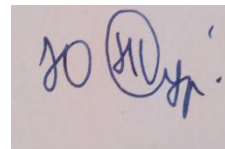


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Турба Юрій Васильович**



УДК 691.328

**ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНОГО БЕТОНУ**

05.23.05 – Будівельні матеріали та вироби

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів - 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
Солодкий Сергій Йосифович

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Толмачов Сергій Миколайович,**  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет,  
професор кафедри технологій дорожньо-будівельних  
матеріалів і хімії;

кандидат технічних наук, доцент  
**Андрійчук Олександр Валентинович,**  
Луцький національний технічний університет,  
доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії

Захист відбудеться «28» вересня 2021 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, буд. 6 (II-й навчальний корпус), ауд. 212.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, буд. 1.

Автореферат розісланий «28» серпня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17



П. Ф. Холод

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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 отриманих 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-промислово 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.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались й обговорювалися на таких конференціях: 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).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 3 статті у наукових фахових виданнях України, 1 – у науковому періодичному виданні іншої держави, 2 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних Scopus і 6 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження. Наведено отримані автором основні положення, що мають наукову новизну та практичну цінність.

У **першому розділі** проведено критичний огляд літературних джерел, пов’язаних з технологічними особливостями отримання бетонів, армованих фібрами різних видів та типів, їх вплив на фізико-механічні властивості, характеристики тріщиностійкості та довговічність, а також визначено теоретичні передумови досліджень.

На основі аналізу літературних джерел відзначено, що при використанні дисперсно-армованих бетонів можна значно зменшити матеріало- і трудомісткість транспортного будівництва та, як наслідок, його вартість.

Розглянуті особливості використання фібрових волокон різних видів та типів для армування бетонів: металевих, скловолоконних, базальтових, поліпропіленових, поліетиленових, ін., та виділено їх переваги та недоліки.

Проведено аналіз робіт, що стосуються композиційного дисперсного армування бетонів. Слід відзначити, що питання полідисперсного армування бетонів в літературі розглянуте недостатньо, а особливо поєднання поліпропіленових фібр різного типу.

Численні сучасні дослідження вітчизняних (І.П. Гамеляк, В.І. Гоц, В.М. Вировий, Л.Й. Дворкін, Т.В. Ковальчук, Ю.М. Баженов, П.В. Кривенко, А.М. Плугін, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницький, С.Й. Солодкий, Х.С. Соболь, С.М. Толмачов, О.В. Андрійчук, О.Ю. Дорошенко) та зарубіжних вчених (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.

Показано, що фізико-механічні властивості та силові і енергетичні характеристики тріщиностійкості дисперсно-армованих бетонів залежать від його складу, технології виготовлення, виду і вмісту фібри, геометричних характеристик волокон та способу їх введення в бетонну суміш.

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.

**У другому розділі** наведено характеристики вихідних матеріалів та описано основні методи досліджень, застосованих в роботі.

Для проведення експериментальних досліджень в дисертаційній роботі використані портландцемент ПЦ II/A-III-500 виробництва ПАТ «Волинь-Цемент», як дрібний заповнювач при приготуванні фібробетонів використовували пісок Ясинецького кар'єру Львівської області з модулем крупності 1,29 з додаванням піску з відсівів подрібнення гірських порід 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.

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

Як армуючі волокна застосовували металеву, базальтові та поліпропіленові фібри. Характеристики використаних в роботі фібр наведені в табл. 1. Кращим мікросинтетичним волокном для фібробетону покриттів доріг та аеродромів, промислових підлог є поліпропіленова фібра, що є альтернативою сталевим волокнам. Поліпропіленові фібри типу “поліарм” (рис. 1, а) та “мікроарм” (рис. 1, б) обрано за результатами попередніх випробувань фібробетонів на тріщиностійкість, армованих різними видами фібрових волокон.



а



б

Рисунок 1 – Загальний вигляд поліпропіленових фібр:  
а – типу “поліарм”; б – типу “мікроарм”

Хімічні склади та морфології поверхні бетонів досліджували з використанням скануючого електронного мікроскопу SEM FEI Quanta 250 обладнаного EDS (FEI Company, USA).

Таблиця 1 – Характеристика різних типів фібр

Найменування фібри (довжина фібри)	Фізико-механічні властивості вихідної сировини для фібр					
	Назва мате- ріалу	Температура плавлення, °C	Густина, г/см <sup>3</sup>	Механічна міцність, МПа	Міцність на розрив, МПа	Модуль пружності, МПа
Fibermesh 150* (12 мм)	поліпропілен	149	0,96	2586	2890	120
Fibermesh 300-e3* (19 мм)						
Enduro HPP45** (45 мм)						
Ruredil X Fiber 54** (54 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”

Фізико-механічні, будівельно-технічні та експлуатаційні характеристики розроблених полідисперсноармованих бетонів визначали згідно діючих стандартів та загальноприйнятих методик. Оптимізацію складів дисперсно-армованих бетонів транспортного призначення проводили за допомогою методів експериментально-статистичного моделювання з використанням дисоціативно-крокового методу оптимізації.

Силіві та енергетичні характеристики тріщиностійкості дисперсно-армованих бетонів визначали при рівноважних механічних випробуваннях призм із записом повної діаграми стану (ПДС) «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.

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

**Третій розділ** присвячений дослідженням впливу дисперсного армування різними видами та типами фібрових волокон на фізико-механічні властивості та характеристики тріщиностійкості бетонів.



На першому етапі вивчали вплив різних фібрових волокон на силові та енергетичні 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/м<sup>3</sup>. Для дисперсного армування використовували фібру з умовним позначенням серій (витрата фібри, кг/м<sup>3</sup> бетонної суміші): б/ф – без армування; 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).

Аналіз отриманих ПДС дисперсно-армованих бетонів (рис. 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.

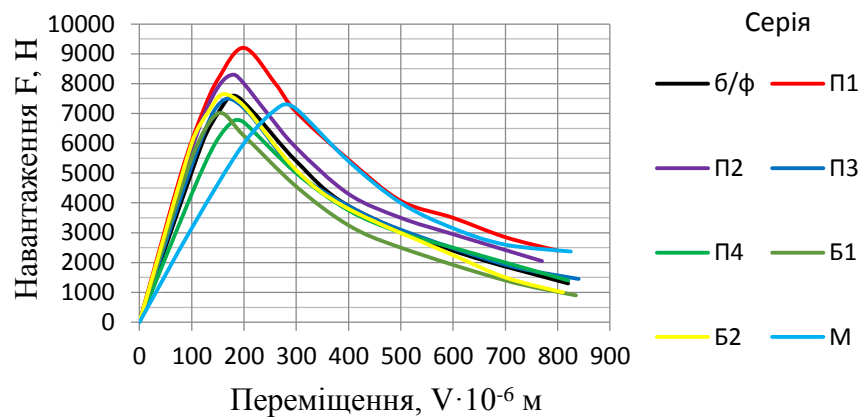
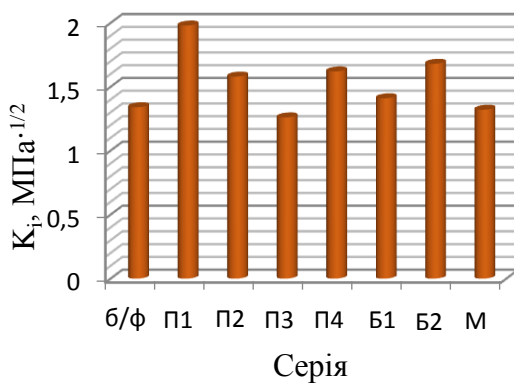
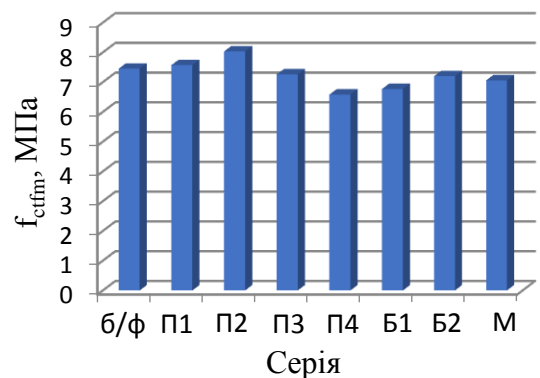


Рисунок 2 – Повні діаграми стану дисперсно-армованих бетонів та неармованого

Це підтверджується підвищеними на 48% (П1) та 21% (П2) (рис. 3, а) значеннями статичного критичного коефіцієнта інтенсивності напружень і на 2 та 8% відповідно (рис. 3, б) 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”).



а



б

Рисунок 3 – Статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (а), міцність на розтяг при згині (б)

Наступний етап полягав в оптимізації складу бетону із застосуванням трьохрівневого трьохфакторного плану експерименту (Д-оптимального, як найчастіше використовуваного в практиці досліджень технології дорожніх бетонів) та у встановленні оптимального вмісту поліпропіленових фібр типу “поліарм” та “мікроарм”. Як технологічні фактори впливу обрані:  $X_1$  – витрата поліпропіленової фібри (типу “поліарм” -  $7 \pm 3$  кг на  $1 \text{ м}^3$  бетонної суміші, типу “мікроарм” –  $1,35 \pm 0,45$  кг на  $1 \text{ м}^3$  бетонної суміші);  $X_2$  – відношення довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача (типу “поліарм” –  $2,25 \pm 0,75$ , типу “мікроарм” –  $0,6 \pm 0,2$ );  $X_3$  – коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача ( $1,4 \pm 0,3$ ).

Склади досліджуваних серій бетонів наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Склади бетонів диспесно-армованих поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”\*

Серії бетонів	Витрата матеріалів на $1 \text{ м}^3$ бетонної суміші, кг								
	Цемент	Вода	Пластифікатор	Поліпропіленова фібра типу “поліарм” (“мікроарм”)	Дрібний заповнювач		Фракції крупного заповнювача, мм		
					пісок фр. 0-1,25 мм	відсів фр. 1,25-5,0 мм	5-15	5-20	5-30
1 (18)	350	154	2,45	10 (1,8)	549	323	1060	-	-
2 (19)					367	215	1335	-	-
3 (20)					518	305	-	-	1124
4 (21)					335	196	-	-	1405
5 (22)				4 (0,9)	549	323	1335	-	-
6 (23)					367	215	1060	-	-
7 (24)					518	305	-	-	1124
8 (25)					335	196	-	-	1405
9 (26)				10 (1,8)	435	255	-	1247	-
10 (27)				4 (0,9)					
11 (28)				10 (1,8)	549	323	1060	-	-
12 (29)				7 (1,35)	437	256	-	-	1249
13 (30)					517	303	-	1123	-
14 (31)					333	195	-	1403	-
15 (32)									
16 (33)					435	255	-	1247	-
17 (34)									

\*бетони серій 1-17 диспесно армовані поліпропіленовою фіброю типу “поліарм”, 18-34 – типу “мікроарм” (витрата вказана в дужках)

Аналіз отриманих ПДС бетонів дисперсно-армованих поліпропіленовими фібрами (рис. 4) візуально демонструє серії бетонів з найвищими характеристиками тріщиностійкості - питомими енерговитратами на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини, питомими ефективними енерговитратами на статичне руйнування, статичним критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень, а саме серія 4 (бетон, армований поліпропіленовою фіброю типу “поліарм” з витратою фібри  $10 \text{ кг/м}^3$  в поєднанні з мінімальними відношеннями довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача 0,4 (що відповідає щебеню з максимальним розміром зерна 30 мм) та коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача 1,1) та серія 32 (бетон, армований поліпропіленовою фіброю типу “мікроарм” з витратою фібри  $1,35 \text{ кг/м}^3$ , відношенням довжини фібри до максимального розміру крупного заповнювача 0,6 (що відповідає щебеню з максимальним розміром зерна 20 мм) та коефіцієнтом розсуву зерен крупного заповнювача 1,4).

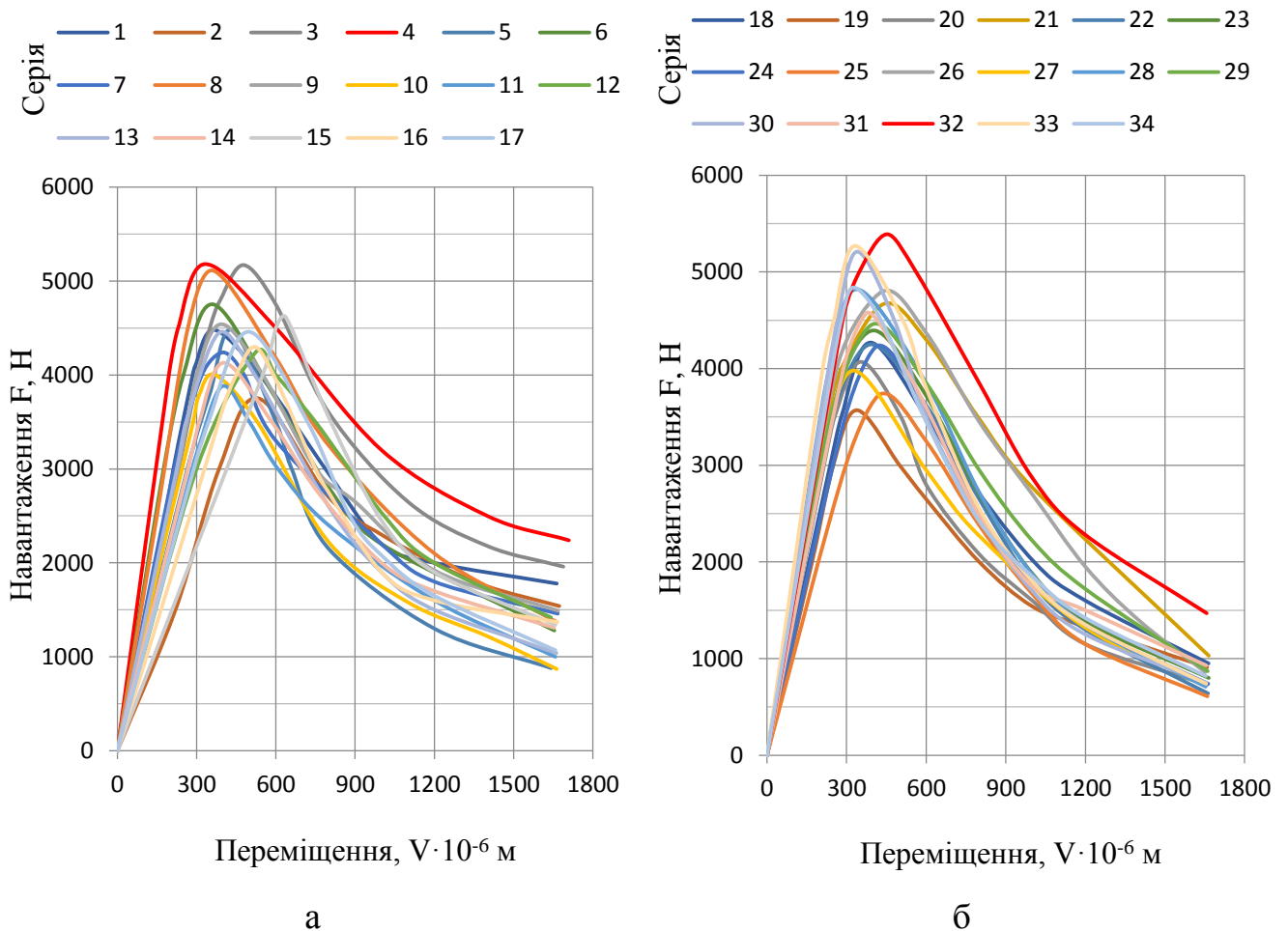


Рисунок 4 – Повні діаграми стану бетонів дисперсно-армованих поліпропіленовими фібрами: а – типу “поліарм”; б – типу “мікроарм”

Як видно з рис. 5, а, бетон серії 4, армований фіброю типу “поліарм” ( $10 \text{ кг/м}^3$ ), 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%. Така ж закономірність спостерігається і в бетонах, армованих фіброю типу “мікроарм” (рис. 5, б). Найвища

міцність на розтяг при згині серії 32 (11,40 МПа) перевищує найнижчу міцність при згині серії 19 (7,55 МПа) на 51 %.

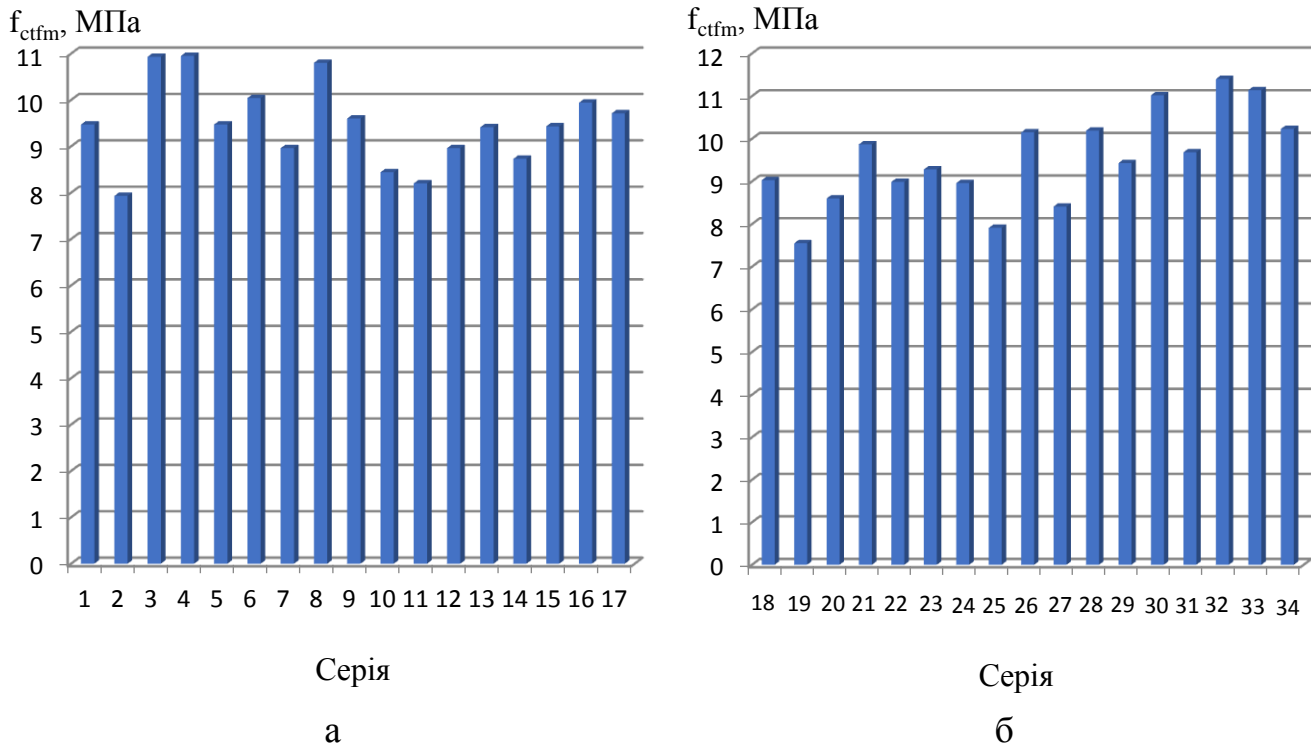


Рисунок 5 – Міцність на розтяг при згині бетонів дисперсно-армованих поліпропіленовими фібрами: а – типу “поліарм”; б – типу “мікроарм”

Максимальні питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування ( $G_f$ ) та найвищий статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень ( $K_i$ ) також відповідають бетонам серій 4 та 32 (рис. 6). Максимальні питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини ( $G_i$ ) відповідають бетону серії 32. 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 збільшення 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.

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

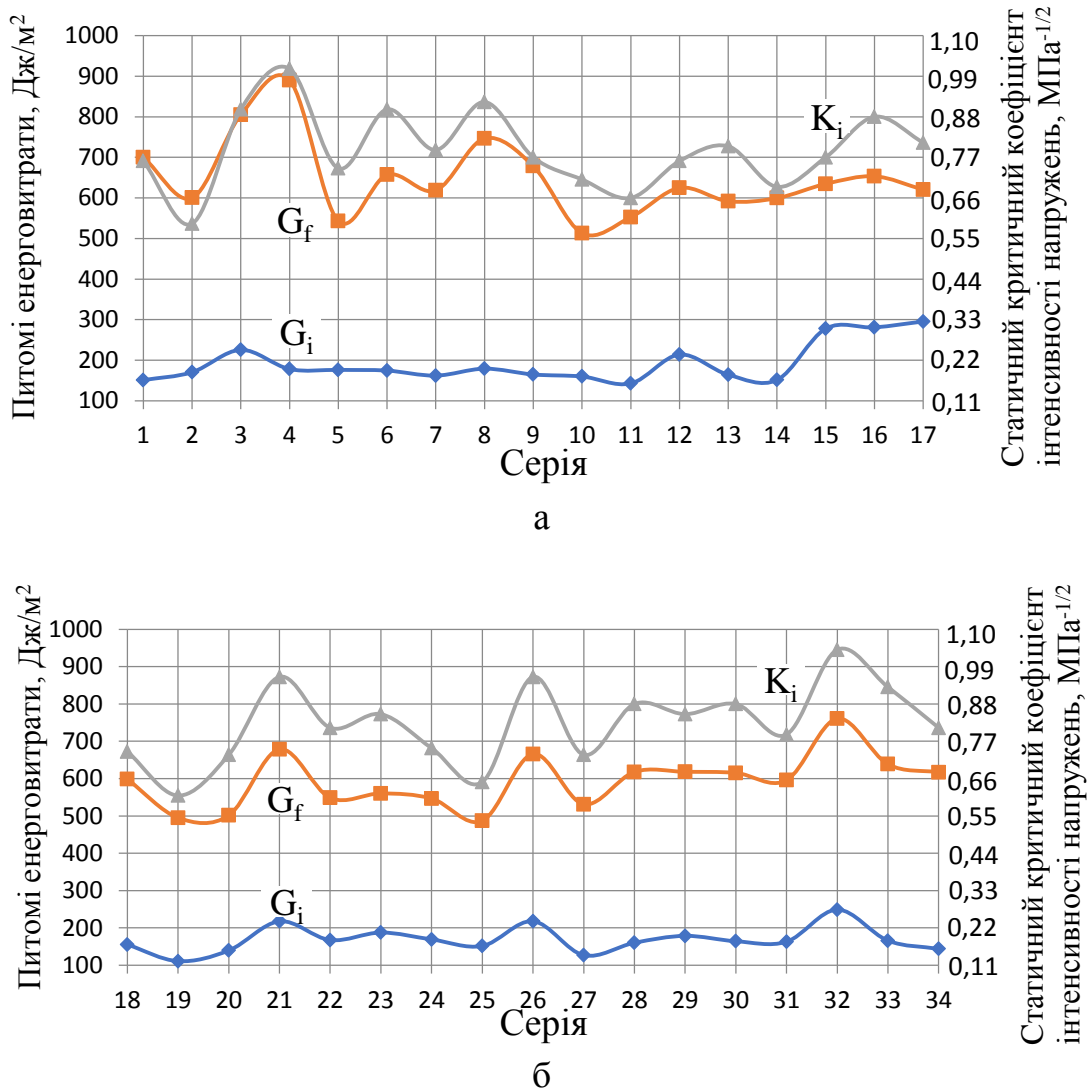


Рисунок 6 – Характеристики тріщиностійкості бетонів дисперсно-армованих поліпропіленовими фібрами: а – типу “поліарм”; б – типу “мікроарм”

У четвертому розділі представлено результати експериментально-статистичного моделювання міцнісних властивостей та характеристик тріщиностійкості бетонів з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”. Досліджено також фізико-механічні, експлуатаційні властивості, деформації усадки бетонів оптимального складу з композиційним дисперсним армуванням порівняно з неармованим бетоном.

Для встановлення оптимального вмісту поліпропіленових фібр типу “поліарм” та “мікроарм” застосувували трьохрівневий двохфакторний план. Як технологічні фактори впливу обраних витрати поліпропіленової фібри (табл. 3):  $X_1$  – типу “поліарм” –  $10 \pm 2$  кг на  $1 \text{ м}^3$  бетонної суміші,  $X_2$  – типу “мікроарм” –  $1,05 \pm 0,35$  кг/м<sup>3</sup>

Побудовані ПДС досліджуваних бетонів (рис. 7) дають можливість якісно оцінити вплив комбінації різної поліпропіленової фібри на досліджувані характеристики бетонів. Як видно з рис. 7, бетони з композиційним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” за характеристиками тріщиностійкості суттєво переважають неармований бетон.

Таблиця 3 – Витрата поліпропіленової фібри типу “поліарм” та “мікроарм” при проектуванні складу бетонів з комплексним дисперсним армуванням

Позначення серії бетонів		1	2	3	4	5	6	7	8	9	н/ф
Витрата поліпропіленової фібри, кг на м <sup>3</sup> бетонної суміші	типу типу “поліарм”	12	12	8	8	12	8	10	10	10	-
	типу “мікроарм”	1,4	0,7	1,4	0,7	1,05	1,05	1,4	0,7	1,05	-

Високі показники міцності на розтяг при згині та характеристики тріщиностійкості пояснюються ефектом “містка”, який який формується фібровим волокном і сповільнює розвиток макротріщини в докритичній стадії деформування та чинить опір дефрагментації в закритичній стадії руйнування полідисперсноармованих бетонів.

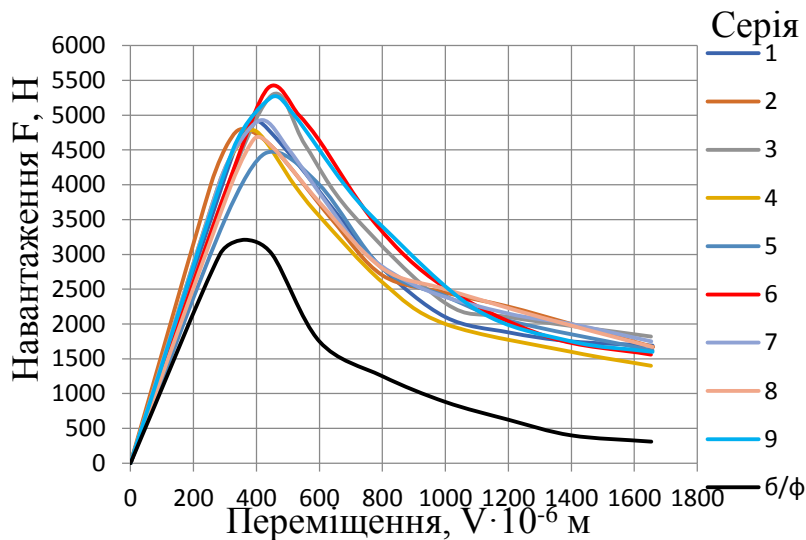
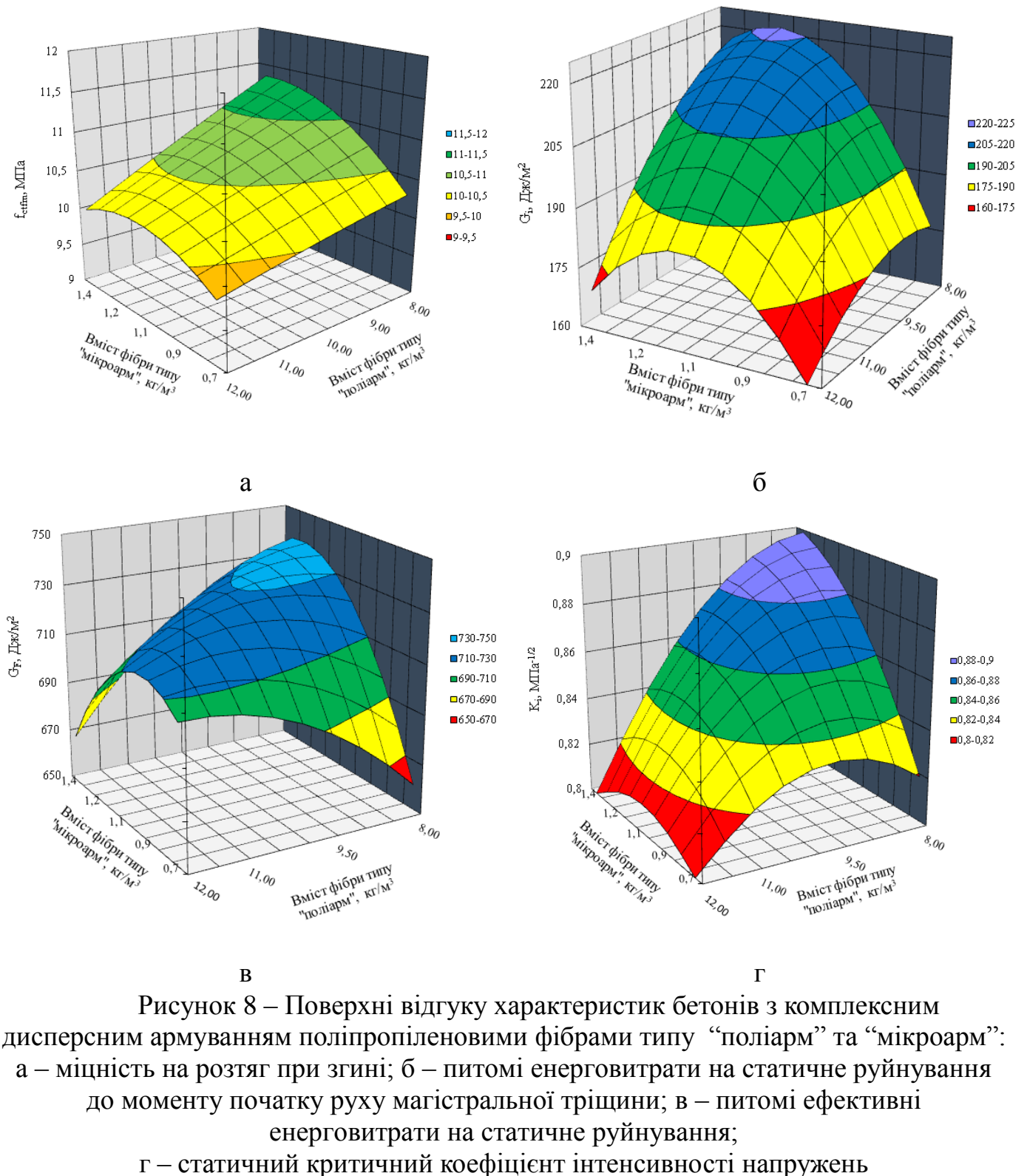


Рисунок 7 – ПДС неармованого бетону та бетонів з комплексним дисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”

Аналіз поверхонь відгуків (рис. 8) дає змогу визначити області значень технологічних факторів впливу, які забезпечують максимальні показники критеріїв оптимізації. Побудова поверхонь відгуку здійснювалась з використанням алгоритму табуляції функцій на заданій двовимірній сітці факторних значень.

Екстремуми досліджуваних характеристик оптимального складу бетону - міцність на розтяг при згині (11,40 МПа), питомі енерговитрати на статичне руйнування до моменту початку руху магістральної тріщини (207 Дж/м<sup>2</sup>), питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування (760 Дж/м<sup>2</sup>) та статичний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (0,86 МПа<sup>-1/2</sup>), досягаються при

комплексному поєднанні поліпропіленових фібр типу “поліарм” та “мікроарм” в кількості 8 та 1,05 кг/м<sup>3</sup> 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 (відношення міцності на розтяг при згині до міцності на стиск), який наведений на рис. 9, також вищий в усіх дисперсно-армованих бетонах порівняно з неармованим. Коефіцієнт ефективності дисперсного армування розробленого оптимального складу бетону з композиційним полідисперсним армуванням більший, ніж неармованого бетону на 32%.

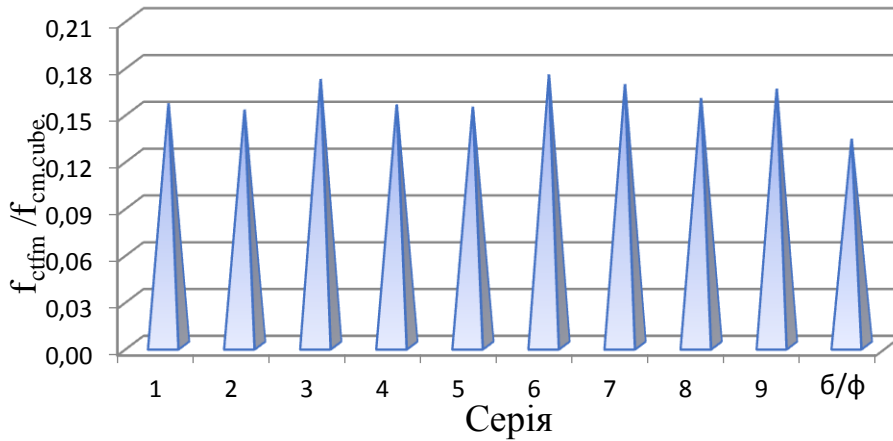


Рисунок 9 – Коефіцієнт ефективності композиційного дисперсного армування поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм”

Деформації зсідання займають важливе місце серед властивостей бетону і впливають на якість і довговічність конструкцій та споруд. Деформації зсідання дисперсно-армованих бетонів наведено на рис. 10. Результати досліджень свідчать, що 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%.

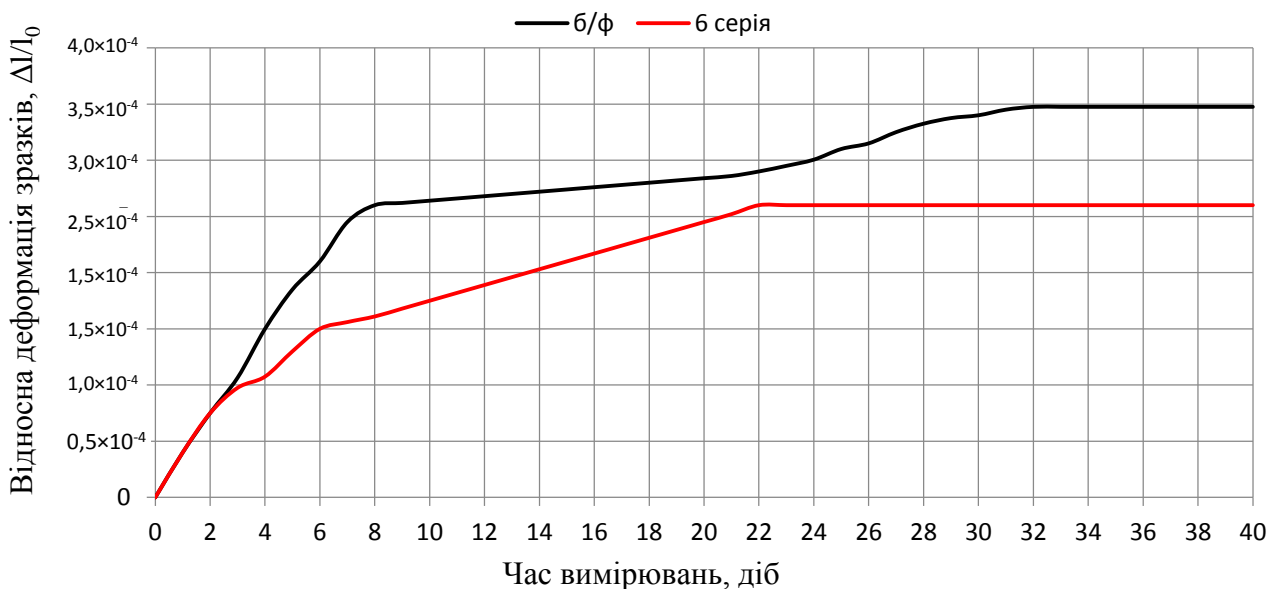


Рисунок 10 – Деформації зсідання композиційного дисперсного армування поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” та неармованого бетону



Будівельно-технічні властивості бетону з композиційним полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм”, “мікроарм” та неармованого бетону наведені в табл. 4. Звідси 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.

Таблиця 4 – Будівельно-технічні властивості бетону з композиційним полідисперсним армуванням поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” та неармованого бетону

Показник	Одиниці вимірювання	Значення показника для бетону	
		неармованого	з композиційним армуванням
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, $\Delta f_{cm}$	%	12,3	9,8
Стираність	г/см <sup>2</sup>	0,27	0,22
Питомі енерговитрати на початок статичного руйнування, $G_i$	Дж/м <sup>2</sup>	112	207
Загальні питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування, $G_F$	Дж/м <sup>2</sup>	327	760
В'язкість руйнування, $K_i$	МПа·м <sup>1/2</sup>	0,57	0,86

У п'ятому розділі представлені результати дослідно-промислового впровадження розроблених бетонів дисперсно-армованих поліпропіленовими фібрами типу “поліарм” та “мікроарм” транспортного призначення.

Промислову апробацію проведено при виготовленні цементно-бетонного покриття паркінгу при складських приміщеннях у с. Муроване (Львівська ОТГ). Результати випробувань підтвердили досягнення високої ранньої міцності на стиск ( $f_{cm.cube}^3=34,3$  МПа) та проектної міцності на розтяг при згині ( $f_{ctfm}^{28}=9,5$  МПа).

Результати випробувань бетонної суміші та бетону наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Властивості бетонної суміші та бетону

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

Порівняльний розрахунок витрат на влаштування дорожнього покриття для традиційного та розробленого бетону свідчить, що використання бетону з класом міцності на згин  $B_{cb}$  7,2 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 м<sup>2</sup> дорожнього покриття.

## 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/м<sup>3</sup>,  $\rho_k=335$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_b=196$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{ш}$  (фр. 5-30 мм) =1405 кг/м<sup>3</sup>,  $V/\rho_c=0,44$ , витрата фібри 10 кг/м<sup>3</sup>; та “мікроарм”:  $\rho_c=350$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_k=435$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_b=255$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{ш}$  (фр. 5-20 мм) =1247 кг/м<sup>3</sup>,  $V/\rho_c=0,44$ , витрата фібри 1,35 кг/м<sup>3</sup>. 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/м<sup>3</sup>) та

“мікроарм” ( $X_2=0,7; 1,05; 1,4 \text{ кг/м}^3$ ). При вмісті фібри типу “поліарм” ( $8 \text{ кг/м}^3$ ) та типу “мікроарм” ( $1,05 \text{ кг/м}^3$ ) досягаються найвища міцність на розтяг при згині  $11,40 \text{ МПа}$  (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  $12 \text{ діб}$ ) 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  $62,4 \text{ МПа}$ , міцність на розтяг при згині –  $62,4 \text{ МПа}$ , водопоглинання за масою –  $2,3\%$ , зниження міцності після  $400$  циклів заморожування – відтавання –  $9,8\%$ , стираність –  $0,22 \text{ г/см}^2$ .

8. На виробничій базі ПП “ЗАХІД-БЕТОН-БУД” проведено дослідно-промислово 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  $18 \text{ см}$  із забезпеченням розрахункових коефіцієнтів надійності. Питомий економічний ефект від зниження вартості матеріалів і виконання робіт складає  $12 \text{ тис. грн}$  на  $1000 \text{ м}^2$  дорожнього покриття.

## 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).

*Статті у науковому періодичному виданні іншої держави:*

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.

**АНОТАЦІЯ**

**Турба Ю. В. Тріщиностійкість дисперсно-армованого бетону. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступення кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. – Національний

університет “Львівська політехніка”, Міністерство 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.

## АННОТАЦІЯ

**Турба Ю. В. Трещиностойкость дисперсно-армированного бетона. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискания ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2021.

Диссертация посвящена вопросам повышения трещиностойкости цементных бетонов путем композиционного полидисперсного армирования полипропиленовыми фибрами типа “полиарм” и “микроарм” для улучшения их прочностных свойств и силовых и энергетических характеристик трещиностойкости. Установлена эффективность дисперсного армирования бетонов транспортного назначения.

Показано влияние расходов фибр, отношение длины фибры до максимального размера зерен крупного заполнителя, коэффициента роздвига зерен крупного заполнителя на прочность на растяжение при изгибе и характеристики трещиностойкости дисперсно-армированных цементных бетонов.

Разработан и оптимизирован по критериям прочности, силовых и энергетических характеристик трещиностойкости склады цементных бетонов с композиционным полидисперсным армированием полипропиленовыми фибрами типа “полиарм” и “микроарм” и доказана их эффективность.

Исследованы деформации усадки и строительно-технические свойства разработанных бетонов. Проведены опытно-промышленное их внедрения и обоснованно технико-экономическую эффективность.

**Ключевые слова:** дисперсно-армированные бетоны, полипропиленовая фибра типа "полиарм" и "микроарм", полная диаграмма состояния, характеристики трещиностойкости, технологические факторы.

## ABSTRACT

**Turba Y. V. Crack resistance of dispersedly reinforced concrete. – 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. - 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.





Підписано до друку \_\_.\_\_.2021 р.

Формат \_\_\_×\_\_\_ —/—. Папір . Гарнітура Times New Roman.

Друк \_\_\_\_\_. Ум. друк. арк. \_\_\_\_\_.

Наклад \_\_\_\_\_ прим. Зам. № \_\_\_\_\_.

---

Надруковано \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_