

Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Турба Юрій Васильович

УДК 691.328

ДИСЕРТАЦІЯ

Тріщиностійкість дисперсно-армованого бетону

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

19 – архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Ю.В. Турба

Науковий керівник Солодкий Сергій Йосифович,

доктор технічних наук, професор

Львів – 2021

АНОТАЦІЯ

Турба Ю. В. Тріщиностійкість дисперсно-армованого бетону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступення кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби (19 – «Архітектура та будівництво»). – Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена питанням підвищення тріщиностійкості цементних бетонів шляхом композиційного полідисперсного армування поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” для покращення їх міцнісних властивостей і силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості. Встановлена ефективність дисперсного армування бетонів транспортного призначення.

Показано вплив витрати фібр, відношення довжини фібри до максимального розміру зерен крупного заповнювача, коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача на міцність на розтяг при згині та характеристики тріщиностійкості дисперсно-армованих цементних бетонів.

Розроблено та оптимізовано за критеріями міцності, силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості склади цементних бетонів з композиційним полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” та доведена їх ефективність.

Досліджено деформації зсідання та будівельно-технічні властивості розроблених бетонів. Проведено дослідно-промислове їх впровадження та обґрунтовано техніко-економічну ефективність.

Ключові слова: дисперсно-армовані бетони, поліпропіленова фібра типу “поліарм” та “мікроарм”, повна діаграма стану, характеристики тріщиностійкості, технологічні фактори.

ABSTRACT

Turba Y. V. Crack resistance of dispersedly reinforced concrete. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the candidate degree of engineering science (Doctor of Philosophy) in specialty 05.23.05 - Building Materials and Products (19 – Architecture and construction). - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

The dissertation is devoted to increasing the crack resistance of cement concrete by composite polydisperse reinforcement with polypropylene fibres of "polyreinf" and "microreinf" type to improve their strength properties and strength and energy characteristics of crack resistance. The efficiency of dispersed reinforcement of concrete for transport purposes is established.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation, formulates the purpose and objectives of the study. The main provisions obtained by the author, which have scientific novelty and practical value, are given.

The first section provides a critical review of the literature related to the technological features of concrete reinforced with fibres of different types and types, their impact on physical and mechanical properties, crack resistance and durability, and identifies the theoretical background.

The second section presents the characteristics of the source materials and describes the main research methods used in work. The force and energy characteristics of crack resistance of dispersed reinforced concrete were determined using a complete stress-strain diagram during the mechanical tests of concrete prisms. The samples were tested according to the scheme of three-point bending on a 200 ts hydraulic machine. Control samples were loaded until destruction.

The third section is devoted to the study of the influence of dispersed reinforcement by different types of fibres with determining the physical and mechanical properties and crack resistance characteristics of concrete. At the first

stage, the effect of different fibres on the strength and energy characteristics of crack resistance was studied. The next stage was to optimize the composition of concrete using a three-level three-factor experimental plan and to establish the optimal content of polypropylene fibres such as "polyreinf" and "microreinf".

The fourth section presents the results of experimental and statistical modelling of strength properties and crack resistance characteristics of concretes with composite disperse reinforcement with polypropylene fibres such as "polyreinf" and "microreinf". Physico-mechanical, functional properties, shrinkage deformations of concretes of optimal composition with composite disperse reinforcement in comparison with non-reinforced concrete were investigated.

The fifth section presents the experimental and industrial implementation results of the developed concretes dispersed and reinforced with polypropylene fibres such as "polyreinf" and "microreinf" for transport purposes.

As a result, the dissertation solved a scientific problem with practical significance, namely the development of dispersed reinforced concrete for transport purposes with increased construction and operational properties and crack resistance characteristics. Based on the results of theoretical and experimental studies, general conclusions are formulated.

Keywords: disperse-reinforced concrete, polypropylene fiber type "polyreinf" and "microreinf", complete state diagram, crack resistance characteristics, technological factors.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз:

1. Дослідження тріщиностійкості важких бетонів та пінобетонів, армованих поліпропіленою фіброю для дорожнього будівництва / С. Й. Солодкий, В. О. Каганов, І. Б. Горніковська, Ю. В. Турба // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies = Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. № 4/5 (76). Р. 40–46. (Scopus).

2. Turba Y., Solodkyu S. Crack resistance of concretes reinforced with polypropylene fiber. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 100 : Proceedings of 2nd International scientific conference on EcoComfort and Current issues of civil engineering EcoComfort 2020, Lviv; Ukraine, 16–18 September 2020. P. 474–481. (Scopus).

3. Turba Y., Solodkyu S., Markiv T. Strength and fracture toughness of cement concrete, dispersedly reinforced by combination of polypropylene fibers of two types. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 47 : Proceedings of CEE 2019. Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering. P. 488–494.

Статті у наукових фахових виданнях України:

4. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленою фіброю. Наукові нотатки : міжвузівський збірник (за галузями знань “Технічні науки”). 2014. Вип. 46. С. 512–515.

5. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленою фіброю. Частина II. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2015. № 823. С. 298–302.

6. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Підвищення тріщиностійкості дисперсно армованих поліпропіленовою фіброю бетонів технологічними чинниками. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2017. Вип.66. С. 99–105.

Наукові праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:

7. Ефективність дисперсного армування за критерієм тріщиностійкості бетону. / Ю.В. Турба, С.Й. Солодкий // Тези доповідей LXVIII наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. Київ: НТУ, 2012. С. 181-182.

8. Crack resistance of concrete, reinforced with fiber of different types. / Solodkyu S., Turba Y. // 18-th Internationale Baustofftagung. IBAUSIL. Weimar, 2012. P 2.12. – S. 2-0561- 2-0567.

9. Тріщиностійкість бетонів армованих поліпропіленовою фіброю. / Солодкий С.Й., Турба Ю.В. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг”. Харків, 14-15 листопада 2013. С. 198-202.

10. Improvement of the fracture crack resistance of the dispersion-reinforced concrete / Solodkyu S., Turba Y // 19. Internationale Baustofftagung. IBAUSIL. Weimar, 2015. Band 2. P.2-1075-2-1082.

11. Crack resistance increase of dispersive reinforced road concrete / Solodkyu S., Turba Y // XV International Scientific Conference “Current issues of civil and environmental engineering and architecture”. Rzeszow, 2015. P. 80-81.

12. Вплив дисперсного армування поліпропіленовими фібрами на підвищення тріщиностійкості дорожніх бетонів / Ю.В. Турба, Т.М. Фик // Модернізація та сучасні технології транспортного будівництва : матеріали II Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції, 23 листопада 2017 р., Львів. 2017. С. 68–74.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 9 |
| ВСТУП..... | 10 |
| РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ..... | 15 |
| 1.1. Особливості застосування фібр різних видів для дисперсного армування бетонів..... | 15 |
| 1.2. Композиційне дисперсне армування як спосіб покращення фізико-механічних властивостей, характеристик тріщиностійкості бетонів | 26 |
| 1.3. Тріщиностійкість бетонів транспортного призначення..... | 29 |
| 1.4. Теоретичні передумови та наукова гіпотеза дослідження..... | 37 |
| Висновки до розділу 1..... | 39 |
| РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 40 |
| 2.1. Вихідні матеріали..... | 40 |
| 2.2. Методи досліджень..... | 46 |
| Висновки до розділу 2..... | 53 |
| РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСНОГО АРМУВАННЯ БЕТОНІВ НА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ..... | 55 |
| 3.1. Вплив дисперсного армування бетонів різними видами фібри на міцність та характеристики тріщиностійкості... .. | 55 |
| 3.2. Оптимізація складів бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю типу “поліарм” за критеріями міцності та тріщиностійкості..... | 62 |

| | |
|--|-----|
| 3.3. Вплив поліпропіленової фібри типу “мікроарм” на міцність і тріщиностійкість дисперсно-армованих бетонів та оптимізація розроблених складів..... | 72 |
| Висновки до розділу 3..... | 80 |
| РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА І ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ БЕТОНІВ З ПОЛІДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ..... | 82 |
| 4.1. Розробка і оптимізація складів бетонів з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”..... | 82 |
| 4.2. Деформації усадки..... | 91 |
| 4.3. Мікроструктура дисперсно-армованого бетону..... | 92 |
| 4.4. Фізико-механічні та будівельно-технічні властивості бетонів | 96 |
| Висновки до розділу 4..... | 98 |
| РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ | 100 |
| 5.1. Економічна ефективність влаштування дорожнього покриття з використанням розроблених бетонів..... | 100 |
| 5.2. Промислова апробація високоміцних бетонів для дорожніх покриттів..... | 120 |
| Висновки до розділу 5..... | 122 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 123 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 126 |
| ДОДАТКИ..... | 138 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$f_{cm.cube}$ – міцність на розтяг при згині, МПа;

f_{cm} – міцність при стиску, МПа;

K_i – статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м^{1/2};

K_c – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м^{1/2};

G_i – питомі енерговитрати на початок статичного руйнування, Дж/м²;

G_1 – питомі енерговитрати на початок статичного руйнування, Дж/м²;

G_F – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування, Дж/м²;

X_{cF} – критерій крихкості, м;

ПДС – повна діаграма стану.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний досвід будівництва та експлуатації автомобільних доріг підтверджує, що кращі показники надійності і довговічності мають жорсткі дорожні одяги. Проте, цементний бетон у процесі його укладання та експлуатації може накопичувати багато дефектів, які значно зменшують його проектну міцність. Однією з головних причин недобору міцності може бути тріщиноутворення, яке виникає, коли навантаження перевищують міцність бетону. Напруження, які виникають при цьому в бетоні, можуть пояснюватися дією зовнішніх сил (постійні навантаження від руху транспорту; збільшення вантажопідйомності автомобілів; погане обпирання бетонного покриття на основу), так і внутрішніх сил, які обумовлені фізико-хімічними процесами, що відбуваються під час твердіння бетону.

Критерій надійності і довговічності бетону дорожнього покриття визначається здатністю елементів структури перерозподіляти та гасити локальні напруження в нестійких тріщинах в період раннього твердіння і експлуатації. Тому в технології дорожнього бетону і механіці управління його структуроутворенням з'являється новий напрямок, заснований на гальмуванні процесів руйнування – підвищення тріщиностійкості, що досягається розробкою та впровадженням одного із перспективних конструкційних матеріалів, а саме дисперсно-армованого бетону, який дозволяє компенсувати головні недоліки традиційного бетону - низьку міцність при розтягуванні та крихкість (низьку тріщиностійкість).

При цьому армування одним видом фібрового волокна не завжди призводить до підвищення фізико-механічних, техніко-експлуатаційних характеристик бетонів, а інколи навіть до їх зниження, що пояснюється “роботою” фібри на різних етапах експлуатації бетону. Комплексне дисперсне армування різними видами та типами фібри дасть змогу задіяти увесь потенціал введених волокон, яке до теперішнього часу вивчене недостатньо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Тема дисертації є складовою частиною науково-дослідної роботи кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка» і виконувалась в межах теми «Розроблення ефективних технологій і матеріалів для будівництва та ремонту дорожніх одягів» (номер держреєстрації 0114U001233).

Мета роботи та завдання дослідження. Розроблення цементобетонів з підвищеними характеристиками міцності та тріщиностійкості шляхом композиційного дисперсного армування.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- провести критичний аналіз теоретичних уявлень та експериментальних даних щодо підвищення фізико-механічних характеристик та показників тріщиностійкості цементного бетону дисперсним армуванням;

- встановити найбільш ефективний вид та тип фібрового волокна для дисперсного армування цементних бетонів та їх вплив на фізико-механічні характеристики та параметри тріщиностійкості;

- розробити та оптимізувати за критеріями міцності та тріщиностійкості склади дисперсно-армованих поліпропіленовою фіброю типу “поліарм” та “мікроарм” цементних бетонів, визначити їх фізико-механічні властивості та характеристики тріщиностійкості;

- розробити та оптимізувати за критеріями міцності та тріщиностійкості склади цементних бетонів із композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”, визначити їх фізико-механічні властивості та характеристики тріщиностійкості;

- дослідити експлуатаційні властивості розроблених бетонів;

- провести дослідно-промислове впровадження розроблених цементних бетонів із композиційним дисперсним армуванням

поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” та провести техніко-економічне обґрунтування їх ефективності.

Об'єкт дослідження – фізико-механічні властивості, силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості дисперсно-армованих цементних бетонів.

Предмет дослідження – дисперсно-армовані бетони з підвищеними характеристиками тріщиностійкості, завдяки композиційному дисперсному армуванню поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”.

Методи дослідження. Експериментальні результати отримані із використанням сучасних методів фізико-механічних випробувань, електронної мікроскопії з мікрозондовим аналізом. Визначення фізичних, фізико-механічних та будівельно-експлуатаційних властивостей матеріалів і виробів здійснювали згідно з чинною нормативно-технічною документацією та загальноприйнятими методиками. Оптимізацію складів бетонів проведено із застосуванням експериментально-статистичних методів планування експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів:

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання бетонів транспортного призначення з підвищеною тріщиностійкістю шляхом композиційного дисперсного армування поліпропіленовою фіброю різного типу;

- вперше встановлено ефективність комплексного поєднання в оптимальному співвідношенні поліпропіленової фібри типу “поліарм” та “мікроарм” для полідисперсного армування бетону на мікро- та макрорівні для забезпечення підвищених силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості;

- встановлена визначальна роль композиційного дисперсного армування та технологічних факторів на ефективність “роботи” бетону на різних етапах деформування та руйнування;

- виявлено ефект “містка”, який формується фібровим волокном і

сповільнює розвиток макротріщини в докритичній стадії деформування та чинить опір дефрагментації в закритичній стадії руйнування полідисперсноармованих бетонів;

- отримано комплекс експериментально-статистичних моделей силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості дисперсно-армованих бетонів поліпропіленовими фібрами типів “поліарм” і “мікроарм” та їх комплексного поєднання.

Практичне значення одержаних результатів

- розроблено бетони з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”, з підвищеними показниками довговічності (марка за морозостійкістю не менше F200), тріщиностійкості (загальні питомі ефективні витрати енергії на статичне руйнування $G_F=760 \text{ Дж/м}^2$, критичний коефіцієнт інтенсивності напружень $K_I=0,86 \text{ МПа}\times\text{м}^{1/2}$) та міцності на розтяг при згині ($f_{ctfm}=11,40 \text{ МПа}$);

- проведено дослідно-промислову апробацію розроблених полідисперсноармуваних бетонів на виробничій базі ПП “ЗАХІД-БЕТОН-БУД”. Здійснено виробництво дослідної партії бетону на основі портландцементу ПЦ II/A-III-500 та виготовлено цементно-бетонне покриття паркінгу при складських приміщеннях у с. Муроване (Львівська ОТГ). Результати випробувань підтвердили досягнення підвищених характеристик міцності, тріщиностійкості та довговічності.

- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» у викладанні дисциплін “Наукові дослідження в будівництві” для магістрів за спеціальністю

192 Будівництво та цивільна інженерія.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень, обробленні та інтерпретації одержаних даних.

Постановка завдання, планування програми досліджень,

формулювання основних положень та висновків здійснювалося під керівництвом наукового керівника – д.т.н., проф. Солодкого С.Й.

Результати наукових досліджень, представлені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. В роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1] – дослідження впливу дисперсного армування поліпропіленовою фіброю типу “мікроарм” на цементний бетон та можливість його використання в якості покриття автомобільних доріг; [2, 9] – дослідження впливу дисперсного армування поліпропіленовою фіброю типу “поліарм” на характеристики бетонів з варіацією технологічних чинників, а саме витрати фібри, відношення довжини фібрового волокна до максимального діаметру крупного заповнювача, коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача; [3] – дослідження впливу композиційного дисперсного армування поліпропіленовими фібрами типу “мікроарм” і “поліарм” на фізико-механічних властивостей і силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів. [4, 5, 6, 10, 11] – дослідження впливу дисперсного армування поліпропіленовою фіброю типу “мікроарм” на характеристики бетонів з варіацією технологічних чинників, таких як витрата фібри, відношення довжини фібрового волокна до максимального діаметру крупного заповнювача, коефіцієнт розсуву зерен крупного заповнювача; [7, 8] - дослідження впливу дисперсного армування різними видами та типами фібр на фізико-механічні властивості та характеристики тріщиностійкості бетонів.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається з вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 118 найменувань та 2 додатків. Робота викладена на 143 сторінках, у тому числі 125 сторінки основного тексту, 28 таблиці, 38 рисунків, 12 сторінок списку використаних джерел та 6 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Особливості застосування фібр різних видів для дисперсного армування бетонів

Одним з перспективних конструкційних матеріалів, який дає змогу компенсувати головні та недоліки бетону – низьку міцність при розтягуванні та крихкість, є дисперсно-армовані бетони. Фібробетон характеризується в кілька разів вищою міцністю при розтягуванні на зріз, ударною міцністю, тріщиностійкістю і в'язкістю, морозостійкістю, водонепроникністю, пожежостійкістю. За показником роботи руйнування фібробетон може в 15-20 разів перевершувати бетон. Такі бетони являють собою один із різноманітних видів широкого класу композиційних (композитних) матеріалів, які в наш час все більш широко застосовуються в різних галузях промисловості.

Зацікавлення дисперсно-армованими бетонами і фіброцементом зосереджене в його перспективному застосуванні в таких конструкціях: дорожні та аеродромні покриття, більш стійкі до динамічних навантажень і стирання; підлоги промислових цехів; відповідальні, що піддаються кавітації, частини водостоків гідротехнічних споруд; облицювальні елементи промислових та житлових будівель; залізобетонні труби та стовпи ліній електропередач; комбіновані та інші конструкції.

Для покращення властивостей цементних бетонів до їх складу вводять як волокнисті наповнювачі різні волокна: сталеві, полімерні, поліпропіленові, сополімерні, базальтові, скляні, вуглецеві та інші (табл. 1.1 [1]), [2-11].

Галузі застосування різних видів волокон

| Тип волокна | Галузь застосування |
|----------------------|--|
| 1 | 2 |
| Скло | Збірні панелі, облицювання стін, каналізаційні труби, тонкі бетонні покриття дахів, суха штукатурка для бетонних блоків |
| Сталь | Ніздрюваті бетонні елементи покриття, дорожні покриття, мостові настили, вогнетривкі матеріали, бетонні труби, злітно-посадочні смуги аеродромів, ємності високого тиску, вибухостійкі споруди, основи верстатів, портові споруди, облицювання тунелів, конструкції корабельного корпусу |
| Поліпропілен, нейлон | Фундаментні палі, попередньо напружені палі, лицевальні панелі, плавучі елементи для проходів і причалів у портах, дорожній ремонтний матеріал, привантажі для підвідних труб |
| Азбест | Листи, полотно, труби, плити, вогнетривкі й ізоляційні матеріали, каналізаційні труби, гофровані і гладкі покрівельні листи, облицювання стін |
| Вуглецеві | Гофровані елементи перекриттів, одинарні і подвійні вигнуті мембранні структури, корпуси човнів, настили будівельних лісів |
| Поліамід | Аналогічно вуглецевим волокнам |
| Бамбук | Будівельні настили |
| Слюдяні луски | Частково заміщають азбест у цементних настилах, бетонних трубах; ремонтні матеріали |

| 1 | 2 |
|---|---|
| Рослинні волокна: кокосової пальми, сизала джуту, аквара, слонової трави | Дешеві покрівельні матеріали і облицювальні панелі |

За значенням модуля пружності волокна поділяють на два типи [12, 13]: низько модульні (нейлонові, поліетиленові, поліпропіленові, поліефірні) із великим відносним видовженням при розриванні і високо модульні (скляні, вуглецеві). Перші застосовують для досягнення вищої ударної в'язкості бетону, другі – для підвищення міцності при розтягу, жорсткості і підвищення опору динамічним навантаженням.

Практично усі види синтетичних волокон (капронові, нейлонові, поліпропіленові та інші) характеризуються хімічною стійкістю до дії лужного середовища портландцементів. Дисперсне армування здійснюють волокнами-фібрами, рівномірно розподіленими в об'ємі бетонної матриці. Номенклатура штучних волокон досить широка: від надзвичайно дефіцитних, наприклад із вуглецю, бору, сапфіру, вольфраму, у порівняно доступних для застосування в масовому будівництві – сталевих, базальтових, скляних, полімерних. В якості армуючих елементів для бетонів можуть використовуватись також природні волокна такі як: деревинні (целюлозні), бамбукові, сизалеві, джутові, тростинові та ін., але вони в конструкційному відношенні поступаються штучним волокнам.

В якості вихідних армуючих матеріалів для бетону використовуються металеві, мінеральні та органічні волокна у вигляді коротких відрізків волокон-фібр, що отримали широкий спектр застосування та відносну дешевизну.

Розвиток теорії дисперсного армування бетонних матеріалів пов'язаний в значній мірі з розв'язком задач в області моделювання структури

дисперсно-армованих систем (композитів), приведення хаотичного і дискретного армування до еквівалентного напрямленого з врахуванням напружено-деформативного стану елементів, визначення ефективних значень об'ємного вмісту фібрової арматури, що забезпечує виключення крихкого руйнування конструкцій і підвищення опору поширення тріщин в бетоні, виявлення здатності армованого матеріалу до сприйняття механічних та інших видів впливів.

Принцип побудови композитів простий, який лежить в основі організації структури багатьох природних матеріалів. Наприклад, легкий і міцний бамбук являється характерним композиційним матеріалом, в якому м'яка целюозна складова зміцнена витягнутими в нитку кристалами оксиду кремнію. Дисперсне розподілення кристалів в матриці, їх зчеплення і орієнтація в композиті забезпечують не тільки високу міцність, але й тріщиностійкість композиту. Тріщини, які могли б розвинути в ньому під навантаженням завдяки міцному зв'язку між кристалами, блокуються, при цьому значно знижується "відчуття" матеріалу до зовнішніх впливів. Разом з цим, матеріал, подібний кістковій тканині, не міг би бути ефективною арматурою для бетону, так як модуль пружності кісткової тканини (21000 МПа) практично не перевищує модуля пружності звичайного бетону. Проте відношення між модулями кісток і біологічних тканин (для яких кістки являються армуючим матеріалом) змінюються в межах 35-100, тобто значно перевищують ті ж відношення між модулями бетону і арматурної сталі. Тому для отримання більш міцних композицій необхідно виконати низку вимог:

- волокна потрібно рівномірно розподіляти по всьому об'єму матриці, але вони не повинні безпосередньо дотикатися одне до одного;
- матриця повинна бути хімічно інертною по відношенню до дії волокон;
- волокна повинні мати більш високий, порівняно з матрицею, модуль пружності;
- бажано, щоб матриця мала достатньо високу міцність при зсуві;

- слід прагнути до орієнтованого розподілу волокон в матриці (бетоні, розчині).

Методами дисперсного армування передбачені можливості отримання напрямленої і довільної (вільної) орієнтації волокон в об'ємі бетону. Тут розглядалась тільки довільна орієнтація короткими волокнами, а саме - стиснуто-довільна (хоча б два геометричні параметри елементів конструкцій обмежені в розмірах, що стискає свободу довільної орієнтації армуючих волокон в об'ємі бетону: для балки - це висота і ширина; для кубів - це ще й довжина).

На можливість рівномірного розподілу волокон в бетонній суміші впливає низка факторів, які залежать в значній мірі від відношення довжини волокон до їх діаметра, об'ємного вмісту, розміру часток заповнювача і його кількості, а також способів перемішування.

Огляд експериментальних даних показує, що введення синтетичних волокон в бетон зазвичай не призводить до якого-небудь помітного підвищення міцності матеріалу на розтяг, згин чи стиск при дії статичних навантажень, так як бетон не в стані передати статичні зусилля на волокна, які характеризуються нижчими, порівняно з бетоном, значеннями модуля пружності. Тому застосування синтетичних волокон доцільне залежно від умов роботи конструкцій в процесі їх виготовлення, монтажу та експлуатації.

Синтетичні волокна істотно підвищують опір бетону ударним навантаженням. При швидкій подачі навантаження енергія, потрібна для руйнування армованого бетону, після виникнення в ньому тріщин, повинна витратитися на виривання волокон з бетонної матриці. Коли час дії навантаження надзвичайно малий, необхідно за короткий проміжок провести більшу роботу, щоб забезпечити виривання більшої маси вельми тонких і пластичних волокон з об'єму бетону. Тому опір бетону, армованого синтетичними волокнами, ударним навантаженням є достатньо високим.

Згідно з результатами експерименту, проведеного в США, декілька груп бетонних елементів, армованих звичайною стержневою арматурою, і

тих, що містять додаткову арматуру, в тому числі із синтетичних волокон, сталевих фібр і азбестових волокон, були встановлені в епіцентр вибуху. Обстеження цих елементів після вибуху показали, що всі види волокон забезпечили певний ефект. Однак найбільша ефективність була досягнута при застосуванні сталевих фібр та нейлонових ниток. Характерно, що найменші пошкодження мали елементи, армовані нейлоновими волокнами. Використання волокон дозволило істотно підвищити опір бетону роздробленню при вибуху і зменшити швидкість розльоту шматків бетону. Бетонні елементи, які включали тільки стержневу арматуру, при вибуху були повністю знищені, тоді як такі ж елементи, які включали волокнисту арматуру, при тих же умовах, зберегли відносну форму, розміри і могли б бути повністю відновлені при ремонті.

Синтетичні волокна характеризуються низькою змочуваністю, а відповідно і низькою адгезією до цементного каменю. Забезпечення сумісної роботи волокон з бетоном може бути досягнуто тільки за рахунок їх механічного заанкерування. З цієї точки зору, найбільший інтерес представляють волокна, які мають конструкцію у вигляді спіралі чи переплетеного джгута. Ефективність волокон тим вища, чим більша їх відносна довжина (l/d). Найкращі результати досягнуті на бетонах з вмістом синтетичних волокон 0,15-0,25 % за масою (0,4-0,65% по об'єму) при довжині 10-100 мм.

При цьому аналітики ринку вказують на значне зростання споживання сталі в Китаї та Індії як важливого чинника зростання цін на сталеву продукцію на міжнародних ринках. У ряді випадків використання фібри дозволяє зменшити потребу в арматурі. Вагомим аргументом застосування дисперсної арматури є простота її використання [14].

Найбільш розповсюдженим видом фібри, яка застосовується в будівництві, є сталева. Але вона має ряд недоліків, пов'язаних з технологією приготування бетонних сумішей. Для одержання якісної бетонної суміші, необхідно рівномірно розподілити волокна по всьому об'єму бетону. При

введенні сталеві фібри її волокна можуть збиватися в грудки, утворюючи при цьому "сталеві їжаки", які потім у процесі перемішування майже неможливо роздробити та забезпечити однорідність суміші.

Перші спроби армування бетону сталевими волокнами здійснив француз Жан Луї Ламбо. У 1855 р. він виготовив човен завдовжки 3,5 м з цементного розчину, армованого декількома шарами сталевітканої сітки. Перші роботи, що стосуються отримання дисперсно-армованих бетонів із застосуванням сталевих волокон, пов'язують з ім'ям В. П. Некрасова, який ще в 1907 р. провів комплекс робіт і описав результати випробувань бетонних матеріалів, регулярно й хаотично дисперсно-армованих відрізкамі дроту малих діаметрів. Пізніше стали застосовувати склофібробетон, в якому рівномірно розподілені в об'ємі скляні волокна, з'єднані цементним розчином. Дисперсно-армований бетон в мостобудуванні застосовувався в Берлінському парку (1988) для реконструкції пішохідного двопрогонового моста та в одному з японських гольф-клубів (1992) - для спорудження вантового моста. У Лос-Анджелесі і Санта-Моніці (США), в рамках програми підвищення сейсмостійкості мостових конструкцій (1993), знайшло застосування захисне облицювання колон з використанням фібробетону [15].

У зарубіжній практиці для виготовлення склофібробетону широко використовується лугостійке скловолокно марки "Цем-Філ", що розроблене і випускається у Великобританії. Дослідження фібри в напрямку удосконалення скловолокна призвели до створення волокон з підвищеною лугостійкістю, що збільшують довговічність, міцність і в'язкість руйнування склофібробетону [16]. Але значним недоліком скляної фібри є її висока вартість.

При широкому застосуванні бетону особливої уваги заслуговують композиційні матеріали, в яких роль матриці виконує цементний камінь на основі портландцементу, а для мікроармування – базальтові волокна. Використання базальтової фібри дозволяє значною мірою компенсувати

головні недоліки бетону – низьку міцність при розтягу і крихкість руйнування. При застосуванні базальтової фібри підвищується морозостійкість, теплостійкість, стійкість до стирання, вологостійкість матеріалу, знижуються деформації зсідання, значно зростає тріщиностійкість, ударна в'язкість, діелектричність та ін. [17, 18]. Перспективним для армування бетонів є використання базальтової фібри, враховуючи те, що поклади базальту знаходяться в багатьох країнах світу, в тому числі значні – в Україні.

Різка збільшення цін на традиційну сталеву арматуру на міжнародних ринках викликає необхідність пошуку рішень, які обмежували б використання сталі. Фібра може ефективно замінити армування стрижневої арматури в плитних конструкціях промислових підлог, покриттях автомобільних доріг і згинаних елементах.

Базальтова фібра сприяє усуненню негативного впливу концентрації напружень в місцях структурних дефектів цементного каменю, підвищує міцність, збільшує деформативність та довговічність бетону. У результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень доведено, що вагомий техніко-економічний ефект дисперсного армування досягається використанням базальтового волокна [19].

Важливою умовою використання базальтової фібри для армування бетонів є її хімічна стійкість у лужному середовищі бетону. Проведені дослідження [20] показують, що при дотриманні певних умов базальтову фібру можна використовувати для армування бетону.

У роботі [21] наведені результати дослідження впливу довжини базальтової фібри діаметром 16 мкм (довжиною 12, 24, 50 мм) та кількості фібри (1, 2, 3 мас.% від сухої суміші) на міцність при згині дрібнозернистого базальтофібробетону (БФБ). Зроблено висновок, що армування базальтовою фіброю довжиною до 12 мм не змінює крихкий характер руйнування бетонних призм на згин і при вмісті фібри 1-2 % призводить до підвищення міцності на розтяг при згині бетону класу В20 (С 16/20) в 1,2 рази. При

армуванні бетону В20 (С 16/20) базальтовою фіброю довжиною 24 і 50 мм за вмісту фібри 1-3 % спостерігається більш пластичний характер руйнування і міцність бетону на розтяг при згині зростає в 1,8 - 2,2 рази.

Базальтові волокна є перспективним армувальним матеріалом, на основі якого може бути створений фібробетон для ремонту захисного шару прогонових будов. Виробництво базальтових волокон збільшується, тому що сировиною служать гірські породи, а формування здійснюється подібно скляним волокнам фільтрним способом у різноманітному асортименті: штапельне волокно, нитки, ровінги та інше. Хімічний склад залежно від родовища змінюється незначно [22].

Україна має у своєму розпорядженні необмежені ресурси гірських порід, таких як базальт, габро, діабаз, порфірит та інші, що представляють цінність не тільки як облицювальні матеріали, але і як однокомпонентна сировина для виробництва базальтових волокон з унікальними властивостями [10].

Базальтові волокна нетоксичні, характеризуються високими фізико-механічними характеристиками, підвищеною порівнянно зі скляними волокнами стійкістю до кислот і лугів, низьким коефіцієнтом теплопровідності, більш високою температурою застосування [24]. Ці властивості базальтових волокон і обумовлюють створення нових високоефективних будівельних матеріалів для влаштування прогонових будов мостів.

Зарубіжна практика армування бетону фіброю широко використовується з 70-80-х років ХХ ст. Сьогодні Євросоюз вводить єдину систему стандартів, яка розробляється спеціальним комітетом СЕН. Ці норми розповсюджуються також на фібробетони, а деякі країни вже мають стандарти на цей композит та його застосування. Із закордонного досвіду слід відзначити використання фібробетонів у дорожньому і тунельному будівництві, при зведенні морських платформ і дамб, а також при влаштуванні підлог промислових будівель. Вважається доцільним

застосування його і в конструкціях каркасних будівель, особливо при сейсмічних впливах.

У Росії діють будівельні норми [25], які передбачають і допускають застосування, проектування та методи виготовлення фібробетонних конструкцій на основі важкого, дрібнозернистого бетонів. У цих нормах представлені архітектурно-конструктивні форми, типи конструктивних елементів та номенклатура фібробетонних конструкцій і виробів.

Вимоги до бетонів, які використовуються в транспортному будівництві, відрізняються від вимог до бетонів для промислового та цивільного будівництва. Так, до дорожніх бетонів ставляться підвищені вимоги щодо міцності на розтяг при згині, тріщиностійкості, морозостійкості, водонепроникності, стиранності тощо. Отримання таких характеристик забезпечується за допомогою мікроармування бетону фіброю.

В Україні також проведено дослідження впливу поліпропіленової фібри на властивості бетону [26], в результаті яких встановлено, що введення до складу бетону поліпропіленового волокна збільшує його міцність на стиск до 20%, на згин – до 25%, початковий модуль пружності фібробетону при цьому на 15% нижчий, ніж у звичайного бетону.

Дані досліджень [27] свідчать про збільшення тріщиностійкості таких бетонів, що дуже важливо для елементів дорожніх та аеродромних покриттів.

У роботі [28] встановлено позитивний вплив армувального поліпропіленового волокна на міцність, жорсткість і тріщиностійкість дрібнозернистого бетону. Руйнівне навантаження та міцність при згині збільшилися на 6 і 14% відповідно. Використання фібри в бетоні за умови забезпечення якісного перемішування і, відповідно, рівномірного розподілення, дозволяє виключити процес армування основи для підлог (стяжки) металевою сіткою.

Для ефективного застосування дисперсно-армованих бетонів в транспортному будівництві необхідно визначити, який оптимальний вміст

поліпропіленової фібри повинен бути введений у бетон для покращення його характеристик.

Необхідно дослідити спеціальні властивості бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленовими волокнами, що дозволить використовувати його для влаштування конструкцій мостів, покриттів автомобільних доріг і аеродромів. Тому актуальним завданням є дослідження характеристик бетонів, армованих поліпропіленовими фібрами, для подальшого використання в транспортному будівництві.

1.2. Композиційне дисперсне армування як спосіб покращення фізико-механічних властивостей та характеристик тріщиностійкості бетонів

Ступінь позитивних змін властивостей бетону при його дисперсному армуванні і характеристик конструкцій на його основі, головним чином, визначається видом і властивостями використовуваних волокон, співвідношенням і ступенем взаємодії між ними. Тісний взаємозв'язок армувальних волокон з бетонною матрицею забезпечується величиною поверхні розділу, яка, в свою чергу, залежить від ступеня насичення бетону волокнами, їх геометричних характеристик і поверхневої енергії [29]. З теоретичних передумов, можна припустити, що найбільшого позитивного ефекту в плані поліпшення структури і властивостей фібробетонів можна досягти в результаті композиційного дисперсного армування при оптимальному поєднанні двох і більше видів фібр різного складу, з різними розмірами, міцністю і пружно-пластичними характеристиками. Метою композиційного армування є створення такого матеріалу, який зберігаючи позитивні особливості, виключав би недоліки, що мають місце у варіанті моноармування. Перевагами композиційного дисперсного армування (поліармування) можуть бути:

- забезпечення більшої однорідності структури фібробетону, що в свою чергу створить передумови для досягнення більших значень міцності, ніж у випадку моноармування;
- уникнення або суттєвого зменшення розшарування фібробетонної суміші в процесі її приготування, транспортування та укладання;
- цілеспрямоване регулювання комплексу фізико-механічних властивостей фібробетону в більш широких межах, ніж при моноармуванні;
- можливість покращення показників довговічності та експлуатаційних характеристик фібробетону.

Проведений літературний огляд показує, що питання використання композиційного дисперсного армування для покращення властивостей фібробетонних сумішей та фібробетонів вивчалось недостатньо. Окремі дослідження проведені за цим напрямком дозволяють зробити висновок про перспективність використання полідисперсного армування [30-32]. У роботі [31] показана можливість композиційного дисперсного армування з використанням сталеві та поліпропіленові фібри. Відзначається, що при оптимальному їх співвідношенні і вмісті стає можливим досягнення більшої однорідності композиту, зменшення відкритої пористості, зменшується також ймовірність комкування волокон при перемішуванні суміші. Модель багаторівневого дисперсного армування самоущільнюваного бетону представлена в роботі [33]. Структура такого фібробетону формується на двох рівнях: на макрорівні – базальтовим волокном, на мікрорівні – за рахунок утворення волокнисто-голчастих субмікроармувальних новоутворень кристалогідратів, які підвищують опір руйнуванню при реалізації явища "самомікроармування".

На думку Голанцева В.А. [32], принцип полідисперсного армування ґрунтується на тому, що застосована для цього фібра з різними геометричними параметрами, забезпечує формування просторових комірок на різних рівнях структури бетону. Більш крупні комірки накладаються на більш дрібні, тоді як розміри структурних комірок кожного рівня залежать від параметрів армування. Таким чином, волокна з меншим діаметром будуть перебувати в стиснених умовах більш крупних комірок, а фібра більшого діаметра розташована в матриці мікроармованого композиту. У цьому випадку мікрволокна перешкоджають розвитку мікродефектів на стадії утворення тріщин, перебуваючи в контактній зоні волокон більшого діаметру, і знижують концентрацію напружень, тим самим сприяючи їх перерозподілу на більший об'єм бетону. В даному варіанті відбувається збільшення міцності зчеплення волокон більшого діаметра з матрицею, що в підсумку і дозволяє домогтися підвищення міцності композиту.

Однак, поряд з таким загально-теоретичним підходом до структуроутворення фібробетону, який ґрунтується на класичних законах композиційних матеріалів, потрібно також враховувати важливу структуроутворюючу роль бетонної матриці, а також значення контактної зони на межі розділу фаз "волокно-матриця", стан якої багато в чому визначає найважливіші характеристики дисперсно-армованих бетонів. Концепція Ю.В. Пухаренка [29] полягає в тому, що на кожному структурному рівні фібробетону можна виділити дві фази, які взаємодіють між собою по поверхні розділу через зону контакту на всіх стадіях структуроутворення і подальшої роботи матеріалу:

- дисперсна фаза, що представляє сукупність відрізків фібр заданого розміру;

- дисперсійне середовище - матриця, в якій відбуваються значні зміни в процесі формування структури і властивостей композиту.

Термодинамічно структура дисперсноармованого бетону формується за рахунок прагнення фаз до рівноваги шляхом зниження їх внутрішньої поверхневої енергії. Таким чином, питання композиційного дисперсного армування фібробетонів набуває особливої актуальності.

1.3. Тріщиностійкість бетонів транспортного призначення

Механіка руйнування як наука була започаткована А. Гріффітсом в оригінальних працях [34, 35]. А. Гріффітс на основі першого закону термодинаміки запропонував і розвинув енергетичний критерій руйнування матеріалів. Основний висновок його роботи – розвиток тріщини призводить до перетворення пружної енергії тіла в його поверхневу енергію за рахунок утворення нових поверхонь. Він сформулював принцип, відповідно до якого тріщина починає поширюватися за умови, що швидкість вивільнення енергії пружної деформації досягає приросту поверхневої енергії тіла.

У наукових роботах [36–48] фактично було вирішено проблему напружено-деформованого стану пружних тіл із тріщиною. Із урахуванням останніх досягнень механіки руйнування проблему напружено-деформованого стану тіл із тріщинами та характеру поведінки поля напружень в околі їх вершин детально висвітлено в 4-х томах довідникового посібника [49].

А. Neville вперше застосував теорію А. Гріффітса до бетону [50], наголошуючи на її умовному відношенні до бетону, міцність якого більшою мірою визначається граничною деформацією, ніж напруженням. J. Glucklich вперше почав вивчати руйнування бетону при стиску з позицій механіки руйнування [51, 52]. Він припускав, що ріст тріщини в бетоні починається з порожнин та інших дефектів структури. Поширення тріщин постійно призупиняється, доки не буде досягнуто достатньо високих напружень, необхідних для необмеженого їх зростання.

Одним з перших в'язкість руйнування бетону при згині балок із штучно створеною тріщиною у розтягнутій зоні дослідив Н. Kaplan [53]. Дослідженнями встановлено, що в'язкість руйнування практично не залежить від схеми завантаження балки і відносної довжини тріщини при її зміні в межах $1/6 \dots 1/2$. Збільшення розмірів зразка спричиняло збільшення

в'язкості руйнування бетону. Процес руйнування бетону не обмежується поширенням однієї тріщини – у зоні високих напружень утворюється багато тріщин. Визначенню характеристик тріщиностійкості цементних паст і розчинів з позицій механіки руйнування присвячені дослідження J. Brown [54]. D. Naus підтвердив незалежність в'язкості руйнування від відносної довжини тріщини і встановив залежність цього показника від водоцементного відношення і вмісту дрібного і крупного заповнювачів [55]. Зроблено висновок, що за однакової міцності на стиск в'язкість руйнування зменшується в ряду: важкий бетон > цементно-піщаний розчин > цементна паста [56]. E. Evans дійшов висновку, що вік бетону і водоцементне відношення незначно впливають на в'язкість руйнування, а просочення бетону полімером збільшує цей показник [57]. K. Kitigava підтвердив незалежність в'язкості руйнування від відносної довжини тріщини і розмірів зразка і наголосив, що величину руйнівного зусилля для бетонної балки можна визначити за показником в'язкості руйнування [58]. J. Lott і C. Kesler [59] використали модель нескінченного тіла з цементного каменю з тріщинами і дисками, що імітують заповнювач. Експериментально встановлено, що на величину в'язкості руйнування бетону позитивно впливає заповнювач. У роботі [60] F. McClintock та J. Walsh як критерій руйнування використали припущення, що руйнування настає, коли максимальна концентрація напружень розтягу біля дефектів еліптичної форми сягає границі міцності бетону на осьовий розтяг. При цьому не враховується процес стійкого розгалуження тріщин, що передує руйнуванню при стиску, а також напружений стан, що виникає на кінцях цих тріщин. У роботі Vombolakis E. [61] було показано, що утворення розгалужених тріщин необов'язково спричиняє миттєве руйнування усієї системи. Спостереження показали, що взаємодія тріщин не викликає значних змін у процесі зростання окремих тріщин.

До однієї з перших спроб експериментального визначення величини критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (ККІН) у матеріалі типу

бетону належить робота [62], в якій автори випробовували зразок у вигляді циліндра (диска) з щілиною від торця до центру, що завантажується центробіжними силами інерції або силами стискання в площині щілини.

Грунтовні дослідження характеристик тріщиностійкості бетонів з позицій механіки руйнування започатковані у Ленінградському (тепер Санкт-Петербурзькому) інституті ВНИИГ ім. Веденєєва. Дослідження проводились за такими напрямками: розроблення моделей руйнування бетону, визначення величини в'язкості руйнування, застосування положень механіки руйнування до розрахунку бетонних (переважно гідротехнічних) споруд, розрахунок конструкцій на тріщиностійкість.

Так, дослідженнями [63–65] встановлено, що показник в'язкості руйнування є константою бетону при випробуванні зразків з відношенням критичної довжини тріщини до розміру крупного заповнювача, більшого за 2, в іншому інтервалі цього відношення положення не підтверджується. Також встановлено, що величина в'язкості руйнування залежить від схеми випробувань і температури бетонного зразка. Дослідженнями встановлено, що довжина зони передруйнування, яка утворюється у вершині тріщини, для важких бетонів може сягати 50–100 мм і більше, для дрібнозернистого бетону і цементного каменю ця величина значно менша.

А.П. Пак і Л.П. Трапезніков експериментально перевірили гіпотезу узагальненого нормального відриву і дійшли висновку, що ця гіпотеза справедлива за умови, що довжина тріщини більше ніж удвічі, перевищує максимальну крупність заповнювача, а кут нахилу тріщини не перевищує певного значення, яке залежить від її довжини [66].

Ю.В. Зайцевим [67, 68] на базі концепції Гріффітса–Ірвіна і сформульованої ієрархічної схеми структури бетону, яка враховує характерні неоднорідності і дефекти, закладено підвалини теорії деформацій і міцності бетону з урахуванням фізичної сутності процесів тріщиноутворення і руйнування. Із залученням апарату теорії повзучості запропоновано розв'язання задачі про довготривалу міцність бетону. Пропонується

визначати параметри тріщиностійкості бетону на основі аналізу повністю рівноважних діаграм деформування зразків із створеною тріщиною. Виявлено можливість визначення основних параметрів тріщиностійкості (силових, енергетичних, деформаційних) на стадії стійкого зростання тріщини за спадною віткою діаграми деформування. Зроблено висновок, що на стадії стійкого зростання тріщини її розкриття відбувається пропорційно прогину і не залежить від її довжини. Отже, довжина тріщини та швидкість її розвитку однозначно пов'язані з прогином.

Ю.В. Зайцевим із співробітниками [69, 70] розроблено математичний апарат для моделювання процесів тріщиноутворення і руйнування композиційних матеріалів із різними вихідними структурами. Встановлено, що чутливість матеріалу до розвитку тріщин залежить від його структурної неоднорідності. Так, цементний камінь і дрібнозернистий бетон, що характеризуються однорідною структурою, значно чутливіші до тріщин, ніж важкі бетони. Зроблено висновок про наявність тісної кореляції між ККІН і границею міцності на розтяг (на розтяг при згині). Встановлена залежність характеристик механіки руйнування від макроструктури бетону дає підстави для підбору складу бетону із заданими механічними властивостями. Для дрібнозернистих бетонів пропонується система нормування значень ККІН за значеннями кубикової міцності, міцності на розтяг або за маркою цементу [71].

У роботах В.М. Ентова і В.І. Ягуста доведена можливість застосування положень механіки руйнування до бетонів. [72, 73]. Аналізуючи залежність ККІН (K_{1C}) від структури бетону, визначаємо, що з підвищенням її однорідності значення K_{1C} падають [74, 75]. Такий висновок робиться на основі порівняння значень K_{1C} для цементного каменю, дрібнозернистого бетону і важкого бетону [74]. В.І. Ягустом досліджено довжину зони непружних деформацій у вершині тріщини [74]. Вона становить 90–120 мм і залежить від багатьох факторів, а саме: складу і міцності бетону, величини

заповнювача тощо. Автор запропонував залежність значення ККІН від розміру крупного заповнювача і границі міцності бетону на осьовий розтяг.

Положення механіки руйнування для цементних систем застосував В.І. Шевченко [76, 77], розробивши оригінальну установку, яка дала змогу фіксувати спадну вітку діаграми деформування бетону під час згину. Автором запропоновано енергетичний підхід до оцінки в'язкості руйнування цементного каменю і бетону на основі аналізу повністю рівноважних діаграм їх деформування. Надалі на установці досліджено вплив циклічного замерзання – відтавання [78] і водонасичення [79] бетонів на показники їх тріщиностійкості та міцності.

В.А. Перфілов [80, 81] пропонує оцінювати тріщиностійкість бетону за величиною критичної тріщини, оскільки розкриття і подальший неконтрольований ріст тріщини відбуваються в момент досягнення тріщиною постійного для кожного матеріалу критичного розміру. Автором запропонована нова методика вимірювання критичної довжини магістральної тріщини, яка кореспондується зі стандартною методикою. Крім того, наголошується на ролі крупного заповнювача в бетоні, який гальмує руйнування, але збільшує критичну довжину макротріщини.

В.М. Чубріков [82] на основі проведених досліджень дійшов висновку, що критична густина енергії руйнування цементного каменю, піщаного бетону і крупнозернистого бетону у відносно широкому діапазоні глибини тріщини при триточковому згині є постійною характеристикою. Густина енергії руйнування трактується як відношення роботи руйнування до приросту поверхні тріщини. Автором запропоновано залежності для оцінки критеріїв тріщиностійкості балок різної висоти і впливу масштабного чинника [83].

У роботі [84] описано методику та установку для дослідження тріщиностійкості бетонів за сумісної дії напружень розтягу і кручення. За допомогою розробленої методики можна експериментально досліджувати закономірності поширення тріщин у бетонних і залізобетонних зразках.

Й.Й. Лучком встановлено критерій розвитку тріщини, розроблено методику розрахунку параметрів тріщиностійкості з урахуванням зчеплення бетону з арматурою, повзучості та усадки бетону в залізобетонних конструкціях [85]. Розглянуто метод визначення критичної глибини зони передруйнування та встановлено залежності для оцінки тріщиностійкості у перетині з тріщинами за наявності робочої арматури [86, 87].

У роботі [88] за допомогою повністю рівноважної діаграми деформування (ПРДД) досліджено руйнування бетону при дії на нього сульфатно-хлоридних розчинів. Встановлено, що ПРДД бетону найточніше відображають вплив фізико-механічних деструктивних процесів у бетонах від агресивних розчинів на характер деформування і руйнування бетону. Рекомендовано застосовувати цю методику у випадках, коли необхідно враховувати складні процеси деформування, накопичення і розвитку макропошкоджень у структурі матеріалу, тривалість процесу руйнування.

З.Я. Бліхарський дослідив на залізобетонних балках вплив виду та міцності бетону на параметри їх міцності, деформативності, тріщиностійкості та інтенсивність поширення корозії за одночасної дії агресивного середовища та навантаження [89, 90].

Розроблено метод граничних станів бетонних і залізобетонних конструкцій із застосуванням критеріїв механіки руйнування, що дає змогу визначити критичні довжини тріщин в бетоні і граничні навантаження в елементах конструкцій. За цим підходом можна прогнозувати граничні стани конструкцій під час складного навантаження з урахуванням наявних або тих, що з'являються в процесі експлуатації тріщин, дефектів, пошкоджень, що дає можливість визначити фактичні коефіцієнти запасу конструкції [91, 92].

І.М. Жуковським на основі статистичної обробки результатів низки досліджень взаємозв'язку між в'язкістю руйнування і міцністю бетону на розтяг незалежно від виду бетону встановлено прямо пропорційну залежність між цими параметрами. Коефіцієнт кореляції для важкого бетону становить 0,6 [93]. Автор наголошує, що за однакової міцності на розтяг в'язкість

руйнування розчину менша за в'язкість руйнування бетону. Це твердження справедливе і для легкого, і для важкого бетонів.

Тріщиностійкість дисперсно-армованих бетонів. Дисперсне армування високомодульними волокнами: сталевими, азбестовими, вуглецевими, скляними збільшує тріщиностійкість бетону [94-100]. За результатами [101] при введенні сталевих фібр $0,25 \times 25,4$ мм ($d \times l$) у кількості 2,3 % за об'ємом навантаження в момент утворення першої тріщини подвоюється порівняно зі зразками з неармованого бетону. При вмісті волокон 4 % за об'ємом навантаження зростає приблизно в 3 рази, за даним [102] в 2,5 рази. В [103, 104] також відзначається збільшення міцності в момент утворення тріщини порівняно з контрольними зразками на 35–80 % в міру збільшення вмісту фібри від 1,25 % до 2,5 % за об'ємом. Не менш показовими є результати досліджень Ставрова Г.Н. [105], з яких випливає, що тріщиностійкість при статичному навантаженні в 1,5–1,8 рази перевищує границю міцності неармованого бетону, а згідно даних Григорьева В.І. [106] в 1,8 рази. Необхідно відзначити, що тріщиностійкість фібробетону істотно залежить від рівня дисперсного армування, обумовленого величиною діаметра використовуваних фібр. Так, у випадку армування бетону сталевими фібрами $0,3 \times 25$ мм при армуванні 0,02 % за об'ємом [107] момент між початком навантаження та появою тріщини збільшується в 1,25 рази порівняно з бетоном, армованим волокнами $1,25 \times 120$ мм. У зв'язку із цим, для конструкцій, до яких ставляться підвищені вимоги щодо тріщиностійкості, рекомендується застосовувати фіброву арматуру діаметром 0,2–0,5 мм. До аналогічного висновку приходять автори роботи Курбатова Л.Г. [108].

Пояснюючи механізм значного підвищення тріщиностійкості при зменшенні діаметра фібр, Голанцев В.А. [109] встановив, що це відбувається за рахунок істотного зниження напружень у волокнах в момент виникнення тріщини в бетоні у зв'язку зі збільшенням їх кількості на одиницю площі розрахункового перерізу. Високомодульні волокна малого діаметру впливають на початкову ширину розкриття тріщин. Так, Пухаренко Ю.В.

встановив [100], що для бетону, армованого фібрами діаметром 0,3 мм, тріщини в момент їх утворення носили характер місцевих розривів шириною 1,5–3 мкм та довжиною 1–3 мкм. У випадку ж використання фібр діаметром 0,9 мм відразу утворювалися тріщини шириною 7–10 мкм.

1.4 Теоретичні передумови та наукова гіпотеза дослідження

Аналіз літературних джерел, проведений вище дозволяє зробити висновки, що незважаючи на певні успіхи, досягнуті в розвитку технології дисперсно-армованих бетонів, повністю вирішеною цю проблему вважати не можна, а експериментальний досвід в даній області залишає не розкритим цілий ряд питань, зокрема питання тріщиностійкості.

Численні сучасні дослідження вітчизняних (І.П. Гамеляк, В.І. Гоц, В.М. Вировой, Л.Й. Дворкін, Т.В. Ковальчук, П.В. Кривенко, А.М. Пługін, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницький, С.Й. Солодкий, Х.С. Соболев, С.М. Толмачов, О.В. Андрійчук, О.Ю. Дорошенко) та зарубіжних вчених (Ю.М. Баженов, Z. Xu, F. Qiang, P.C. Aitcin, M.A. Caldarone P.K. Mehta, A. Neville, M. Pigeon, J. Stark) в області технологій бетонів та фібробетонів свідчать, що особливої уваги потребує питання забезпечення необхідних будівельно-технічних властивостей та довговічності. Основним критерієм на сьогодні при виготовленні бетонів є міцність. Проте у межах одного класу міцності на стиск бетони характеризуються різною тріщиностійкістю, що обумовлює широкий діапазон значень силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості. Тому тріщиностійкість є важливим показником бетонів, оскільки процес їх руйнування відбувається під дією зовнішніх впливів шляхом утворення та поширення в його структурі тріщин, що має велике значення в бетонах дорожніх та аеродромних покриттів.

Аналіз проведених досліджень дав змогу висунути наукову гіпотезу про можливість підвищення міцнісних властивостей і силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості бетонів за рахунок полідисперсного армування поліпропіленовими фібрами різних типів з покращеними будівельно-технічними властивостями.

Для досягнення мети дисертаційної роботи та вирішення завдань

розроблено структурнологічну схему досліджень. Блок-схема досліджень (рис. 1.1) включає етапи проведення досліджень, які направлені на визначення напрямків керування показниками міцності та тріщиностійкості дисперсно-рмованих бетонів.

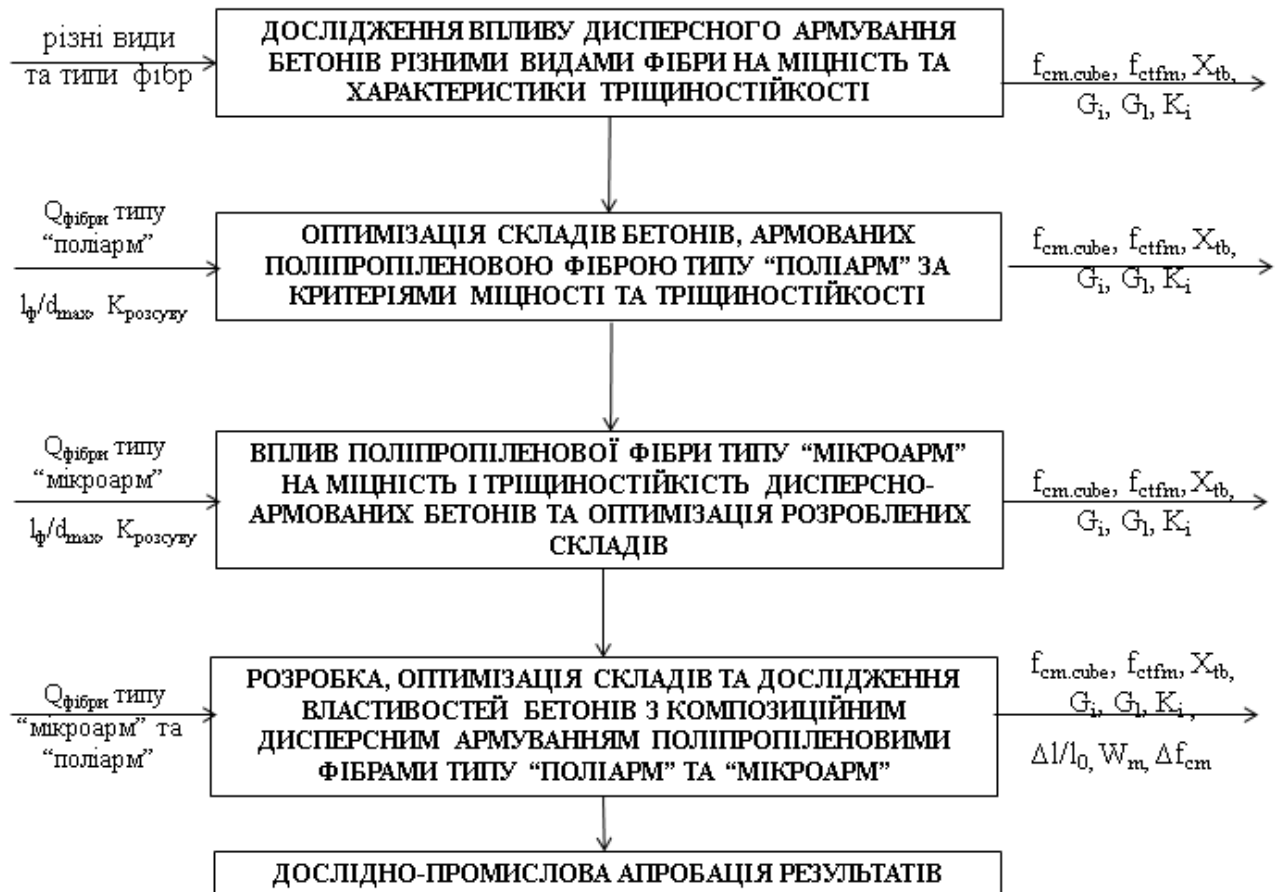


Рисунок 1.1 – Блок-схема досліджень

Висновки до розділу 1

1. Цементний бетон, який є найпоширенішим будівельним матеріалом, характеризується рядом суттєвих недоліків у будівництві. До таких недоліків, в першу чергу, відноситься невисока міцність на розтяг, що у 7-9 разів нижча міцності на стиск, низька тріщиностійкість. Цементний бетон в процесі виготовлення накопичує дуже багато дефектів, кількість яких залежить від ущільнення, якості перемішування компонентів та умов тверднення. Ці дефекти значно зменшують проектну міцність бетону і можуть бути усунені при дисперсному армуванні бетону різними видами та типами фібрових волокон.

2. Ефективність використання фібробетонів зростає при їх композиційному армуванні. Такі композиційні матеріали, зберігаючи позитивні особливості фібробетонів, виключають недоліки, що мають місце при моноармуванні.

3. За результатами літературного огляду встановлена ефективність застосування різних видів та типів фібр для дисперсного армування бетонів, зокрема і в транспортному будівництві. Їх присутність забезпечує зростання міцності бетону, підвищення характеристик тріщиностійкості.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

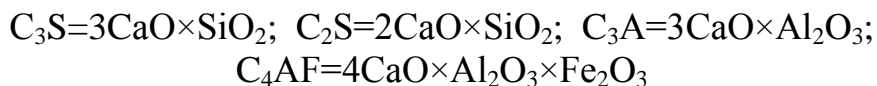
2.1. Вихідні матеріали

В даній роботі для приготування бетонної суміші для формування фібробетонних зразків використали портландцемент загально-будівельного призначення з добавкою шлаку ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 виробництва “Волинь-Цемент” філії ПрАТ “Дікергофф Цемент Україна”. Цемент відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 (табл. 2.1, 2.2).

Таблиця 2.1

Хіміко-мінералогічний склад портландцементного клінкеру

| Вміст оксидів, мас. % | | | | | | | | Мінералогічний склад, мас. % | | | |
|-----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|--------------------|------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| CaO _{вкл.} | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Нерозч. залишок | C ₂ S | C ₃ S | C ₃ A | C ₄ AF |
| 1,25 | 22,04 | 4,85 | 3,59 | 65,10 | 1,44 | 0,49 | 0,49 | 19,0 | 59,0 | 6,76 | 10,91 |



Фізико-механічні властивості портландцементу ПЦ II/A-III-500

| $S_{плт.}, М^2/кг$ | $A_{008}, \%$ | В/Ц | РК | НПЦТ, % | Терміни тужавіння, хв | | Границя міцності при стиску, МПа через, діб | |
|--------------------|---------------|------|-----|------------|--------------------------|---------------|--|-----------------|
| | | | | | поча- ток | кі- нець | 2 | 28 |
| 431 | 2,0- 10,0 | 0,39 | 118 | 29,5 | 90...1 20 | 300... 360 | 23,0... 32,5 | 50,0... 53,5 |

Як дрібний заповнювач при приготуванні фібробетонів використовували пісок Ясинецького кар'єру Львівської області з модулем крупності 1,29 (табл. 2.3) з додаванням піску із відсівів дроблення вивержених гірських порід (ПВДГП) фракцій 1,25 – 5,0 мм Клесівського кар'єру нерудних копалин “Технобуд” Рівненської області з метою збільшення модуля крупності дрібного заповнювача. Як крупний заповнювач використовували гранітний щебінь фракцій 5,0 – 30,0 мм того ж кар'єру, що й відсів. Характеристики заповнювачів наведено в табл. 2.3 – 2.5.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики піску

| Показники | Відповідно до нормативних вимог | Фактичні |
|---|---------------------------------------|----------|
| Істинна густина, кг/м ³ | 2000-2800 | 2660 |
| Насипна густина, кг/м ³ | не менше 1100 | 1450 |
| Модуль крупності | від 1,5 до 3,25 | 1,51 |
| Вміст зерен розміром від 5,0 мм до 10 мм, % за масою | не більше 10 | 0,7 |
| Вміст зерен розміром більше 10,0 мм, % за масою | не більше 0,5 | 0 |
| Вміст зерен, що проходять крізь сито № 016, % за масою | не більше 15 | 14,3 |
| Вміст пиловидних та глинистих частинок розміром менше 0,05 мм, % за масою | не більше 3 | 1,6 |
| Вміст органічних домішок | низький | низький |

Таблиця 2.4

Технічні характеристики відсівів дроблення вивержених гірських порід

| Показники | | Відповідно до нормативних вимог | Фактичні |
|---|------|---------------------------------|----------|
| Повні залишки на ситах, мас. % | 2D | - | - |
| | D | до 10 | 0,5 |
| | d | 90-100 | 98,7 |
| | 0.5d | 0-10 | 0,8 |
| Модуль крупності | | від 1,5 до 4,0 | 3,9 |
| Вміст зерен розміром від 5,0 мм до 10 мм, % за масою | | не більше 15 | 0,5 |
| Вміст зерен розміром більше 10,0 мм, % за масою | | не більше 5 | 0 |
| Вміст зерен, що проходять крізь сито № 016, % за масою | | не більше 25 | 0 |
| Вміст пиловидних та глинистих частинок розміром менше 0,05 мм, % за масою | | не більше 2 | 0,9 |
| Насипна густина, кг/м ³ | | не менше 1100 | 1510 |
| Марка за міцністю | | Не нижче 600 | 1000 |

Таблиця 2.5

Технічні характеристики щебеню

| Показники | | Відповідно до нормативних вимог ДСТУ Б.В.2.7-75-98 | Фактичні | |
|---|----------|--|------------------------|-------------------------|
| | | | Фракція від 5 до 10 мм | Фракція від 10 до 30 мм |
| 1 | | 2 | 3 | 4 |
| Повні залишки на ситах, мас. % | D | 90-100 | 96,8 | 94,6 |
| | 0.5(d+D) | 30-80 | 65,7 | 43,4 |
| | D | До 10 | - | - |
| | 1.25D | До 0,5 | - | - |
| Вміст зерен пластинчатої та голчастої форми, мас. % | | До 35 | 12,2 | 13,7 |
| Марка за міцністю | | Не нижче 800 для бетону класу за міцністю С25/30 | 1200 | 1200 |
| Вміст зерен слабких порід, мас. % | | До 10 для бетону класу за міцністю В30 | 0,2 | 0,3 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-----------|------|------|
| Вміст пиловидних та глинистих частинок, мас. % | До 1,0 | 0,9 | 0,8 |
| Істинна густина, г/см ³ | - | 2,70 | 2,70 |
| Середня густина, кг/м ³ | 2000-2800 | 2500 | 2580 |
| Насипна густина, кг/м ³ | - | 1366 | 1396 |

Воду використовували звичайну водопровідну згідно з ДСТУ Б В.2.7-273:2011.

Для досягнення проектної марки за легкоукладальністю бетонної суміші використовували пластифікатор для товарного бетону Liquol BV 18 фірми “BASF” в кількості 0,7 мас.% від витрати цементу (табл. 2.6).

Таблиця 2.6

Характеристика пластифікатора Liquol BV 18

| Основа | Сфера використання і особливості застосування | Витрата у % до маси цементу |
|-------------------|--|-----------------------------|
| Mg-Ligninsulfonat | Для виробництва бетону, залізобетонних виробів та напружених бетонів | 0,1 – 0,9 |

Як армуючі волокна застосовували поліпропіленові, металеву та базальтові фібри (рис. 2.1). Характеристики використаних в роботі фібр наведені в табл. 2.6. Кращим мікросинтетичним волокном для фібробетону покриттів доріг та аеродромів, промислових підлог є поліпропіленова фібра, що є альтернативою сталевим волокнам. Поліпропіленові фібри типу “мікроарм” (рис. 2.1, а) та “поліарм” (рис. 2.1, б) обрано за результатами попередніх випробувань фібробетонів на тріщиностійкість, армованих різними видами фібрових волокон. Їхні характеристики наведені в табл. 2.7, 2.8.



а



б



в



г



д



е

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд фібр:
а – Fibermesh 150; б – Enduro HPP45; в – Ruredil X Fiber 54;
г – Fibermesh 300-e3; д – металева; е – базальтові

Таблиця 2.7

Характеристика різних типів фібр

| Найменування фібри (довжина фібри) | Фізико-механічні властивості вихідної сировини для фібр | | | | | |
|---------------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | Назва мате- ріалу | Температура плавлення, °C | Густина, г/см ³ | Механічна міцність, МПа | Міцність на розрив, МПа | Модуль пружності, МПа |
| Fibermesh 150* (12 мм) | поліпропілен | 149 | 0,96 | 2586 | 2890 | 120 |
| Enduro HPP45** (45 мм) | | | | | | |
| Ruredil X Fiber 54** (54 мм) | | | | | | |
| Fibermesh 300-е3* (19 мм) | | | | | | |
| Металева** (52 мм) | сталь | 1500 | 7,74 | 1779 | 1420 | 200 |
| Базальтова* (24 мм) | ба- зальт | 1500 | 2,65 | 4100 | 6240 | 120 |
| Базальтова* (50 мм) | | | | | | |

* фібри типу “поліарм”, ** фібри типу “мікроарм”

Таблиця 2.8

Характеристики поліпропіленових фібр типу “поліарм” та “мікроарм”

| Властивість | Значення | |
|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| | Тип “поліарм” | Тип “мікроарм” |
| Довжина фібри, мм | 45 | 12 |
| Форма перерізу | Прямокутна (1,0×0,5 мм) | Кругла (діаметром 18...20 мкм) |
| Тип/форма | Макро/мононитки | Мікро/монофіламентна |
| Густина, г/см ³ | 0,91 | 0,91 |
| Температура плавлення, °C | 164 | 162 |
| Температура займання, °C | >550 | 593 |

2.2. Методи досліджень

Характеристики тріщиностійкості бетону визначали при зрівноважених механічних випробуваннях із записом повної діаграми стану «навантаження-прогин» (F–V). Випробування зразків проводили за схемою триточкового згину на 200-тонному гідравлічному пресі. Загальний вигляд випробувальної установки зображено на рис. 2.2.

За зрівноважених випробувань контрольні зразки навантажували неперервно до їх поділу на частини з фіксацією повної діаграми стану бетону F–V.

Для випробувань використовували зразки розміром 0,1×0,1×0,4 м із початковим надрізом висотою 0,04 м і шириною 0,002 м (рис. 2.3), який створювали на фрезерному верстаті. Кожна серія складалася з 4-х зразків.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд випробувальної установки

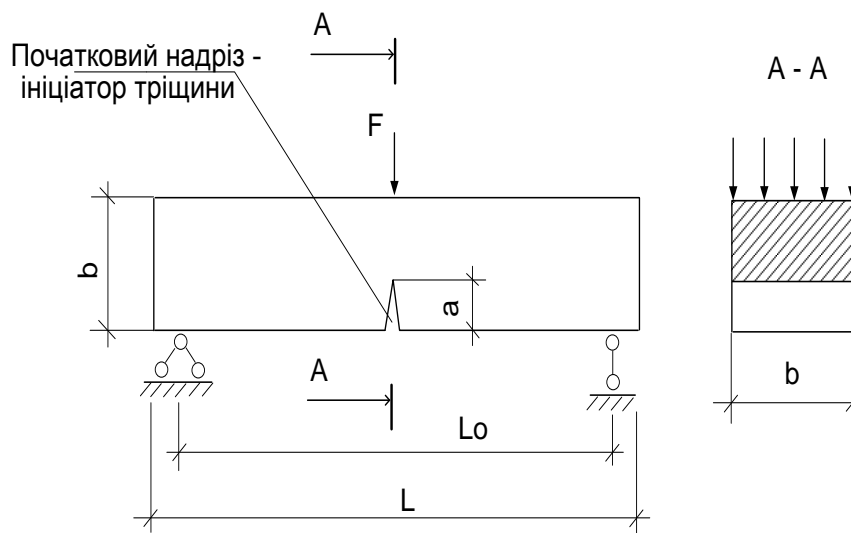


Рисунок 2.3 – Схема випробувань зразка-призми на згин із ініційованою тріщиною нормального відриву:

a – довжина початкового надрізу, м; b , L , L_0 – розміри зразка, м;
 F – навантаження на зразок, кН

Загальний вигляд експериментальної повної діаграми стану бетону після оброблення даних випробувань представлено на рис. 2.4. На стадії локального деформування проводили 3–5 короткочасних розвантажень зразка для визначення напрямків ліній розвантаження і розрахунку повних питомих пружних енерговитрат на статичне деформування зразка до поділу на частини і відповідного критичного коефіцієнта інтенсивності напружень.

Отриману повну діаграму стану для розрахунку силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості трансформували у розрахункові діаграми шляхом здійснення додаткових розрахунків і побудов згідно з рекомендаціями ДСТУ Б В.2.7-227:2009 [110] (рис. 2.5, 2.6).

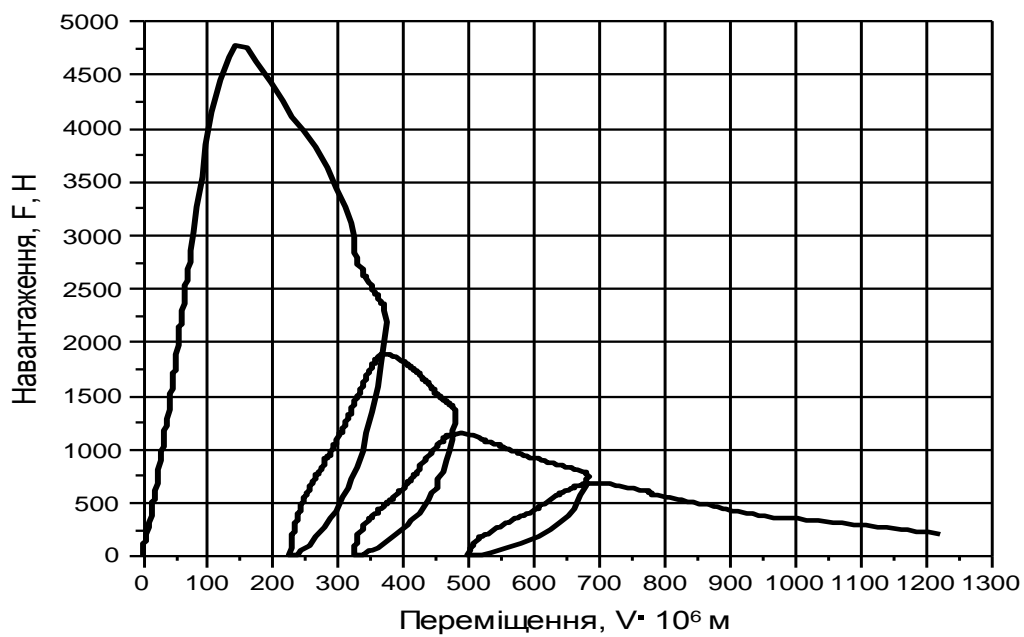


Рисунок 2.4 – Повна діаграма стану бетону

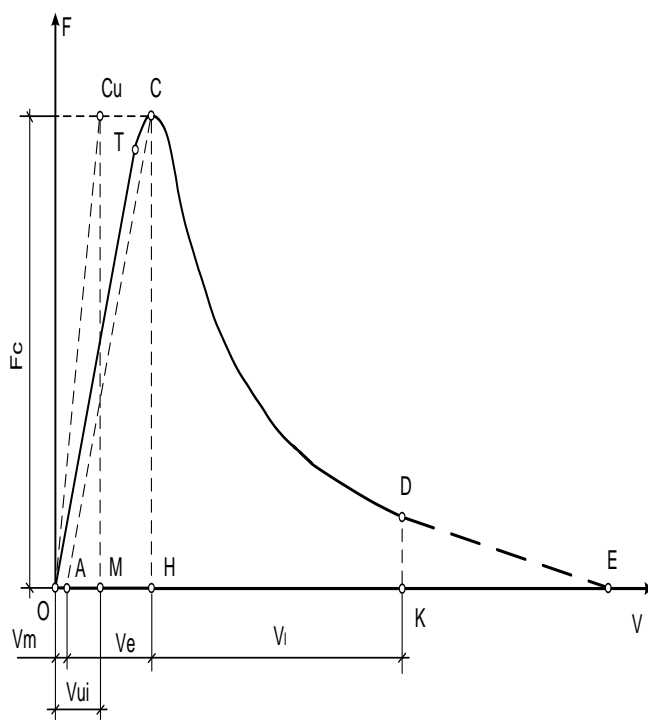


Рис. 2.5. ПДС бетону за зрівноважених випробуваннях без фіксації ліній розвантаження

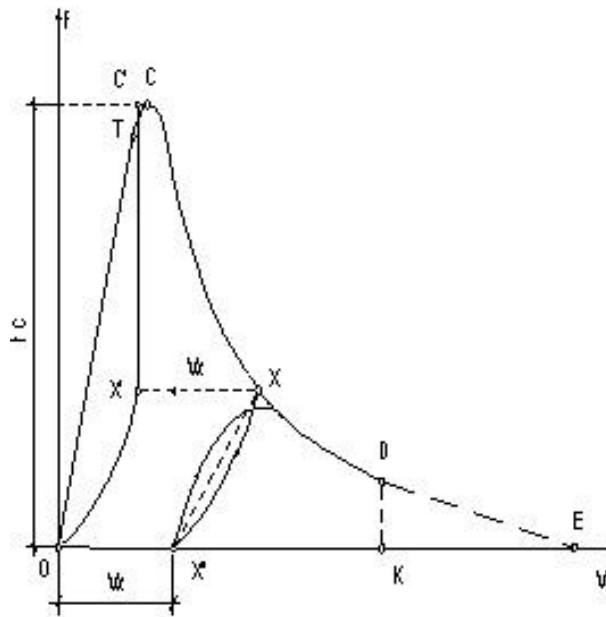


Рис. 2.6. ПДС бетону за зрівноважених випробуваннях з фіксацією ліній розвантаження

Випробування зразків-призм за схемою триточкового згину із ініційованою тріщиною нормального відриву ґрунтується на моделі бетону з фіктивною тріщиною [111]. В цій моделі припускається, що після досягнення зовнішньою напругою значення, що відповідає границі міцності бетону при згині, утворюється зона локалізованої деформації – область передруйнування, в якій напруги зменшуються зі зростанням прогину. За наявності спеціального обладнання отримують повну діаграму стану бетону (ПДС) у координатах «навантаження - прогин» (рис. 2.7), конфігурація якої є важливою характеристикою опору руйнуванню бетону.

Зрівноважені механічні випробування на стадії локальної деформації бетонного зразка характеризуються адекватністю зміни зовнішніх сил внутрішнім зусиллям у матеріалі з відповідним статичним розвитком макротріщини і дають змогу отримати спадну вітку діаграми стану у вигляді квадратної гіперболи.

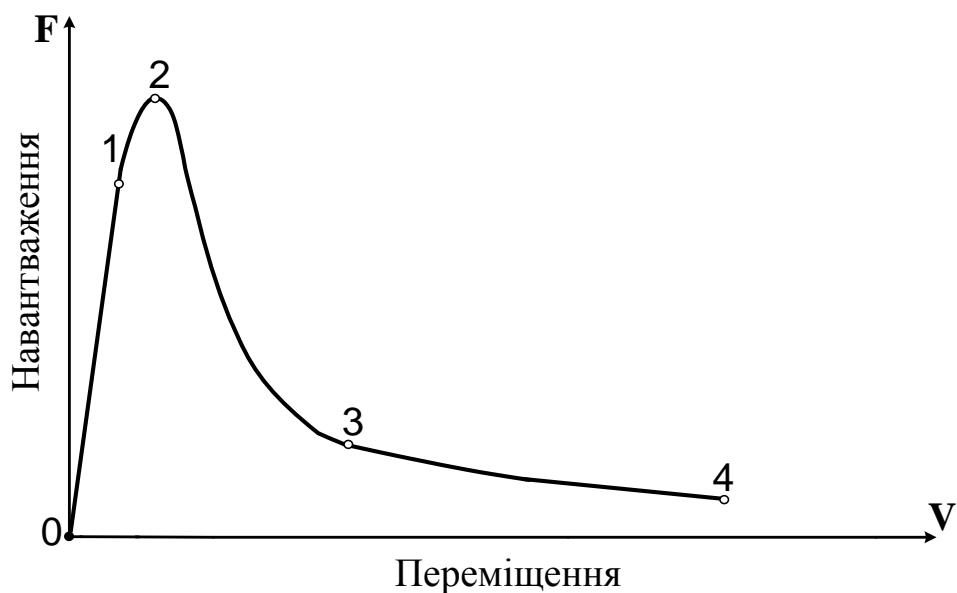


Рис. 2.7. Повна діаграма стану (ПДС) бетону при згині

Важливою перевагою методики зрівноважених випробувань є те, що визначені за ПДС енергетичні та силові показники руйнування бетону інваріантні до умов випробувань та об'єктивно відображають фізичні процеси руйнування за механічних навантажень.

Під час випробування контрольних зразків на згин процес руйнування зумовлюється розвитком тріщини нормального відриву, що дозволяє розрахувати фактичну площу поверхні руйнування.

Під час аналізу ПДС найдоцільніше застосовувати концепцію нелінійної механіки руйнування, яка дає змогу разом із традиційними механічними характеристиками визначити комплекс силових та енергетичних характеристик руйнування бетону. Побудова та аналіз ПДС дозволяє реалізувати енергетичний підхід для оцінки тріщиностійкості бетону. Отримане за ПДС значення інтегральної енергії руйнування включає термодинамічну величину поверхневої енергії в умовах ідеально крихкого відриву та дисипацію енергії за рахунок незворотних деформацій на фронті тріщини під час її просування.

Аналіз ПДС дозволяє диференціювати повну роботу руйнування на окремі частки, що відповідають різним стадіям деформування бетону. Окремі

ділянки діаграми стану в координатах «навантаження - прогин» відповідають якісно різним етапам деформування:

- початкова лінійна ділянка на висхідній вітці відповідає стадії пружного деформування бетону (рис. 2.7, ділянка 0-1);
- нелінійна ділянка на висхідній вітці, що передує точці зламу, відповідає зоні утворення мікротріщин (рис. 2.7, ділянка 1-2);
- спадна вітка до точки з мінімальними радіусом гіперболи відповідає стійкому просуванню макротріщини (рис. 2.7, ділянка 2-3);
- спадна ділянка за точкою 3 – стадія нестійкого розвитку макротріщини (рис. 2.7, ділянка 3-4).

За значенням площі окремих частин діаграми можна розрахувати значення роботи, що витрачається на: пружне і локальне деформування, мікротріщиноутворення, на розвиток магістральної тріщини і незворотніх деформацій. Крім цього, довжина макротріщини та швидкість її розвитку однозначно пов'язані зі значенням прогину і можуть бути ідентифіковані за спадною віткою діаграми. На спадній вітці діаграми стану розкриття тріщини відбувається лінійно пропорційно прогину незалежно від її довжини. Показник співвідношення між площами під спадною та висхідною вітками діаграми називається характеристичною довжиною та визначає ступінь опору руйнуванню бетону в закритичній стадії.

Отже, всебічний аналіз ПДС дає змогу об'єктивно відобразити фізичні процеси накопичення руйнувань в структурі бетону як за механічних, так і за кліматичних, корозійних та інших впливів.

Таким чином, визначення повної роботи руйнування бетону на підставі ПДС з метою подальшого введення в розрахунок конструкцій набуває актуальності для споруд, що експлуатуються за дії динамічних, сейсмічних і циклічних навантажень, а також за різноманітних агресивних впливів погодно-кліматичних, корозійних та інших факторів. Це пояснюється тим, що бетон на спадній вітці діаграми його деформування працює вже за границею міцності, тобто довговічність бетону і бетонної споруди загалом

визначається опором локальному деформуванню, що супроводжується розвитком магістральної тріщини. Повною мірою це стосується дорожніх цементобетонних покриттів і основ.

Випробування міцності бетонів на стиск проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [112].

Стійкість до циклів заморожування-відтавання визначалась згідно з ДСТУ Б В.2.7-47-96 [113].

Деформації усадки бетонів визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-216:2009 [114] на спеціальному стенді із вимірюванням абсолютних деформацій за допомогою еталонного компаратора.

Хімічні склади досліджували рентгеноспектрометром SEM FEI Quanta 250 з обладнанням для мікрофотографії EDS.

Визначення середньої густини та показники водопоглинання бетонів визначали відповідно до ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [115].

Легковкладальність бетонних сумішей визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-114-2002 [116].

Стираність досліджували згідно з ДСТУ Б EN 1097-1:2015 [117].

Висновки до розділу 2

1. Для проведення експериментальних досліджень в дисертаційній роботі використані портландцемент ПЦ II/A-Ш-500 виробництва “Волинь-Цемент” філії ПрАТ “Дікергофф Цемент Україна”, кварцовий пісок Ясинецького кар’єру Львівської області з модулем крупності 1,29, гранітний відсів фракцій 1,25 – 5,0 мм та гранітний щебінь фракцій 5,0 – 30,0 мм Клесівського кар’єру “Технобуд” Рівненської області.
2. Для пластифікації бетонної суміші використовували пластифікатор на Mg-Ligninsulfonat основі Liquol BV 18.
3. Для дисперсного армування бетонів використовували поліпропіленові фібри Fibermesh 150, Enduro HPP45, Ruredil X Fiber 54, Fibermesh 300-e3, базальтові довжиною 24 мм та 50 мм та металеву типів “поліарм” та “мікроарм”.
4. Силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості дисперсно-армованих бетонів визначали при рівноважних механічних випробуваннях призм із записом повної діаграми стану «навантаження-прогин» (F–V). Випробування зразків проводили за схемою триточкового згину на 200-тонному гідравлічному пресі. Контрольні зразки навантажували неперервно до їх поділу на частини. Для випробувань використовували зразки розміром 0,1×0,1×0,4 м із початковим надрізом висотою 0,04 м і шириною 0,002 м.
5. Фізико-механічні, будівельно-технічні та експлуатаційні характеристики розроблених бетонів визначали згідно з діючими стандартами та загальноприйнятими методиками. Оптимізацію складів розроблених високоміцних бетонів транспортного призначення за критеріями міцності проводили за допомогою методів експериментально-статистичного моделювання з використанням дисоціативно-крокового методу оптимізації.

6. Деформації усадки бетонів визначали на спеціальному стенді із вимірюванням абсолютних деформацій за допомогою еталонного компаратора.

7. Хімічні склади досліджували рентгеноспектрометром SEM FEI Quanta 250 з обладнанням для мікрофотографії EDS.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИСПЕРСНОГО АРМУВАННЯ БЕТОНІВ НА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ

3.1. Вплив дисперсного армування бетонів різними видами фібри на міцність та характеристики тріщиностійкості

Для дослідження показників тріщиностійкості використано бетони номінального складу (всі серії) Ц:П:Щ= =1:2,23:3,19, В/Ц=0,44 при витраті портландцементу 350 кг/м³. Для дисперсного армування використовували різні види фібри. Прийнято наступні умовні позначенням серій бетонів (витрата фібри, кг/м³ бетонної суміші): б/ф – без армування, базова; П1 - Fibermesh 150 (0,9), П2 - Enduro HPP45 (5,0), П3 - Ruredil X Fiber 54 (1,0), П4 - Fibermesh 300-e3 (0,9); Б1 – базальтова, довжина 24 мм (1,0), Б2 – базальтова, довжина 50 мм (1,0); М – металева (20,0). Марка за легкокладальністю суміші – S1.

Проведено дослідження дисперсно-армованих бетонів. За одержаними результатами побудовані повні діаграми стану (ПДС) неармованого та дисперсно-армованих бетонів, які наведені на рис. 3.1-3.4.

Аналіз отриманих ПДС дисперсно-армованих бетонів (рис. 3.1-3.2) свідчить про позитивний вплив дисперсного армування бетонів серій П1 та П2, як на докритичній стадії формування макротріщини, так і на закритичній – сприйняття бетоном критичного навантаження та руйнування до поділу досліджуваних зразків на частини.

Конфігурація висхідних віток діаграм неармованого та армованих бетонів майже збігаються. Виняток становить бетон армований металевою фіброю (кут нахилу висхідної вітки менший на 10°). Спадні вітки діаграм бетонів базової серії та серій П3, П4 і Б2 накладаються, серій П1, П2 і М

паралельні з більшою повнотою в закритичній стадії, серії Б1 – проходить нижче базової серії.

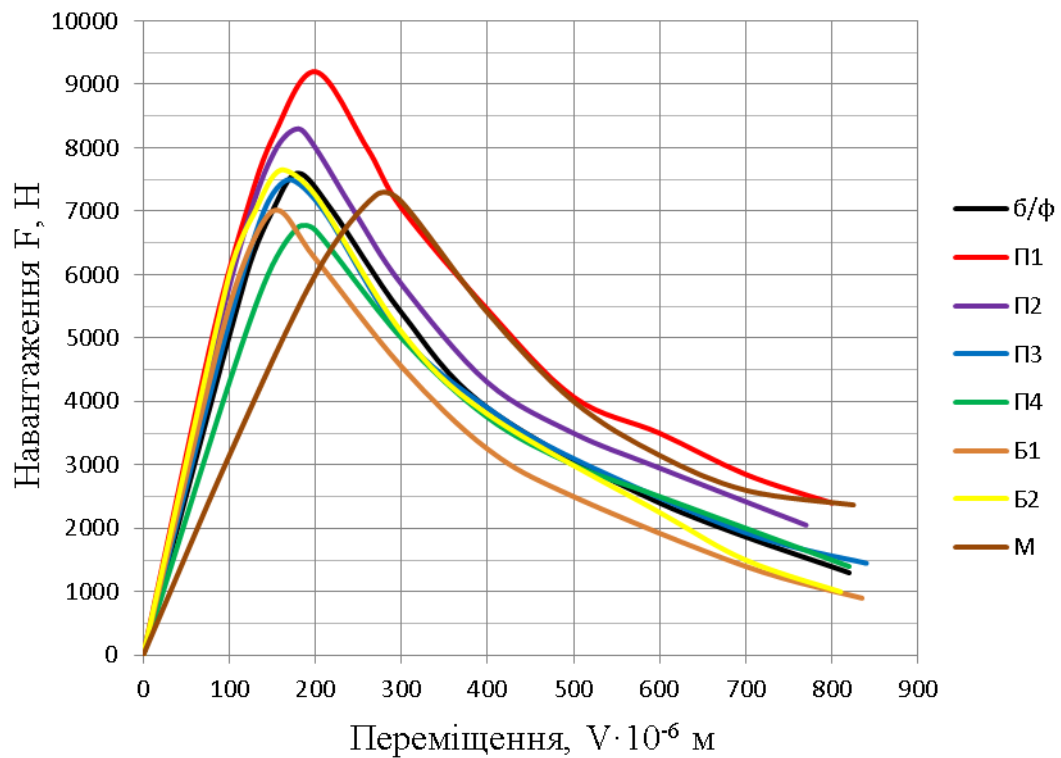


Рисунок 3.1 – ПДС неармованого та дисперсно-армованих бетонів

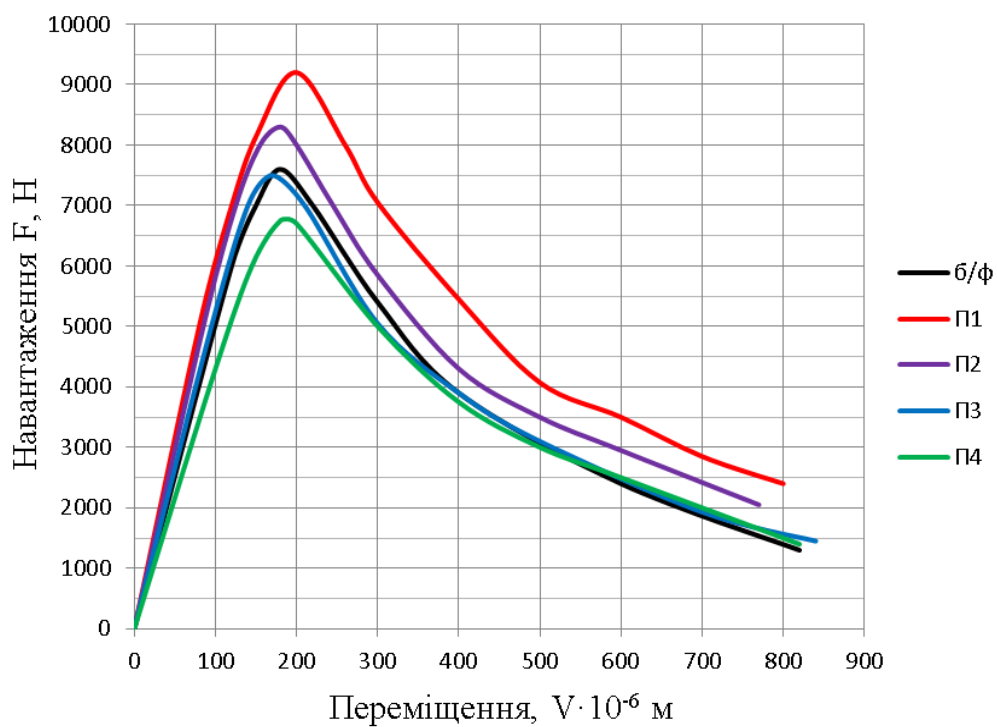


Рисунок 3.2 – ПДС неармованого та дисперсно-армованих поліпропіленовими фібрами бетонів

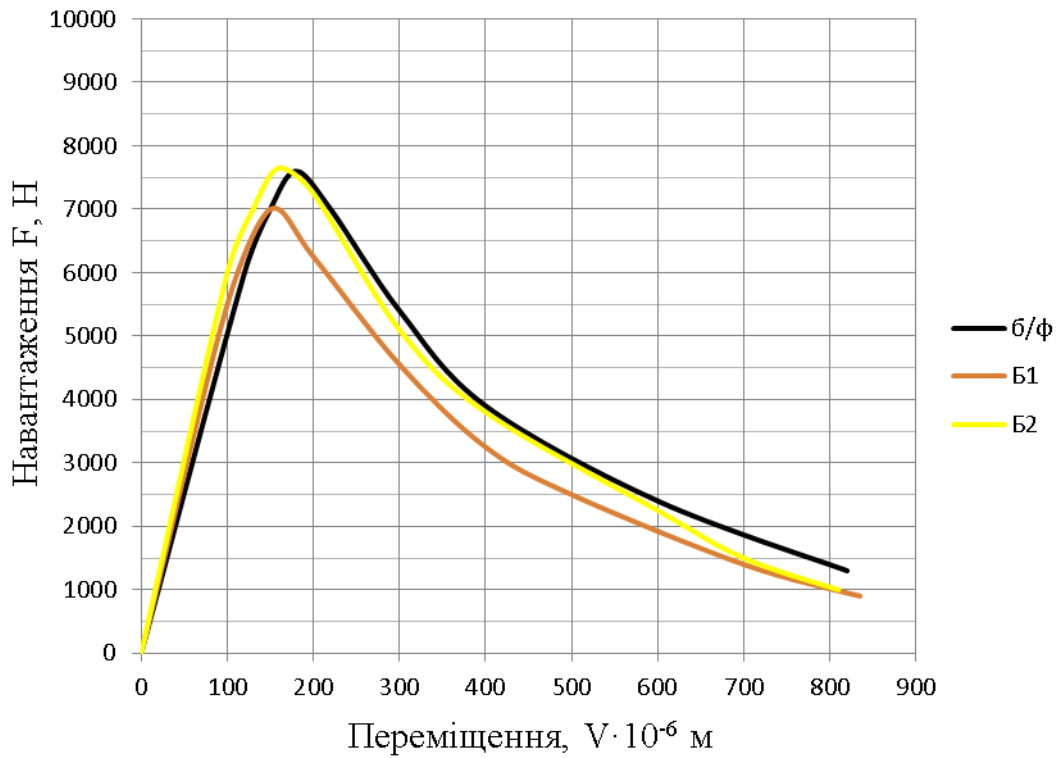


Рисунок 3.3 – ПДС неармованого та дисперсно-армованих базальтовими фібрами бетонів

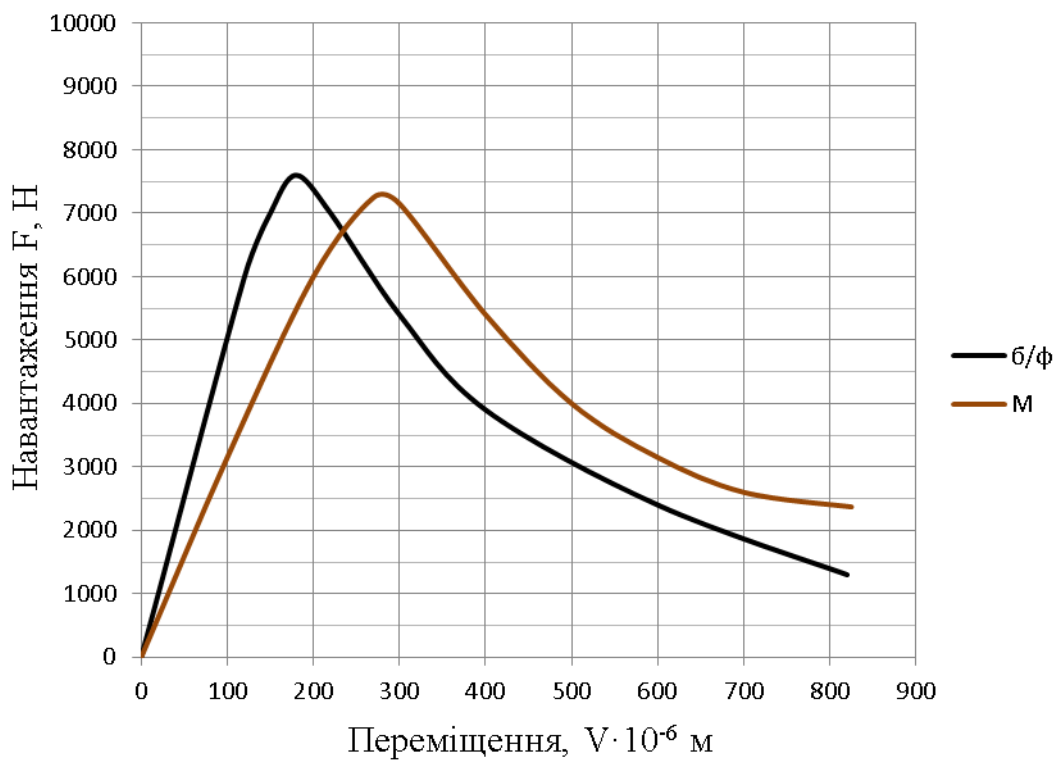


Рисунок 3.4 – ПДС неармованого та дисперсно-армованого металевою фіброю бетонів

Граничні деформації, за яких відбувається дефрагментація зразків не перевищують $840 \cdot 10^{-6}$ м та приблизно рівні між собою.

Міцнісні та деформативні характеристики бетонів наведені в табл. 3.1

Таблиця 3.1

Фізико-механічні характеристики досліджуваних бетонів

| Позначення серії | Міцність на стиск, $f_{cm.cube}$, МПа | Критерій крихкості, $X_{tb}=G_f E_{tb}/R_{tb}^2 \cdot 10^3$ |
|------------------|--|---|
| б/ф | 69,0 | 124 |
| П1 | 65,8 | 107 |
| П2 | 68,2 | 144 |
| П3 | 63,3 | 169 |
| П4 | 66,7 | 127 |
| М | 64,8 | 95 |
| Б1 | 60,5 | 166 |
| Б2 | 58,6 | 120 |

Згідно з даними табл. 3.1, за показниками міцності на стиск всі дисперсно-армовані бетони поступаються неармованому бетону. Проте ці значення близькі – з відхиленням до 8,3 %, за виключенням армованих базальтовою фіброю бетонів (15 %). Як відомо, збільшення границі міцності при стиску прямо пропорційне вмісту фібри і досягає 140-150 % при 2-3 % армуванні за об'ємом. Оскільки в досліджуваних бетонах вміст фібри вибрано на мінімально допустимому рівні згідно з рекомендаціями виробників, отримано прогнозовано нижчу міцність на стиск фібробетонів.

Міцність на стиск не є основною характеристикою фібробетону. Зміцнення, головним чином, досягається за рахунок збільшення границі міцності на розтяг при згині. Як видно з результатів досліджень, вищими значеннями міцності на розтяг при згині (рис. 3.5) характеризуються два види фібробетонів – серії П1 (на 1,5 %) та П2 (на 7,2 %). Незначне зростання міцності серії бетонів П1 та П2 та гірші результати інших пояснюється мінімальним вмістом використаної фібри і неоптимальним

гранулометричним складом суміші заповнювачів за критерієм дисперсного армування (оптимальними є дрібнозернисті бетони, тому що фібра армує цементно-піщану матрицю, а крупніші зерна заповнювачів ускладнюють її армування).

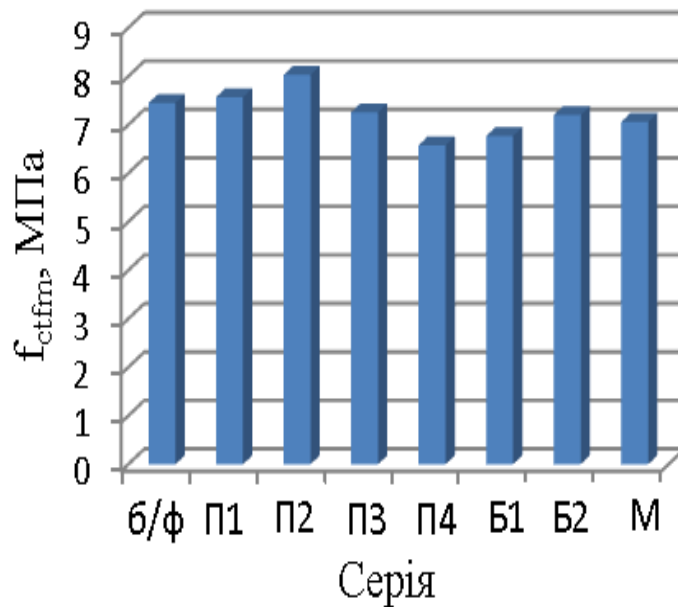


Рисунок 3.5 – Міцність на розтяг при згині

За критерієм крихкості найбільш крихкий характер руйнування показали бетони серії П3 (в 1,4 рази порівняно з базовою), Б1 (в 1,3 рази) та П2 (в 1,2 рази). В бетонах серій П4 та Б2 характер руйнування близький до бетонів базової серії. Результати досліджень свідчать що бетони серій П1 та М більш стійкі до дефрагментації зразків при досягненні критичних навантажень.

Силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості досліджуваних бетонів наведені в табл. 3.2.

Силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості досліджуваних бетонів

| Позначення серії | $W_m, 10^{-2}$ Н·м | $W_e, 10^{-2}$ Н·м | $W_l, 10^{-2}$ Н·м | $G_i,$ Дж/м ² | $G_F,$ Дж/м ² | $J_i,$ Дж/м ² | $K_c,$ МПа ^{·1/2} |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| б/ф | 20,91 | 58,27 | 220,11 | 131,97 | 463,97 | 83,87 | 1,02 |
| П1 | 56,33 | 55,79 | 283,47 | 186,86 | 565,43 | 140,81 | 1,05 |
| П2 | 33,71 | 39,25 | 235,07 | 121,6 | 457,19 | 89,21 | 0,86 |
| П3 | 24,53 | 50,56 | 209,55 | 125,15 | 433,51 | 83,42 | 0,64 |
| П4 | 33,89 | 51,87 | 251,54 | 142,94 | 505,68 | 100,12 | 1,02 |
| М | 35,35 | 79,80 | 217,91 | 191,92 | 496,18 | 126,05 | 0,44 |
| Б1 | 26,63 | 35,28 | 202,31 | 103,19 | 395,99 | 74,07 | 0,97 |
| Б2 | 55,90 | 51,03 | 222,75 | 178,22 | 456,29 | 136,10 | 0,98 |

При роботі в докритичній стадії деформування беззаперечну перевагу має бетон серії М, енерговитрати якого на пружне деформування (W_e) в 1,4 рази перевищує показник базового бетону.

Аналіз закритичної стадії деформування свідчить про перевагу бетонів серій П1, П2 та П3: значення загальних енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (W_l) у 1,3; 1,1 та 1,1 рази перевищує показник бетону базової серії при армуванні відповідними волокнами.

В'язкість руйнування (K_i , рис. 3.6) зростає в послідовності: П3, М, б/ф, Б1, П2, П4, Б2, П1.

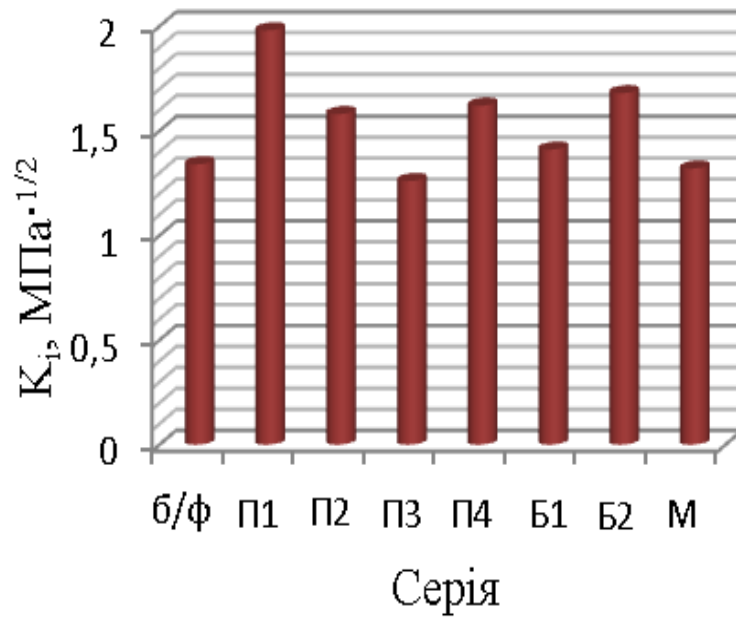


Рисунок 3.6 – Статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень

Критичні коефіцієнти інтенсивності напружень (K_c) в бетонах базової та серій П1, П4, Б1 та Б2 мало відрізняються одне від одного (різниця до 5%), в серіях П2, П3 та М значно менші (14-56 %). Це підтверджується підвищеними на 48 (П1) та 21% (П2) (рис. 3.6) значеннями статичного критичного коефіцієнта інтенсивності напружень і на 2 та 8% відповідно (рис. 3.5) міцностями на розтяг при згині.

У зв'язку з цим, для подальших досліджень використовували поліпропіленові фібри Enduro HPP45 (тип “поліарм”) та Fibermesh 150 (тип “мікроарм”).

3.2. Оптимізація складів бетонів, армованих поліпропіленою фіброю типу “поліарм” за критеріями міцності та тріщиностійкості

Для встановлення оптимального складу бетону та вмісту поліпропіленої фібри типу “поліарм” використовували метод експериментально-статистичного моделювання із застосуванням трьохрівневого трифакторного плану експерименту (Д-оптимального, як найчастіше використовуваного в практиці досліджень технології дорожніх бетонів). Як технологічні фактори впливу обрані: X_1 – витрата поліпропіленої фібри типу “поліарм” - 7 ± 3 кг на 1 м^3 бетонної суміші; X_2 – відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача – $2,25 \pm 0,75$; X_3 – коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача ($1,4 \pm 0,3$).

Склади досліджуваних серій бетонів наведено в табл. 3.3.

**Склади бетонів дисперсно-армованих поліпропіленою фіброю типу
“поліарм”**

| Серії бетонів | Витрата матеріалів на 1 м ³ бетонної суміші, кг | | | | | | | | |
|---------------|--|------|---------------|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------------|------|------|
| | Цемент | Вода | Пластифікатор | Полі-пропіленова фібра типу “поліарм” | Дрібний заповнювач | | Фракції крупного заповнювача, мм | | |
| | | | | | пісок фр. 0-1,25 мм | ПВДГП фр. 1,25-5,0 мм | 5-15 | 5-20 | 5-30 |
| 1 | 350 | 154 | 2,45 | 10 | 549 | 323 | 1060 | - | - |
| 2 | | | | | 367 | 215 | 1335 | - | - |
| 3 | | | | | 518 | 305 | - | - | 1124 |
| 4 | | | | | 335 | 196 | - | - | 1405 |
| 5 | | | | 4 | 549 | 323 | 1335 | - | - |
| 6 | | | | | 367 | 215 | 1060 | - | - |
| 7 | | | | | 518 | 305 | - | - | 1124 |
| 8 | | | | | 335 | 196 | - | - | 1405 |
| 9 | | | | 10 | 435 | 255 | - | 1247 | - |
| 10 | | | | 4 | | | - | - | - |
| 11 | | | | 10 | 549 | 323 | 1060 | - | - |
| 12 | | | | 7 | 437 | 256 | - | - | 1249 |
| 13 | | | | | 517 | 303 | - | 1123 | - |
| 14 | | | | | 333 | 195 | - | 1403 | - |
| 15 | | | | | 435 | 255 | - | 1247 | - |
| 16 | | | | | | | - | - | - |
| 17 | | | | - | | | - | - | |

За отриманими результатами досліджень дисперсно-армованих бетонів побудовані ПДС (рис. 3.7), аналіз яких вказує, що найвищі характеристики тріщиностійкості (питомими енерговитратами на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини, питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування, статичним критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень) має серія 4 (бетон, армований поліпропіленою фіброю типу “поліарм” з витратою фібри 10 кг/м³ в

поєднанні з мінімальними відношеннями довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача 0,4 (відповідає щебеню з максимальним розміром зерна 30 мм) та коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача 1,1.

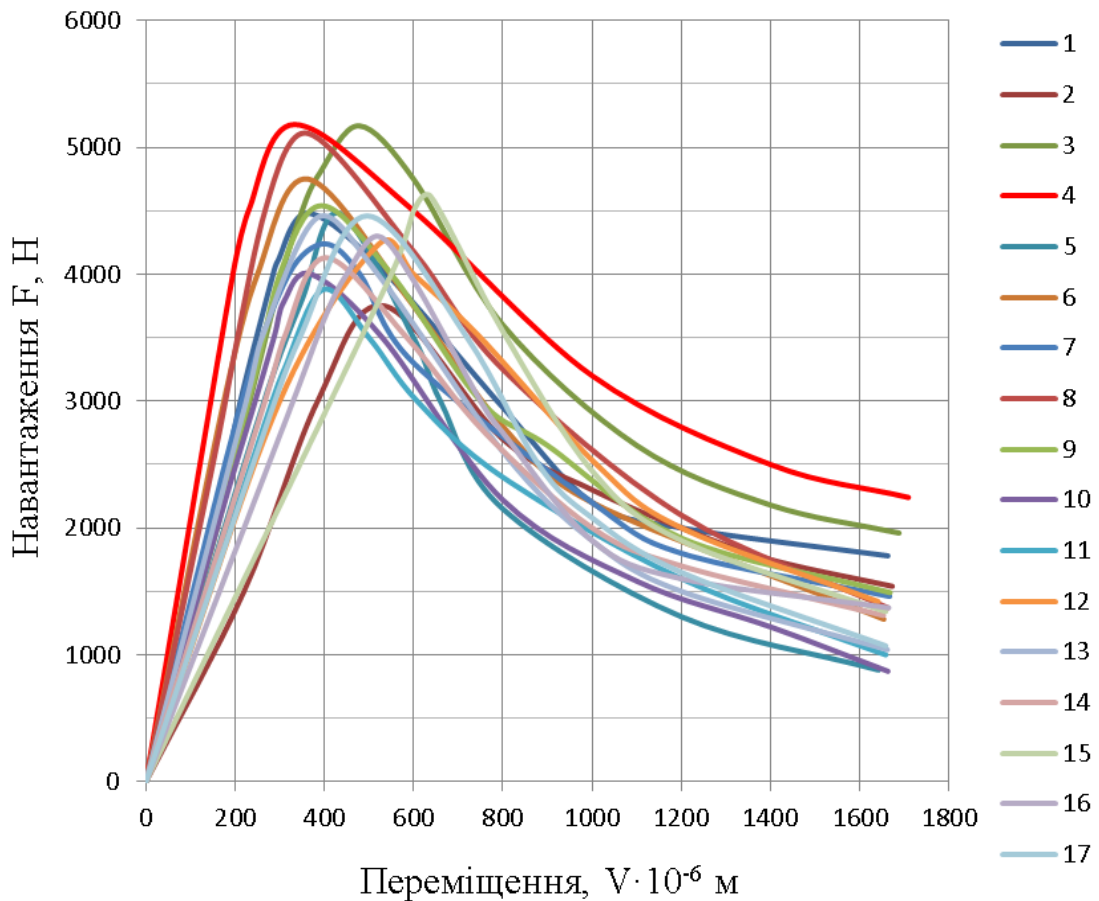


Рисунок 3.7 – ПДС бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленовою фіброю типу “поліарм”

Як видно з рис. 3.8, бетон серії 4, армований фіброю типу “поліарм” (10 кг/м^3), з найвищою міцністю на розтяг при згині $10,95 \text{ МПа}$, перевищує найнижчу міцність ($f_{ctfm}=7,93 \text{ МПа}$) бетону серії 2 на 38%.

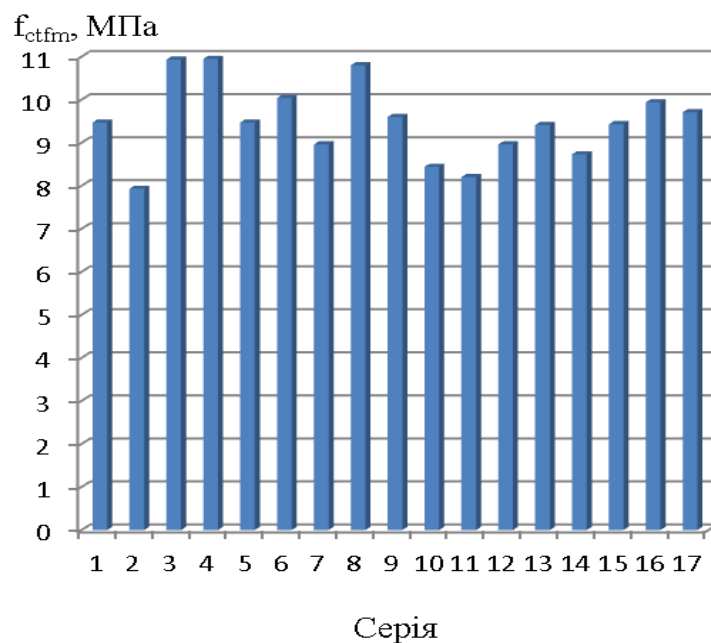


Рисунок 3.8 – Міцність на розтяг при згині бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленою фіброю типу “поліарм”

Максимальні питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування (G_f) та найвищий статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (K_i) також відповідають бетонам серій 4 (рис. 3.9).

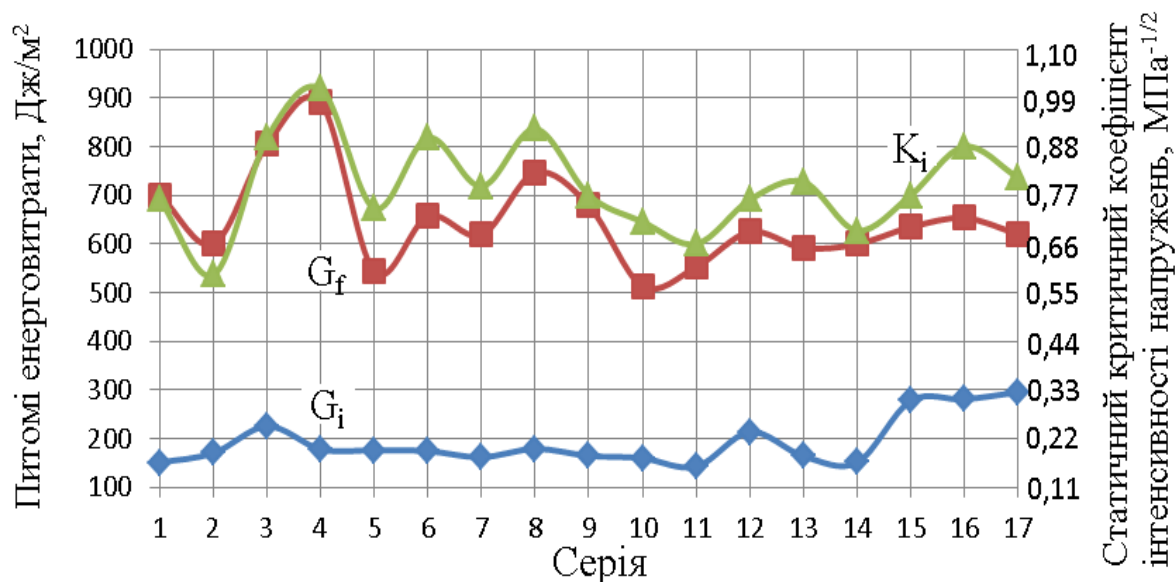


Рисунок 3.9 – Характеристики тріщиностійкості бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленою фіброю типу “поліарм”

Ці результати узгоджуються з одержаною міцністю на розтяг при згині. В той же час, питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i) при дисперсному армуванні поліпропіленовою фіброю типу “поліарм” вищі в серіях 15, 16, 17, що зумовлено особливостями складу бетону, а саме більшим коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача ($\alpha=1,4$) порівняно з серією 4 ($\alpha=1,1$), що призводить до зростання вмісту розчинової частини в складі бетонної суміші і покращення її легкоукладальності, роблячи бетонну суміш більш придатною для технології транспортного будівництва.

Тому для подальших досліджень використовували склад бетону з технологічними факторами впливу на середньому рівні: щебінь з найбільшим розміром зерна 20 мм та коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача 1,4.

Таблиця 3.4

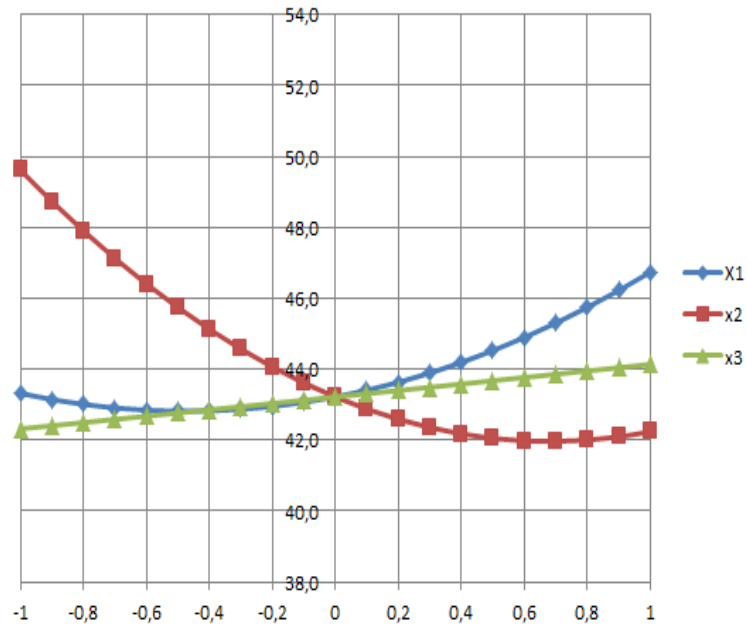
Характеристики міцності та тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю типу “поліарм”

| Серії бетонів | $f_{cm.cube}$, МПа | f_{ctfm} , МПа | G_i , Дж/м ² | W_1 , 10 ⁻² Н·м | G_F , Дж/м ² | K_{1c} , МПа·м ^{1/2} |
|---------------|---------------------|------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 1 | 52,8 | 9,47 | 150,95 | 347,78 | 699,90 | 0,76 |
| 2 | 36,5 | 7,93 | 170,44 | 265,07 | 600,03 | 0,59 |
| 3 | 57,9 | 10,93 | 225,48 | 380,17 | 804,86 | 0,90 |
| 4 | 57,8 | 10,95 | 178,17 | 469,78 | 890,15 | 1,01 |
| 5 | 49,7 | 9,47 | 176,18 | 236,29 | 542,78 | 0,74 |
| 6 | 38,7 | 10,04 | 174,42 | 326,12 | 656,88 | 0,90 |
| 7 | 46,2 | 8,96 | 162,03 | 305,71 | 618,43 | 0,79 |
| 8 | 52,9 | 10,80 | 179,10 | 370,73 | 746,51 | 0,92 |
| 9 | 39,6 | 9,60 | 164,76 | 328,17 | 678,29 | 0,77 |
| 10 | 40,0 | 8,44 | 159,84 | 238,32 | 513,18 | 0,71 |
| 11 | 40,8 | 8,20 | 142,72 | 263,30 | 552,52 | 0,66 |
| 12 | 40,6 | 8,96 | 213,86 | 282,46 | 624,71 | 0,76 |
| 13 | 32,2 | 9,41 | 164,14 | 285,35 | 591,69 | 0,80 |
| 14 | 43,8 | 8,73 | 151,24 | 285,21 | 599,41 | 0,69 |
| 15 | 48,5 | 9,43 | 277,74 | 266,16 | 634,56 | 0,77 |
| 16 | 51,1 | 9,94 | 280,89 | 282,05 | 653,22 | 0,88 |

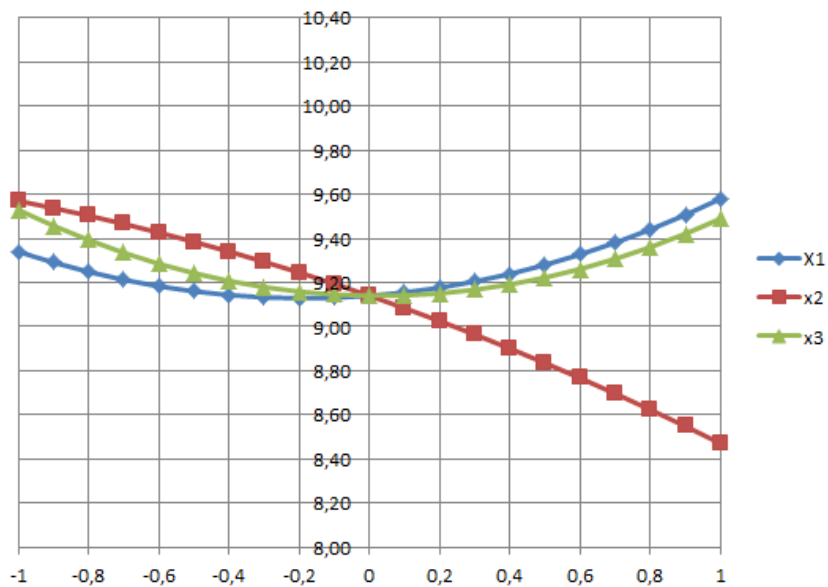
| | | | | | | |
|----|------|------|--------|--------|--------|------|
| 17 | 50,4 | 9,71 | 295,41 | 280,21 | 620,32 | 0,81 |
|----|------|------|--------|--------|--------|------|

Як видно з результатів досліджень, витрата фібри та коефіцієнт розсуву практично не впливають на характеристики міцності фібробетону на відміну від розміру крупного заповнювача (рис. 3.10). Максимальні міцність на стиск (57,9 МПа – серія 3) та на розтяг при згині (10,95 МПа – серія 4) досягаються при використанні щебеню розміром 30 мм. Зі зменшенням розміру щебеню з 30 до 15 мм спостерігається спад міцності: $f_{cm.cube}$ – на 59%; f_{ctfm} – на 38% (серія 2). Слід відзначити, що міцність на розтяг при згині визначалася розрахунковим методом за ПДС по значеннях ординати точки зламу (формула В.2 [110]) при рівноважних механічних випробуваннях за триточковим згином.

Ефективність роботи бетону в докритичній стадії оцінюється питомими енерговитратами на статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i). Залежність показника G_i від витрати фібри та коефіцієнта розсуву має параболічний вигляд (рис. 3.11, а). Екстремум (229 Дж/м²) спостерігається коли впливаючі фактори знаходяться на середньому рівні. Спад відбувається при максимальних і мінімальних значень Q_ϕ та $k_{роз.}$. Бетони, макроструктура яких складається з крупних заповнювачів розміром 30 і 20 мм, працюють краще до моменту зрушення макротріщини на відміну від дрібнозернистих бетонів.

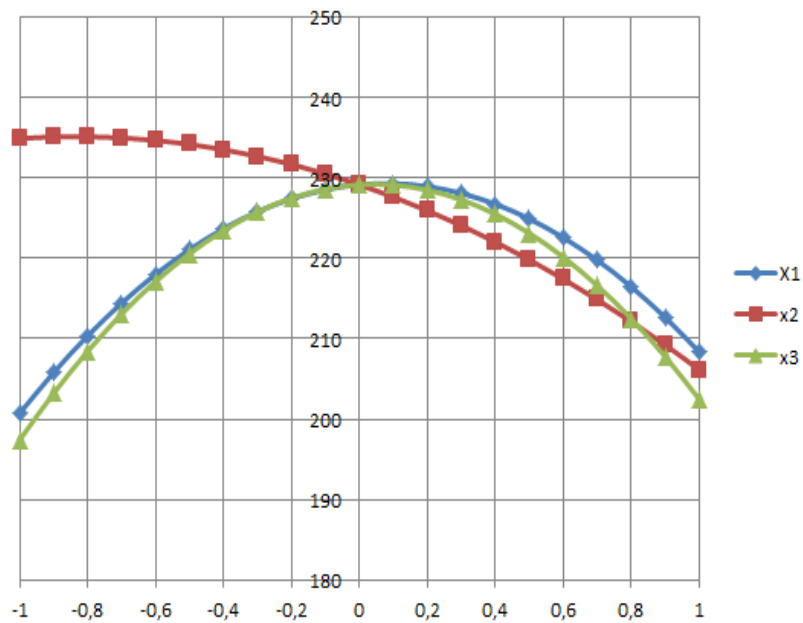


а

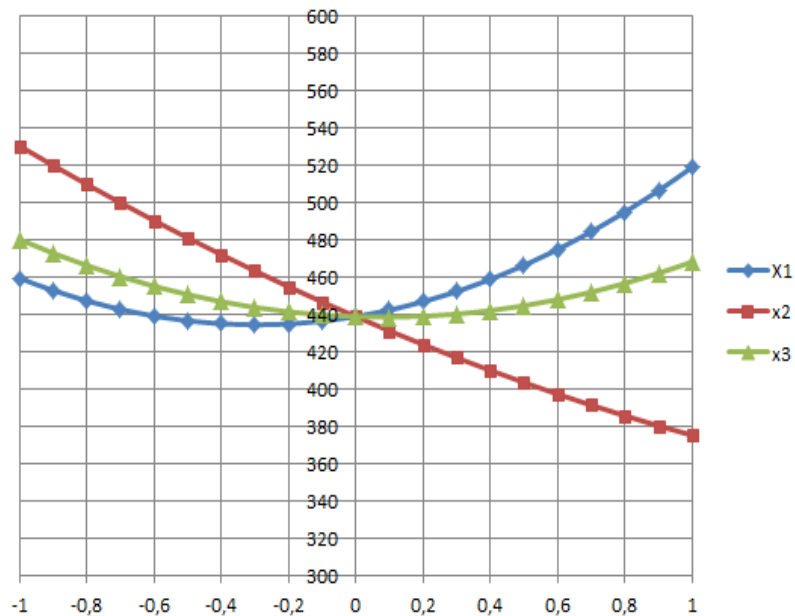


б

Рисунок 3.10 – Залежність досліджуваних міцнісних характеристик дисперсно-армованих бетонів поліпропіленою фіброю типу “поліарм” від обраних технологічних факторів:
 а – міцність на стиск $f_{cm,cube}$, МПа; б – міцність на розтяг при згині f_{ctfm} , МПа



а



б

Рисунок 3.11 – Залежність досліджуваних енергетичних характеристик тріщиностійкості дисперсно-армованих бетонів поліпропіленовою фіброю типу “поліарм” від обраних технологічних факторів:

а – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини G_i , Дж/м²; б – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини G_i , Дж/м²

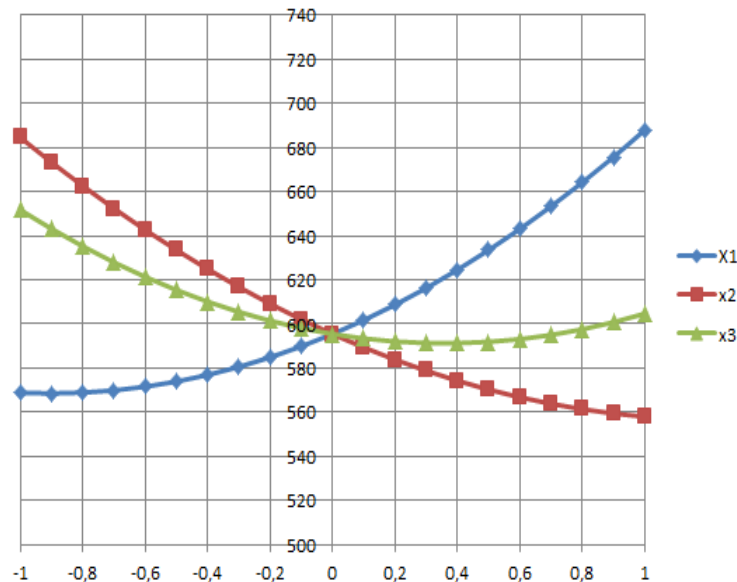


Рисунок 3.12 – Залежність питомих ефективних енерговитрат на статичне руйнування G_f досліджуваних енергетичних характеристик тріщиностійкості дисперсно-армованих бетонів поліпропіленовою фіброю типу “поліарм” від обраних технологічних факторів

Ефективність в закритичній стадії деформування визначається питомими енерговитратами на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (рис. 3.11, б). Ефект дисперсного армування проявляється коли вміст фібри перевищує 7 кг/м^3 і досягає максимуму 519 Дж/м^2 при 10 кг/м^3 бетонної суміші. Залежність G_1 від розміру крупного заповнювача має практично лінійний характер – відбувається падіння G_1 на 29% при зменшенні розміру крупного заповнювача від 30 до 15 мм. Вплив коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача незначний.

Загальна “робота” бетону характеризується питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування (рис. 3.12), які зростають із збільшенням витрати фібри та розміру крупного заповнювача. Зростання коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача призводить до падіння показника G_f .

Отже, бетон, армований поліпропіленовою фіброю типу “поліарм”, з витратою фібри 10 кг/м^3 в поєднанні з мінімальними відношеннями довжини

фібри до максимального розміру крупного заповнювача 0,4 (відповідає щебеню з максимальним розміром зерна 30 мм) та коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача 1,1 характеризується найвищими міцностями на стиск $f_{cm.cube}=57,8$ МПа, на розтяг при згині $f_{ctfm}=10,95$ МПа та характеристиками тріщиностійкості: $G_I=178,17$ Дж/м², $W_I=469,78 \cdot 10^{-2}$ Н·м, $G_F=890,15$ Дж/м².

3.3. Вплив поліпропіленової фібри типу “мікроарм” на міцність і тріщиностійкість дисперсно-армованих бетонів та оптимізація розроблених складів

Дослідження впливу поліпропіленової фібри типу “мікроарм” на міцність і тріщиностійкість дисперсно-армованих бетонів та оптимізацію розроблених складів проводили з використанням таких технологічних факторів: X_1 – витрата поліпропіленової фібри типу “мікроарм” - $1,35 \pm 0,45$ кг на 1 м^3 бетонної суміші; X_2 – відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача – $0,6 \pm 0,2$; X_3 – коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача ($1,4 \pm 0,3$).

Склади досліджуваних серій бетонів наведено в табл. 3.5.

**Склади бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленою фіброю типу
“мікроарм”**

| Серії бетонів | Витрата матеріалів на 1 м ³ бетонної суміші, кг | | | | | | | | |
|---------------|--|------|---------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|------|------|
| | Цемент | Вода | Пластифікатор | Поліпропіленова фібра типу “мікроарм” | Дрібний заповнювач | | Фракції крупного заповнювача, мм | | |
| | | | | | Пісок фр. 0-1,25 мм | ПВДП фр. 1,25-5,0 мм | 5-15 | 5-20 | 5-30 |
| 18 | 350 | 154 | 2,45 | 1,8 | 549 | 323 | 1060 | - | - |
| 19 | | | | | 367 | 215 | 1335 | - | - |
| 20 | | | | | 518 | 305 | - | - | 1124 |
| 21 | | | | | 335 | 196 | - | - | 1405 |
| 22 | | | | 0,9 | 549 | 323 | 1335 | - | - |
| 23 | | | | | 367 | 215 | 1060 | - | - |
| 24 | | | | | 518 | 305 | - | - | 1124 |
| 25 | | | | | 335 | 196 | - | - | 1405 |
| 26 | | | | 1,8 | 435 | 255 | - | 1247 | - |
| 27 | | | | 0,9 | | | | | |
| 28 | | | | 1,8 | 549 | 323 | 1060 | - | - |
| 29 | | | | 1,35 | 437 | 256 | - | - | 1249 |
| 30 | | | | | 517 | 303 | - | 1123 | - |
| 31 | | | | | 333 | 195 | - | 1403 | - |
| 32 | | | | | 435 | 255 | - | 1247 | - |
| 33 | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | |

ПДС бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленою фіброю типу “мікроарм” наведені на рис. 3.13.

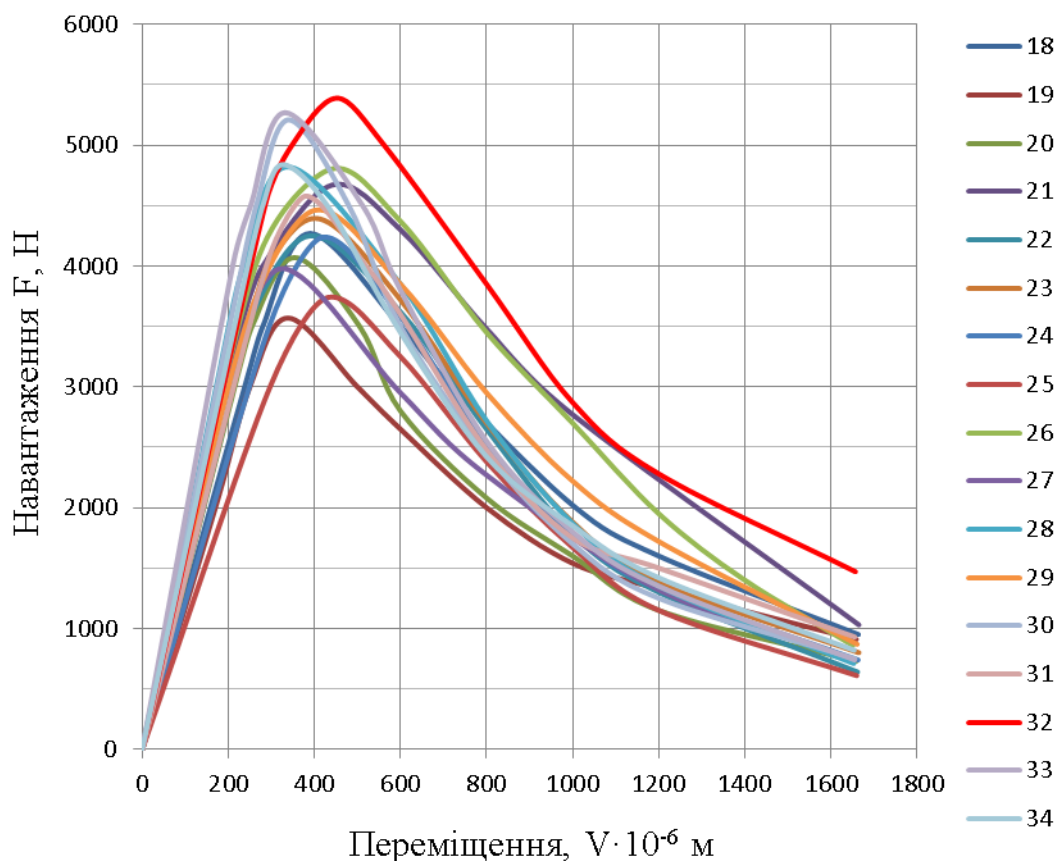


Рисунок 3.13 – ПДС бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленовою фіброю типу “мікроарм”

Результати реалізації експерименту наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Характеристики міцності та тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю типу “мікроарм”

| Серії бетонів | $f_{ck.cube.},$ МПа | $f_{ctfm},$ МПа | $G_i,$ Дж/м ² | $G_l,$ Дж/м ² | $G_F,$ Дж/м ² |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 18 | 55,0 | 9,03 | 155,18 | 478,14 | 598,58 |
| 19 | 44,1 | 7,55 | 110,78 | 406,39 | 495,13 |
| 20 | 59,4 | 8,60 | 139,31 | 401,78 | 501,42 |
| 21 | 64,2 | 9,87 | 217,42 | 558,99 | 678,69 |
| 22 | 59,0 | 8,99 | 167,27 | 442,92 | 548,53 |
| 23 | 47,7 | 9,28 | 187,33 | 446,25 | 560,28 |
| 24 | 65,6 | 8,96 | 168,95 | 420,35 | 546,66 |
| 25 | 62,3 | 7,91 | 151,37 | 371,28 | 486,81 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|------|-------|--------|--------|--------|
| 26 | 62,7 | 10,15 | 217,70 | 539,20 | 666,00 |
| 27 | 48,8 | 8,41 | 126,62 | 444,12 | 531,25 |
| 28 | 64,8 | 10,19 | 159,91 | 507,22 | 617,84 |
| 29 | 64,7 | 9,43 | 178,50 | 504,44 | 618,17 |
| 30 | 63,1 | 11,02 | 164,10 | 483,99 | 615,37 |
| 31 | 64,4 | 9,68 | 162,77 | 469,89 | 595,73 |
| 32 | 67,8 | 11,40 | 248,82 | 607,58 | 760,88 |
| 33 | 62,3 | 11,14 | 165,69 | 517,12 | 638,68 |
| 34 | 63,1 | 10,23 | 143,53 | 497,59 | 616,90 |

На рис. 3.14-3.17 представлені залежності досліджуваних міцнісних характеристик, силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості фібробетонів від зміни одного з трьох технологічних факторів (інші два знаходяться на середньому рівні).

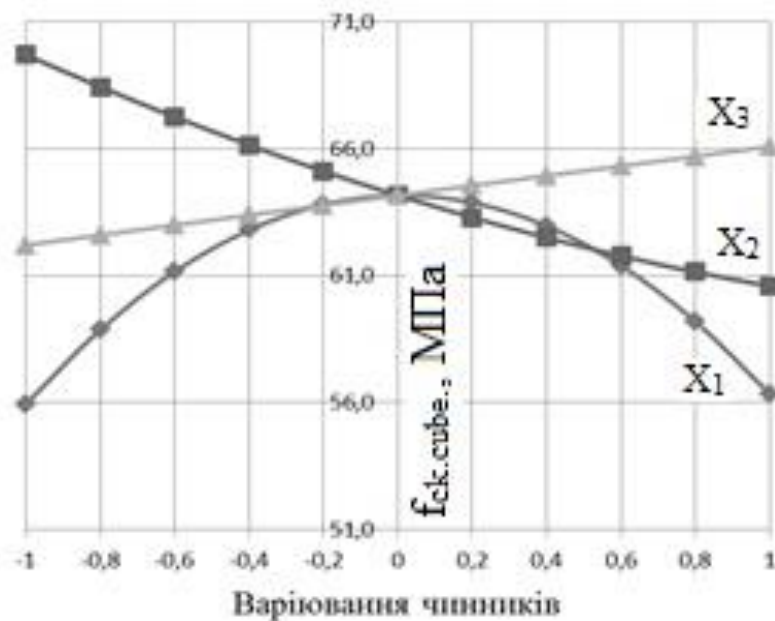


Рисунок 3.14 – Залежність міцності на стиск бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленою фіброю типу “мікроарм” від обраних технологічних факторів

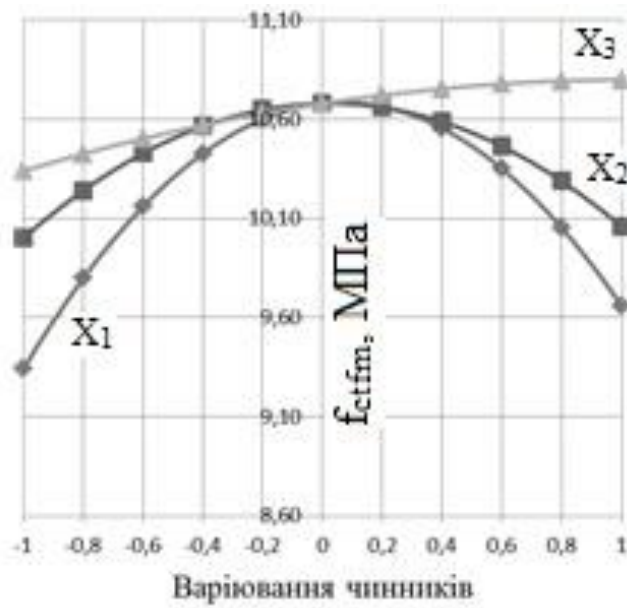


Рисунок 3.15 – Залежність міцність на розтяг при згині бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленою фіброю типу “мікроарм” від обраних технологічних факторів

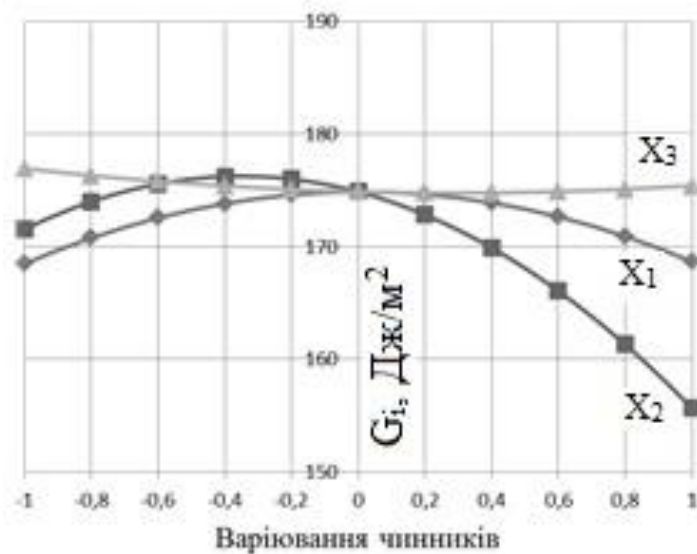
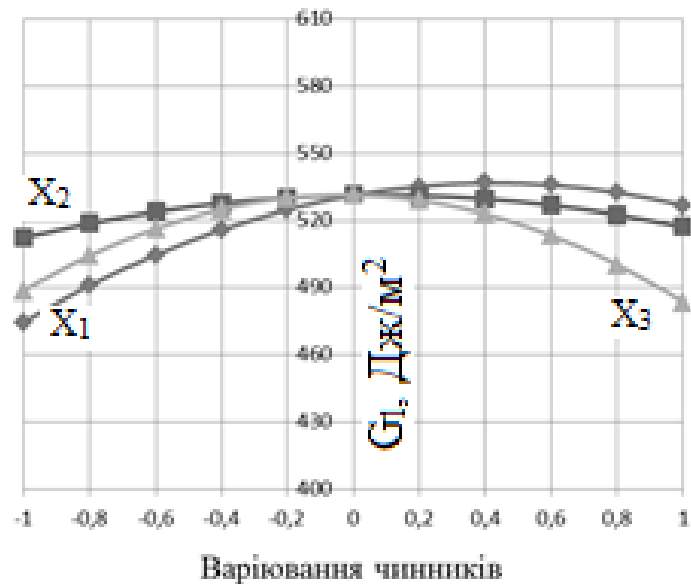
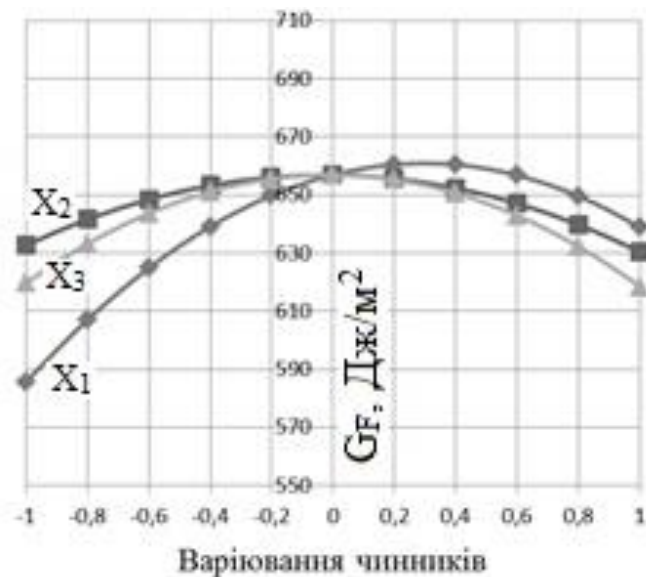


Рисунок 3.16 – Залежність питомих енерговитрат на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленою фіброю типу “мікроарм” від обраних технологічних факторів



а



б

Рисунок 3.17 – Залежності досліджуваних енергетичних характеристик тріщиностійкості дисперсно-армованих бетонів поліпропіленовою фіброю типу “мікроарм” від обраних технологічних факторів:

а – питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини; б – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування

Значний вплив на міцнісні характеристики досліджуваних бетонів відіграє витрата фібри та відношення довжини фібри до максимальної

величини крупного заповнювача (рис. 3.14, 3.15). При вмісті фібри в бетонах $1,3 - 1,4 \text{ кг/м}^3$ (середній рівень) досягаються максимальні значення міцності на стиск та на розтяг при згині – $64,2 \text{ МПа}$ і $10,68 \text{ МПа}$ відповідно; збільшення та зменшення витрати армуючих волокон призводить до зниження міцності. Зростання відношення довжини фібри до діаметра зерен крупного заповнювача від $l/d=0,4$ до $l/d=0,8$ призводить до зниження міцності на стиск на 14% . Міцність на розтяг при згині досягає також свого максимуму на середньому рівні варіювання $l/d=0,6$ (20 мм) та витраті фібри $1,35 \text{ кг/м}^3$ бетонної суміші. Зростання коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача призводить до незначного підвищення показників міцності фібробетонів.

Ефективність “роботи” бетону в докритичній стадії оцінюється питомими енерговитратами на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини (рис. 3.16). Стимування утворення та розповсюдження тріщин на даному етапі досягається за відношення довжини фібри до максимальної крупності використаного щебеню на рівні $0,4 - 0,6$ (мінімальний та середній рівень – $30 - 20 \text{ мм}$), та різко падає досягаючи значення $0,8$ (що відповідає розміру зерен крупного заповнювача 15 мм). В закритичній стадії “робота” бетону характеризується питомими енерговитратами на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (рис. 17, а), значення якої максимальне за відношенні довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача $0,6$ (щебінь з максимальною крупністю фракції 20 мм) та коефіцієнта розсуву зерен крупного заповнювача $\alpha=1,4$ і становить 531 Дж/м^2 . Збільшення кількості фібри з $0,9$ до $1,6 \text{ кг/м}^3$ призводить до зростання питомих енерговитрат на статичне руйнування на 21% . Загальна характеристика тріщиностійкості, що характеризується питомими енерговитратами ($G_1=537 \text{ Дж/м}^2$, рис. 17, б) на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини (рис. 14, в), максимальна при витраті фібри $1,6 \text{ кг/м}^3$ та середніх значеннях $l_f/d_{max}=0,6$ і $\alpha=1,4$.

Максимальні питомі енерговитрати на локальне статичне деформування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_f), питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування (G_f) та найвищий статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (K_i) відповідають бетону серії 32 (рис. 3.18). Максимальні питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини (G_i) відповідають також бетону серії 32. Ці результати узгоджуються з одержаною міцністю на розтяг при згині.

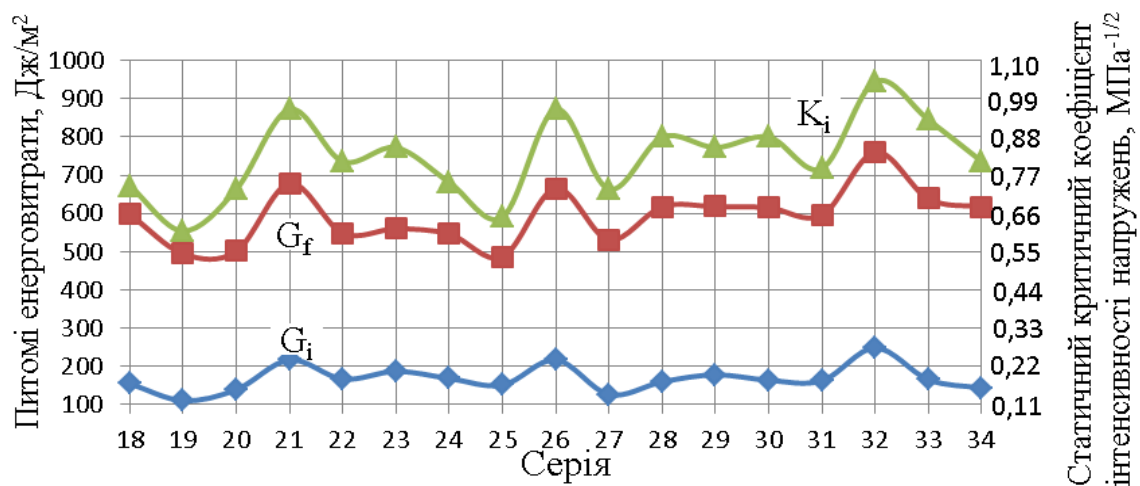


Рисунок 3.18 – Характеристики тріщиностійкості бетонів, дисперсно-армованих поліпропіленовою фіброю типу “мікроарм”

Таким чином, бетон, армований поліпропіленовою фіброю типу “мікроарм”, з витратою фібри $1,35 \text{ кг/м}^3$ в поєднанні зі середнім відношенням довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача 0,6 (відповідає щебеню з максимальним розміром зерна 20 мм) та коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача 1,4 характеризується найвищими міцностями на стиск $f_{\text{cm.cube}}=67,8 \text{ МПа}$, на розтяг при згині $f_{\text{ctfm}}=11,4 \text{ МПа}$ та характеристиками тріщиностійкості $G_i=248,82 \text{ Дж/м}^2$, $G_f=607,58 \text{ Дж/м}^2$, $G_f=248,82 \text{ Дж/м}^2$

Аналіз отриманих результатів досліджень свідчить про необхідність оптимізації вмісту поліпропіленових фібр типу “поліарм” і “мікроарм” в бетонах для забезпечення найвищих показників міцності та тріщиностійкості.

Висновки до розділу 3

1. Армування поліпропіленою фіброю Fibermesh, Enduro HPP45 та базальтовою довжиною 50 мм сприяє зростанню статичних критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень на 48, 21 та 25 % відповідно, що дозволяє витримувати більші критичні навантаження (на 50-1600 Н) до моменту зрушення макротріщини та підвищує ефективність “роботи” бетону в закритичній стадії руйнування. Армовані металевою фіброю бетони демонструють кращу “роботу” на стадії розповсюдження магістральної тріщини ().

2. За результатами досліджень поліпропіленові фіброві волокна Enduro HPP45 (тип “поліарм”) та Fibermesh 150 (тип “мікроарм”) забезпечують найвищі показники міцності ($f_{cm.cube}=57,8$ та $67,8$ МПа, $f_{ctfm}=10,95$ та $11,4$ МПа відповідно) та тріщиностійкості ($G_I=178,17$ та $248,82$ Дж/м², $G_f=890,15$ та $760,88$ Дж/м², $K_I=1,01$ та $1,04$ МПа·м^{1/2} відповідно).

3. Найбільший ефект дисперсного армування поліпропіленою фіброю типу “поліарм” спостерігається в закритичній стадії руйнування: неармований бетон із сформованою макротріщиною чинить слабкий опір руйнуванню і саме на цьому етапі включаються в “роботу” фіброві волокна дисперсно-армованого бетону. Максимальний їх вміст в кількості 10 кг/м³ підвищує питомі енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини на 51%.

4. Загальна тріщиностійкість фібробетону, що характеризується питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування, зростає з підвищенням вмісту фібри типу “поліарм” з 7 до 10 кг/м³ на 44%.

5. На докритичній стадії деформування бетону (до початку зрушення макротріщини) максимальна ефективність дисперсного армування поліпропіленою фіброю типу “мікроарм” досягається за максимального вмісту фібри – 1,8 кг/м³ з використанням щебеню розміром 15 мм та $\alpha=1,7$,

що підтверджується зростанням питомих енерговитрат на статичне деформування на 33%.

6. В закритичній стадії деформування (під час розвитку макротріщини) найкраще чинять опір поширенню макротріщини бетони з максимальним армуванням ($1,8 \text{ кг/м}^3$), крупністю зерен щебеню 30 мм та $\alpha=1,25$ – зростання питомих енерговитрат на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини досягає 29%.

7. Максимальний енергетичний потенціал тріщиностійкості, що чисельно характеризується питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування, досягається в бетонах з витратою фібри $1,6 \text{ кг/м}^3$, максимальним розміром щебеню – 20 мм і коефіцієнтом розсуву – 1,4.

8. В результаті оптимізації за критеріями міцності на згин і характеристик тріщиностійкості встановлено область оптимальних значень досліджуваних технологічних факторів: витрата фібри типу “поліарм” 7-10 кг/м^3 , типу “мікроарм” 1,4-1,6 кг/м^3 бетонної суміші; максимальний розмір щебеню 20 мм і коефіцієнт розсуву зерен крупного заповнювача 1,4. Це свідчить про необхідність оптимізації вмісту фібри в дисперсно-армованих бетонах.

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБКА І ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ БЕТОНІВ З
ПОЛІДИСПЕРСНИМ АРМУВАННЯМ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ

4.1. Розробка і оптимізація складів бетонів з композиційним
димперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та
“мікроарм”

Проведені дослідження показали необхідність комплексного поєднання та оптимізації вмісту в бетоні поліпропіленової фібри типу “поліарм” та “мікроарм”.

Фактори та інтервали варіювання при плануванні трирівневого двохфакторного експерименту наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Фактори та інтервали варіювання

| № фактора | Фактори | | Значення фактора, кг/м ³ бетонної суміші | | | |
|-----------|-------------------------------|------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Натуральний вигляд | Кодований вигляд | нижній рівень “-1” | середній рівень “0” | верхній рівень “+1” | інтервал варіювання |
| 1 | Витрата фібри типу “поліарм” | X ₁ | 8,0 | 10,0 | 12,0 | 2,0 |
| 2 | Витрата фібри типу “мікроарм” | X ₂ | 0,7 | 1,05 | 1,4 | 0,35 |

Матриця плану експерименту включає точки плану N , кожна з яких описує значення вибраних факторів. Для плану другого порядку кожний фактор необхідно планувати не менше ніж на трьох рівнях: верхньому (+1),

середньому (0) та нижньому (-1). Для кожної такої точки необхідно реалізувати експеримент для знаходження значення вихідного параметра (досліджуваної властивості бетону).

Плани експериментів другого порядку складаються з точок ядра плану N_1 , нульових N_0 та “зіркових” точок N_α . Точку плану можна геометрично інтерпретувати як точку у просторі вибраних факторів з відповідними координатами. Тоді точки ядра плану, як правило, описують границі області варіації факторів.

“Зіркові” точки розташовуються всередині цієї області на деякій незмінній відстані α (інтервал варіації). Нульові точки описують середнє значення вибраних факторів і використовуються для визначення експериментальних похибок під час статистичної обробки результатів експерименту.

У практиці досліджень технології бетонів часто використовують ротатабельні плани, плани Бокса-Бенкіна та інші плани. У практиці досліджень технології дорожніх бетонів найчастіше використовують трирівневий план, близький за властивостями до Д-оптимального.

Матриця планування трирівневого двохфакторного експерименту наведена в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Матриця планування трирівневого двохфакторного експерименту

| Точки плану N | | Матриця планування | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------|-------|--|-----|
| | | Кодований вигляд | | Натуральний вигляд | |
| | | X_1 | X_2 | Витрата фібри, кг/м ³ бетонної суміші | |
| типу “поліарм” | типу “мікроарм” | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| N_1 | 1 | +1 | +1 | 12 | 1,4 |
| | 2 | +1 | -1 | 12 | 0,7 |
| | 3 | -1 | +1 | 8 | 1,4 |
| | 4 | -1 | -1 | 8 | 0,7 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|---|----|----|----|------|
| N_{α} | 5 | +1 | 0 | 12 | 1,05 |
| | 6 | -1 | 0 | 8 | 1,05 |
| | 7 | 0 | +1 | 10 | 1,4 |
| | 8 | 0 | -1 | 10 | 0,7 |
| N_0 | 9 | 0 | 0 | 10 | 1,05 |

Для запобігання систематичним помилкам і для рівномірного розподілення або усунення некерованих впливів на весь експеримент (коливання вологості та температури повітря, незначні зміни зернового складу) випробування виконали не за порядком, вказаним у матриці, а у випадковій послідовності.

В результаті статистичної обробки експериментальних результатів отримані рівняння регресії 2-го порядку, які пов'язують критерії оптимізації з обраними технологічними факторами впливу.

Коефіцієнти рівнянь регресії для тривірневого двофакторного плану розраховують за формулами (2.5 – 2.8, [118]).

Як критерії оптимізації обрали:

Y_1 – міцність на стиск, $f_{ck,cube}$, МПа;

Y_2 – міцність на розтяг при згині, f_{ctfm} , МПа;

Y_3 – енерговитрати на мікропластичне і пружне деформування W_i , $H \cdot m \cdot 10^{-2}$;

Y_4 – енерговитрати на локальне статичне деформування в зоні магістральної тріщини W_l , $H \cdot m \cdot 10^{-2}$;

Y_5 – питомі енерговитрати на статичне деформування до моменту руху магістральної тріщини G_i , Дж/м²;

Y_6 – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування G_f , Дж/м²;

Y_6 – статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (в'язкість руйнування) K_i , МПа \cdot м^{1/2}.

Результати реалізації тривірневого двофакторного плану зображені на рис. 4.1 та наведені в табл. 4.3 та 4.4.

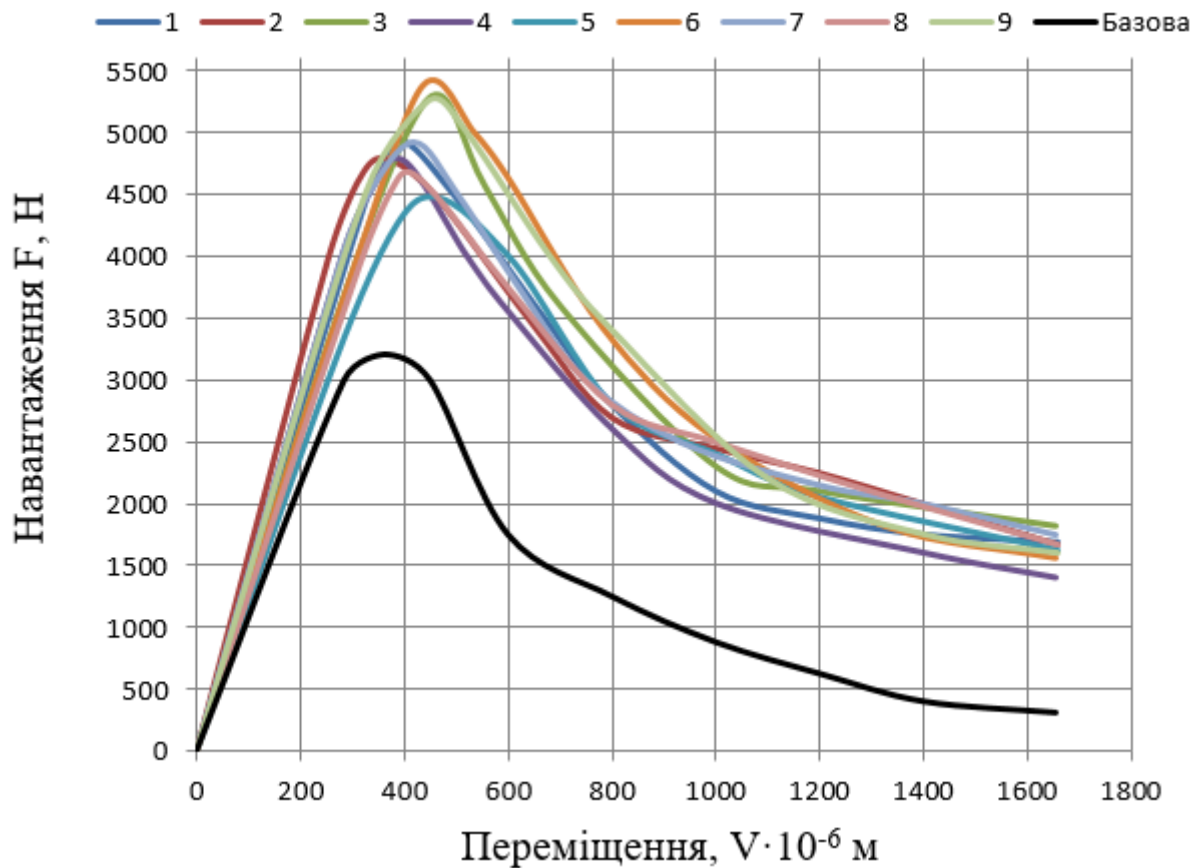


Рисунок 4.1 – ПДС бетонів, неармованих та з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” і “мікроарм”

Побудовані діаграми стану досліджуваних бетонів (рис. 4.1) дають можливість якісно оцінити вплив комбінації поліпропіленових фібр двох різних типів на досліджуванні характеристики бетонів. Для порівняння впливу дисперсного армування на характеристики бетонів досліджено також неармований бетон.

Поєднання двох видів фібр на досліджуваних рівнях показало їх ефективність та дозволило покращити міцнісні та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів.

Таблиця 4.3

Фізико-механічні характеристики бетонів, неармованих та з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” і “мікроарм”

| № точки плану | Міцність на стиск $f_{cm.cube.}$, МПа, у віці, діб | | | Міцність на розтяг при згині f_{ctfm} , МПа | Модуль пружності при згині $E_{tb} \cdot 10^{-3}$, МПа | Статичний розрахунковий модуль пружності бетону E_b , МПа | Критерій крихкості $X_{tb} \cdot 10^{-4}$, м |
|---------------|---|------|------|---|---|---|---|
| | 3 | 7 | 28 | | | | |
| 1 | 34,8 | 46,8 | 67,1 | 10,44 | 97 | 3774 | 241 |
| 2 | 35,5 | 51,1 | 67,0 | 10,15 | 106 | 4354 | 302 |
| 3 | 27,9 | 49,1 | 65,5 | 11,21 | 129 | 3573 | 207 |
| 4 | 30,7 | 47,9 | 65,1 | 10,08 | 117 | 3954 | 245 |
| 5 | 31,4 | 50,1 | 61,5 | 9,43 | 107 | 3232 | 244 |
| 6 | 34,3 | 46,8 | 69,5 | 11,40 | 115 | 3577 | 209 |
| 7 | 31,5 | 45,7 | 52,1 | 10,42 | 129 | 3959 | 254 |
| 8 | 30,0 | 47,3 | 62,1 | 9,87 | 90 | 3456 | 253 |
| 9 | 31,5 | 48,5 | 62,4 | 11,12 | 143 | 3835 | 225 |
| Базова | 26,8 | 45,4 | 51,1 | 6,79 | 71,39 | 2927 | 208 |

Таблиця 4.4

Силкові та енергетичні характеристики тріщиностійкості бетонів, неармованих та з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” і “мікроарм”

| Серія бетону | $W_m \cdot 10^{-2}$, Н·м (S_{OTCA}) | $W_e \cdot 10^{-2}$, Н·м (S_{ACH}) | $W_i \cdot 10^{-2}$, Н·м (S_{OTCH}) | $W_L \cdot 10^{-2}$, Н·м (S_{HCDK}) | G_i , Дж/м ² | G_b , Дж/м ² | G_F , Дж/м ² | G_{CE} , Дж/м ² | J_i , Дж/м ² | K_i , МПа·м ^{1/2} | K_c , МПа·м ^{1/2} |
|--------------|--|---|--|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 12,8 | 89,6 | 102,3 | 329,2 | 171 | 549 | 698 | 123 | 97 | 0,80 | 0,68 |
| 2 | 26,60 | 73,28 | 99,88 | 354,88 | 166 | 591 | 714 | 146 | 106 | 0,85 | 0,80 |

Продовження таблиці 4.4

| | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 3 | 22,51 | 108,88 | 131,39 | 328,11 | 219 | 547 | 728 | 118 | 129 | 0,88 | 0,65 |
| 4 | 29,82 | 79,69 | 109,51 | 298,93 | 183 | 498 | 631 | 142 | 117 | 0,85 | 0,75 |
| 5 | 21,05 | 85,25 | 106,30 | 318,19 | 177 | 530 | 672 | 70 | 107 | 0,76 | 0,48 |
| 6 | 11,93 | 112,47 | 124,40 | 343,25 | 207 | 572 | 760 | 144 | 115 | 0,86 | 0,72 |
| 7 | 34,32 | 85,04 | 119,36 | 332,74 | 199 | 555 | 696 | 192 | 129 | 0,89 | 0,87 |
| 8 | 9,76 | 87,39 | 97,15 | 341,33 | 162 | 569 | 715 | 182 | 90 | 0,75 | 0,79 |
| 9 | 35,10 | 99,91 | 135,00 | 336,35 | 225 | 561 | 727 | 150 | 143 | 0,93 | 0,76 |
| Базова | 18,22 | 48,76 | 66,98 | 147,26 | 112 | 245 | 327 | 35 | 71 | 0,57 | 0,32 |

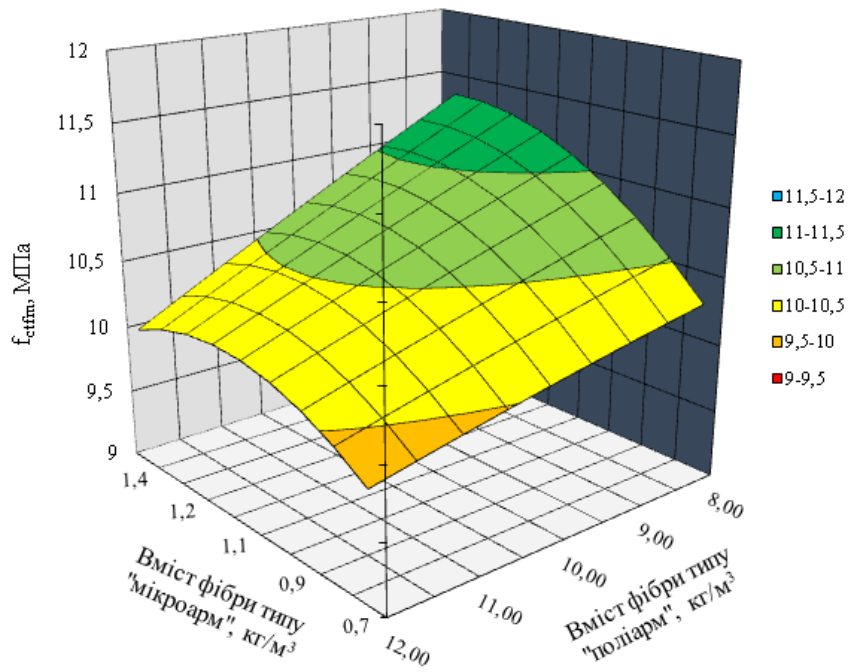
Коефіцієнти рівнянь регресії наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

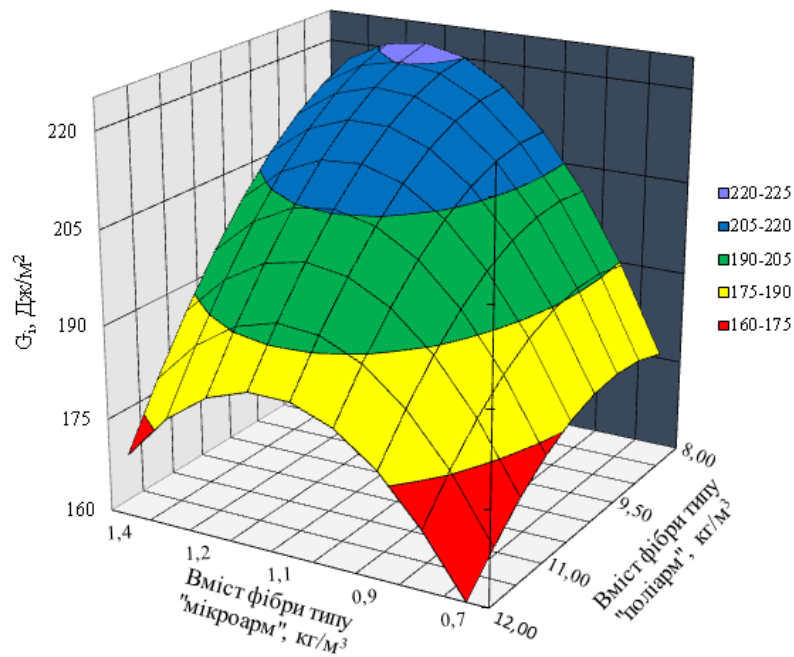
Коефіцієнти рівнянь регресії

| Функції відгуку Y | Коефіцієнти регресії | | | | | |
|---------------------------|----------------------|-------|-------|----------|----------|----------|
| | b_0 | b_1 | b_2 | b_{11} | b_{22} | b_{12} |
| Y_1 | 59,74 | -0,75 | -1,58 | 7,08 | -1,71 | -0,08 |
| Y_2 | 10,66 | -0,45 | 0,33 | -0,02 | -0,29 | -0,21 |
| Y_3 | 125,15 | -9,47 | 7,75 | -4,87 | -11,97 | -4,87 |
| Y_4 | 337,96 | 5,33 | -0,85 | -8,05 | -1,73 | -13,72 |
| Y_5 | 208,44 | -15,8 | 13,0 | -8,17 | -19,67 | -7,75 |
| Y_6 | 727,78 | -5,83 | 10,3 | -12,17 | -22,67 | -28,25 |

Побудова поверхонь відгуку (рис. 4.2-4.3) здійснювалась з використанням алгоритму табуляції функцій на заданій двовимірній сітці факторних значень.



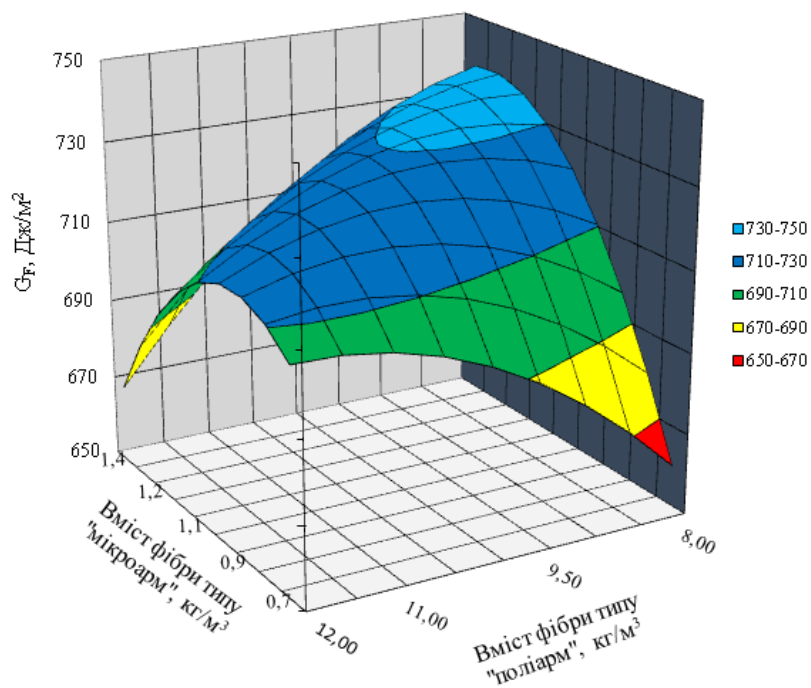
а



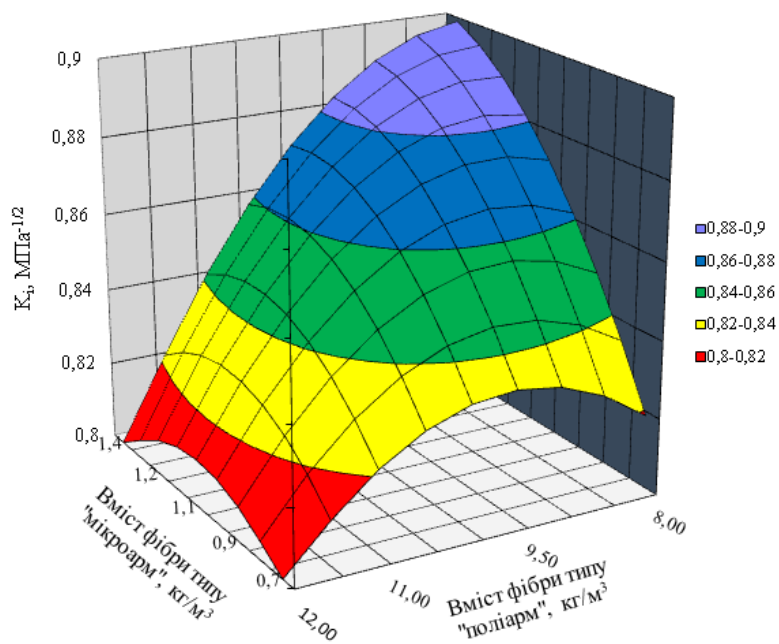
б

Рисунок 4.2 – Поверхні відгуку характеристик бетонів з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”:

а – міцність на розтяг при згині; б – питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини



а



б

Рисунок 4.3 – Поверхні відгуку характеристик бетонів з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”:

- в – питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування;
- г – статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень

Аналіз поверхонь відгуків (рис. 4.2-4.3) дає змогу визначити області оптимальних значень технологічних факторів впливу, які забезпечують максимальні показники критеріїв оптимізації. Екстремуми досліджуваних характеристик оптимального складу бетону - міцність на розтяг при згині (11,4 МПа), питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини (207 Дж/м²), питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування (760 Дж/м²) та статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (0,86 МПа^{-1/2}), досягаються при комплексному поєднанні поліпропіленових фібр типу “поліарм” та “мікроарм” в кількості 8 та 1,05 кг/м³ відповідно. Значення міцності на розтяг при згині, питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини, питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування та статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень перевищують відповідні показники для неармованого бетону відповідно на 68; 85; 132 та 51%.

Коефіцієнт ефективності дисперсного армування (рис. 4.4) усіх бетонів, армованих поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” вищий порівняно з неармованим. Коефіцієнт ефективності дисперсного армування розробленого оптимального складу бетону з композиційним полідисперсним армуванням більший, ніж неармованого бетону на 32%.

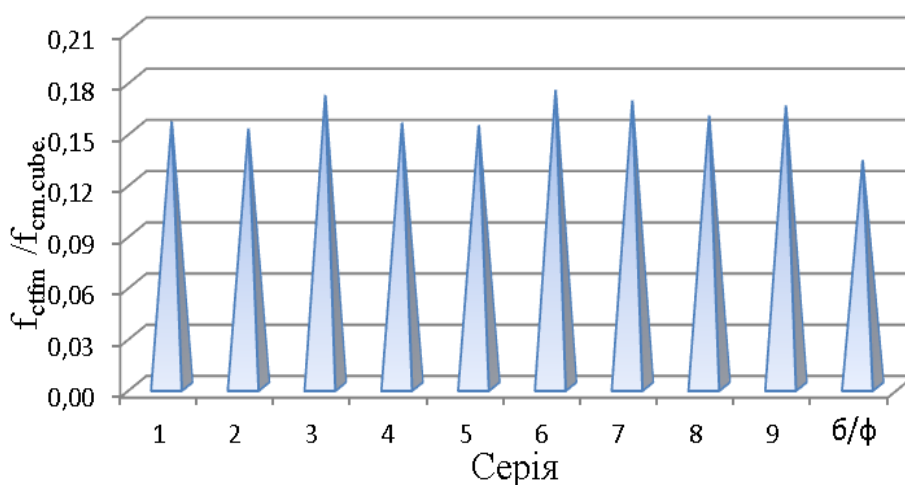


Рисунок 4.4 – Коефіцієнт ефективності композиційного дисперсного армування бетонів поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”

4.2 Деформації усадки

Деформації усадки займають важливе місце серед властивостей бетону і впливають на якість і довговічність конструкцій та споруд.

Деформації усадки бетону визначали на зразках-призмах розміром $0,1 \times 0,1 \times 0,51$ м з точністю вимірювань $0,01$ мм компаратором швейцарської фірми “Amsler”, який має в комплекті еталон з інвару для урахування температурних деформацій. Металеві анкери замоноличувались в зразок під час формування. Вимірювання деформацій виконували у горизонтальному положенні. В процесі досліджень одночасно проводили заміри температури, відносної вологості повітря в лабораторії, маси і деформацій зразків, деформацій температурного еталону.

Деформації усадки дисперсно-армованих бетонів наведено на рис. 4.5. Результати досліджень свідчать, що стабілізація деформації усадки розробленого бетону з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” відбувається через 22 доби, в той час як для неармованого бетону – через 32 доби, а відносні деформації зменшуються на 26%.

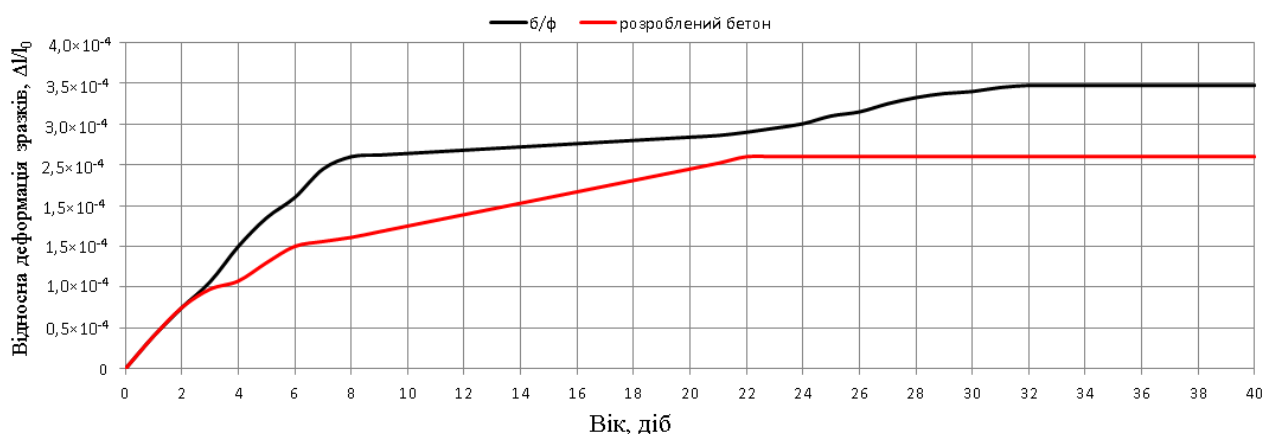


Рисунок 4.5 – Деформації зсідання неармованого та розробленого бетону з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”

4.3. Мікроструктура дисперсно-армованого бетону

Вивчення кінетики процесів гідратації і тверднення, генезису мікроструктури цементного каменю з дисперсним армуванням має велике значення для наукового прогнозування властивостей та довговічності фібробетонів.

Метод електронної мікроскопії дає уявлення про формування структури цементного каменю, в тому числі і дисперсно-армованого поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”, та дозволяє глибше вивчити процеси, що відбуваються при твердненні бетону.

Як видно з рис. 4.6, мікроструктура розробленого бетону характеризується різноманітністю кристалічних форм і в багатьох місцях спостерігається велика кількість дрібних голчастих кристалів гідросилікатів кальцію.

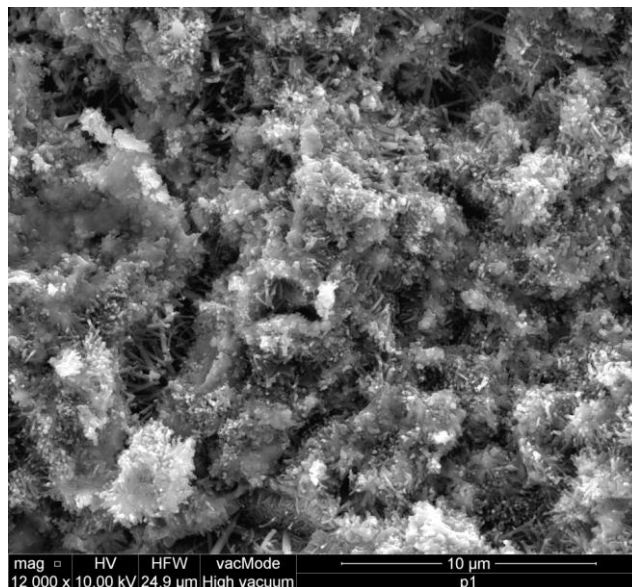


Рисунок 4.6 –Мікроструктура з численними дрібними голчастими кристалами гідросилікатів кальцію цементної матриці з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”, гідратованої 28 діб в нормальних умовах

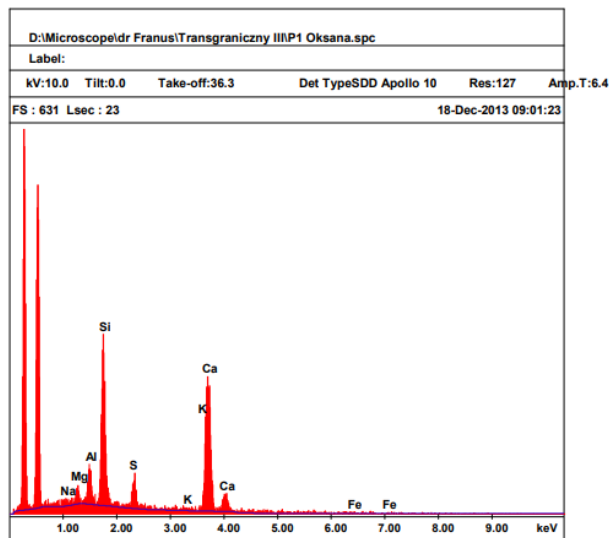


Рисунок 4.7 – Спектр рентгенівського випромінювання цементної матриці (з кристалами гідросилікатів кальцію) з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”, гідратованої 28 діб в нормальних умовах

В деяких місцях чітко простерігаються довгі видовжені кристали AF_t -фази – гідросульфоалюмінату кальцію (рис. 4.8, 4.9). Збільшення міцності каменю відбувається за рахунок його ущільнення при твердненні і розвитку кристалізаційних контактів між утвореними гідратними фазами.

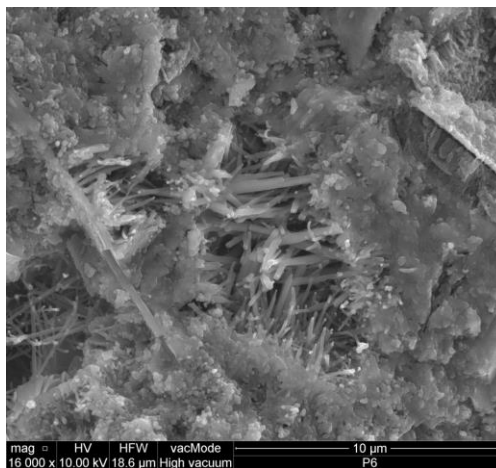


Рисунок 4.8 – Мікроструктура з кристалами гідросульфоалюмінату кальцію AF_t -фази цементної матриці з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”, гідратованої 28 діб в нормальних умовах

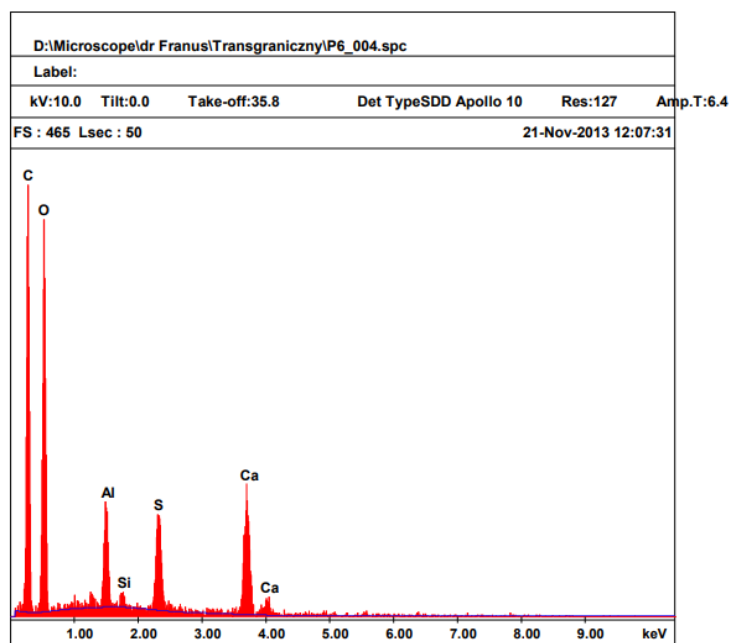


Рисунок 4.9 – Спектр рентгенівського випромінювання цементної матриці (кристалами гідросульфалюмінату кальцію AF_1 -фази) з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”, гідратованої 28 діб в нормальних умовах

Аналіз мікроструктури полідисперсного бетону також свідчить, що використання поліпропіленових фібр дозволє отримати ефект “містка” (рис. 4.10, 4.11), який сповільнює розвиток макротріщини в докритичній стадії деформування та чинить опір дефрагментації в закритичній стадії руйнування полідисперсноармованих бетонів, що забезпечує високі показники міцності на розтяг при згині та характеристики тріщиностійкості розроблених бетонів. Тому деструктивні процеси протікають в значно меншій мірі і бетон характеризується більш стабільними експлуатаційними властивостями.

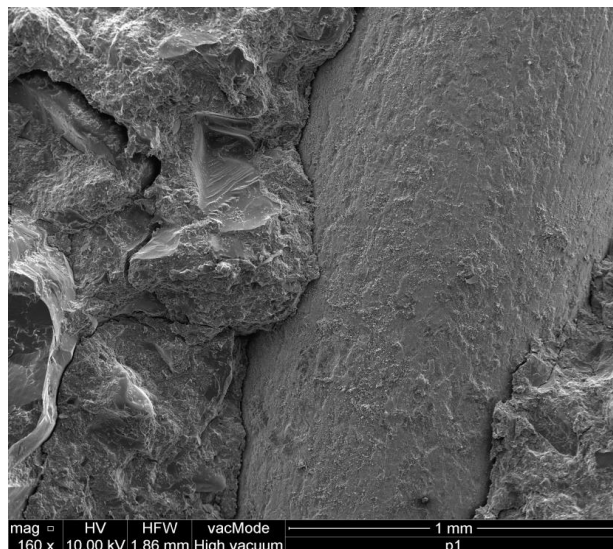
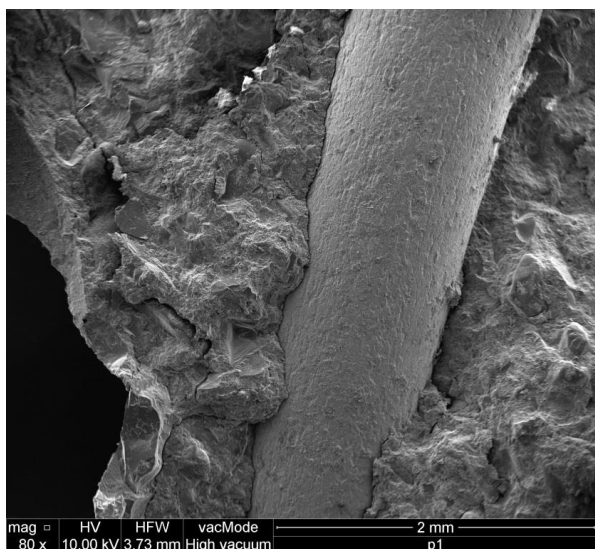


Рисунок 4.10 – Загальний вигляд поліпропіленових фібрових волокон типу “поліарм” в складі цементної матриці полідисперсно-армованих бетонів

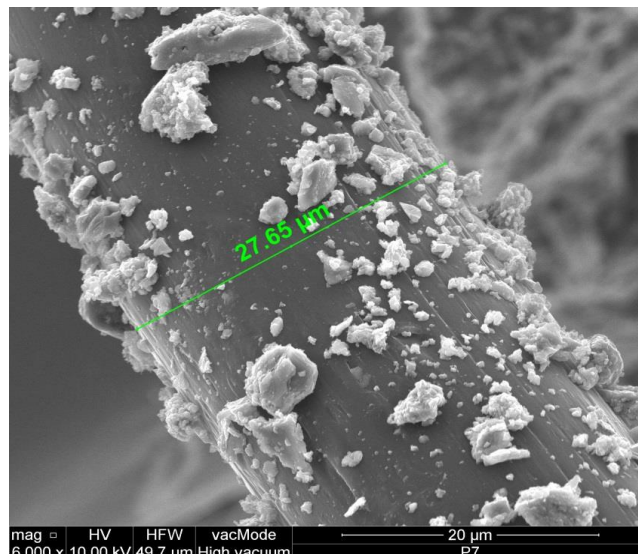
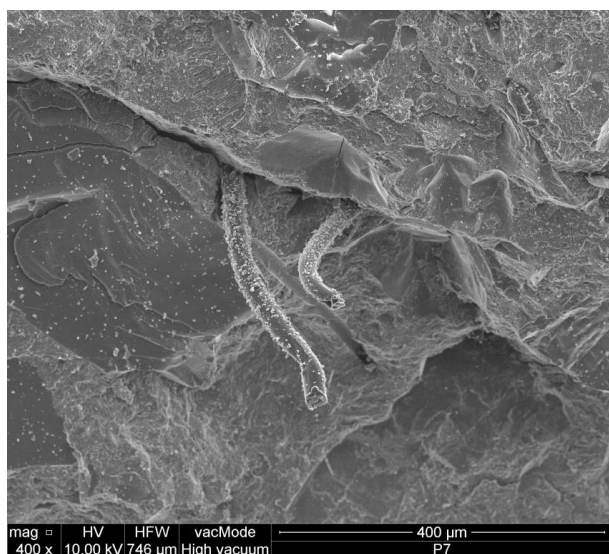


Рисунок 4.11 – Загальний вигляд поліпропіленових фібрових волокон типу “мікроарм” в складі цементної матриці полідисперсно-армованих бетонів

4.4 Фізико-механічні та будівельно-технічні властивості бетонів

Можливість широкого використання розроблених бетонів в технології дорожнього будівництва значною мірою визначається будівельно-технічними та експлуатаційними властивостями. Тому незаперечний практичний інтерес представляє їх вивчення в полідисперсно-армованих бетонах.

Будівельно-технічні властивості неармованого бетону та бетону з композиційним полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” і “мікроарм” наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Будівельно-технічні властивості неармованого бетону та бетону з композиційним полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”

| Показник | Одиниці вимірювання | Значення показника для бетону | |
|--|---------------------|-------------------------------|---|
| | | неармованого | з композиційним полідисперсним армуванням |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Міцність на стиск, f_{cm} , у віці 28 діб | МПа | 51,1 | 62,4 |
| Міцність на розтяг при згині, f_{ctfm} , у віці 28 діб | МПа | 6,79 | 11,40 |
| Водопоглинання за масою, W_m | % | 2,1 | 2,3 |
| Зниження міцності після 400 циклів заморожування – відтавання, Δf_{cm} | % | 12,3 | 9,8 |
| Стираність | г/см ² | 0,27 | 0,22 |
| Питомі енерговитрати на початок статичного руйнування, G_i | Дж/м ² | 112 | 207 |

Продовження таблиці 4.6

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---------------------------------|------|------|
| Загальні питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування, G_F | Дж/м^2 | 327 | 760 |
| В'язкість руйнування, K_i | $\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ | 0,57 | 0,86 |

З табл. 4.6 видно, що міцність на стиск та на розтяг при згині розробленого бетону перевищує відповідні значення для неармованого бетону на 22 та 68 %.

Водопоглинання за масою суттєво не відрізняється. В той же час, зниження міцності після 400 циклів заморожування – відтавання становить для армованого та неармованого бетонів 9,8 та 12,3% відповідно, що зумовлено ефективною роботою фібрових волокон при появі внутрішніх напружень в бетоні внаслідок замерзання рідкої фази. Спостерігається зменшення стираності на 19% при полідисперсному армуванні та суттєве зростання енергетичних характеристик тріщиностійкості.

Висновки до розділу 4

1. Дисперсне армування бетону з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами “поліарм” та “мікроарм” збільшує показники міцності на стиск на 20-31 % та міцності на розтяг при згині на 39-68 %.

2. Композиційне дисперсне армування спричиняє значне збільшення опору бетону при руйнуванні відповідно до енергетичних критеріїв механіки руйнування.

3. Методами математичного планування експерименту встановлено, що в розроблених дисперсно-армованих бетонах максимальні значення міцностей та характеристик тріщиностійості досягаються при полідисперсному армуванні поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” в кількості 8 кг/м³ бетонної суміші та типу “мікроарм” – 1,05 кг/м³. Значення міцності на розтяг при згині, питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини, питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування та статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень перевищують відповідні показники для неармованого бетону відповідно на 68, 85, 132 та 51%.

5. Стабілізації зсідання розробленого бетону з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” відбувається через 22 доби, в той час як для неармованого бетону – через 32 доби, а відносні деформації зменшуються на 26%.

6. Дослідженнями будівельно-технічних та експлуатаційних властивостей показано, що розроблений полідисперсно-армований бетон порівняно з неармованим характеризується на 22 та 68 % вищими показниками міцності на стиск та на розтяг при згині відповідно. Зниження міцності після 400 циклів заморожування – відтавання становить для армованого та неармованого бетонів 9,8 та 12,3% відповідно. Стираність зменшується на 19% та суттєво покращуються характеристики

тріщиностійкості. Це свідчить про ефективність полідисперсного армування бетонів поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” та можливість їх широкого використання в дорожньому будівництві.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Економічна ефективність влаштування покриття із застосуванням дисперсно-армованих бетонів

Основний економічний ефект від впровадження високоміцних бетонів при будівництві дорожнього покриття буде забезпечений за рахунок зменшення товщини плити з розробленого високоміцного бетону порівняно з традиційним, і, відповідно зниження витрат на матеріали, виробництво бетонної суміші, її доставку та укладання. Тому для визначення економічного ефекту потрібно знайти, яку мінімальну товщину плити з розробленого цементобетону можливо сконструювати із забезпеченням необхідних коефіцієнтів міцності.

Згідно ГБН В.2.3-37641918-557:2016 “Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування”, цементобетонне дорожнє покриття розраховується з урахуванням складу транспортного потоку, очікуваної інтенсивності руху до реконструкції, ґрунтово-кліматичних умов. Розрахунок проводиться по граничних станах, які визначають втрати несучої здатності, виходячи з розрахункових схем і використовуючи нормовані розрахункові характеристики. Розрахунок проводиться за допомогою оцінки характеристик заздалегідь розробленого пакету дорожнього покриття:

- міцність верхніх шарів дорожнього покриття;
- стійкість незв'язних матеріалів в шарах основи і земляного полотна на зсув і накопичення уступів в поперечних швах шару бетону;

- стійкість дорожнього одягу до впливу дії заморожування-відтавання;

- здатність дренажного шару базового шару видалити вологу.

Жорсткі покриття обчислюються на основі надійності. Допустимий (необхідний) коефіцієнт надійності (K_n), який визначає мінімальне значення коефіцієнта міцності ($K_{мц}$), який дорожній одяг повинен мати до кінця терміну служби між капітальним ремонтом, нормалізується в залежності від категорії дороги .

Вхідні дані для розрахунку покриття включають:

- параметри транспортного навантаження (розрахункова інтенсивність, розрахункове навантаження);

- параметри дороги (категорія, ширина дорожнього полотна, термін служби дорожнього покриття);

- параметри земляного полотна та умови його роботи (тип місцевості за зволоженням, типи ґрунтів, рівень підземних вод);

- кліматичний регіон.

Проте ГБН не враховує напруження, що виникають на краю плити, а також напруження короблення, які зростають із зменшенням товщини, тому доцільно проводити також розрахунок альтернативним методом, зокрема методом Вестергаарда.

Загальні положення розрахунку покриття згідно методу Вестергаарда :

1. Транспортні навантаження

Параметр реакції основи:

$$k_z = \frac{E_{zast}}{\omega 2a(1-\mu_{gr}^2)},$$

де, E_{zast} – еквівалентний модуль пружності основи, МПа

ω – коефіцієнт надійності

a – радіус відбитку колеса

μ_{gr} – коефіцієнт Пуассона для ґрунту, $\mu_{gr} = 0,3$

Радіус відносної жорсткості плити

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_b \cdot h^3}{12(1 - \mu^2)k_z}}$$

де, E_b і μ - модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для бетону;

μ_0 - коефіцієнт Пуассона для матеріалу під ц/б плитою;

Оскільки дорожня плита має кінцеву довжину і ширину, то характер або інтенсивність максимального навантаження, викликані прикладанням даного транспортного навантаження, залежать від розташування навантаження на поверхні дорожнього покриття. Існують три типові місця розташування: внутрішнє, край і кут, де існують різні умови безперервності плит. Ці місця називаються позиціями критичного навантаження.

Коли внутрішня точка завантажується, тільки невелика площа покриття не піддається згинальному моменту. Вестергаард дає співвідношення для еквівалентного радіуса опорної ділянки в рівнянні

$$b = \begin{cases} \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675 h & \text{if } a < 1.724 h \\ a & \text{otherwise} \end{cases}$$

де a - радіус розподілу навантаження колеса, м і h - товщина плити, м.

Напруження, відповідно в середині, на краю і на куті плити:

$$\sigma_1 = \frac{0.275P}{h^2} (1 + \mu) \left[\log \frac{Eh^3}{kb^4} - 54.54 \left(\frac{i}{L} \right)^2 z \right];$$

$$\sigma_2 = \frac{0.529P}{h^2} (1 + 0.54\mu) \left(\log \frac{Eh^3}{kb^4} - 0.71 \right);$$

$$\sigma_3 = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{1}{i^4} \right)^{0.15} \cdot (a\sqrt{2})^{0.6} \right];$$

де h - товщина плити, см, P - навантаження колеса, МН, a - радіус прикладання навантаження колеса, м, i - радіус відносної жорсткості, м; b - радіус ділянки опору, м

Коефіцієнт забезпечення

$$n = R_{zg} / \sigma_n.$$

2. Температурні напруження

На краю плити

$$\sigma = \frac{CE\alpha_T\Delta T}{2}$$

Посередині плити

$$\sigma_1 = \frac{E\alpha_T\Delta T}{2} \left(\frac{C_1 + \mu C_2}{1 - \mu^2} \right)$$

$$\sigma_2 = \frac{E\alpha_T\Delta T}{2} \left(\frac{C_2 + \mu C_1}{1 - \mu^2} \right)$$

Де α_T коефіцієнт теплового розширення бетону, $1,2 \cdot 10^{-5}$, C_1, C_2 – дирекційні коефіцієнти (з номограми Рисунок 5.2.1), L_x і L_y - довжина і ширина плити, l - радіус відносної жорсткості.

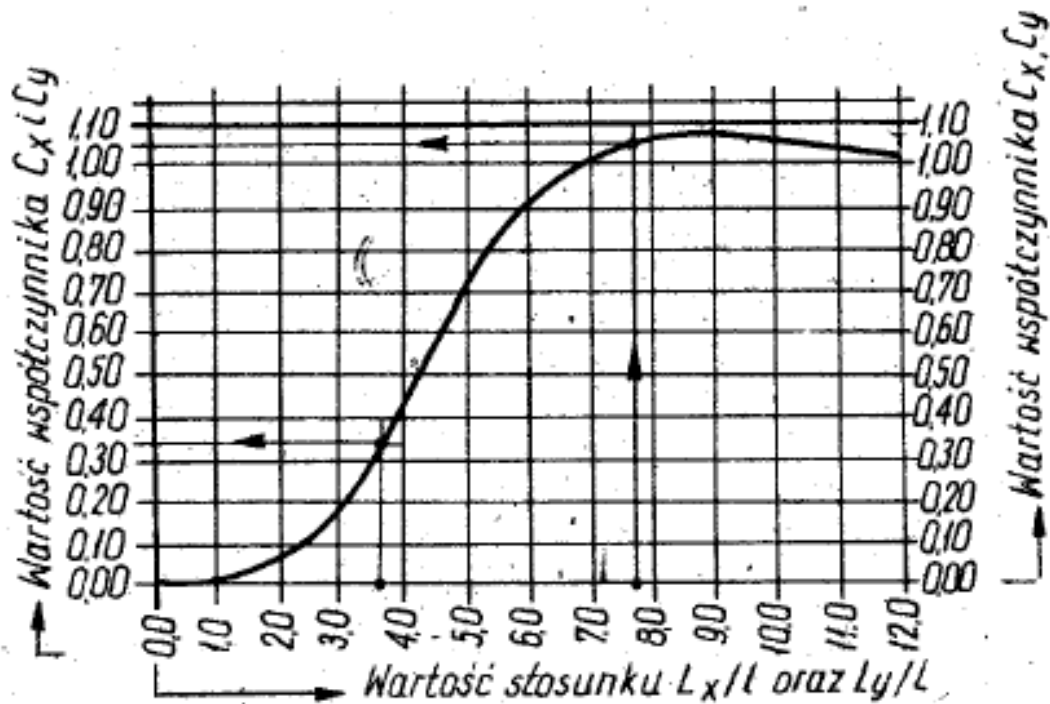


Рисунок 5.1 - Дирекційні коефіцієнти температурних напружень

3. Загальні напруження

$$\sigma_{CALK} = \sigma_{RUCH} + \sigma_{TEMP} \cdot \alpha$$

де, $\alpha = 0,5..0,6$

σ_{RUCH} – транспортні навантаження, МПа

σ_{TEMP} – температурні навантаження, МПа

Допустимі загальні напруження, МПа

$$\sigma_{DOP} = \frac{R_{zg}}{n}$$

R_{zg} – міцність бетону на розтяг при згині, МПа

$n = 1,4..1,8$ – коефіцієнт забезпечення

Розрахунок проведено для таких бетонів: неармований – традиційний дорожній цементобетон $R_{tb}=6,79$ МПа; з композиційним армуванням – розроблений бетон, $R_{tb}=11,4$ МПа.

Результати розрахунку бетонної плити покриття згідно ГБН та методом Вестергаарда наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Результати розрахунку бетонної плити покриття

| Стандарт | ГБН | | Метод Вестергаарда | | Відмітки |
|-------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|---|
| | Неармований, h=25см | З композиційним армуванням, h=18см | Неармований, h=25см | З композиційним армуванням, h=18см | |
| Транспортні навантаження, МПа | 3,46 | 5,62 | 0,70 | 1,32 | Внутрішній |
| | | | 1,13 | 2,09 | Край |
| | | | 1,59 | 3,45 | Кут |
| Температурні навантаження, МПа | 3,10 | 2,17 | 2,04 | 3,16 | Поздовжній |
| | | | 2,18 | 3,38 | Поперечний |
| Розрахунковий коефіцієнт надійності | 2,77 | 3,12 | 3,33 | 6,11 | Для методу Вестергаарда – розрахункові та допустимі навантаження, МПа |
| Необхідний коефіцієнт надійності | 1,39 | 1,39 | 2,35 | 3,98 | |

Для визначення економічного ефекту від використання розробленого дисперсно-армованого бетону, було розраховано вартість суміші (табл. 5.2).

Економічний ефект розраховано як різницю між вартістю влаштування 1000 м^2 покриття товщиною 18 см розробленого бетону та 25 см традиційного бетону за допомогою програми АВК-5. Вартість традиційного бетону прийнята на рівні 1900 грн/м^3 . Результати розрахунку представлені у табл. 5.3-5.6. Розрахований економічний ефект від впровадження технології при будівництві 1000 м^2 складає 12 тис.грн.

Таблиця 5.2

Вартість 1м³ бетонної суміші

| №п.п. | Матеріал | Витрата | Ціна | Енергоресурси |
|-------|-------------------------------|---------|--------------------------------|--|
| 1 | Цемент ПЦ II/A-III-500 | 350 кг | 910 грн | Час перемішування компонентів бетонної суміші 20 хв. Додатковий час на перемішування компонентів з фіброю 5хв Потужність двигуна Бетономішалки 3кВт |
| 2 | Вода | 154 л | 2,31 грн | |
| 3 | Пісок | 690 кг | 314 грн | |
| 4 | Щебінь | 1247 кг | 574 грн | |
| 5 | Пластифікатор Liquol BV 18 | 2,45 кг | 184 грн (75,1 грн/кг) | |
| 6 | Фібра типу “мікроарм” | 1,05 кг | 116,55 грн (111 грн/кг) | |
| 7 | Фібра типу “поліарм” | 8 кг | 1232,30 грн (154,03 грн/кг) | |
| Σ | | | 3333,16 грн | 57 грн |
| Σ | | | 3392,16 грн | |

Таблиця 5.3

Калькуляція вартості 1000 м² покриття товщиною 250 мм із традиційної цементобетонної суміші

| № п/п | Шифр ресурсу | Найменування | Одиниця виміру | Кількість | Поточна ціна за одиницю, грн. | в тому числі: | | | Обґрунтування ціни | |
|-------|--------------|--|----------------|-----------|-------------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------|--|
| | | | | | | відпускна ціна, грн. | транспортна складова, грн. | заготівельно-складські витрати, грн. | | |
| | | | | | | всього, грн. | всього, грн. | всього, грн. | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6/7 | 8/9 | 10/11 | 12/13 | 14 | |
| | | <u>I. Витрати труда</u> | | | | | | | | |
| 1 | 1 | Витрати труда робітників-будівельників | люд-год | 67,38 | 54,27 | | | | | |
| 2 | | Середній розряд робіт, що виконуються робітниками-будівельниками | розряд | 2,9 | | | | | | |
| 3 | | Витрати труда робітників, зайнятих керуванням та обслуговуванням машин | люд-год | 56,74 | 23,46 | | | | | |
| 4 | | Середній розряд ланки робітників, зайнятих керуванням та обслуговуванням машин | розряд | 4,8 | | | | | | |
| 5 | | Витрати труда робітників, заробітна плата яких враховується в складі: | | | | | | | | |
| 5.1 | | загальновиробничих витрат | люд-год | 16,38 | 95,86 | | | | | |
| | | Разом кошторисна трудомісткість | люд-год | 140,5 | | | | | | |
| | | Середній розряд робіт | розряд | 2,9 | | | | | | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6/7 | 8/9 | 10/11 | 12/13 | 14 |
|---|-----------|---|---------|------|--------------------------|-----|-------|-------|----|
| | | <u>II. Будівельні машини і механізми</u> | | | | | | | |
| 6 | CH201-12 | Автомобілі бортові, вантажопідйомність 5 т | маш-год | 4,52 | <u>106,14</u> 479,75 | | | | |
| 7 | CH206-340 | Екскаватори одноковшові дизельні на пневмоколісному ході, місткість ковша 0,65 м3 | маш-год | 5,06 | <u>221,25</u> 1119,53 | | | | |

Продовження таблиці 5.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6/7 | 8/9 | 10/11 | 12/13 | 14 |
|----|--------------|---|-------------|---------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|--------|
| 8 | CH212-1303 | Нарізувачі поздовжніх та поперечних швів у бетоні, що затужавів | маш-год | 7,1 | <u>389,2</u> 2763,32 | | | | |
| 9 | CH212-1306 | Машина для нанесення плівкоутворювальних матеріалів | маш-год | 2,63 | <u>163,79</u> 430,77 | | | | |
| 10 | CH212-1601 | Машина поливально-мийні, місткість 6000 л | маш-год | 7,34 | <u>238,64</u> 1751,62 | | | | |
| 11 | CH212-2143 | Бетоноукладальник, продуктивність 80 м3/год | маш-год | 5,06 | <u>372,78</u> 1886,27 | | | | |
| 12 | C331-38-2 | Перевезення бетону, розчину спецтранспортом на відстань 30 км | т | 600 | <u>134,21</u> 80526,00 | | | | |
| | | Разом по розділу II в тому числі енергоносії: | грн. | | 88957,26 | | | | |
| | | Бензин | кг | 81,258 | | | | | |
| | | Дизельне паливо | кг | 149,548 | | | | | |
| | | Мастильні матеріали | кг | 13,011 | | | | | |
| | | Гідравлічна рідина | кг | 2,125 | | | | | |
| | | <u>IV. Будівельні матеріали, вироби і конструкції</u> | | | | | | | |
| 13 | C111-1580 | Плівкоутворювальні матеріали для дорожніх робіт ПМ-100А | т | 0,41 | <u>6765,36</u> 2773,80 | <u>6420,99</u> 2632,61 | <u>211,72</u> 86,81 | <u>132,65</u> 54,38 | 30 км. |
| 14 | +C1424-11603 | Суміші бетонні готові важкі, клас бетону В35 [М450], крупність заповнювача більше 20 до 40 мм | м3 | 265,2 | <u>1900</u> 503880,00 | <u>1900</u> 503880,00 | - - | - - | |
| | | Разом по розділу IV Підсумкові витрати енергоносіїв для усіх машин | грн. | | 510645,36 | 510645,36 | 86,81 | 54,38 | |
| | | Мастильні матеріали | кг | 13,011 | | | | | |
| | | Гідравлічна рідина | кг | 2,125 | | | | | |
| | | Бензин | л | 109,808 | | | | | |
| | | Дизельне паливо | л | 175,939 | | | | | |

Таблиця 5.4

Калькуляція вартості 1000 м кв покриття товщиною 250 мм із традиційної цементобетонної суміші

| N п / п | Обґрунтування (шифр норми) | Найменування робіт і витрат | Одиниця виміру | Кількість | Вартість одиниці, грн. | | Загальна вартість, грн. | | | Витрати труда робітників, люд.-год. | |
|------------------|----------------------------------|--|-------------------|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------------|---|------------------------------|
| | | | | | Всього | експлуатації машин | Всього | заробітної плати | експлуатації машин | не зайнятих обслуговуванням машин | |
| | | | | | | | | | | тих, що обслуговують машини | |
| | | | | | заробітної плати | в тому числі заробітної плати | в тому числі заробітної плати | на одиницю | всього | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | C331-38-2 | Перевезення бетону, розчину спецтранспортом на відстань 30 км | т | 600 | <u>134,21</u> - | <u>134,21</u> - | 80526 | - | <u>80526</u> - | - | - |
| 2 | ЕН27-30-1 | Улаштування цементнобетонного покриття товщиною 26 см бетоноукладальником при ширині укладання 6 м | 1000 м2 | 1 | <u>518908,48</u> <u>3656,71</u> | <u>8524,66</u> <u>1345,29</u> | 518908.48 | 3657 | <u>8525</u> <u>1345</u> | <u>67,38</u> <u>57,3479</u> | <u>67,38</u> <u>57,35</u> |

Продовження таблиці 5.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|-----------|---|---------|----|-------------------|----------------------|---------------|------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 3 | ЕН27-30-5 | Улаштування цементнобетонного покриття товщиною 26 см бетоноукладацьником, при зміні товщини на кожні 0,5 см додавати або виключати до норм 27-30-1 – 27-30-4 | 1000 м2 | -2 | <u>46,70</u> - | <u>46,70</u> 6,99 | -93 | - | <u>-93</u> -14 | <u>-</u> 0,3048 | <u>-</u> -0,61 |
| | | Разом прямі витрати по кошторису | | | | | 519001 | 3657 | <u>88958</u> 1331 | | <u>67,38</u> 56,74 |
| | | Разом будівельні роботи, грн. в тому числі: | | | | | 519001 | | | | |
| | | вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн. | | | | | 510654 | | | | |
| | | всього заробітна плата, грн. | | | | | 4988 | | | | |
| | | Загальновиробничі витрати, грн. | | | | | 3460 | | | | |
| | | трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год. | | | | | 16,38 | | | | |
| | | заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн. | | | | | 1570 | | | | |
| | | Всього будівельні роботи, грн. | | | | | 594572 | | | | |
| | | ----- | | | | | | | | | |
| | | ----- | | | | | | | | | |
| | | Всього по кошторису | | | | | 594572 | | | | |
| | | Кошторисна трудомісткість, люд.год. | | | | | 140,5 | | | | |
| | | Кошторисна заробітна плата, грн. | | | | | 6558 | | | | |

Продовження таблиці 5.4

| | | |
|------------------------------|--|---------------|
| | Разом по главах 1-12: | 594572 |
| ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.5.8.16 | Кошторисний прибуток (П) | 537 |
| ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.5.8.16 | Кошти на покриття адміністративних витрат будівельних організацій (АВ) | 214 |
| | Разом (гл. 1-12 + П + АВ + Р + І) | 595323 |
| | Разом: | 595323 |
| | Податок на додану вартість | 199065 |
| | Всього по зведеному кошторисному розрахунку | 714388 |

Таблиця 5.5

Калькуляція вартості 1000 м кв покриття товщиною 180 мм із цементобетонної суміші з покращеними властивостями

| № п/п | Шифр ресурсу | Найменування | Одиниця виміру | Кількість | Поточна ціна за одиницю, грн. | в тому числі: | | | Обґрунтування ціни |
|-------|--------------|--|----------------|-----------|-------------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| | | | | | | відпускна ціна, грн. | транспортна складова, грн. | заготівельно-складські витрати, грн. | |
| | | | | | всього, грн. | всього, грн. | всього, грн. | всього, грн. | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6/7 | 8/9 | 10/11 | 12/13 | 14 |
| | | I. Витрати труда | | | | | | | |
| 1 | 1 | Витрати труда робітників-будівельників | люд-год | 67,38 | 54,27 | | | | |
| 2 | | Середній розряд робіт, що виконуються робітниками-будівельниками | розряд | 2,9 | | | | | |
| 3 | | Витрати труда робітників, зайнятих керуванням та обслуговуванням машин | люд-год | 50,64 | 23,53 | | | | |
| 4 | | Середній розряд ланки робітників, зайнятих керуванням та обслуговуванням машин | розряд | 4,7 | | | | | |
| 5 | | Витрати труда робітників, заробітна плата яких враховується в складі: | | | | | | | |
| 5.1 | | загальновиборничих витрат | люд-год | 15,57 | 95,90 | | | | |
| | | Разом кошторисна трудомісткість | люд-год | 133,59 | | | | | |
| | | Середній розряд робіт | розряд | 2,9 | | | | | |

Продовження таблиці 5.5

| II. Будівельні машини і механізми | | | | | |
|--|-----------|---|---------|------|---------------|
| 6 | CH201-12 | Автомобілі бортові, вантажопідйомність 5 т | маш-год | 4,52 | <u>106,14</u> |
| | | | | | 479,75 |
| 7 | CH206-340 | Екскаватори одноковшові дизельні на пневмоколісному ході, місткість ковша 0,65 м3 | маш-год | 5,06 | <u>221,25</u> |
| | | | | | 1119,53 |

Продовження таблиці 5.5

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6/7 | 8/9 | 10/11 | 12/13 | 14 |
|----|------------|---|-------------|---------|---------------------------|-----|-------|-------|----|
| 8 | CH212-1303 | Нарізувачі поздовжніх та поперечних швів у бетоні, що затужавів | маш-год | 4,7 | <u>389,2</u> 1829,24 | | | | |
| 9 | CH212-1306 | Машини для нанесення плівкоутворювальних матеріалів | маш-год | 2,63 | <u>163,79</u> 430,77 | | | | |
| 10 | CH212-1601 | Машини поливально-мийні, місткість 6000 л | маш-год | 7,34 | <u>238,64</u> 1751,62 | | | | |
| 11 | CH212-2143 | Бетоноукладальник, продуктивність 80 м3/год | маш-год | 5,06 | <u>372,78</u> 1886,27 | | | | |
| 12 | C331-38-2 | Перевезення бетону, розчину спецтранспортом на відстань 30 км | т | 360 | <u>134,21</u> 48315,60 | | | | |
| | | Разом по розділу II в тому числі енергоносії: | грн. | | 55812,78 | | | | |
| | | Бензин | кг | 81,258 | | | | | |
| | | Дизельне паливо | кг | 143,668 | | | | | |
| | | Мастильні матеріали | кг | 12,675 | | | | | |
| | | Гідравлічна рідина | кг | 2,125 | | | | | |

Продовження таблиці 5.5

| | | <u>IV. Будівельні матеріали, вироби і конструкції</u> | | | | | | | |
|----|--------------|---|-------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|--------|
| 13 | C111-1580 | Плівкоутворювальні матеріали для дорожніх робіт ПМ-100А | т | 0,41 | <u>6765,36</u> 2773,80 | <u>6420,99</u> 2632,61 | <u>211,72</u> 86,81 | <u>132,65</u> 54,38 | 30 км. |
| 14 | +C1424-11607 | Суміші бетонні готові важкі, клас бетону В45 [М600], крупність заповнювача більше 20 до 40 мм | м3 | 153 | <u>3392,16</u> 519000,48 | <u>3392,16</u> 519000,48 | - - | <u>150</u> 22950,00 | |
| | | Разом по розділу IV Підсумкові витрати енергоносіїв для усіх машин | грн. | | 525765,84 | 525765,84 | 86,81 | 23004,38 | |
| | | Мастильні матеріали | кг | 12,675 | | | | | |
| | | Гідравлічна рідина | кг | 2,125 | | | | | |
| | | Бензин | л | 109,808 | | | | | |
| | | Дизельне паливо | л | 169,021 | | | | | |

Таблиця 5.6

Калькуляція вартості 1000 м кв покриття товщиною 180 мм із дисперсно-армованого цементобетону

| № п/п | Обґрунтування (шифр норми) | Найменування робіт і витрат | Одиниця виміру | Кількість | Вартість одиниці, грн. | | Загальна вартість, грн. | | | Витрати труда робітників, люд.-год. | |
|-------|----------------------------|--|----------------|-----------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | | | | | Всього | експлуатації машин | Всього | заробітної плати | експлуатації машин | не зайнятих обслуговуванням машин | |
| | | | | | | | | | | тих, що обслуговують машини | |
| | | | | | заробітної плати | в тому числі заробітної плати | | | в тому числі заробітної плати | на одиницю | всього |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | C331-38-2 | Перевезення бетону, розчину спецтранспортом на відстань 30 км | т | 360 | <u>134,21</u> - | <u>134,21</u> - | 48316 | - | <u>48316</u> - | - | - |
| 2 | ЕН27-30-1 | Улаштування цементнобетонного покриття товщиною 26 см бетоноукладальником при ширині укладання 6 м | 1000 м2 | 1 | <u>820757,54</u> 3656,71 | <u>8524,66</u> 1345,29 | 820757,54 | 3657 | <u>8525</u> 1345 | <u>67,38</u> 57,3479 | <u>67,38</u> 57,35 |

Продовження Таблиці 5.6

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|-----------|---|---------|-----|---------------------|----------------------|---------------|------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 3 | ЕН27-30-5 | Улаштування цементнобетонного покриття товщиною 26 см бетоноукладальником, при зміні товщини на кожні 0,5 см додавати або виключати до норм 27-30-1 – 27-30-4 | 1000 м2 | -20 | <u>9488,53</u> - | <u>46,70</u> 6,99 | -208748 | - | <u>-1027</u> -154 | <u>-</u> 0,3048 | <u>-</u> -6,71 |
| | | Разом прямі витрати по кошторису | | | | | 612010 | 3657 | <u>55814</u> 1191 | | <u>67,38</u> 50,64 |
| | | Разом будівельні роботи, грн. | | | | | 612010 | | | | |
| | | в тому числі: | | | | | | | | | |
| | | вартість матеріалів, виробів та конструкцій, грн. | | | | | 525766 | | | | |
| | | всього заробітна плата, грн. | | | | | 4848 | | | | |
| | | Загальновиробничі витрати, грн. | | | | | 3314 | | | | |
| | | трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год. | | | | | 15,57 | | | | |
| | | заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн. | | | | | 1492 | | | | |
| | | Всього будівельні роботи, грн. | | | | | 605462 | | | | |
| | | ----- | | | | | | | | | |
| | | — | | | | | | | | | |
| | | Всього по кошторису | | | | | 605462 | | | | |
| | | Кошторисна трудомісткість, люд.год. | | | | | 133,59 | | | | |
| | | Кошторисна заробітна плата, грн. | | | | | 6340 | | | | |

Продовження Таблиці 5.6

| | | |
|------------------------------|--|---------------|
| | Разом по главах 1-12: | 605462 |
| ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.5.8.16 | Кошторисний прибуток (П) | 510 |
| ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 п.5.8.16 | Кошти на покриття адміністративних витрат будівельних організацій (АВ) | 203 |
| | Разом (гл. 1-12 + П + АВ + Р + І) | 606176 |
| | Разом: | 606176 |
| | Податок на додану вартість | 120379 |
| | Всього по зведеному кошторисному розрахунку | 726555 |

5.2 Промислова апробація високоміцних бетонів для дорожніх покриттів

У травні 2021 року проведено випробування дослідної партії бетонної суміші та бетону з композиційним дисперсним армуванням для влаштування покриття паркінгу при складських приміщеннях у с. Муроване Львівської ОТГ. Загальний обсяг вкладеного бетону склав 502,2 м³.

У виробництві використовували портландцемент ПЦ II/A-III-500P-Н ПрАТ «Івано-Франківськцемент», пісок Ясинецького кар'єру Львівської області з додаванням піску з відсівів подрібнення гірських порід фракцій 1,25 – 5,0 мм та гранітний щебінь суміші фракцій 5,0–10,0 мм та 10,0-20,0 мм а також поліпропіленові фібри типу “поліарм” та “мікроарм”.

Результати випробувань бетонної суміші та бетону наведені в табл.

Таблиця 5.7

Властивості бетонної суміші та бетону

| Середня густина суміші, кг/м ³ | Жорсткість, с | Міцність на розтяг при згині, МПа, у віці, діб | | Водопоглинання за масою, % |
|---|---------------|--|-----|----------------------------|
| | | 7 | 28 | |
| 2420 | 4 | 6,2 | 9,5 | 2,3 |

Застосування бетонів з полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами різних типів дало змогу зменшити товщину покриття на 3 см без зміни відстані між деформаційними швами завдяки зниженню деформацій зсідання бетону. Також вирішено технологічні завдання забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик: одержання високої ранньої міцності на стиск ($f_{cm.cube3}=34,3$ МПа) для пришвидшення відкриття руху по влаштованому покриттю, та проектної

міцності на розтяг при згині ($f_{ctfm28}=9,5$ МПа). Загальний обсяг вкладеного бетону склав $502,2$ м³. Акт впровадження наведений у Додатку Б.

Висновки до розділу 5

1. Порівняльний розрахунок витрат на влаштування покриття паркінгу для традиційного та розробленого бетонів свідчить, що використання бетону з класом міцності на згин B_{tb} 8,4 дає змогу знизити товщину конструкції з 25 до 18 см із забезпеченням розрахункових коефіцієнтів надійності. Питомий економічний ефект від зниження вартості матеріалів і виконання робіт складає 12 тис.грн. на 1000м^2 дорожнього покриття.

2. Проведено промислову апробацію розроблених бетонів при влаштуванні цементобетонного покриття паркінгу при складських приміщеннях у с. Муроване Львівської ОТГ. Результати випробувань підтвердили досягнення високої ранньої ($f_{ctb}=6,2$ МПа) та проектної міцності на розтяг при згині ($f_{ctb28}=9,5$ МПа). Застосування бетонів з полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами різних типів дало змогу зменшити товщину покриття на 3 см.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено науково-прикладну задачу розроблення дисперсно-армованих бетонів транспортного призначення з підвищеними будівельно-експлуатаційними властивостями та характеристиками тріщиностійкості. За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано наступне:

1. Встановлена можливість одержання дисперсно-армованих бетонів транспортного призначення з покращеними фізико-механічними властивостями та силовими і енергетичними характеристиками тріщиностійкості. Показано доцільність композиційного полідисперсного армування бетонів поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”.

2. Проведено оцінку впливу дисперсного армування різними видами та типами фібрових волокон на фізико-механічні властивості та характеристики тріщиностійкості бетонів. Встановлено, що найбільш ефективними дисперсними волокнами є поліпропіленові фібри Enduro HPP45 (тип “поліарм”) та Fibermesh 150 (тип “мікроарм”), які дозволяють підвищити майже до 10 та 50% відповідно міцність на розтяг при згині та статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень.

3. Розроблено оптимальні склади дисперсно-армованих бетонів поліпропіленовими фібрами типу “поліарм”: $\rho_c=350$ кг/м³, $\rho_k=335$ кг/м³, $\rho_b=196$ кг/м³, Щ (фр. 5-30 мм) =1405 кг/м³, В/Ц=0,44, витрата фібри 10 кг/м³; та “мікроарм”: $\rho_c=350$ кг/м³, $\rho_k=435$ кг/м³, $\rho_b=255$ кг/м³, Щ (фр. 5-20 мм) =1247 кг/м³, В/Ц=0,44, витрата фібри 1,35 кг/м³. При цьому досягаються найвищі міцності на розтяг при згині 10,95 і 11,40 МПа та статичні критичні коефіцієнти інтенсивності напружень 1,01 і 1,04 відповідно для типу “поліарм” та “мікроарм”.

4. Методом математичного планування експерименту проведено оптимізацію вмісту поліпропіленових фібр типу “поліарм” ($X_1=8; 10; 12$ кг/м³) та “мікроарм” ($X_2=0,7; 1,05; 1,4$ кг/м³). При вмісті фібри типу “поліарм” (8 кг/м³) та типу “мікроарм” (1,05 кг/м³) досягаються найвища міцність на розтяг при згині 11,40 МПа (перевищує відповідний показник неармованого бетону на 68%), що має велике значення при проектуванні жорстких дорожніх одягів.

5. Аналіз структури розробленого бетону свідчить, що високі показники міцності на розтяг при згині та характеристики тріщиностійкості досягаються в наслідок ефекту “містка”, який формується фібровим волокном при полідисперсному армуванні бетону і сповільнює розвиток макротріщини в докритичній стадії деформування та чинить опір дефрагментації в закритичній стадії руйнування полідисперсноармованих бетонів.

6. Показано, що полідисперсне армування бетону поліпропіленовими волокнами призводить до інтенсивнішої стабілізації деформацій зсідання (на 12 діб) та їх зменшення на 26% порівняно з неармованим бетоном.

7. Досліджено будівельно-технічні властивості бетонів з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”. Встановлено, що міцність на стиск становить 62,4 МПа, міцність на розтяг при згині – 62,4 МПа, водопоглинання за масою – 2,3%, зниження міцності після 400 циклів заморожування – відтавання – 9,8%, стираність - 0,22 г/см².

8. На виробничій базі ПП “ЗАХІД-БЕТОН-БУД” проведено дослідно-промислову апробацію розроблених полідисперсноармованих бетонів при виготовленні цементно-бетонного покриття паркінгу при складських приміщеннях у с. Муроване (Львівська ОТГ). Ефективність від впровадження розроблених полідисперсноармованих бетонів, дає змогу знизити товщину конструкції з 25 до 18 см із забезпеченням розрахункових коефіцієнтів надійності. Питомий економічний ефект від зниження вартості

матеріалів і виконання робіт складає 12 тис. грн на 1000 м² дорожнього покриття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – К.: Основа, 2007. – 616 с.
2. Дацкевич, В. В. Базальтовые волокна, материалы и изделия / В.В. Дацкевич, А.Л. Смирнов, О.О. Семенов // В сб. Базальтоволокнистые материалы. – М.: Информконверсия, 2001. – с. 268-278.
3. Джигирис Д. Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий / Джигирис, Д.Д., Махова М.Ф. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 412 с.
4. Журавський О. Д. Дослідження плит, підсилених сталевібробетоном / О. Д. Журавський, І. О. Цибульник // Будівельні конструкції. – 2001. – №54. – с. 268-270.
5. Кадыкова Ю. А. Полимерные композиционные материалы на основе волокон различной химической природы / Ю. А. Кадыкова, А. Н. Леонтьев, О. Г. Васильева, С. Е. Артеменко // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – №6 – с. 10-11.
6. Лесков С. П. Мини-заводы для производства базальтового волокна / С. П. Лесков // Строительные материалы. – 2001. – №4. – с. 25–26.
7. Моргун В. Н. Актуальность применения композитной стержневой арматуры в фибропенобетоне / В. Н. Моргун, А. В. Виснап, Л. В. Моргун // Вестник Дегестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2015. – №4 (39). – с. 87-93.
8. Пащенко А. А. Армирование бетона стеклянными стержнями / А. А. Пащенко, В. П. Сербин, В. В. Глуховский // Строительные материалы и конструкции. – 1986. – №4. – с. 32-33.
9. Таланова К. В. Сталефібробетон конструкції на его основе [Текст] / К. В. Таланова, Н. М. Михеев. – Спб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – 276 с.

10. Фибробетон. Особенности и перспективы применения в строительных конструкциях / СтройПРОФИль. – 2003. – №2. – с. 67-69.
11. Филимонова Н.В. Стеклофибробетон – материал, который нужен всем! / Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 1999. – №3-4. – с. 55-59.
12. Рабинович Ф. Н. Бетоны, дисперсно - армированные волокнами. Обзор ВНИИЭСМ – М., 1976. – 73 с.
13. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.
14. Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete /A.M. Lypcz-Buendha,, M. D. Romero-Sanchez, V. Climent, C. Guillem // Cement and Concrete Research.– 2013. – № 54. – p. 29-35.
15. Базанов С.М. Улучшение качества бетона на основе использования смешанных видов волокон /С. М. Базанов, М.В. Торопова // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ibeton.ru>. (дата звернення: 17.02.2018).
16. Фибробетон. Особенности и перспективы применения в строительных конструкциях / СтройПРОФИль. – 2003. – №2. – с. 67-69.
17. Ghanbari A. Prediction of the plastic viscosity of self-compacting steel fibre reinforced concrete / Ghanbari A., Karihaloo B. L. // Cement and Concrete Research. – 2009. – № 39. – p. 1209-1216.
18. Szwabowski J. Technologia betonu samozageszczalnego / J. Szwabowski, J. Golaszewski. – Krakow Stowarzyszenie Producentow Cementu, 2010. – 160 p.
19. Белятинський А. О. Перспективи застосування базальтового волокна-фібри при будівництві й реабілітації доріг і злітних смуг аеродромів / А. О. Белятинський, К. В. Краюшкіна Д. Я. Гігієйшвілі // Дорожня галузь України – №6 – 2014р. – с. 28-32.
20. Гоц В. І. Вилуговування базальтового волокна різних модифікацій / В. І. Гоц, П. П. Пальчик, С. П. Шпера, О. Ю. Резнік // Ресурсоекономні

матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. – Рівне. 2010, – Вип. 2010. – с. 17-22.

21. Климов Ю. А. Заключение по результатам прочности на растяжение при изгибе бетона, армированного базальтовой фиброй производства ТОВ "Технобазальвест" / Ю. А. Климов, Р. А. Пискун // Научно-производственное предприятие "Будконструкция", Киев, 2007. – 13 с.

22. Лесков С. П. Мини-заводы для производства базальтового волокна / С. П. Лесков // Строительные материалы. – 2001. – №4. – с. 25–26.

23. Кадыкова Ю. А. Полимерные композиционные материалы на основе волокон различной химической природы / Ю. А. Кадыкова, А. Н. Леонтьев, О. Г. Васильева, С. Е. Артеменко // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – №6 – с. 10-11.

24. Фибробетон. Особенности и перспективы применения в строительных конструкциях / СтройПРОФИль. – 2003. – №2. – с. 67-69.

25. ВСН 56-97. Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций // ДСНТУ НИЦ "СТРОИТЕЛЬСТВО". – М., 1997. – 172 с.

26. Заключение о результатах сравнительных испытаний образцов тяжелого бетона и фибробетона, где в качестве фибры использованы волокна армирующие полипропиленовые производства ООО "ДИиФ". – Донецк: Донецкий ПромстройНИИпроект, 2004. – 14 с.

27. Экспертний висновок про можливість використання поліпропіленової фібри виробництва ТОВ «СПЕЦНАБ» у дорожньому будівництві. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – 22 с.

28. Отчет о научно-исследовательской работе «Проведение сравнительных испытаний по определению влияния волокна армирующего полипропиленового – ВАП (фибры), ТУ У 32781078.002-2004, на свойства основания для полов из мелкозернистого бетона (стяжки)». – Днепропетровск: ОАО "ДНИИСП", 2006. – 16 с.

29. Пухаренко Ю.В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: дис. докт. техн. наук / Пухаренко Юрий Владимирович. СПбГАСУ. – СПб, 2005. – 315 с.

30. К вопросу применения нескольких видов фибр для дисперсно армированных бетонов / [Клюев СВ., Лесовик Р.В., Клюев А.В., Бондаренко Д.О.]. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – № 94. – 2012. – С. 81–83.

31. Пухаренко Ю.В. Полидисперсное армирование строительных композитов – фибробетонов / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова // Технологии бетонов. 2011, №1–2. – С. 28–29.

32. Голанцев В.А. Свойства и особенности полиармированных фибробетонов: дис. канд. техн. наук / В. А. Голанцев. – Л., 1990. – 214 с.

33. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсноармованих цементуючих систем / [Саницький М. А., Марущак У. Д., Кіракевич І. І., Стечишин М. С.]. Будівельні матеріали і вироби, 2015. – № 1. – С. 6–9.

34.Griffith. A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids // Phil Trans. Roy. Soc. Ser. A. – 1920. – P.128–154.

35. Griffith A. A. The theory of rupture // In: Proc.1 Congr. Appl. Mech. Depft, 1924 – P.55–63.

36. Westergaard H.M. Bearing pressures and cracks // I. Appl. Mech. – 193. – V. 6, № 2. – P. A49–A53.

37. Sack R.A. Extension of Griffith theory of rupture of three dimension // Proc. Phys. Soc. –1946. – V.58. – P.729–756.

38. Sneddon I. N. The distribution of stress in the neighborhood of a crack in an elastic solid // Proc.Roy. Soc. Ser. A. – 1946. – V.1987. -- P.229–260/

39. Williams M.L. On the stress distribution at the base a stationary crack // Journ. Appl. Mech. – 1957. – v.24, № 1. – P. 109–114.

40. Морозов Н.Р. Математические вопросы механики трещин. – М.: Наука, 1984. – 256 с.

41. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
42. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1990. – 545 с.
43. Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – К.: Наукова думка, 1968. – 545 с.
44. Партон В.З., Морозов Е.Н. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 240 с.
45. Леонов Н.Я. Механика деформации и разрушения. – Фрунзе: Илџн, 1981. – 236 с.
46. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
47. Берещницкий Л.Г., Панасюк В.В., Стащук Н.Г. Взаимодействие линейных включений и трещин в деформируемом теле. – К.: Наукова думка, 1983. – 288 с.
48. Стащук Н.Г. Задачи механики упругих тел с трещиноподобными дефектами. – К.: Наукова думка, 1993. – 360 с.
49. Механика разрушения и прочность материалов / Справ. Пособие. Под ред. В.В. Панасюка. – В 4-х томах. – К.: Наукова думка, 1988–1990. – Т.1. Основы механики разрушения. – 499 с. – Т.2. Коэффициенты интенсивности напряжения в телах с трещинами. – 620 с. – Т.3. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их наблюдения. – 436 с. – Т.4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – 680 с.
50. Neville A.M. // Civ. Eng. (London). – 1959. 54. – P. 1153–1156.
51. Glucklich J. Fracture of plain concrete // J. of Eng. Mech., ASCE, 1963, EM 6. – P. 923–948.
52. Glucklich J. The effect of microcracking on time-depend deformations and the long term strength of concrete // Int. Congress on the Structure of Concrete / London, 1965. – P. 278–289.

53. Kaplan H.F. Crack propagation and the fracture of concrete/ ACI Journal, V.58. – 1961. – № 5.
54. Brown J.H. Measuring of the fracture toughness of cement paste and mortar // Mag. Of Concrete Res., vol.24. – 1972. – # 81. – P. 185–196.
55. Naus D.J., Lott J. L. Fracture toughness of Portland cement concretes // ACI Journal, v. 66. – 1969.
56. Naus D.J., Batson J.B., Lott J. L. of Concrete // Fracture Mechanics of Ceramics, vol. 2. – 1974.
57. Evans E.G. and others. The Fracture Mechanics of Mortars // Cement and Concrete Research, 6. – 1976. – № 4.
58. Kitigava K. Suyama V. Fracture mechanics study on the size effect for the strength of cracked concrete materials. Proc. 19-th Conference Mater. Research. Kyoto. – 1970.
59. Lott J., Kesler C. Crack propagation in plain concrete – SR 90, Highway Research Board, 1966. – P. 118.
60. McClintock F.A., Walsh J.B. Friction on Griffith crack in rock under pressure. – Proc. 4-th U.S. National Cong. Of Appl. Mech., 1962, v.11. – P.1015–1021.
61. Bomobolakis E. G. Photoelastic stress analysis of crack propagation within a compressive stress field // PhD. Thesis:Massachusetts Ins.of Tech., Feb. 1963. – P. 34–39.
62. Ярема С.Я., Крестин Г.С. Определение модуля сцепления хрупких материалов путем испытаний дисков с трещиной на сжатие // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1966. – №1. – С.10–14.
63. Пак А.П. и др. Зависимость критического значения коэффициента интенсивности напряжений бетона от длины трещины // Известия ВНИИГ. – Т.136, 1980.
64. Пак А.П. и др. Влияние вида напряженного состояния на значение характеристик трещиностойкости бетона // Известия ВНИИГ. – Т.147, 1981.

65. Пак А.П., Трапезников Л.П. Яковлева Э.Н. Исследование характеристик трещиностойкости бетона при осевом растяжении и изгибе образцов с надрезами // Известия ВНИИГ. – Т.163, 1983. – С. 29–37.
66. Пак А.П., Трапезников Л.П. Экспериментальная проверка гипотезы обобщенного нормального разрыва // ФХММ. – 1979. – № 3.
67. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
68. Зайцев Ю.В. Новое в строительной науке. – М.: Знание, 1986. – 64 с.
69. Зайцев Ю.В., Сахи Д.М., Пирадов К.А. Механика разрушения бетонов различной макроструктуры. – М.: МГОУ, 2002. – 225 с.
70. Зайцев Ю.В., Красновский Р.О., Ковлер К.Л., Тахер А. Трещиностойкость бетонов с различной степенью неоднородности структуры // Бетон и железобетон. – 1989. – № 11. – С. 10–12.
71. Зайцев Ю.В., Казацкий М.Б., Цава Г.Ф. К нормированию значений K_{Ic} для мелкозернистых бетонов // Бетон и железобетон. – 1984. – № 6. – С. 23–24.
72. Ентов В.М., Ягуст В.И. Экспериментальное исследование закономерностей квазистатического развития трещин в бетоне // Изв. АН СССР. – МТТ, 1975. – № 4. – С.93–103.
73. Ягуст В.И. О границах области применения линейной механики разрушения к бетону // Бетон и железобетон. – 1982. – № 6.
74. Ягуст В.И. Сопротивление развитию трещины в бетонных конструкциях с учетом микроструктуры материала: Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.:МНИИТЭ, 1982. – 24 с.
75. Ковлер К.Л. Прогнозирование развития силовых трещин в несущих стеновых конструкциях крупнопанельных зданий: Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.:МИСИ, 1985. – 21 с.

76. Шевченко В.И. Применение методов механики разрушения для оценки трещиностойкости и долговечности бетонов. – Волгоград: ВолГИСИ, 1988.

77. Шевченко В.И. Энергетический подход к оценке вязкости разрушения цементного камня и бетона // Бетон и железобетон. – 1985. – № 1. – С. 35–36.

78. Гузеев Е.А., Сейланов Л.А., Шевченко В.И. Анализ разрушения бетона по полностью равновесным диаграммам деформирования // Бетон и железобетон. – 1985. – № 10, – С. 10–11.

79. Гузеев Е.А., Шевченко В.И., Сейланов Л.А. Исследование силовых и энергетических параметров разрушения бетона по полностью равновесным диаграммам его деформирования // Изв-я ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 8. – С.1–5.

80. Перфилов В.А. Рост трещин в бетоне. – Волгоград: ВолГАСА. – 2002.– 82 с.

81. Перфилов В.А. Определение критической длины магистральной трещины в бетоне // Строительство и архитектура. – 2004. – № 11. – С. 108–111.

82. Чубриков В.М. К методике определения плотности энергии разрушения бетонов. // Физико-химическая механика материалов. – Т.21. – 1985. – №4. – С. 113–115.

83. Чубриков В.М. Особенности определения критериев трещиностойкости в механике разрушения бетонов // Физико-химическая механика материалов. – Т.23. – 1987. – С. 120–121.

84. Иваницкий Я.Л., Лучко И.И. Методика определения трещиностойкости бетона при сложном напряженном состоянии // Бетон и железобетон. – 1986. – № 10. – С. 24–25.

85. Лучко Й.Й., Сулим Г.Т., Кир'ян В.І. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності / НАН України фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка / За ред. Й.Й. Лучка. – Львів:

Каменяр, / Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідник. посібник. Т.6. – 2004. – 885 с.

86. Лучко Й.Й. Застосування методів механіки руйнування для оцінки міцності та тріщиностійкості залізобетонних конструкцій // Будівельні конструкції: Зб. наук. праць. – К: НДІБК., 2005. – Вип. 62. – С.180–188.

87. Лучко Й.Й., Чубріков В.М., Лазар В.Ф. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування / НАН України, фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка, Львів, Каменяр. – 1999. – 348 с.

88. Тытюк А.А., Савицкий Н.В., Веселовский Д.Р., Пирадов К.А. Использование методов и принципов механики разрушения для исследования свойств бетонов, подверженных воздействию агрессивных сред // Будівельні конструкції: Зб. наук. праць. – К: НДІБК., 2005. – Вип. 62. – С.343–350.

89. Бліхарський З.Я. Напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій в агресивному середовищі при дії навантаження: Автореф. дис... д-ра. техн. наук: 05.23.01/ К.: КНУБА, 2005. – 37 с.

90. Бліхарський З.Я., Сташук М.Г., Малик О.М. Теоретичні та експериментальні дослідження корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі // Вісник Одеської акад. б-ва та арх.-ри. – Одеса: ОДА БА, 2003. – №10. – С.22–29.

91. Богдан С.Ю., Хавкин А.К. Метод механики разрушения при анализе состояния трещин железобетонных конструкций // Будівельні конструкції: Зб. наук. праць. – К: НДІБК., 2005. – Вип. 62. – С.77–80.

92. Богдан С.Ю. Визначення граничних станів елементів бетонних і залізобетонних конструкцій методами механіки руйнування: Автореф. дис... канд.. техн. наук. – К: Науковий світ, 2002. – 19 с.

93. Жуковский И.Н. О корреляции между вязкостью разрушения бетона и его прочностью на растяжение // Бетон и железобетон в Украине. – 2006. – № 6. – С.17–23.

94. Бетон, армированный волокнами // Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М., 1975. – Вып.22. – С. 13–14. – Сер.7. (Строительные материалы и изделия).

95. Пухаренко Ю.В. Высокопрочный сталефибробетон / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – №9. – С. 40–41

96. Пухаренко Ю.В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: дис. докт. техн. наук / Пухаренко Юрий Владимирович. СПбГАСУ. – СПб, 2005. – 315 с.

97. Влияние некоторых характеристик отрезков стальной проволоки на свойства бетона, армированного этими отрезками. Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М., 1974. – Вып.17. – С 6–8.

98. Голубев В.Ю. О методах определения вязкости разрушения высокопрочного бетона / В.Ю. Голубев // Доклады 65-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных руководителей, инженеров и аспирантов университета. Ч.1. – СПб: СПбГАСУ, 2008. – С. 205–207.

99. Пухаренко Ю.В. О вязкости разрушения фибробетона / Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев // Вестник гражданских инженеров. – 2008. – №3(16). – С. 80–83.

100. Пухаренко Ю.В. Проектирование состава и исследование свойств высокопрочного сталефибробетона / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова, В.Ю. Голубев // III третья международная выставка-конференция "Популярное бетоноведение 2009": – сб. докл., 2009. – С. 74–79.

101. Рабинович Ф.Н. Дисперсно армированные бетоны / Ф.Н. Рабинович. – М.: Стройиздат, 1989. – 174 с.

102. Свойства волокон и бетона, армированного волокнами. Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М. – 1974. – Вып.14. – С. 12–15. – Сер.7. (Строительные изделия и конструкции).

103. Растяжимость и начало образования трещин в бетоне, армированном отрезками стальной проволоки. Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). – М. – 1975. – Вып.9. – С. 9–12.

104. Романов В.П. К вопросу о пределе трещиностойкости фибробетона на растяжение / В.П. Романов // Исследование новых типов пространственных конструкций гражданских зданий и сооружений. – Л., 1977. – С. 96–105.

105. Ставров Г.Н. Состояние и перспективы применения сталефибробетона в конструкциях, подверженных динамическим воздействиям / Г.Н. Ставров, В.П. Романов, И.Д. Захаров // Применение сталефибробетона в строительстве. – Л., 1985. – С. 55–58.

106. Григорьев В.И. Напряженно-деформированное состояние сталефиброжелезобетонных изгибаемых элементов при импульсном воздействии: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.И. Григорьев. Ленингр. инженер.-строит. ин-т. – Л., 1987. – 24 с.

107. Курбатов Л.Г. Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами / Л.Г. Курбатов, Ф.Н. Рабинович // Бетон и железобетон. – 1980. – №3. – С. 6–8.

108. Курбатов Л.Г. Трещиностойкость и раскрытие трещин в изгибаемых сталефибробетонных элементах / Л.Г. Курбатов, В.Н. Попов // Пространственные конструкции в гражданском строительстве. – Л., 1982. – С. 33–42.

109. Голанцев В.А. Свойства и особенности полиармированных фибробетонов: дис. канд. техн. наук / В. А. Голанцев. – Л., 1990. – 214 с.

110. ДСТУ Б В.2.7-227:2009 Бетони. Методи визначення характеристики тріщиностійкості (в'язкості руйнування) при статичному навантаженні.

111. Солодкий С.Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах: Монографія. – Л.: Видавництво НУ “ЛП”. 2008. – с. 144.

112. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
113. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками/
114. ДСТУ Б В.2.7-216:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення деформацій усадки та повзучості.
115. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності.
116. ДСТУ Б В.2.7-114-2002 Суміші бетонні. Методи випробувань (ГОСТ 10181-2000).
117. ДСТУ Б EN 1097-1:2015 Методи випробувань механічних і фізичних характеристик заповнювачів. Частина 1. Визначення опору стираності (micro-Deval) (EN 1097-1:2011, IDT).
118. Солодкий С.Й. Математичне моделювання та оптимізація будівельних композитів / С.Й. Солодкий, І.Д. Пелешко, Р.М. Русин, В.В. Юрченко. Л.: Видавництво НУ "ЛП". – 2006. – С. 92.

ДОДАТКИ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз:

1. Дослідження тріщиностійкості важких бетонів та пінобетонів, армованих поліпропіленовою фіброю для дорожнього будівництва / С. Й. Солодкий, В. О. Каганов, І. Б. Горніковська, Ю. В. Турба // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies = Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. № 4/5 (76). Р. 40–46. (Scopus).

2. Turba Y., Solodkyu S. Crack resistance of concretes reinforced with polypropylene fiber. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 100 : Proceedings of 2nd International scientific conference on EcoComfort and Current issues of civil engineering EcoComfort 2020, Lviv; Ukraine, 16–18 September 2020. P. 474–481. (Scopus).

3. Turba Y., Solodkyu S., Markiv T. Strength and fracture toughness of cement concrete, dispersedly reinforced by combination of polypropylene fibers of two types. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 47 : Proceedings of CEE 2019. Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering. P. 488–494.

Статті у наукових фахових виданнях України:

4. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю. Наукові нотатки : міжвузівський збірник (за галузями знань “Технічні науки”). 2014. Вип. 46. С. 512–515.

5. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Експериментально-статистичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою

фіброю. Частина II. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2015. № 823. С. 298–302.

6. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Підвищення тріщиностійкості дисперсно армованих поліпропіленовою фіброю бетонів технологічними чинниками. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2017. Вип.66. С. 99–105.

Наукові праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:

7. Ефективність дисперсного армування за критерієм тріщиностійкості бетону. / Ю.В. Турба, С.Й. Солодкий // Тези доповідей LXVIII наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. Київ: НТУ, 2012. С. 181-182.

8. Crack resistance of concrete, reinforced with fiber of different types. / Solodkyu S., Turba Y. // 18-th Internationale Baustofftagung. IBAUSIL. Weimar, 2012. P 2.12. – S. 2-0561- 2-0567.

9. Тріщиностійкість бетонів армованих поліпропіленовою фіброю. / Солодкий С.Й., Турба Ю.В. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг”. Харків, 14-15 листопада 2013. С. 198-202.

10. Improvement of the fracture crack resistance of the dispersion-reinforced concrete / Solodkyu S., Turba Y // 19. Internationale Baustofftagung. IBAUSIL. Weimar, 2015. Band 2. P.2-1075-2-1082.

11. Crack resistance increase of dispersive reinforced road concrete / Solodkyu S., Turba Y // XV International Scientific Conference “Current issues of civil and environmental engineering and architecture”. Rzeszow, 2015. P. 80-81.

12. Вплив дисперсного армування поліпропіленовими фібрами на підвищення тріщиностійкості дорожніх бетонів / Ю.В. Турба, Т.М. Фик // Модернізація та сучасні технології транспортного будівництва : матеріали II

Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції, 23 листопада 2017 р., Львів. 2017. С. 68–74.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

III міжнародна науково-технічна конференція “Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей” (Світязь, 2014);

XV International Scientific Conference “Current Issues Of Civil And Environmental Engineering And Architecture”. – Rzeszow-Lviv-Kosice (Жешув, Польща, 2015).

А К Т

про впровадження у виробництво партії полідисперсноармованого цементобетону для покриття паркінгу

Ми, нижче підписані, представник ПП «ЗАХІД-БЕТОН-БУД» інженер-технолог Гуняк О.М. та представники Національного університету “Львівська політехніка” д.т.н., професор Соболев Х.С., ст. викладач Турба Ю.В., склали даний акт про те, що у травні 2021 року проведено випробування дослідної партії бетонної суміші та бетону з композиційним дисперсним армуванням для влаштування покриття паркінгу при складських приміщеннях у с. Муроване Львівської ОТГ. Загальний обсяг вкладеного бетону склав 502,2 м³.

У виробництві використовували портландцемент ПЦ II/A-III-500P-N ПрАТ «Івано-Франківськцемент», пісок Ясинецького кар’єру Львівської області з додаванням піску з відсівів подрібнення гірських порід фракцій 1,25 – 5,0 мм та гранітний щебінь суміші фракцій 5,0–10,0 мм та 10,0-20,0 мм а також поліпропіленові фібри типу “поліарм” та “мікроарм”.

Результати випробувань бетонної суміші та бетону наведені в табл.

Таблиця – Властивості бетонної суміші та бетону

| Середня густина суміші, кг/м ³ | Жорсткість, с | Міцність на розтяг при згині, МПа, у віці, діб | | Водопоглинання за масою, % |
|---|---------------|--|-----|----------------------------|
| | | 7 | 28 | |
| 2420 | 4 | 6,2 | 9,5 | 2,3 |

Застосування бетонів з полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами різних типів дало змогу зменшити товщину покриття без зміни відстані між деформаційними швами завдяки зниженню деформацій усадки бетону.

Також вирішено технологічні завдання забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик: одержання високої ранньої на стиск ($f_{cm.cube}^3=34,3$ МПа) для пришвидшення відкриття руху по влаштованому покриттю, та проектної міцності на розтяг при згині ($f_{ctfm}^{28}=9,5$ МПа).

Акт підписали:

Представник ПП «ЗАХІД-БЕТОН-БУД»

Інженер-технолог, к.т.н. _____ Гуняк О.М.

Представники Національного університету “Львівська політехніка”

Професор, д.т.н. _____ Соболев Х.С.

Ст. викладач _____ Турба Ю.В.