дослідження міцності, жорсткості і тріщиностійкості бетонних і фібробетонних балкових конструкцій мостів, армованих неметалевою базальтопластиковою арматурою та зроблені наступні висновки:

1. Отримані експериментальні дані щодо можливих видів руйнування базальтобетонних згинаних елементів, армованих базальтопластиковою арматурою: в результаті розриву композитної арматури і в результаті роздроблення бетону стиснутої зони. Встановлено залежність виду руйнування від коефіцієнта повздовжнього армування.

2. Експериментально встановлена можливість застосування методики розрахунку залізобетонних згинаних елементів за нормами проектування мостів ДБН В. 2.3–14:2006 до розрахунків бетонних і фібробетонних згинаних елементів із базальтопластиковою арматурою при умові їх оптимального армування (одночасного руйнування за стиснутою і розтягнутою зонами).

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ

КОВАЛЬ Петро Миколайович,

Провідний науковий співробітник відділу управління станом мостів, професор, к.т.н., заслужений діяч науки і техніки України

+38 050 312 69 98, koval_pm@meta.ua