

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)
Будівельної механіки
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: Дослідження впливу наповнювача з відходів металообробки
на фізико-механічні властивості бетону

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МБнм
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Венгров В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Коваль І.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мещерякова О.М.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Ясній В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Качка О.І.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)

Кафедра Будівельної механіки
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
ЯСНІЙ Володимир
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

студенту Венгрову Василю Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження впливу наповнювача з відходів металообробки на фізико-механічні властивості бетону

Керівник роботи к.т.н., доц., Коваль Ігор Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «09» 04 2026 року № 4/9-178

2. Термін подання студентом завершеної роботи 24.05.26

3. Вихідні дані до роботи Огороджувальні конструкції дев'ятиповерхового житлового будинку

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вплив наповнювачів на фізико-механічні властивості бетону. Аналіз основних наповнювачів для максимізації екологічного ефекту. Методика проведення дослідження. Дослідження характеристик бетонних зразків із наповнювачем – стружкою надламу. Дослідження характеристик бетонних зразків із наповнювачем – зливною стружкою. Аналіз результатів досліджень. Заходи охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Актуальність теми. Методика проведення дослідження. Об'єкт дослідження. Основні характеристики. Загальні висновки.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 Огляд літературних джерел	7
1.1 Від античних розчинів до нанотехнологій майбутнього.....	7
1.2 Огляд науково-технічної літератури та патентних джерел щодо використання вторинної металевої сировини у виробництві фібробетонів.....	10
1.3 Фізико-механічні, геометричні та морфологічні характеристики сталеві стружки	14
1.3.1 Морфологічна класифікація металевих відходів механообробки.....	14
1.3.2 Геометричні та морфометричні параметри.....	15
1.3.3 Фізико-механічні особливості та ефект наклепу.....	15
1.4 Висновки за розділом 1.....	16
РОЗДІЛ 2 Методика дослідження	17
2.1 Методика визначення середньої густини бетонних кубиків.....	17
2.2 Методика визначення водопоглинання бетону.....	18
2.3 Методика визначення міцності бетону на стиск.....	18
2.4 Методика попередньої підготовки та очищення відходів металообробки від залишків мастильно-охолоджувальних рідин.....	20
2.5 Висновки за розділом 2.....	22
РОЗДІЛ 3 Науково-дослідницький	24
3.1 Результати досліджень.....	24
3.1.1 Очищення відходів металообробки від залишків мастильно-охолоджувальних рідин.....	25
3.1.2 Визначення середньої густини бетонних кубиків.....	28
3.1.3 Визначення водопоглинання бетону.....	33
3.1.4 Визначення міцності бетону на стиск.....	38
3.2 Аналіз результатів досліджень.....	47
3.3 Висновки за результатами дослідження.....	49
РОЗДІЛ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	51

4.1 Охорона праці.....	51
4.1.1 Нормативно-правова база та організаційні засади безпеки в дослідній лабораторії	51
4.1.2 Ідентифікація та аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів	52
4.1.3 Інженерно-технічні та санітарно-гігієнічні заходи забезпечення безпеки	53
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях та цивільний захист.....	54
4.2.1 Ідентифікація та аналіз джерел надзвичайних ситуацій техногенного характеру	54
4.2.2 Комплекс заходів протипожежного захисту та вибухобезпеки.....	55
4.2.3 Алгоритм дій персоналу при виникненні аварійних ситуацій та заходи цивільного захисту.....	56
4.2.4 Організація першої домедичної допомоги при виробничому травматизмі.....	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
БІБЛІОГРАФІЯ.....	61

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку будівельної індустрії характеризується жорсткими вимогами до капітальності, довговічності та екологічної безпеки будівельних матеріалів. Традиційний цементний бетон, попри свої беззаперечні переваги, такі як висока міцність на стиск, доступність сировини та технологічна гнучкість, має суттєві конструкційні недоліки. Головними серед них є низька міцність на розтяг та вигин, схильність до крихкого руйнування під дією динамічних навантажень, а також інтенсивне мікротріщиноутворення на ранніх етапах твердіння.

Традиційним шляхом вирішення цих проблем є дисперсне армування (фіброармування), яке дозволяє трансформувати крихку матрицю цементного каменю у квазіпластичний композит – фібробетон. Використання промислової сталевих фібри заводського виготовлення забезпечує високі фізико-механічні показники матеріалу, проте її широке впровадження стримується високою вартістю первинного металу та значними енерговитратами на його виробництво, що суперечить сучасним концепціям декарбонізації та сталого розвитку.

У цьому контексті особливої актуальності набуває перехід до принципів циркулярної економіки, що передбачає пряме залучення вторинних ресурсів та промислових відходів у виробничі цикли без проміжних енергомістких процесів переплавлення. Щорічно на підприємствах машинобудування та металообробки утворюються мільйони тонн металевих стружки. Традиційна утилізація цих відходів шляхом переплавки супроводжується значними викидами парникових газів та втратою маси металу через чад. Пряме використання відходів металообробки як дисперсної арматури в бетонах дозволяє одночасно вирішити два критичні завдання: утилізувати техногенні відходи та знизити собівартість високоміцних будівельних композитів.

Проте ефективність використання металевих стружки в бетоні залежить від її морфологічних та геометричних характеристик, які визначаються режимами різання металу та типом оброблюваного матеріалу. Найменш дослідженим у

науковій літературі залишається питання диференційованого впливу різних видів стружки, зокрема стружки зливу та стружки надламу, на комплекс реологічних та фізико-механічних властивостей бетону.

Стружка зливу, що утворюється при обробці пластичних сталей на високих швидкостях, має вигляд протяжних, суцільних спіралей або стрічок. Вона володіє високим потенціалом до просторового анкерування в матриці, працюючи аналогічно промисловій фібрі, проте створює підвищені ризики грудкування суміші («ефект їжака»).

Стружка надламу, яка формується під час обробки крихких матеріалів або за специфічних низькошвидкісних режимів різання, складається з окремих, слабо пов'язаних між собою сегментів та елементів неправильної форми. Вона легше розподіляється в об'ємі суміші, виконуючи роль як мікроармувального компонента, так і жорсткого дисперсного наповнювача, що ущільнює структуру бетону.

Відсутність системних порівняльних даних щодо впливу цих двох типів відходів металообробки на кінетику набору міцності, пористість, водонепроникність та характер руйнування бетону стримує розробку нормативної бази для їхнього практичного застосування. Необхідність встановлення закономірностей формування структури та властивостей бетонів, армованих стружкою зливу та стружкою надламу, визначає актуальність, наукове та практичне значення даного дослідження.

Мета й завдання дослідження. Метою роботи є встановлення науково обґрунтованих закономірностей впливу добавок відходів металообробки (сталеві стружки зливу та стружки надламу) на реологічні, фізико-механічні та експлуатаційні властивості бетону для створення екологічно безпечних та економічно ефективних дисперсно-армованих будівельних композитів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- провести аналітичний огляд науково-технічної літератури та патентних джерел щодо досвіду використання вторинної металеві сировини у виробництві фібробетонів;

- дослідити та систематизувати фізико-механічні, геометричні та морфологічні характеристики сталеві стружки зливу та стружки надламу, отриманої з підприємств металообробки;

- розробити методика попередньої підготовки та очищення відходів металообробки від залишків мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) для забезпечення належної адгезії з цементною матрицею;

- провести комплексні лабораторні випробування зразків бетону із різним ступенем масового наповнення (дозування) досліджуваними типами стружки та визначити їхній вплив на фізико-механічні характеристики бетону, визначити оптимальний відсоток армування для кожного виду стружки;

- оцінити техніко-економічну ефективність та екологічний ефект від впровадження розроблених складів бетону у виробництво.

Об'єкт дослідження – процес формування фізико-механічних властивостей дисперсно-армованого бетону під впливом геометричних і кількісних параметрів металевих добавок техногенного походження.

Предмет дослідження – закономірності зміни міцності на стиск, густини та водопоглинання бетону залежно від виду (стружка зливу та стружка надламу) та концентрації добавок відходів металообробки в цементній матриці.

Публікації. Результати магістерської роботи опубліковано у збірнику тез доповідей науково-технічної конференції. За результатами досліджень опубліковано тези доповідей у ІХ Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 24-25 квітня 2026 року.) [1].

Ключові слова: ВІДХОДИ МЕТАЛООБРОБКИ, БЕТОН, ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Від античних розчинів до нанотехнологій майбутнього

Бетон часто сприймають як символ сучасної урбанізації, продукт промислової революції та епохи хмарочосів. Проте історія цього матеріалу налічує тисячоліття, демонструючи тривалий шлях еволюції будівельних технологій [2]. Пройшовши шлях від перших експериментів із вапняком до створення надміцних сучасних композитів, бетон став найпопулярнішим штучним матеріалом на планеті, без якого неможливо уявити людську цивілізацію [3].

Найдавніші археологічні знахідки, що нагадують за структурою бетон, датуються приблизно 7000–6500 рр. до н. е. [2]. На території сучасної Галілеї (Ізраїль) під час розкопок неолітичних поселень було виявлено підлоги, виготовлені з випаленого вапняку, змішаного з водою та гравієм. Отриманий розчин мав високу щільність завдяки ретельному ручному трамбуванню. Справжніми майстрами раннього бетону вважають набатеїв – стародавнє арабське плем'я, яке контролювало оазиси в пустелях сучасних Йорданії та Сирії близько IV ст. до н. е. [2]. Вони виявили, що якщо змішати місцевий вапняк із вулканічним попелом, матеріал набуває гідравлічних властивостей, тобто здатності твердіти не лише на повітрі, а й під водою [3]. Набатеї будували підземні резервуари для збору дощової води, покриваючи їх цим розчином, що дозволило їм забезпечити водопостачання у надпосушливому кліматі.

Паралельно власні рецепти в'яжучих матеріалів розвивали в Стародавньому Єгипті та Китаї [3]. Єгиптяни використовували гіпсові та вапняні розчини для скріплення блоків під час будівництва монументальних споруд, а в Китаї під час зведення Великого китайського муру до вапняного розчину додавали органічний компонент – клейку рисову кашу, що значно підвищувало міцність і еластичність кладки на стиках.

Справжній технологічний прорив, який за масштабами можна порівняти із сучасним будівництвом, здійснили давні римляни. Приблизно у III ст. до н. е. вони

впровадили у будівництво матеріал під назвою *Opus caementicium* (римський бетон) [4]. Головним секретом римського бетону стало використання пуцолану – дрібного вулканічного попелу, який видобували поблизу містечка Пуццуолі біля підніжжя Везувію [5]. Римський інженер Вітрувій у своєму фундаментальному трактаті «Десять книг про архітектуру» детально описав цей феномен: «Існує різновид попелу, який від природи має дивовижні властивості. Якщо його змішати з вапном і щебенем, він не тільки надає міцності будівлям взагалі, але навіть коли з нього будують моли в морі, вони тверднуть під водою». Завдяки тривалим пуцолановим реакціям римляни змогли побудувати масштабні інфраструктурні об'єкти: акведуки, терми, дороги, порти та монументальні споруди [5]. Найяскравішим прикладом є Пантеон у Римі (зведений близько 125 р. н. е.), чий бетонний купол діаметром 43,3 метра досі залишається найбільшим у світі неармованим бетонним куполом [6]. Римляни також застосовували технологічні хитрощі: що вище піднімався купол, то легші наповнювачі вони використовували – від важкого базальту в основі до легкої пемзи на вершині [4]. З падінням Римської імперії у V ст. н. е. унікальний рецепт пуцоланового бетону був втрачений майже на тисячу років. Середньовічна Європа повернулася до використання простого вапняного розчину, який значно поступався римському матеріалу за міцністю та водостійкістю.

Інтерес до бетону повернувся в епоху Ренесансу, коли в 1414 році було перевідкрито рукописи Вітрувія [4]. Проте промислове відродження матеріалу відбулося лише у XVIII столітті в Англії. У 1756 році англійський інженер Джон Смітон отримав завдання відбудувати Еддістонський маяк, який до цього неодноразово руйнувався штормами [3]. Смітон почав експериментувати з різними видами вапняку і виявив, що вапняк із високим вмістом глини (так зване гідравлічне вапно) ідеально твердне у солоній воді. Маяк Смітона успішно витримав випробування стихією, що дало поштовх до нових хімічних пошуків у галузі в'язучих речовин. Наступний вирішальний крок зробив каменярь Джозеф Аспдін. У 1824 році він запатентував в'язучий матеріал під назвою «Портландцемент». Назву матеріал отримав через те, що бетон, виготовлений на

його основі, своїм кольором і міцністю нагадував природний камінь, який видобували на англійському острові Портленд. У 1845 році Ісаак Джонсон вдосконалив технологію Аспдіна, запропонувавши випалювати суміш глини та вапняку за значно вищих температур (близько 1400–1450 °С) до стану спікання [3]. Саме цей метод ліг в основу сучасного промислового виробництва цементу.

Попри високу міцність на стиск, новий бетон залишався крихким матеріалом, нездатним витримувати великі розтягуючі навантаження. Цю проблему вирішило поєднання бетону з металом [3]. Винахід залізобетону пов'язують із французьким садівником Жозефом Моньє, який у 1867 році запатентував метод виготовлення діжок для рослин із бетонної суміші, армованої залізною сіткою. Моньє помітив, що метал і бетон мають майже однаковий коефіцієнт теплового розширення, що забезпечує їхню сумісну роботу під навантаженням.

Наприкінці XIX століття інженер Франсуа Еннебік першим розробив комплексну систему залізобетонного монолітного каркасу, що назавжди змінило архітектурний вигляд міст [3]. XX століття стало епохою залізобетонного буму: з'явилися технології попередньо напруженого залізобетону, що дозволило будувати мости з величезними прогонами, гідроелектростанції та хмарочоси.

Сьогодні наука про бетон вийшла на мікро- та нанорівні [2]. Традиційний портландцемент поступово модифікується або замінюється екологічними альтернативами. Оскільки світове виробництво цементу є джерелом близько 8% викидів вуглекислого газу, сучасні дослідження спрямовані на створення «зеленого» бетону: геополімерних композитів (без використання цементу), бетонів із додаванням наночастинок та вторинної сировини промисловості [3]. Розвиваються технології самовідновлювального бетону, який містить біокапсули з бактеріями, що активуються під дією вологи у тріщинах і виділяють кальцит для їхнього автоматичного «заліковування» [2]. Крім того, модифікований бетон став базовим матеріалом для будівельного 3D-друку, відкриваючи нову сторінку в архітектурній історії людства.

1.2 Огляд науково-технічної літератури та патентних джерел щодо використання вторинної металевої сировини у виробництві фібробетонів

Сучасне будівельне матеріалознавство дедалі більше орієнтується на розроблення високотехнологічних композитів із замкненим життєвим циклом, що зумовлено необхідністю скорочення вуглецевого сліду та забезпечення раціонального використання природних ресурсів [7]. У цьому контексті традиційні бетони, незважаючи на високу міцність на стиск, мають істотні конструктивні обмеження, пов'язані з низькою міцністю на розтяг, підвищеною крихкістю та схильністю до тріщиноутворення під дією експлуатаційних навантажень [8]. Саме тому для підвищення тріщиностійкості та експлуатаційної надійності таких матеріалів широко застосовують дисперсне армування фіброю, під якою розуміють короткі волокна сталевих дротів, відходи цвяхового виробництва, металеву стружку, а також синтетичні, базальтові чи скляні волокна [9]. Водночас виробництво первинної сталевих фібри (Industrial Steel Fiber, ISF) потребує значних енергетичних витрат, що стимулює пошук і впровадження вторинної металевої сировини як більш ресурсоефективної альтернативи.

Особливого значення використання вторинних будівельних і металевих відходів набуває в умовах повоєнної відбудови зруйнованих міст України [10]. Поєднання цегляного та бетонного рециклінгу із рецикльованою сталевих фіброю (Recycled Tire Steel Fiber, RTSF) створює передумови для виготовлення екологічно орієнтованих залізобетонних конструкцій безпосередньо в зоні відновлювальних робіт. Такий підхід дає змогу не лише зменшити обсяги захоронення відходів, а й істотно скоротити логістичні витрати, енерговитрати на транспортування та загальне техногенне навантаження на довкілля. Рецикльована сталевих фібра, що отримується шляхом механічного подрібнення, просіювання та магнітної сепарації відпрацьованих автомобільних шин, демонструє значний потенціал як ефективний армувальний компонент [11]. Її зміцнювальна дія пояснюється багаторівневим механізмом тріщиностримування (crack-bridging), завдяки якому стримується розвиток мікродефектів і уповільнюється їх перехід у макроскопічні руйнування.

Для оцінювання стану подібних конструкцій без їх пошкодження широко застосовують неруйнівні методи контролю, зокрема вимірювання швидкості поширення ультразвукового імпульсу (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) та визначення динамічного модуля пружності [12]. У бетонах на основі вторинних заповнювачів (Recycled Aggregate Concrete, RAC), армованих мікрофіброю в кількості 0,4–1,0% за об'ємом, показники UPV демонструють стійкий зв'язок із кінетикою наростання міцності, що підтверджує можливість формування щільної та однорідної структури за оптимального вмісту волокон на рівні близько 0,8%.

Окрему перспективну групу дисперсних армувальних добавок становлять металеві відходи токарної та фрезерної обробки — стружка, тирса й чипси [13]. Їхня особливість полягає у значній варіативності геометричних параметрів і форми часток, унаслідок чого такі відходи можуть одночасно виконувати функцію мікрофібри та часткової заміни дрібного заповнювача. Експериментальні дослідження впливу сталевих токарних стружок (lathe waste) у кількості 5%, 10% та 15% від маси цементу засвідчили помітне покращення як міцнісних, так і теплофізичних властивостей бетону. Зокрема, міцність на стиск збільшилася відповідно на 13,9%, 20,8% та 36,3%, міцність на згин — на 7,1%, 12,7% та 18,2%, а міцність на розтяг при розколюванні — на 4,2%, 33,2% та 38,4%. Одночасно коефіцієнт теплової дифузії зменшився на 25,2%, тоді як питома теплоємність матеріалу за максимального дозування (15% стружки) зростає на 23%. Це свідчить про потенціал таких бетонів для використання в конструкціях, де важливо забезпечити підвищену теплову інерцію поряд із високими механічними характеристиками.

Отримані результати узгоджуються з даними інших дослідників. Так, при заміні дрібного заповнювача сталевими стружками в обсягах 22%, 33% і 44% від маси цементу було зафіксовано приріст міцності на стиск до 27% та збільшення міцності на згин на 50–100% [13]. Подібним чином, часткова або повна заміна кварцового піску залізними пилом чи подрібненими сталевими відходами в діапазоні від 25% до 100% маси заповнювача забезпечує підвищення міцності на стиск на 24–50%. Крім того, введення дисперсних сталевих часток у кількості 10%, 20% та 30% маси

цементу сприяє зростанню міцності на стиск відповідно на 40%, 51% та 62%. Сукупність наведених даних підтверджує, що використання вторинних металевих відходів як армувальних і частково заповнювальних компонентів є науково обґрунтованим і технологічно перспективним напрямом розвитку сучасних бетонів.

Для зручності аналізу та практичного проектування бетонних сумішей у таблиці 1.1 наведено зведені порівняльні характеристики різних композитів, армованих вторинною металевою сировиною.

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні ефекти дисперсного армування вторинними металами

Тип та джерело вторинного металу	Концентрація у складі матриці	Зміна міцності на стиск	Зміна міцності на згин
Рециклізована сталева фібра з шин (RSF)[9]	4.0% - 6.0% (від маси цементу)	+22.2%	+47.0%
Мікро-сталева фібра з вторинним заповнювачем[12]	0.8% (об'ємна частка)	+15.0%	+85.0%
Рециклізована дрібна сталева фібра (RTSF) у складі УНПС [11]	25.0% заміщення первинної фібри	Зниження в межах 5-10%	Покращення тріщиностійкості
Спіралеподібна стружка механічної обробки[13]	1.5% (об'ємна частка)	Помірне зростання	+54.7% (несуча здатність балки)
Сталеві токарні чипси (lathe waste)[14]	15.0% (від маси цементу)	+36.3%	+18.2%

Патентний аналіз у досліджуваній сфері демонструє наявність системного науково-технічного пошуку, спрямованого на усунення ключових недоліків

вторинної металевої фібри. До таких недоліків, зокрема, належать схильність волокон до агломерації (утворення конгломератів), недостатня корозійна стійкість, а також нестабільність геометричних параметрів, що негативно впливає на рівномірність їх розподілу в цементній матриці та, відповідно, на експлуатаційні характеристики композиту.

У цьому контексті заслуговує на увагу технічне рішення, запропоноване в патенті [15], яке спрямоване на запобігання комкуванню тонкого сталевих дроту діаметром 0,05–0,3 мм, отриманого в процесі переробки шин. Зокрема, передбачено об'єднання окремих волокон у пасма із застосуванням тимчасового водорозчинного клею. Альтернативним підходом є використання сумішей волокон із варіативною довжиною та діаметром, при цьому контроль параметра відношення довжини до діаметра ($l/d \leq 250$) забезпечує їх ефективне диспергування в об'ємі бетонної суміші ще до початку процесів тужавіння. Таким чином, досягається суттєве підвищення однорідності армування.

Подальший розвиток ідей підвищення ефективності дисперсного армування простежується у патенті [16], де обґрунтовується застосування високоміцної фібри з межею міцності понад 2000 МПа. Геометричні параметри таких волокон варіюються в межах довжини 3–30 мм і товщини 0,08–0,30 мм, а їх поверхня модифікується шляхом формування періодичних вм'ятин глибиною 0,01–0,05 мм або шляхом створення сплющених кінцевих ділянок. Зазначені конструктивні особливості виконують функцію мікроанкерів, які ефективно взаємодіють із перехідною інтерфейсною зоною (FITZ), забезпечуючи підвищену адгезію та опір висмикуванню волокон із цементного каменю.

Крім того, окрему увагу в сучасних розробках приділено технологічним аспектам нанесення фібробетону, зокрема процесу торкретування. У патенті [17] розглядається проблема втрат матеріалу внаслідок відскоку фібри при напиленні. Для її вирішення запропоновано використання сталевих волокон зі складною геометрією, що включає відхилені проміжні ділянки та спеціально сформовані кінцеві анкери. Така конфігурація сприяє кращому закріпленню волокон у бетонній

масі під час нанесення та дозволяє суттєво знизити рівень відскоку, що, у свою чергу, підвищує технологічну ефективність і економічність процесу.

1.3 Фізико-механічні, геометричні та морфологічні характеристики сталеві стружки

1.3.1 Морфологічна класифікація металевих відходів механообробки

У процесі різання металів на токарних та фрезерних верстатах утворюються різні види відходів, які за своєю природою суттєво відрізняються від традиційної сталеві фібри. Основними типами відходів механічної обробки є стружка зливу (зливна стружка) та стружка надламу (стружка надлому). Формування цих типів стружки визначається механікою зрізання шару металу та пластичною деформацією в первинній і вторинній зонах зсуву.

Стружка зливу утворюється переважно під час обробки пластичних, в'язких металів та сплавів (низьковуглецеві сталі, мідь тощо) за високих швидкостей різання та малих подач інструменту. Вона являє собою безперервну, суцільну стрічку або щільну спіраль із постійною товщиною. Її внутрішній бік (прирізцевий), який безпосередньо взаємодіє із передньою поверхнею різального інструменту, під дією високого тиску та сил тертя стає гладким, блискучим і бездефектним. Зовнішній бік зливної стружки має матову текстуру та характеризується великою кількістю дрібних пилкоподібних зазубрин, що утворюються внаслідок циклічного зсуву та сколювання мікрооб'ємів металу. Стружка надламу формується під час обробки крихких матеріалів (сірий чавун, бронза) або пластичних матеріалів за специфічних несприятливих умов (низькі швидкості різання, велика товщина зрізу, малі або негативні передні кути нахилу інструменту, відсутність змащувально-охолоджувальних рідин). Процес різання супроводжується руйнуванням металу у площині зсуву, що призводить до відпадання окремих ізольованих шматочків (сегментів) неправильної форми. Оброблена поверхня та сама стружка надламу мають високу шорсткість, численні зазубрини та мікротріщини.

1.3.2 Геометричні та морфометричні параметри

Геометричні параметри стружки безпосередньо визначають її поведінку як дисперсної арматури у бетонній матриці:

Слендерність (l/d): Для стружки зливу значення l/d може варіюватися в межах від 15 до понад 100. Усереднені показники відходів токарного виробництва демонструють товщину (еквівалентний діаметр) біля 1,2 мм та довжину нарізаних фрагментів 20 мм, що відповідає відношенню $l/d \approx 16,7$. Навпаки, стружка надламу має мінімальну довжину і характеризується низьким показником слендерності ($l/d \leq 5$), що наближає її геометрію до ізометричних часток (мікрозаповнювачів).

Коефіцієнт усадки стружки (ζ): Цей параметр кількісно оцінює ступінь пластичної деформації металу під час зрізання. Усадка стружки проявляється в тому, що її товщина a_c стає більшою за товщину зрізу a , а довжина l_c – меншою за шлях інструменту l_s . Математично коефіцієнт усадки визначається за формулою:

$$\zeta = a_c / a = l_s / l_c \quad (1.1)$$

Оскільки об'єм металу в процесі деформації залишається незмінним, для пластичних сталей значення ζ завжди більше одиниці і зазвичай перебуває в діапазоні $1,5 \leq \zeta \leq 4,0$. Високі значення ζ свідчать про глибокі структурні зміни та високе напруження в тілі стружки.

1.3.3 Фізико-механічні особливості та ефект наклепу

Фізико-механічний стан металевих відходів механообробки істотно відрізняється від первинного прокату завдяки явищу наклепу. В процесі інтенсивного зсувного деформування у первинній зоні різання метал зазнає значного деформаційного зміцнення. Кристалічні зерна витягуються в напрямку зсуву, подрібнюються, різко зростає щільність дислокацій, що призводить до значного збільшення твердості та межі пружності матеріалу. Стружка зливу стає

жорсткою, голчастою, набуваючи підвищеної опірності до згинання, що є позитивним фактором для армування бетонних композитів.

Проте суттєвим негативним чинником є забруднення поверхні стружки. Під час токарної чи фрезерної обробки робоча зона інструменту безперервно зрошується змащувально-охолоджувальними рідинами (ЗОР) та мастильними емульсіями. Залишковий оливний плівочний шар на поверхні стружки погіршує адгезійну здатність контакту з цементним тілом, перешкоджаючи утворенню міцного хімічного та фізичного зв'язку в зоні FITZ. Для вирішення цієї проблеми у промисловості застосовують промивання розчинниками або термічне знежирення, хоча численні дослідження доводять можливість використання незнежиреної стружки із незначним зниженням ефективності.

1.4 Висновки за розділом 1

Проведений аналіз літературних джерел підтвердив еволюційний розвиток бетону як багатокомпонентного інженерного матеріалу – від примітивних в'язучих систем до сучасних високоміцних та екологічно орієнтованих композитів, що відповідають вимогам сталого будівництва.

Встановлено, що використання вторинної металевої сировини, зокрема сталеві фібри та відходів механообробки, є ефективним напрямом підвищення тріщиностійкості та механічних характеристик бетонів при одночасному зниженні ресурсних та енергетичних витрат.

Виявлено, що основними обмежувальними факторами застосування вторинної фібри є її неоднорідність, схильність до агломерації та знижена адгезія, що потребує вдосконалення геометричних параметрів і технологій введення в цементну матрицю.

Обґрунтовано доцільність подальших досліджень металевої стружки як альтернативного армувального компонента, з урахуванням її морфологічних, фізико-механічних характеристик та впливу на структуру і властивості фібробетонів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження базових фізичних характеристик бетону виконувалися на серійних зразках-кубах правильної геометричної форми. Усі випробування проводилися в лабораторних умовах за температури навколишнього середовища $(25\pm 10)^\circ\text{C}$ і відносної вологості повітря $(60\pm 10)\%$ відповідно до регламенту ДСТУ Б В.2.7-170:2008[18] та ДСТУ Б В.2.7-214:2009[19].

2.1 Методика визначення середньої густини бетонних кубиків

Для дослідження середньої густини бетону використовували серію, що складалася з трьох зразків.

Перед початком зважування та обміру поверхню кубиків ретельно очищали від залишків мастила, пилу та технічних напливів за допомогою дротяної щітки.

Порядок проведення випробування включав такі етапи:

1. Геометричний обмір:

- За допомогою штангенциркуля з точністю до 0,1 мм вимірювали лінійні розміри кожного зразка-куба для подальшого обчислення його об'єму V (м^3).

2. Лабораторне зважування:

- Визначали масу зразків m (кг) у поточному стані вологості на вагах із похибкою зважування не більше 0,1%.

3. Математичний розрахунок:

- Середню густину окремого зразка (ρ_w , $\text{кг}/\text{м}^3$) обчислювали за формулою:

$$\rho_w = m/V \quad (2.1)$$

За кінцеве значення середньої густини бетону досліджуваної серії приймали середнє арифметичне результатів випробувань усіх трьох кубиків.

2.2 Методика визначення водопоглинання бетону

Визначення водопоглинання матеріалу можливо проводити за масою (W_m) та об'ємом (W_o) на тій самій серії зразків після визначення їхньої густини.

Експеримент виконували у такій послідовності:

1. Термічне висушування:

- Зразки кубиків поміщали в сушильну шафу за температури $(105 \pm 10)^\circ\text{C}$ і сушили до досягнення постійної маси m_c (останні зважування з інтервалом у 2 години показували різницю не більше 0,1%).

2. Водонасичення зразків:

- Кубики охолоджували та встановлювали у посудину, заповнену водою з температурою $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Рівень води в процесі всього випробування підтримували на 50 мм вище верхньої грані кубиків.

3. Контрольне зважування:

- Насичення проводили до постійної маси m_v . Зважування фіксували кожні 24 години, попередньо обтерши поверхню кубика вологою віджатою тканиною.

4. Розрахунок показників:

- Водопоглинання за масою ($W_m, \%$) обчислювали за формулою:

$$W_m = ((m_v - m_c) / m_c) \times 100\% \quad (2.2)$$

Показник водопоглинання за об'ємом ($W_o, \%$) визначали як добуток водопоглинання за масою на відношення середньої густини сухого бетону до густини води.

2.3 Методика визначення міцності бетону на стиск

Визначення границі міцності бетону на стиск здійснювали на гідравлічному пресі згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-214:2009[19] шляхом руйнівного навантаження серії зразків-кубів.

Експериментальний процес виконували за такою схемою:

1. Підготовчий етап:

- Перед випробуванням лінійні розміри кубиків вимірювали лінійкою або штангенциркулем для обчислення площі робочого перерізу A (мм²).

Поверхні зразків перевіряли на площинність та відсутність раковин чи напливів.

2. Центрування зразка:

- Кубик встановлювали на нижню опорну плиту преса центровано відносно його вертикальної осі.

Зразок орієнтували так, щоб стискальна сила була спрямована паралельно шарам укладання бетонної суміші (навантаження прикладали до бічних граней, які під час виготовлення прилягали до металевих стінок форми).

3. Процес навантаження:

- Навантаження на зразок подавали безперервно зі сталою швидкістю наростання напружень ($0,6 \pm 0,2$) МПа/с до моменту його руйнування.

У ході експерименту автоматично або візуально фіксували максимальне руйнівне зусилля F (Н).

4. Математичний розрахунок:

- Міцність на стиск окремого кубика (R , МПа) визначали за формулою:

$$R = \alpha \times F / A \quad (2.3)$$

де α – масштабний коефіцієнт для приведення результатів до міцності базового еталонного зразка з розміром ребра 150 мм (для кубів із ребром 100 мм $\alpha=0,95$, для 150 мм $\alpha=1,0$).

За кінцеве значення міцності бетону на стиск досліджуваної серії приймали середнє арифметичне значення результатів випробувань зразків у серії.

2.4 Методика попередньої підготовки та очищення відходів металообробки від залишків мастильно-охолоджувальних рідин

Використання відходів металообробки (стружки, шроту, дисперсного кускового брухту) як фібри або дисперсного наповнювача у цементних бетонах є ефективним методом підвищення їхньої міцності на розтяг, ударної в'язкості та тріщиностійкості. Проте головним бар'єром на шляху до створення надійного залізобетонного композиту є наявність на поверхні металу залишків мастильно-охолоджувальних рідин (МОР).

МОР містять мінеральні оливи, ПАР, сульфонати, парафіни та інгібітори корозії. Якщо метал не очистити, ці речовини утворюють стійку гідрофобну плівку, яка:

- Повністю блокує хімічну та механічну адгезію між сталеву поверхнею та цементним каменем;
- Сповільнює гідратацію цементу на межі поділу фаз (контактна зона);
- Призводить до висмикування металевих елементів під дією навантажень, що зводить нанівець ефект армування.

Поетапна лабораторна методика попередньої підготовки й очищення відходів металообробки від МОР складається з наступних етапів:

1. Попереднє механічне розділення.

Перед початком хімічної обробки відходи необхідно звільнити від надлишку рідкої фази та механічних домішок (абразивного пилу, шламу).

Центрифугування – металеву стружку або шрот поміщають у перфоровані центрифуги. Під дією відцентрових сил видаляється до 85–90% вільної (незв'язаної молекулярно) олії та водної емульсії. Суміш евакуйованого МОР збирається для подальшої утилізації або регенерації.

Магнітна сепарація – проводиться для відділення залізовмісних відходів від сторонніх немагнітних включень (наприклад, залишків абразивних кругів верстатів, залишків деревини чи пластику).

2. Хімічне знежирення.

Для руйнування стійкої гідрофобної плівки ПАР та мінеральних олив застосовують один із трьох методів (або їх комбінацію):

Варіант А. Лужне промивання (Найбільш екологічний та економічний метод).

Метал піддається обробці гарячими розчинами технічних мийних засобів або індивідуальних лугів.

Розчин обов'язково підігрівається до температури 70–80°C. За високої температури в'язкість олив падає, а швидкість омилення жирів та емульгації нафтопродуктів суттєво зростає.

Час витримки у ванні становить 15–30 хвилин при постійному барботуванні (перемішуванні розчину стисненим повітрям) або механічному струшуванні.

Варіант Б. Органічна екстракція.

Використовується при підвищених вимогах до чистоти поверхні або у лабораторній практиці.

Металеві відходи промивають в органічних розчинниках: бензин-розчинник (уайт-спірит), ацетон або нафтовий нефрас.

Метод базується на швидкому розчиненні неполярних молекул мінеральних олив у полярних або неполярних органічних розчинниках.

Обробка проводиться за кімнатної температури протягом 10–15 хвилин у закритих ємностях з дотриманням правил пожежної безпеки.

Варіант В. Ультразвукова інтенсифікація.

Для дрібнодисперсних відходів (металевий пил, коротка січена стружка) хімічну обробку лугами проводять в ультразвукових ваннах (частота 22–44 кГц). Ультразвукова кавітація буквально «зриває» мікроплівки МОР навіть з глибоких тріщин та дефектів шорсткої поверхні металу за 3–5 хвилин.

3. Промивання та Нейтралізація.

Після хімічного знежирення на поверхні металу залишаються хімічні реагенти, які можуть порушити лужне середовище всередині цементної матриці або викликати її корозію.

Гаряче промивання – відходи переміщують у ванну з проточною технічною водою ($T = 50\text{--}60^\circ\text{C}$) для видалення залишків лужних розчинів чи розчинників та емульгованих нафтопродуктів.

Холодне промивання – остаточне споліскування холодною водою. Контроль якості промивання здійснюється за водневим показником (рН) змивної води – він має дорівнювати рН вихідної чистої води (близько 7,0).

4. Сушіння та Активація поверхні.

Залишати вологий метал на повітрі не можна, оскільки почнеться миттєва атмосферна корозія з утворенням пухкої іржі (гідроксиду заліза), яка також знижує адгезію до цементу.

Примусове сушіння – очищений брукт негайно висушують у сушильних шафах або конвеєрних сушарках за температури $105\text{--}120^\circ\text{C}$ протягом 20–30 хвилин до повного видалення вологи.

2.5 Висновки за розділом 2

У межах дослідження розроблено та обґрунтовано комплексну методику оцінювання основних фізико-механічних характеристик бетону, що включає визначення середньої густини, водопоглинання та міцності на стиск. Застосування стандартизованих лабораторних процедур забезпечує достовірність і відтворюваність результатів, що є необхідною умовою для магістерського дослідження.

Встановлено, що визначені показники густини та водопоглинання є інформативними характеристиками структури бетону, оскільки відображають його щільність, пористість і потенційну стійкість до дії вологи. Це дає змогу оцінювати придатність матеріалу до експлуатації в умовах змінного вологісного режиму.

Показано, що випробування на стиск є базовим методом визначення несучої здатності бетону та дає можливість кількісно оцінити ефективність його внутрішньої структури. Використання серійних зразків і приведення результатів до еталонного розміру забезпечують коректність порівняння отриманих даних.

Обґрунтовано, що попереднє очищення відходів металообробки від мастильно-охолоджувальних рідин є обов'язковою умовою їх подальшого використання як дисперсного армувального компонента. Запропонована послідовність механічного, хімічного та термічного очищення створює передумови для підвищення адгезії металу до цементної матриці та, відповідно, для отримання більш ефективних фібробетонних композитів.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ

3.1 Результати досліджень

Для забезпечення статистичної надійності отриманих експериментальних даних, оцінки відтворюваності результатів та суворого дотримання методологічного регламенту національних стандартів (зокрема ДСТУ Б В.2.7-170:2008[18] та ДСТУ Б В.2.7-214:2009[19]), програмою досліджень було передбачено формування паралельних серій зразків-кубів. Кожен досліджуваний склад бетону (як базовий, так і модифікований) був представлений серією з трьох зразків-близнюків правильної геометричної форми (рис.3.1). Такий підхід дозволяє виконати коректну математико-статистичну обробку результатів із визначенням середнього арифметичного значення та відсіюванням грубих похибок вимірювань.



Рисунок 3.1 – Серія з трьох зразків-близнюків правильної геометричної форми

Загальна матриця планування експерименту та номенклатура виготовлених зразків включала такі класифікаційні групи:

1. Контрольна серія зразків – базовий склад дрібнозернистого бетону, виготовлений за вихідною рецептурою без введення дисперсних металевих елементів. Ця партія виступала в ролі бази порівняння для оцінки ефективності фіброармування.

2. Дослідні серії зразків, модифіковані зливною стружкою – композити, структуровані механічно подрібненою дискретною сталевую фіброю зливного типу. З метою встановлення оптимального ступеня армування було реалізовано три рівні варіювання концентрації металевих відходів у кількості 0,5 %, 1,0 % та 1,5 % від маси.

3. Дослідні серії зразків, модифіковані стружкою зламу – фібробетонні композити, армовані попередньо очищеною за хіміко-термічним регламентом стружкою надламу. Для забезпечення зіставності результатів було дотримано аналогічного кроку варіювання вмісту дисперсної фази, який становив 0,5 %, 1,0 % та 1,5 % відповідно.

3.1.1 Очищення відходів металообробки від залишків мастильно-охолоджувальних рідин

Використання металевої стружки як дисперсного армувального елемента у цементних бетонах дозволяє значно підвищити їхню міцність. Однак ефективність такого армування прямо залежить від адгезії між сталевую поверхнею та гідратованим цементним каменем у контактній зоні.

Наявність на відходах металообробки мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) створює стійку гідрофобну плівку, яка повністю блокує дифузію іонів цементного розчину до металу, уповільнює процеси твердіння та призводить до висмикування фібри під навантаженням. Тому було проведено поетапне очищення та термічна активація сталевую стружки:

1. Попереднє механічне розділення та сепарація надлишків МОР.

Цей етап є обов'язковим для видалення основної маси рідкої фази (до 85–90%), що дозволяє мінімізувати подальшу витрату хімічних розчинників. Відбувається завантаження стружки у бункери з конічним дном. Протягом 2–4 годин під дією сили тяжіння відбувається стікання вільних масел та емульсій у збірні резервуари.

2. Органічна екстракція в ацетоні.

Метою цього етапу є повне розчинення та видалення залишків важких вуглеводнів, парафінів, сульфонатів та фосфоризованих присадок, які не піддаються механічному видаленню.

3. Двоетапне рідинне промивання (Гаряче та Холодне).

Після виходу з ацетонової ванни на поверхні металу залишається найтонша плівка розчину, що містить сліди розчиненої олії. Якщо ацетон просто випарується, ці олії знову осядуть на сталі. Для запобігання цьому застосовують гідродинамічне промивання. При гарячому промиванні за високої температури води (75–85 °С) залишки ацетону миттєво закипають (температура кипіння ацетону становить 56,1 °С), викликаючи мікробурління безпосередньо на поверхні сталі. Це сприяє ефективному відриву гідрофобних мікрочасток від металу. Гаряча вода емульгує залишки масел, переводячи їх у зважений стан. Час обробки — 7–10 хвилин. При холодному промиванні стружка подається у фінішну ванну з чистою водопровідною водою кімнатної температури (15–22 °С). Обробка супроводжується механічним перемішуванням протягом 5 хвилин.

4. Термічна обробка та хімічна активація поверхні.

Цей етап є фінальним і виконує подвійну функцію: повне термічне видалення (піроліз) можливих нанорозмірних залишків органіки та створення високоадгезійного мікрорельєфу на поверхні сталі. Температуру в камері рівномірно піднімають зі швидкістю 10–15 °С/хв до досягнення відмітки 360 °С. Матеріал витримують за температури 360 °С протягом 30–45 хвилин. Після закінчення витримки піч вимикають, і стружка охолоджується разом із піччю до температури 40–50 °С.

У межах проведення експериментальних досліджень як дисперсну арматуру було використано два морфологічні типи відходів металообробки: зливну стружку (рис. 3.2) та стружку надламу (рис. 3.3). Специфіка геометричної форми вихідної зливної стружки, яка характеризується значною довжиною та спіралеподібною конфігурацією, зумовила необхідність її попереднього механічного подрібнення. Цей етап підготовки є критично важливим для запобігання ефекту просторового зчеплення та скупчення волокон під час замішування бетонної суміші – так званого явища «їжакування» (утворення гетерогенних конгломератів фібри). Локальне скупчення металевих елементів порушує гомогенність структури цементної матриці, призводить до формування підвищеної макропористості та, як наслідок, знижує міцнісні показники залізобетонного композиту.



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд зливної стружки



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд стружки надламу

Візуальний аналіз вихідного стану матеріалу (рис. 3.2) показав, що поверхня зливної стружки практично не містила залишків мастильно-охолоджувальних рідин (МОР), що пояснюється високими температурними режимами в зоні різання під час її утворення. Натомість для стружки надламу було характерне значне поверхневе забруднення технологічними нафтопродуктами та емульсіями. Наявність стабільної гідрофобної плівки МОР на поверхні металу суттєво погіршує адгезійну здатність та блокує хімічну взаємодію на межі поділу фаз "сталь – цементний камінь". Це зумовило необхідність обов'язкової реалізації повного циклу хіміко-термічного очищення та пасивації для даного типу відходів за вищеписаним регламентом.

3.1.2 Визначення середньої густини бетонних кубиків

Після завершення комплексу підготовчих операцій, регламентованих у підпункті 3.1.1, наступним етапом експериментальних досліджень стало

приготування модифікованих бетонних сумішей запроєктованого компонентного складу. Формування дослідних зразків-кубів здійснювали у відповідних металевих формах (рис. 3.4) із належним ущільненням суміші на лабораторному вібромайданчику.

Тривалість витримування бетонних композитів безпосередньо у формах до моменту їх розпалублення становила 5 діб. Після демонтажу форм зразки-куби переміщували до кімнати витримування, де забезпечувалися стабільні температурно-вологісні параметри протягом нормативного терміну – не менше 28 діб. Протягом усього періоду дозрівання бетону виконували регулярне примусове зволоження відкритих граней зразків. Цей захід був спрямований на мінімізацію деформацій ранньої повітряної усадки та нівелювання внутрішніх напружень у матриці, що дозволило забезпечити безперервний перебіг процесів гідратації цементного в'язучого і повністю запобігти утворенню усадочних мікротріщин.



Рисунок 3.4 – Формування дослідних зразків-кубів у відповідних металевих формах

На основі первинних експериментальних даних, отриманих шляхом прецизійного лабораторного зважування дослідних зразків-кубів, модифікованих сталевую зливною стружкою, було зафіксовано їхні фактичні масові характеристики у проектному віці. Наступним кроком, із урахуванням геометричних обмірів та відповідно до методологічних вимог ДСТУ Б В.2.7-170:2008[18], здійснено розрахункове визначення показників середньої густини для кожного одиничного зразка-близняка. Повний масив отриманих результатів, а також дані їхньої первинної математико-статистичної обробки (включаючи визначення середньоарифметичних значень для кожної серії) систематизовано та представлено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Повний масив отриманих результатів (зливна стружка)

Вміст стружки, %	Маса зразка №1, кг	Маса зразка №2, кг	Маса зразка №3, кг	Густина зразка №1, кг/м ³	Густина зразка №2, кг/м ³	Густина зразка №3, кг/м ³	Середня густина, кг/м ³
0,5	8,331	8,303	8,289	2419,8	2427,7	2439,7	2429,1
1	8,305	8,319	8,269	2428,3	2432,3	2433,8	2431,5
1,5	8,222	8,282	8,233	2436,1	2453,9	2439,4	2443,2

З метою наочної візуалізації, аналізу та математичного опису виявлених закономірностей, на основі табличних даних було побудовано графічні залежності (рис. 3.5). Наведена крива дозволяє простежити кінетику та характер зміни середньої густини дисперсно-армованого композиту залежно від відсоткової концентрації введених відходів металообробки, а також оцінити їхній вплив на щільність упаковки макроструктури бетону.

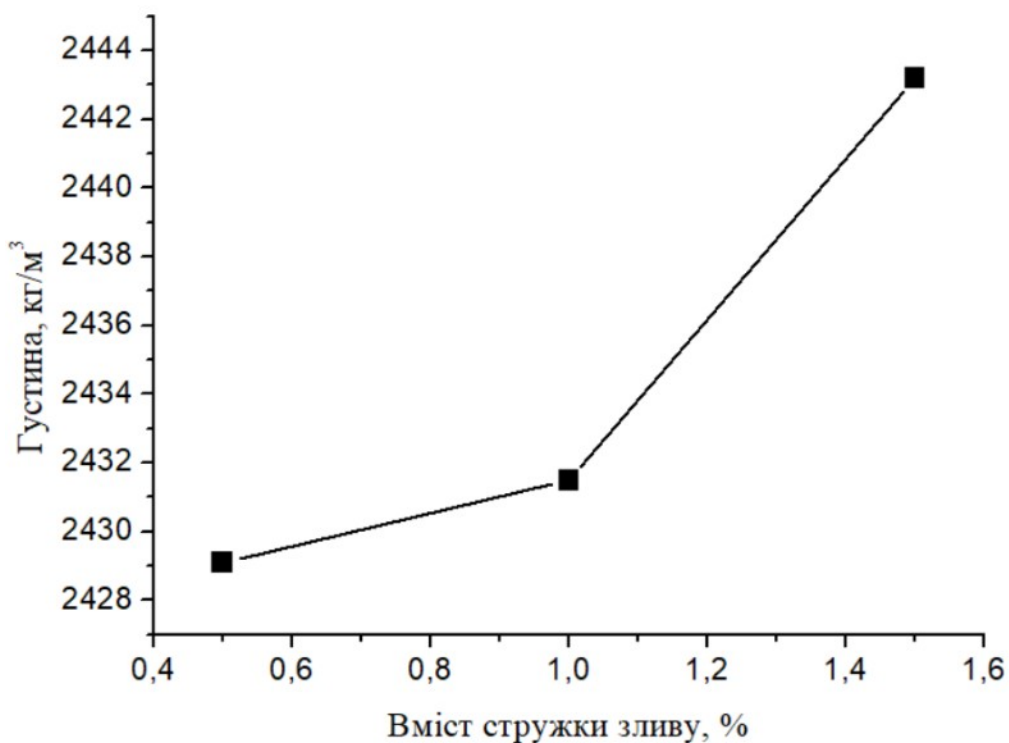


Рисунок 3.5 – Графік залежності густини від вмісту стружки

З метою проведення порівняльного аналізу та встановлення загальних закономірностей, аналогічний комплекс мас-геометричних вимірювань та аналітичних розрахунків було реалізовано для серій зразків-кубів, модифікованих сталеву стружкою надламу. Повний масив отриманих експериментальних даних разом із результатами їх первинної математико-статистичної обробки систематизовано та зведено в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Повний масив отриманих результатів (стружка надламу)

Вміст стружки, %	Маса зразка №1, кг	Маса зразка №2, кг	Маса зразка №3, кг	Густина зразка №1, кг/м ³	Густина зразка №2, кг/м ³	Густина зразка №3, кг/м ³	Середня густина, кг/м ³
0,5	7,731	7,725	7,728	2275,5	2288,9	2289,8	2289,8
1	7,161	7,145	7,222	2093,8	2103,0	2111,6	2102,8
1,5	7,211	7,17	7,125	2094,5	2096,4	2083,2	2091,4

Графічну інтерпретацію виявленої залежності, що відображає характер зміни показників густини від концентрації дискретного наповнювача, наведено на рисунку 3.6.

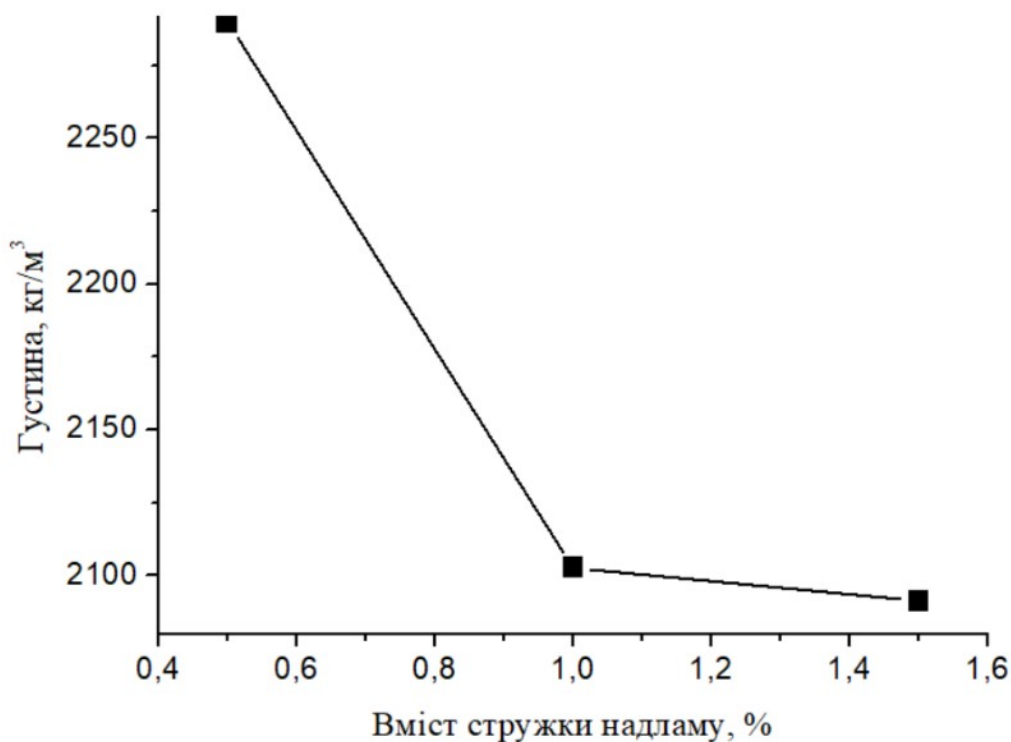


Рисунок 3.6 – Графік залежності густини від вмісту стружки

Для ілюстрації методики проведення експерименту, а також фіксації морфологічних особливостей отриманих матеріалів, на рисунках 3.7 та 3.8 представлено характерний зовнішній вигляд дослідних зразків кожної класифікаційної групи (модифікованих зливною стружкою та стружкою надламу відповідно) безпосередньо у ході виконання етапу лабораторного зважування на прецизійних електронних вагах.

На основі аналізу результатів випробувань контрольної серії зразків, виготовлених за базовою рецептурою без введення модифікувальних добавок, було встановлено, що інтегральний показник їхньої середньої густини становить 2348,5 кг/м³.



а

б

в

Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд дослідних зразків із вмістом зливної стружки:

а – 0,5% б – 1,0% в – 1,5%



а

б

в

Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд дослідних зразків із вмістом стружки надламу:

а – 0,5% б – 1,0% в – 1,5%

3.1.3 Визначення водопоглинання бетону

На першому етапі оцінки гідрофізичних властивостей розробленого матеріалу було зафіксовано масові характеристики дослідних зразків-кубів, модифікованих сталеву зливною стружкою, у стані повного водонасичення, досягнутого шляхом їх прецизійного лабораторного зважування. Надалі, на основі отриманих вагових параметрів зразків-близнюків і відповідно до методологічних

вимог ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [18], здійснено розрахункове визначення інтегральних показників водопоглинання для кожного одиничного елемента серії. Повний масив експериментальних результатів, а також дані їх первинної математико-статистичної обробки (включаючи обчислення середньоарифметичних значень для кожної паралельної серії) систематизовано й представлено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Повний масив отриманих результатів (стружка зливу)

Вміст стружки, %	Маса водонасиченого зразка №1, кг	Маса водонасиченого зразка №2, кг	Маса водонасиченого зразка №3, кг	Водопоглинання зразка №1, %	Водопоглинання зразка №2, %	Водопоглинання зразка №3, %	Середнє водопоглинання, %
0,5	8,423	8,398	8,381	1,10	1,14	1,11	1,12
1	8,396	8,41	8,356	1,10	1,09	1,05	1,08
1,5	8,314	8,366	8,307	0,98	1,01	1,03	1,01

З метою наочної візуалізації, аналізу та математичного опису встановлених закономірностей, на основі табличних даних було побудовано графік залежності (рис. 3.9). Наведений графічний тренд дозволяє детально простежити характер зміни та динаміку показників водопоглинання дисперсно-армованого композиту залежно від відсоткової концентрації введених відходів металообробки, що безпосередньо відображає характер трансформації капілярно-пористої структури цементної матриці.

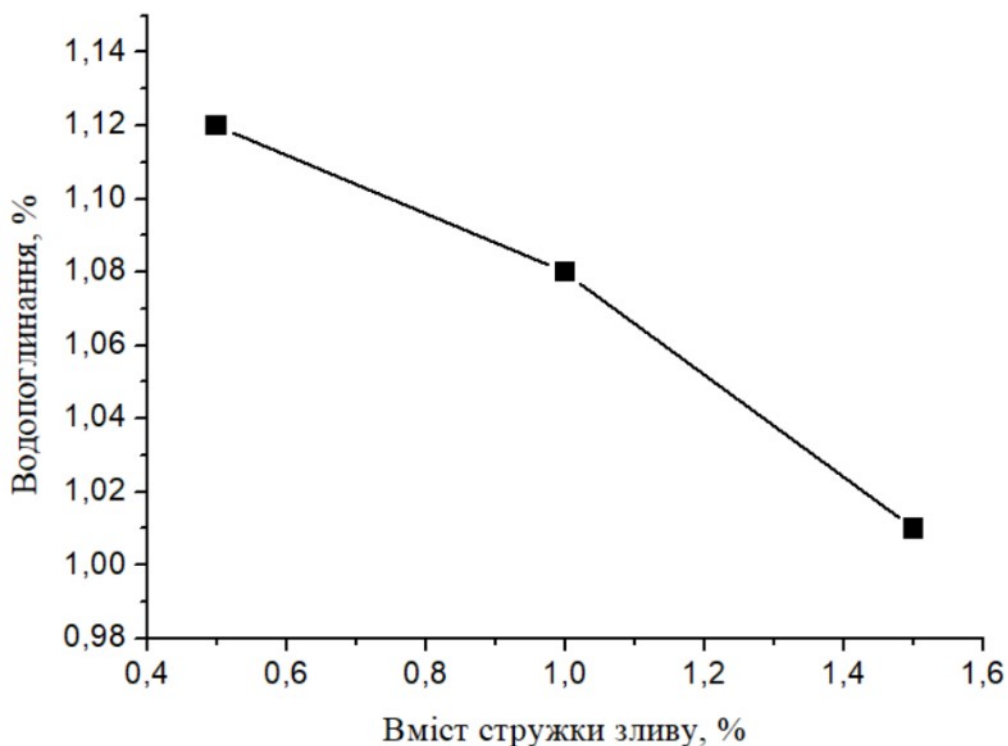


Рисунок 3.9 – Графік залежності водопоглинання від вмісту стружки

З метою проведення порівняльного аналізу та встановлення узагальнених закономірностей, аналогічний комплекс мас-об'ємних вимірювань та аналітичних розрахунків було реалізовано для серій зразків-кубів, модифікованих сталеною стружкою надламу під час оцінки їхнього водопоглинання. Повний масив отриманих експериментальних даних разом із результатами їх первинної математико-статистичної обробки (включаючи обчислення середньоарифметичних значень) систематизовано та зведено в таблицю 3.4.

Графічну інтерпретацію встановленої параметричної залежності, що відображає характер зміни показників водопоглинання композиту залежно від концентрації дискретного наповнювача, наведено на рисунку 3.10.

Таблиця 3.4 – Повний масив отриманих результатів (стружка надламу)

Вміст стружки, %	Маса водонасиченого зразка №1, кг	Маса водонасиченого зразка №2, кг	Маса водонасиченого зразка №3, кг	Водопоглинання зразка №1, %	Водопоглинання зразка №2, %	Водопоглинання зразка №3, %	Середнє водопоглинання, %
0,5	7,822	7,817	7,82	1,18	1,19	1,19	1,19
1	7,321	7,246	7,265	1,37	1,41	1,45	1,41
1,5	7,305	7,225	7,262	1,30	1,40	1,28	1,33

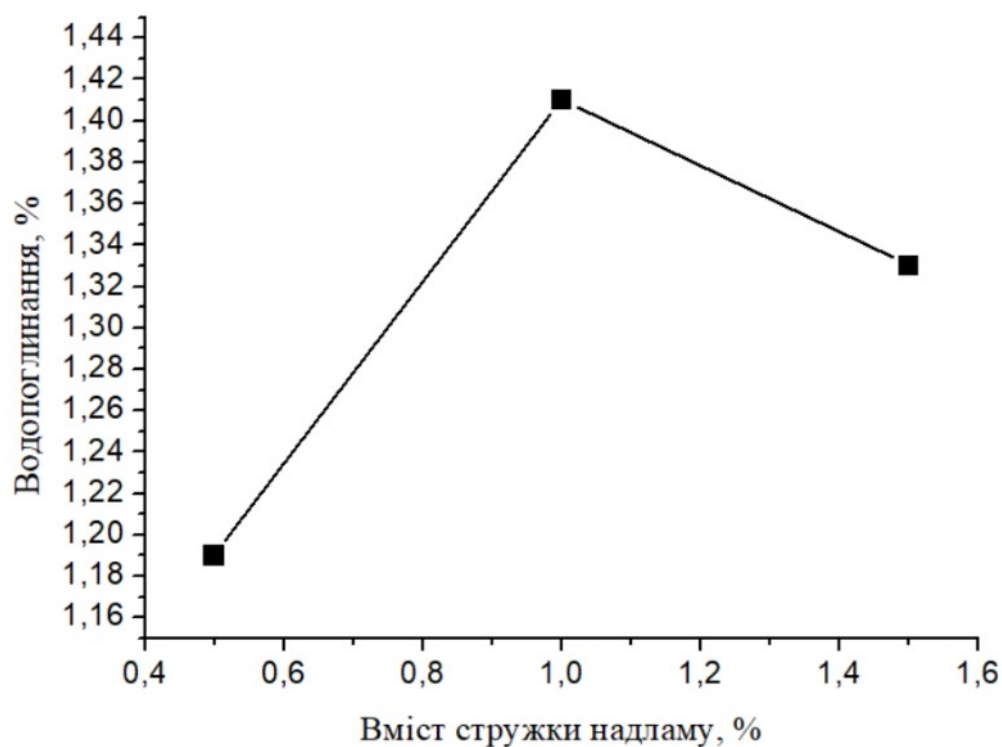


Рисунок 3.10 – Графік залежності водопоглинання від вмісту стружки

Для наочної ілюстрації прийнятої методики проведення експерименту, а також фіксації морфологічних особливостей отриманих матеріалів, на рисунках 3.11 та 3.12 представлено характерний зовнішній вигляд дослідних зразків кожної класифікаційної групи (модифікованих зливною стружкою та стружкою надламу

відповідно). Візуалізацію виконано безпосередньо у ході реалізації етапу лабораторного зважування на електронних вагах для зразків, що перебували у стані повного водонасичення.



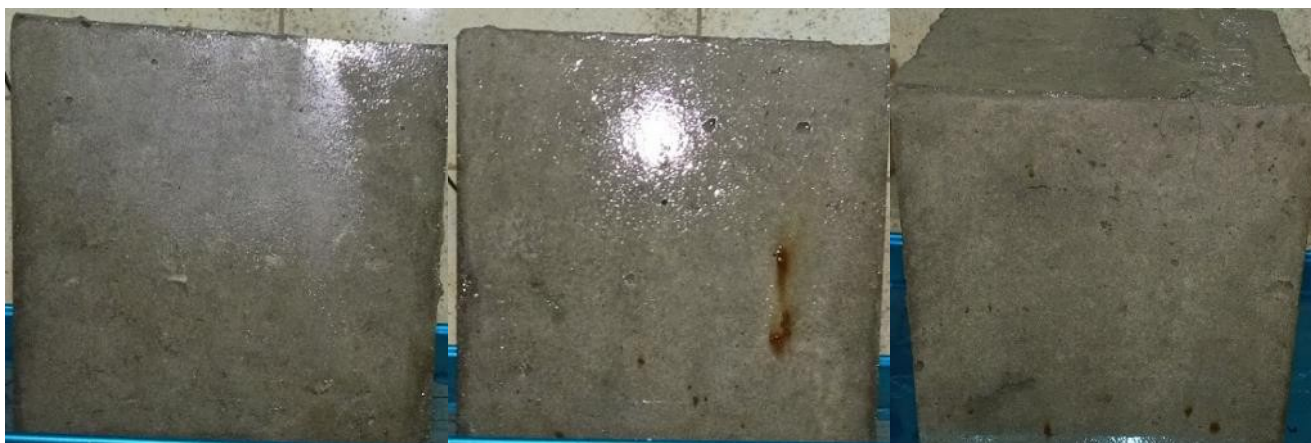
а

б

в

Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд дослідних зразків із вмістом зливної стружки:

а – 0,5% б – 1,0% в – 1,5%



а

б

в

Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд дослідних зразків із вмістом стружки надламу:

а – 0,5% б – 1,0% в – 1,5%

На основі аналізу результатів випробувань контрольної серії зразків, виготовлених за базовою рецептурою без введення модифікувальних дисперсних

добавок, було встановлено, що інтегральний показник їхнього середнього водопоглинання становить 1,21 %.

3.1.4 Визначення міцності бетону на стиск

Наступним ключовим етапом експериментальних досліджень стало визначення фізико-механічних характеристик розробленого фібробетону, а саме – його границі міцності на стиск у проектному віці. Випробування зразків-кубів здійснювали на гідравлічному пресі відповідно до методологічних вимог і регламенту ДСТУ Б В.2.7-214:2009[19]. Дискретні числові значення та параметри навантаження, зафіксовані під час тестування окремих зразків-представників для кожного досліджуваного складу, модифікованого сталеву зливною стружкою, послужили основою для математичної обробки та побудови експериментальних діаграм руйнування, які відображають кінетику процесу навантаження зразків (рис. 3.13–3.15).

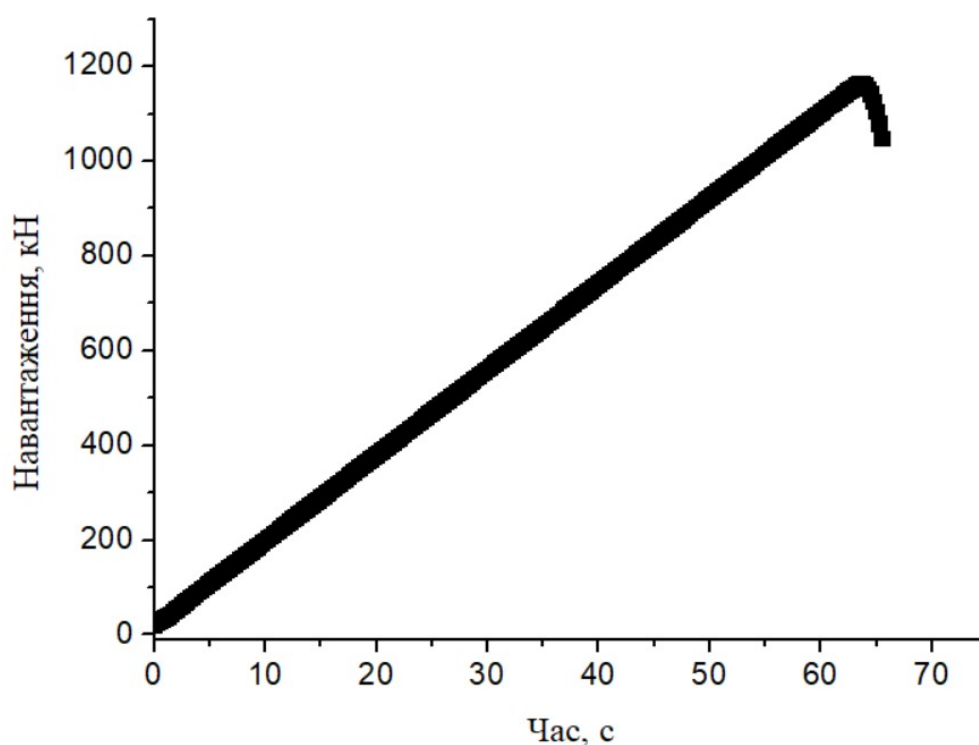


Рисунок 3.13 – Діаграма навантаження зразка з вмістом зливної стружки 0,5%

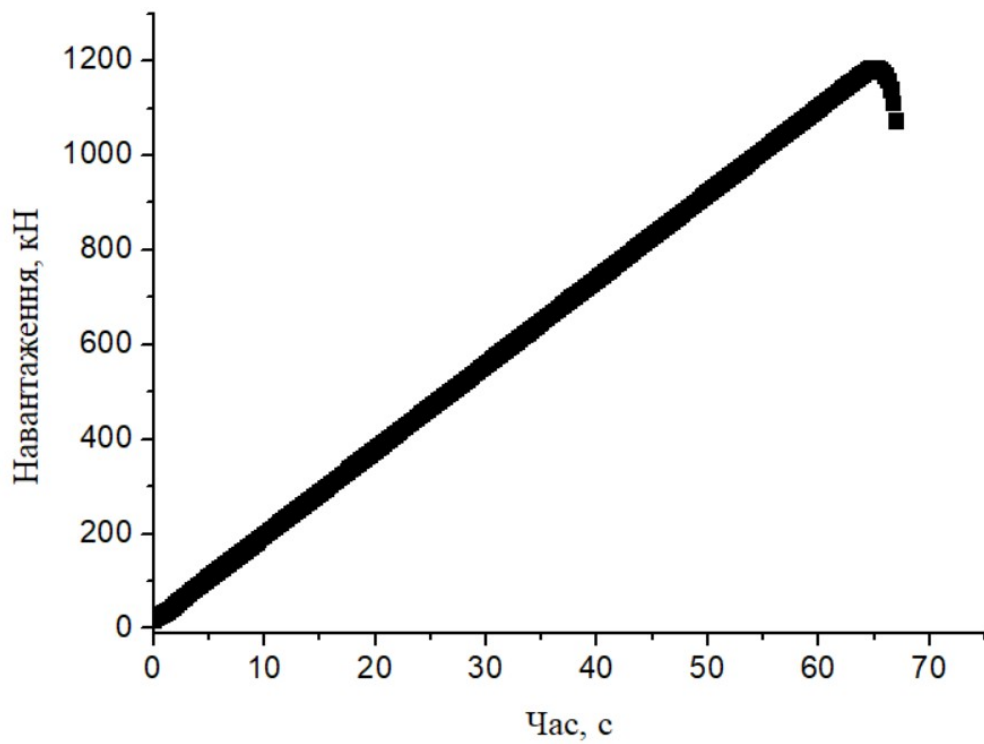


Рисунок 3.14 – Діаграма навантаження зразка з вмістом зливної стружки 1,0%

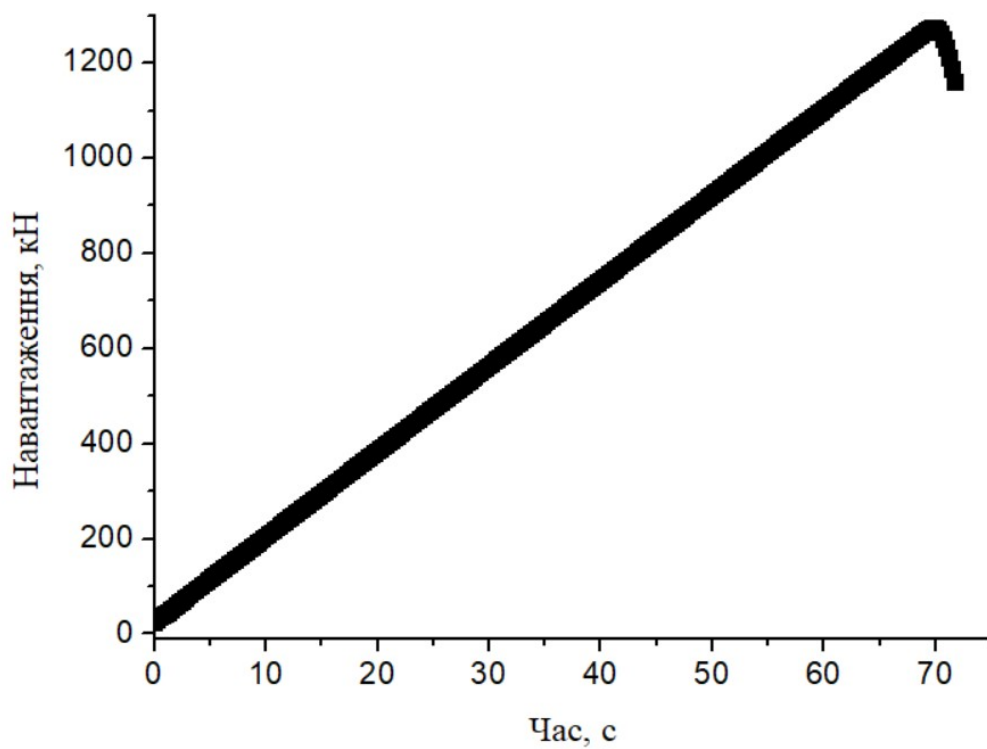


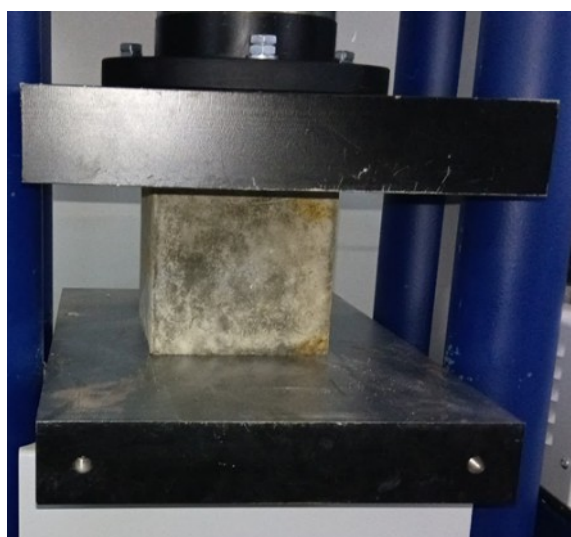
Рисунок 3.15 – Діаграма навантаження зразка з вмістом зливної стружки 1,5%

Повний спектр результатів механічних випробувань для всіх одиничних зразків-близнюків, які містили домішки зливної стружки, а також результати їхньої математико-статистичної обробки з обчисленням середньоарифметичних значень міцності для кожної серії зведено в узагальнюючу таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати механічних випробувань всіх одиничних зразків, які містили домішки зливної стружки

Вміст стружки, %	Міцність на стиск зразка №1, МПа	Міцність на стиск зразка №2, МПа	Міцність на стиск зразка №3, МПа	Середнє значення міцності на стиск, МПа
0,5	50,546	51,552	51,722	51,273
1	52,112	52,896	51,908	52,305
1,5	56,506	57,426	56,244	56,725

З метою аналізу кінематики руйнування композиту та оцінки характеру тріщиноутворення, на рисунках 3.17–3.19.

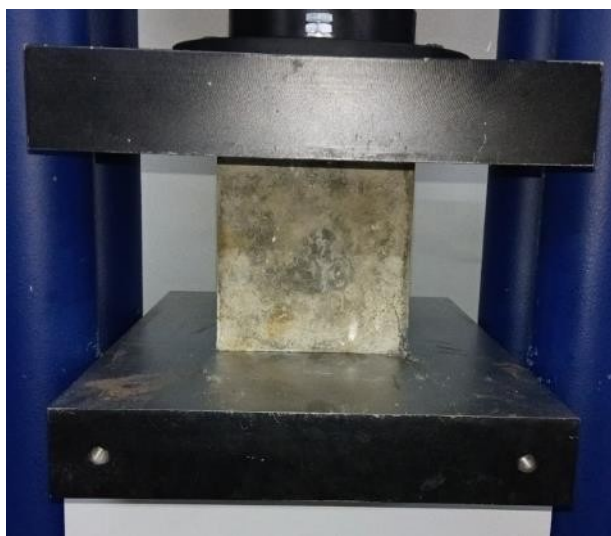


а



б

Рисунок 3.17 – Зовнішній вигляд зразка з вмістом зливної стружки 0,5% під час навантаження (а) та у фазі повного руйнування (б)



а



б

Рисунок 3.18 – Зовнішній вигляд зразка з вмістом зливної стружки 1,0% під час навантаження (а) та у фазі повного руйнування (б)



а



б

Рисунок 3.19 – Зовнішній вигляд зразка з вмістом зливної стружки 1,5% під час навантаження (а) та у фазі повного руйнування (б)

На рисунках продемонстровано фіксацію зовнішнього вигляду характерних зразків кожної серії безпосередньо у процесі навантаження, а також

макроструктуру їхньої матриці після досягнення граничної межі міцності (у фазі повного руйнування).

Графічну інтерпретацію встановленої параметричної залежності, що відображає характер зміни показників міцності композиту залежно від концентрації дискретного наповнювача, наведено на рисунку 3.20.

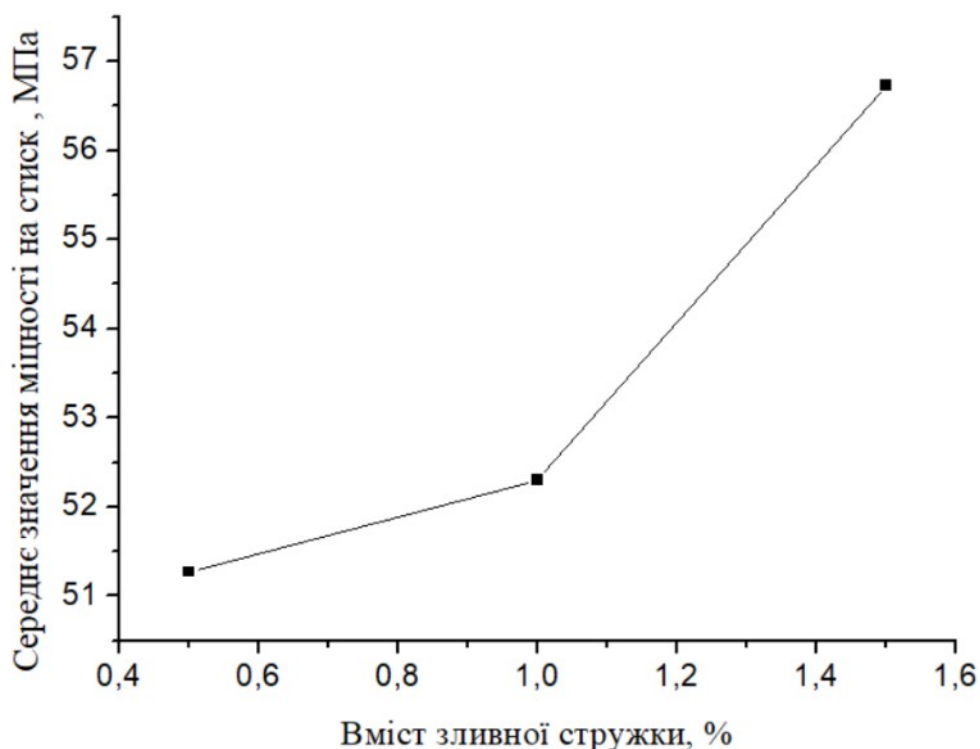


Рисунок 3.20 – Графік залежності міцності на стиск від вмісту стружки

Випробування зразків-кубів здійснювали на гідравлічному пресі відповідно до методологічних вимог і регламенту ДСТУ Б В.2.7-214:2009[19]. Дискретні числові значення та параметри навантаження, зафіксовані під час тестування окремих зразків-представників для кожного досліджуваного складу, модифікованого сталеву стружкою зламу, послужили основою для математичної обробки та побудови експериментальних діаграм руйнування, які відображають кінетику процесу навантаження зразків (рис. 3.21–3.23).

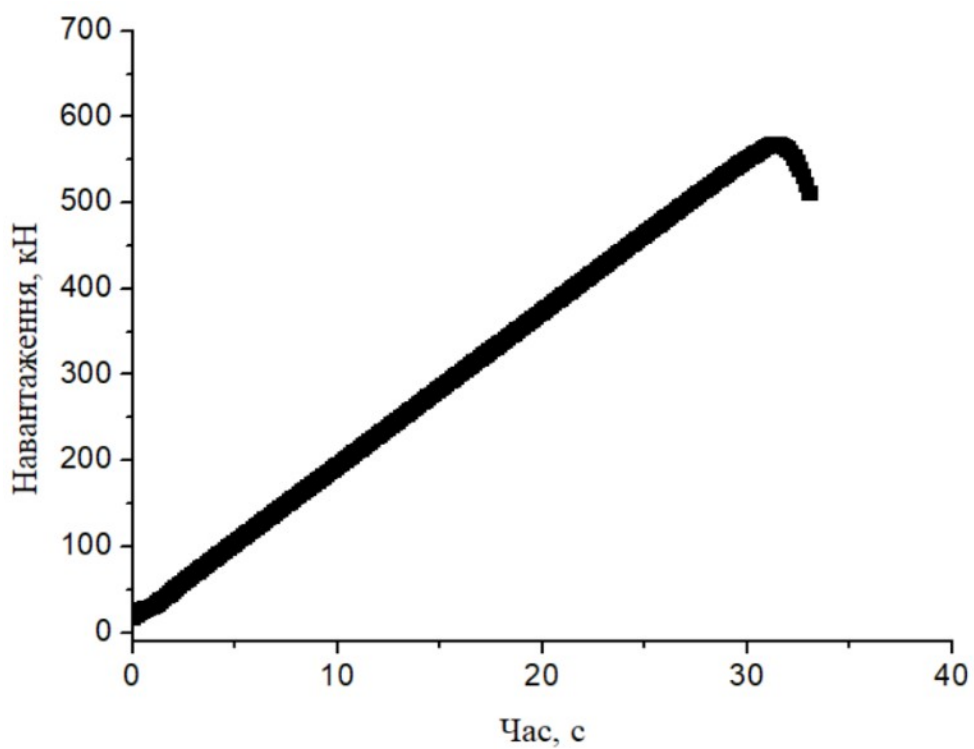


Рисунок 3.21 – Діаграма навантаження зразка з вмістом стружки зламу 0,5%

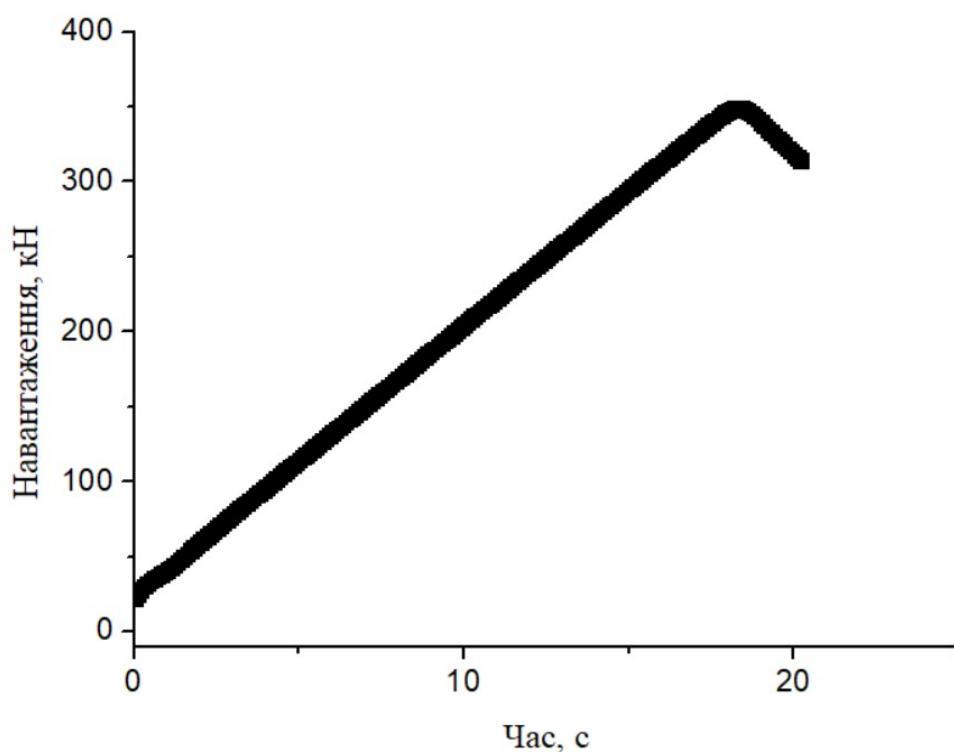


Рисунок 3.22 – Діаграма навантаження зразка з вмістом стружки зламу 1,0%

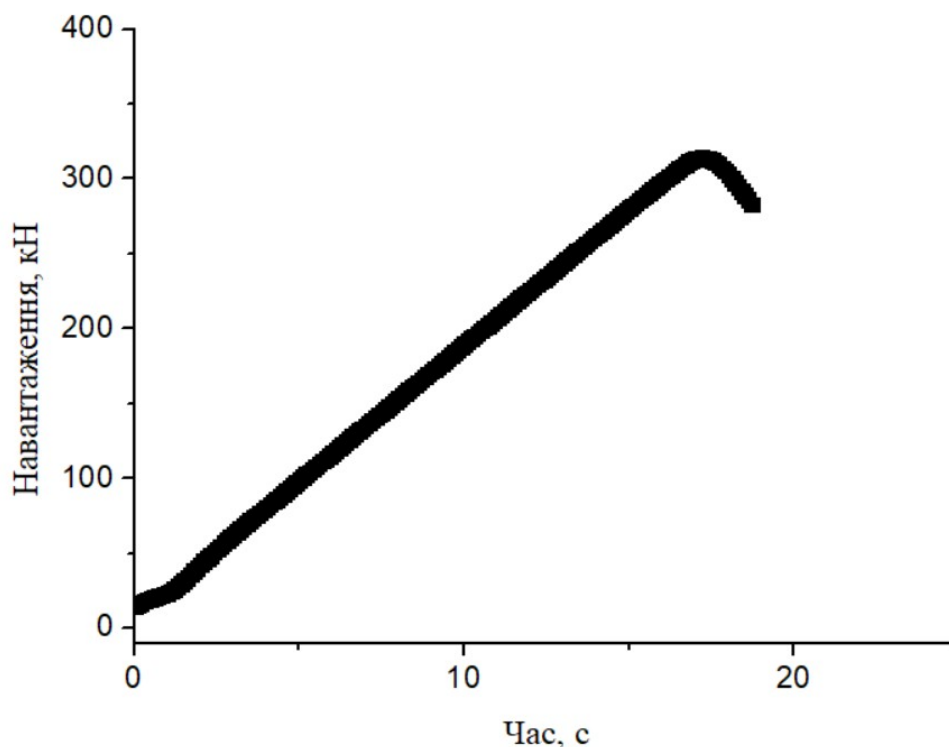


Рисунок 3.23 – Діаграма навантаження зразка з вмістом стружки зламу 1,5%

Повний спектр результатів механічних випробувань для всіх одиничних зразків-близнюків, які містили домішки стружки зламу, а також результати їхньої математико-статистичної обробки з обчисленням середньоарифметичних значень міцності для кожної серії зведено в узагальнюючу таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати механічних випробувань всіх одиничних зразків, які містили домішки стружки зламу

Вміст стружки, %	Міцність на стиск зразка №1, МПа	Міцність на стиск зразка №2, МПа	Міцність на стиск зразка №3, МПа	Середнє значення міцності на стиск, МПа
0,5	24,976	25,723	24,887	25,195
1	15,246	14,782	15,873	15,300
1,5	14,524	13,571	13,211	13,769

З метою аналізу кінематики руйнування композиту та оцінки характеру тріщиноутворення, на рисунках 3.24–3.26. продемонстровано фіксацію зовнішнього вигляду зразків кожної серії безпосередньо у процесі навантаження, а також макроструктуру їхньої матриці після досягнення граничної межі міцності.

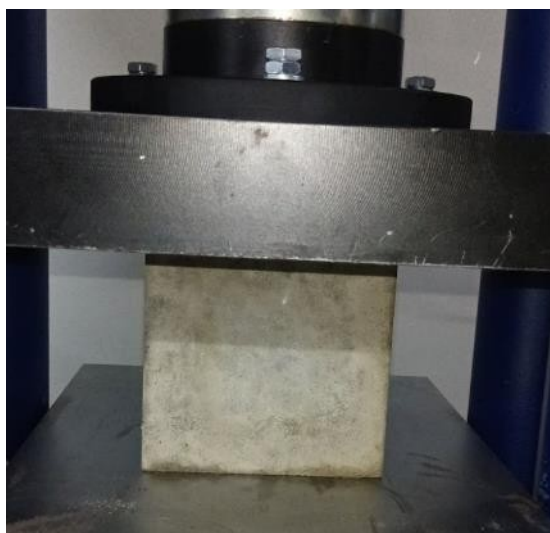


а



б

Рисунок 3.24 – Зовнішній вигляд зразка з вмістом стружки зламу 0,5% під час навантаження (а) та у фазі повного руйнування (б)



а



б

Рисунок 3.25 – Зовнішній вигляд зразка з вмістом стружки зламу 1,0% під час навантаження (а) та у фазі повного руйнування (б)

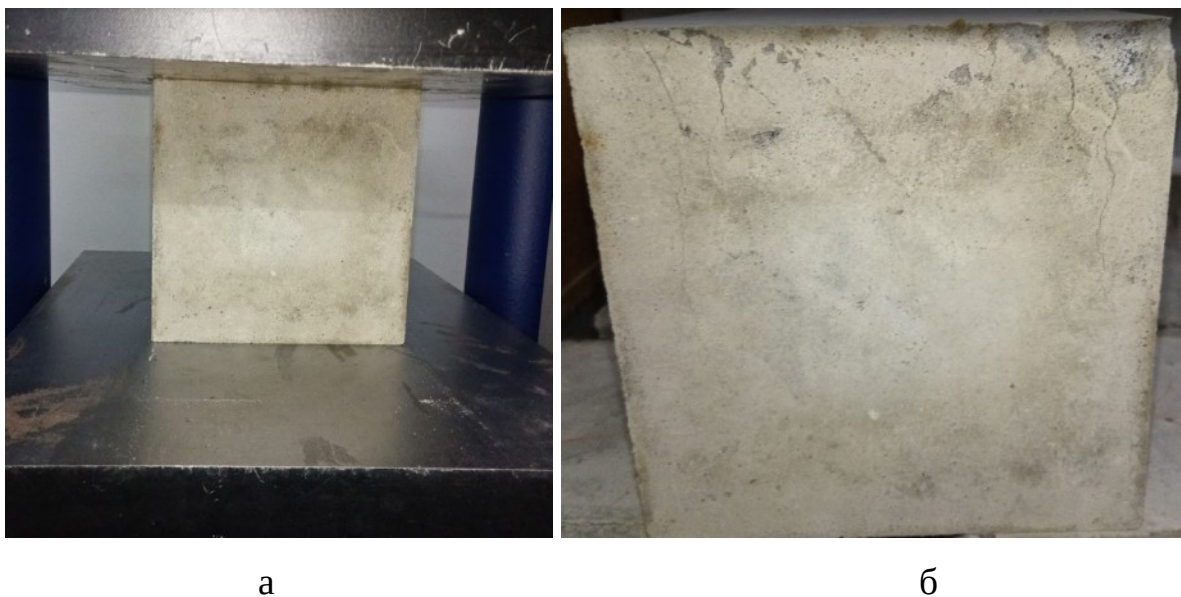


Рисунок 3.26 – Зовнішній вигляд зразка з вмістом стружки зламу 1,5% під час навантаження (а) та у фазі повного руйнування (б)

Графічну інтерпретацію встановленої параметричної залежності, що відображає характер зміни показників міцності композиту залежно від концентрації дискретного наповнювача, наведено на рисунку 3.27.

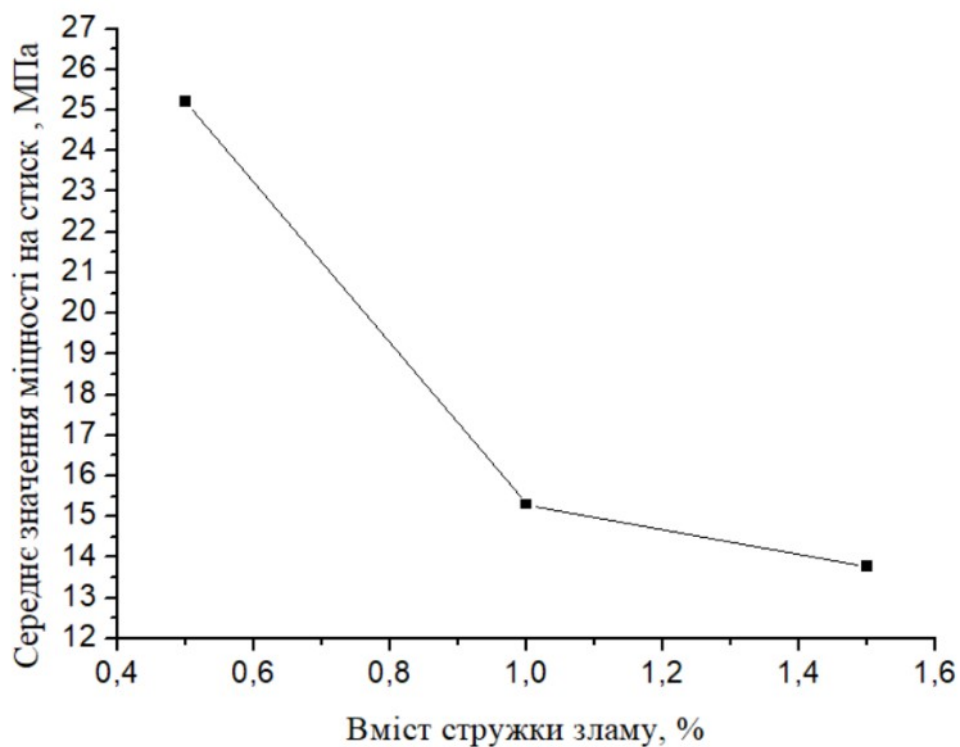


Рисунок 3.27 – Графік залежності міцності на стиск від вмісту стружки

На основі аналізу результатів випробувань контрольної серії зразків, виготовлених за базовою рецептурою без введення модифікувальних дисперсних добавок, було встановлено, що інтегральний показник їхньої міцності на стиск становить 33,658 МПа.

3.2 Аналіз результатів досліджень

Аналіз результатів експериментальних досліджень дозволив встановити диференційований характер зміни фізичних параметрів матеріалу залежно від морфології та концентрації дисперсного армування. У випадку модифікування бетону сталеву зливную стружку зафіксовано монотонне зростання показників його середньої густини пропорційно збільшенню вмісту добавки. Це явище об'єктивно пояснюється суттєво вищою власною густиною сталі порівняно з немодифікованою цементною матрицею, а також рівномірним розподілом попередньо дискретизованих (подрібнених) волокон у об'ємі суміші, що забезпечує високу щільність упаковки макроструктури бетону без утворення значних повітряних каверн.

Натомість при введенні стружки надламу (зламу) спостерігається зворотна тенденція — деструктивне зниження інтегральної густини композиту із ростом ступеня армування. Вказаний ефект зумовлений специфічною мушлеподібною морфологією частинок надламу, які за конфігурацією нагадують спіральні раковини. Така геометрія призводить до механічного защемлення та умовного замкнення мікрооб'ємів повітря всередині самих металевих елементів під час перемішування компоненти. Жорсткий металевий каркас «мушлі» перешкоджає проникненню цементної пасти у внутрішню порожнину стружки та блокує ефективне вихідне ущільнення суміші навіть при високочастотному вібропресуванні. У результаті в структурі бетону формується велика кількість штучних повітряних каверн, які суттєво розущільнюють матеріал і нівелюють ефект від високої власної маси сталі.

Дослідження кінетики гідрофізичних властивостей виявили суттєві розбіжності у трансформації капілярно-пористої структури порівнюваних складів. При використанні зливної стружки спостерігається стабільне зменшення показників водопоглинання в міру збільшення концентрації наповнювача. Це безпосередньо пов'язано з ущільненням мікроструктури матриці, зменшенням питомого об'єму відкритих капілярних пор, а також бар'єрним ефектом, за якого хаотично розподілені металеві волокна механічно перекривають і переривають канали міграції та дифузії вологи в тілі бетону.

Особливий науковий інтерес викликає характер зміни водопоглинання зразків, модифікованих стружкою надламу (зламу), де зафіксовано екстремум (максимальне значення) при 1,0 % вмісту домішки. На основі аналізу макроструктури можна припустити, що дана закономірність обумовлена перерозподілом характеру пористості. Спіралеподібна, мушлеподібна форма стружки зламу забезпечує ефект умовного замкнення пор і локалізації повітряних включень у внутрішньому просторі волокна. До концентрації 1,0 % ці дефекти діють як відкриті зони слабкого контакту на межі фаз, куди легко проникає волога. Проте при досягненні та перевищенні критичної концентрації (понад 1,0 % до 1,5 %), об'ємна частка повітря, защемленого всередині ізольованих металевих "мушель", починає домінувати. Оскільки ці пори є умовно замкненими (ізольованими від загальної капілярної мережі), вони не беруть участі в процесах гідродинамічного капілярного всмоктування води під час насичення, що призводить до зафіксованого на графіку спаду інтегрального показника водопоглинання.

У ході проведення механічних випробувань на одновісний стиск встановлено, що міцнісні характеристики зразків із добавками зливної стружки в 2–3 рази перевищують аналогічні показники серій, армованих стружкою надламу. Такий виражений ефект підвищення тримальної здатності та силового опору ймовірно пояснюється високою адгезійною здатністю повністю очищеної від технологічних забруднювачів поверхні зливної стружки до гідратованого цементного каменю, а також її рівномірною просторовою орієнтацією. Завдяки

цьому реалізується ефективний механізм «містків» (bridging-ефект), який стримує розкриття мікротріщин і перерозподіляє внутрішні напруження на етапі пружно-пластичного деформування.

Водночас незадовільні результати міцності на стиск для зразків зі стружкою надламу прямо пов'язані з її морфологічними вадами. Наявність повітряних порожнин, умовно замкнених усередині мушлеподібної стружки, трансформує ці елементи з армувальних компонентів на локальні макродефекти структури. При прикладанні зовнішнього одновісного стискального навантаження ці інкапсульовані повітряні пори діють як потужні внутрішні концентратори напружень. Металеві стінки «мушель» під тиском зазнають змінання та втрати стійкості, що провокує передчасне мікротріщиноутворення у прилеглих зонах цементного каменю та призводить до прискореного крихкого руйнування матриці за значно нижчих критичних зусиль порівняно зі зразками на основі зливної стружки.

3.3 Висновки за результатами дослідження

Проведені дослідження підтвердили, що використана методика випробувань забезпечує високу відтворюваність результатів, а прийнятий режим твердіння сприяє формуванню однорідної та бездефектної структури бетону.

Встановлено, що зливна стружка підвищує середню густину бетону зі збільшенням її вмісту, тоді як стружка надламу, навпаки, знижує цей показник через особливості своєї форми та утворення замкнених повітряних пор.

Показник водопоглинання для складів зі зливною стружкою зменшується, що свідчить про ущільнення структури та зниження відкритої пористості. Для стружки надламу характерна нелінійна залежність водопоглинання, зумовлена наявністю дефектів на межі фаз і замкнених порожнин.

Міцність на стиск зразків із зливною стружкою у 2–3 рази перевищує показники складів зі стружкою надламу. Це пояснюється кращою адгезією металу до цементного каменю та проявом армувального ефекту.

З'ясовано, що зливна стружка є перспективним модифікатором дрібнозернистого бетону, тоді як використання стружки надламу без скурпульозної попередньої підготовки є неефективним через її негативний вплив на структуру та фізико-механічні властивості матеріалу.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

4.1.1 Нормативно-правова база та організаційні засади безпеки в дослідній лабораторії

Охорона праці та забезпечення техногенної безпеки під час проведення комплексних лабораторних досліджень і механічних випробувань будівельних композитів є невід'ємною складовою загальної організації науково-дослідних та експериментально-виробничих процесів. Виконання лабораторних робіт із виготовлення, витримування та руйнування модифікованих бетонів супроводжується безпосереднім впливом на персонал комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ). Системне керування цими ризиками здійснюється відповідно до чинної нормативно-правової бази України.

Основним фундаментальним актом у цій сфері виступає Закон України «Про охорону праці»[20], який гарантує конституційне право працівників та здобувачів освіти на безпечні умови праці. Закон покладає на керівника лабораторії (роботодавця) обов'язки щодо безперервного моніторингу виробничого середовища, мінімізації професійних ризиків, своєчасного проведення інструктажів, безкоштовного надання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), а також планового технічного огляду випробувального устаткування.

Організація робіт у межах даного дослідження регламентується системою Нормативно-правових актів з охорони праці (НПАОП), зокрема загальними вимогами безпеки в хімічних та випробувальних лабораторіях (НПАОП 73.1-1.11-12), Державними будівельними нормами щодо штучного й природного освітлення, а також галузевими стандартами, що регулюють експлуатацію судин під тиском та електроустановок споживачів (Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів – ПБЕЕС)[21-27].

Обов'язковою умовою допуску персоналу до виконання експериментів є проходження багаторівневої системи інструктажів (вступного, первинного на

робочому місці, а за потреби – цільового). Окрему увагу приділяють верифікації знань щодо будови обладнання, специфіки деструкції матеріалів та алгоритмів дій у разі виникнення позаштатних або аварійних ситуацій.

4.1.2 Ідентифікація та аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Специфіка дослідження дрібнозернистих бетонів, армованих дисперсними відходами металообробки, передбачає наявність двох ключових груп факторів:

1. Фізичні та механічні фактори:

Кінетична енергія уламків бетону: Під час проведення механічних випробувань на одновісний стиск згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 у тілі зразків-кубів накопичуються значні внутрішні пружні напруження. У момент досягнення границі міцності відбувається крихке, часто вибухоподібне руйнування матриці з утворенням високої концентрації летючих макро- й мікроуламків.

Гострі кромки та задирки наповнювача: Використання як дискретної фібри сталеві зливної стружки та стружки надламу створює постійний ризик глибоких колото-різаних ран, травм кистей рук та пальців оператора на етапах дозування, подрібнення й перемішування суміші.

Виробничий шум та локальна вібрація: Формування та ущільнення бетонних зразків здійснюється на лабораторних вібромайданчиках. Тривалий контакт із ними без віброізолювальних елементів призводить до шкідливого впливу низько- та середньочастотної вібрації на опорно-руховий апарат і нервову систему, а шум від працюючого двигуна преса та вібратора може перевищувати нормативні 80 дБ.

Електротравматизм: Живлення гідравлічного преса, вібростола, сушильних шаф та електронних ваг здійснюється від трифазних і однофазних мереж змінного струму (220/380 В), що за умов підвищеної вологості в лабораторії створює загрозу ураження електричним струмом у разі пробою ізоляції на корпус.

2. Хімічні та токсикологічні фактори:

Аерозолі та пил: Процеси відважування в'язучого (цементу) супроводжуються інтенсивним пилоутворенням. Цементний пил містить діоксид кремнію (SiO_2), що за умови систематичного вдихання провокує хронічні пилові бронхіти та силікатози.

Токсичні компоненти мастильно-охолоджувальних рідин (МОР):

Стружка надламу (зламу), отримана з металообробних підприємств, вкрита тонкими гідрофобними плівками залишкових технологічних мастил, емульсій та сульфозфрезолів. Під час зберігання, нагрівання або контакту зі лужним середовищем цементного тіста відбувається емісія летючих органічних сполук, парів нафтопродуктів та специфічних аерозолів. Контакт непідготовленої замавленої стружки зі шкірою оператора викликає хімічні дерматити та алергічні реакції.

4.1.3 Інженерно-технічні та санітарно-гігієнічні заходи забезпечення безпеки

Для нейтралізації та зниження впливу ідентифікованих НШВФ до безпечних рівнів у лабораторії впроваджено комплекс технічних та санітарних заходів.

Безпека при роботі з випробувальним пресом:

Гідравлічний прес, що використовується для стискання кубів, в обов'язковому порядку оснащується захисним рухомим екраном із ударостійкого прозорого полікарбонату або дрібнокомірчастої металевої сітки. Це повністю виключає травмування оператора уламками роздробленого бетону. Будь-які маніпуляції з очищення опорних плит преса від шламу чи встановлення зразків-близнюків виконуються виключно при заблокованому та повністю зупиненому поршні.

Електробезпека:

Усе силове лабораторне устаткування підлягає обов'язковому захисному заземленню з контуром опору не більше 4 Ом. Електричні кола захищені

пристроями диференційного захисту (ПЗВ) та автоматичними вимикачами для миттєвого знеструмлення у випадку короткого замикання чи витоку струму.

Захист від шуму та вібрації:

Лабораторний вібромайданчик встановлюється на спеціальний амортизаційний (віброізолювальний) фундамент або гумові мати, що перешкоджає поширенню структурної вібрації по підлозі приміщення. Для захисту органів слуху під час ущільнення суміші оператор зобов'язаний застосовувати протишумові навушники або беруші (згідно з ДСТУ EN 352-1).

Виробнича санітарія та ЗІЗ:

Приміщення лабораторії обладнується припливно-витяжною вентиляцією загального обміну, а безпосередньо над зоною зберігання замасленої стружки надламу та поблизу бетонозмішувача влаштовуються локальні витяжні зонти (механічна аспірація) для вловлювання парів МОР і пилу.

Для захисту шкіри рук від гострих країв зливної стружки та хімічного впливу мастил використовуються комбіновані захисні рукавиці з кевларовими або нітриловими вставками (клас захисту від механічних ушкоджень не нижче 3 за ДСТУ EN 388). Під час сухого дозування компонентів обов'язковим є носіння протипилових респіраторів класу захисту FFP2/FFP3 та закритих захисних окулярів.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях та цивільний захист

4.2.1 Ідентифікація та аналіз джерел надзвичайних ситуацій техногенного характеру

Специфіка досліджень у лабораторії будівельних матеріалів із використанням гідравлічних випробувальних машин високого тиску та дисперсних відходів металообробки обумовлює наявність потенційних ризиків виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру. Основними джерелами таких НС є:

Аварійна розгерметизація гідросистем надвисокого тиску:

Сучасні гідравлічні преси (зокрема ті, що використовуються для руйнування зразків-кубів за ДСТУ Б В.2.7-214:2009) працюють під робочим тиском мастила, що сягає десятків мегапаскалей (МПа). Раптове руйнування трубопроводів, сальникових ущільнень або шлангів гнучкого зв'язку призводить до імпульсного викиду мінерального мастила у вигляді дрібнодисперсного аерозолу. Така аерозольно-газова суміш за наявності найменшого джерела запалювання (іскри в електрообладнанні) є вибухонебезпечною та призводить до миттєвого об'ємного спалаху.

Пожежна небезпека замаслених дисперсних металовідходів:

Стружка надламу (зламу), яка містить на своїй поверхні залишкові плівки мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) та нафтопродуктів, характеризується розвиненою питомою поверхнею. Тривале зберігання великих масивів такої стружки разом із промасленим ганчір'ям (дрантям) у невентильованих зонах створює умови для екзотермічних процесів окиснення, що може призвести до їх самозаймання. Окрім того, короткі замикання в силових кабелях живлення преса або вібромайданчика виступають прямими ініціаторами пожеж класу А (тверді речовини), класу В (рідкі речовини, оливи) та класу Е (електроустановки під напругою).

4.2.2 Комплекс заходів протипожежного захисту та вибухобезпеки

Протипожежний захист дослідної лабораторії організується відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України та «Правил пожежної безпеки в Україні» (НАПБ А.01.001-2014).

З метою локалізації пожеж на ранніх стадіях приміщення лабораторії укомплектовано первинними засобами пожежогасіння. Розрахунок та підбір вогнегасників виконано з урахуванням категорій приміщення щодо вибухопожежної небезпеки:

Вуглекислотні вогнегасники (типу ОУ-3, ОУ-5): Розміщуються безпосередньо поблизу головного та локальних електрощитів керування, оскільки

діюча речовина (діоксид вуглецю) не пошкоджує прецизійну електронну апаратуру (ваги, датчики преса) та дозволяє здійснювати гасіння електроустановок під напругою до 1000 В (клас Е) без ризику ураження оператора струмом.

Порошкові вогнегасники (типу ОП-5): Призначені для ліквідації осередків займання промасленої металевої стружки та гідравлічних олив (класи пожеж А, В, С).

Категорично забороняється використання води або хімічно-пінних вогнегасників для гасіння пожеж у зонах розміщення силового електрообладнання та складів зберігання МОР через високу електропровідність води та загрозу інтенсифікації кипіння і розбризкування палаючої оливи.

Для профілактики займань у лабораторії впроваджено суворий протипожежний режим: використане мастильне дрантя збирається виключно в металеві контейнери з щільними кришками та видаляється з приміщення наприкінці кожної робочої зміни. На видимих місцях поблизу виходів зафіксовано затверджені плани (схеми) евакуації персоналу та інструкції щодо порядку дій під час пожежі.

4.2.3 Алгоритм дій персоналу при виникненні аварійних ситуацій та заходи цивільного захисту

При виникненні будь-якої позаштатної чи аварійної ситуації (руйнування гідросистеми під тиском, задимлення, стійкий запах тління ізоляції, спалах) оператор та лаборанти діють за чітко регламентованим алгоритмом:

Негайна зупинка випробувального процесу:

Натисканням аварійної кнопки грибкового типу «СТОП» (Emergency Stop), яка розташована на пульті керування пресом, повністю блокується робота гідронасоса.

Знеструмлення об'єкта:

За допомогою головного пакетного вимикача (рубильника) лабораторії приміщення повністю відсікається від зовнішньої електричної мережі для запобігання повторним замиканням та електротравмам під час ліквідації аварії.

Евакуація та сповіщення:

Персонал, що не бере участі в первинній локалізації аварії, негайно залишає приміщення по евакуаційному маршруту. Відповідальна особа здійснює виклик екстреної служби ДСНС за телефоном «101», вказавши точну адресу, характер аварії та наявність загрози людям.

Первинне гасіння:

За умови відсутності прямої загрози життю, оператори застосовують первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники) для локалізації осередку займання.

Враховуючи особливості функціонування науково-дослідних установ в умовах дії правового режиму воєнного стану в Україні, окремим обов'язковим блоком цивільного захисту є дії персоналу під час оголошення сигналу «Повітряна тривога». У разі отримання сигналу через системи оповіщення оператор зобов'язаний:

Плавню скинути тиск у гідросистемі преса до нуля (для запобігання тривалому перебуванню конструкцій під статичним навантаженням у безгосподарному стані);

Вимкнути живлення всіх нагрівальних приладів (сушильних шаф) та силових агрегатів;

Залишити приміщення лабораторії та організовано переміститися до найближчого сертифікованого захисного спорудження цивільного захисту (протирадіаційного укриття чи сховища структури ЗСЦЗ)[28-30].

4.2.4 Організація першої домедичної допомоги при виробничому травматизмі

Зважаючи на специфіку роботи з гострими металевими наповнювачами (зливна стружка, стружка зламу) та крихким руйнуванням бетону, лабораторія

безперервно забезпечується укомплектованою медичною аптечкою першої допомоги, яка знаходиться у вільному та швидкодоступному місці.

При виникненні травм медична допомога надається відповідно до характеру ушкодження:

При глибоких колото-різаних порізах металевою фіброю: Оцінюється характер кровотечі. При капілярній або венозній кровотечі здійснюється обробка країв рани антисептиком (без потрапляння всередину рани) та накладається стерильна тиснуча пов'язка. При масивній артеріальній кровотечі (пульсуючий струмінь яскраво-червоного кольору) вище місця порізу накладається кровоспинний джгут або турнікет із обов'язковою фіксацією часу його затягування, після чого викликається швидка медична допомога «103».

При потрапленні уламків матеріалу або металевого пилу в очі: Категорично забороняється терти око. Виконується тривале промивання ока великою кількістю чистої проточної води або стерильного фізіологічного розчину від зовнішнього кута ока до внутрішнього за допомогою спеціальних очних фонтанчиків або стаканчиків. Після промивання накладається стерильна пов'язка, і постраждалий направляється до лікаря-офтальмолога.

При контакті шкіри з гарячою оливою чи хімічно агресивними МОР: Уражена ділянка промивається проточною водою, очищується від забруднювача і закривається сухою стерильною марлевою серветкою для запобігання інфікуванню хімічного чи термічного опіку.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході проведених експериментальних досліджень щодо модифікування дрібнозернистого бетону дисперсними відходами металообробки встановлено, що застосована методика випробувань забезпечує високу відтворюваність і статистичну надійність результатів. Використання паралельних серій з трьох зразків-близнюків для кожної експериментальної точки, а також прийнятий режим твердіння упродовж 5 діб у закритих формах із подальшим 28-добовим термовологісним дозріванням, дали змогу усунути негативний вплив повітряної усадки, внутрішніх напружень і мікротріщиноутворення, забезпечивши формування однорідної та бездефектної бетонної матриці.

Встановлено, що характер зміни середньої густини бетону суттєво залежить від морфології введеної металевої добавки. За використання зливної стружки спостерігається поступове зростання густини зі збільшенням її вмісту від 0,5 % до 1,5 %, що зумовлено високою питомою масою сталі та більш щільною упаковкою структури композиту. Натомість введення стружки надламу спричиняє зниження середньої густини, оскільки її мушлеподібна форма сприяє утворенню та утриманню повітря в спіральних порожнинах, а також перешкоджає повноцінному проникненню цементного тіста під час ущільнення суміші.

Дослідження водопоглинання засвідчили суттєві зміни капілярно-пористої структури модифікованого бетону порівняно з контрольною серією, для якої середнє водопоглинання становило 1,21 %. У зразках із зливною стружкою виявлено стале зниження водопоглинання зі збільшенням вмісту добавки, що пояснюється бар'єрною дією металевих волокон, які частково перекривають капілярні канали та зменшують кількість відкритих пор. Для зразків зі стружкою надламу характерною є нелінійна залежність із максимумом водопоглинання при 1,0 % добавки, що пов'язано з посиленням дефектності на межі «сталь — матриця». Подальше збільшення вмісту до 1,5 % призводить до формального зниження показника, оскільки замкнені повітряні порожнини всередині мушлеподібних частинок не беруть участі у вологоперенесенні.

За результатами випробувань на стиск відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-214:2009 встановлено, що зразки з добавкою зливної стружки мають у 2–3 рази вищу міцність порівняно зі складами на основі стружки надламу. Підвищення міцності бетону зі зливною стружкою зумовлене доброю адгезією очищеної металевої поверхні до цементного каменю та реалізацією ефекту «містків», який стримує розвиток тріщин. Низька міцність зразків зі стружкою надламу пояснюється наявністю замкнених повітряних порожнин, що виступають концентраторами напружень, а також можливим впливом залишків мастильно-охолоджувальних рідин, які погіршують зчеплення між металом і цементною матрицею.

Загалом установлено, що використання непідготовленої стружки надламу як дисперсного армування є малоефективним через її несприятливу форму та наявність забруднень, які погіршують структуру і знижують експлуатаційні властивості бетону. Натомість очищена зливна стружка може бути ефективним модифікатором дрібнозернистого бетону, оскільки сприяє підвищенню міцності, зниженню водопоглинання та загальному поліпшенню фізико-механічних характеристик композиту.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Матеріали ІХ Міжнародної студентської науково - технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» / Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 24-25 квітня 2026 р.), 2025.- 398 с.
2. Bentur A. Cementitious materials – Cementitious Materials—Nine Millennia and A New Century: Past, Present, and Future. 2002. Vol. 14, Iss. 1. P. 2–22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:1(2)).
3. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Будівельне матеріалознавство : підручник. Рівне : НУВГП, 2014. 504 с.
4. Adam J. P. Roman Building: Materials and Techniques. London ; New York : Routledge, 2005. 360 p.
5. Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through long-term water–rock reactions in Roman maritime concrete / M. D. Jackson et al. American Mineralogist. 2017. Vol. 102, No. 7. P. 1435–1450. DOI: <https://doi.org/10.2138/am-2017-5993CCBY>.
6. Moore D. The Roman Pantheon: The Triumph of Concrete. Mangilao : University of Guam, 1995. 239 p.
7. Wu L, Feng C, Qiu J, Wang L, Peng Y, Liu J. Influence of Recycled Tire Steel Fibers on the Mechanical Properties and Carbon Emissions of High-Performance Cement-Based Materials. Materials (Basel). 2025 Jun 25;18(13):3008. doi: 10.3390/ma18133008. PMID: 40649496; PMCID: PMC12250636.
8. Biswas, W.K.; Zhang, X.; Matters, C.; Maboud, M. Techno-Eco-Efficiency Assessment of Using Recycled Steel Fibre in Concrete. Sustainability 2024, 16, 3717. <https://doi.org/10.3390/su16093717>
9. Adisa, Mohammed & Oshadare, Samuel & Yusuf, Yassar. (2026). Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Using Steel Fibers Derived from Discarded Tires. International Journal of Concrete Structures and Materials. 20. 10.1186/s40069-026-00906-4.

10. Shyshkin, Eduard & Haiko, Yurii & Chernosova, Tetiana. (2024). Ways of recycling construction waste during the post-war reconstruction of ruined cities. Urban development and spatial planning. 679-697. 10.32347/2076-815x.2024.85.679-697.

11. Yu J, Wu Q, Zhao D, Jiao Y. Influence of Recycled Tire Steel Fiber Content on the Mechanical Properties and Fracture Characteristics of Ultra-High-Performance Concrete. *Materials (Basel)*. 2025 Jul 13;18(14):3300. doi: 10.3390/ma18143300. PMID: 40731509; PMCID: PMC12300035.

12. Alkhafaji, S.F., Abduljabbar, R.A., Abdulhusein, S.S., Hussain, H.D. and Khalid, H.R. 2025. Mechanical Properties of Sustainable Concrete Reinforced with Micro Steel Fibers. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 15, 5 (Oct. 2025), 27436–27444. DOI:<https://doi.org/10.48084/etasr.12928>.

13. Małek M, Kadela M, Terpiłowski M, Szewczyk T, Łasica W, Muzolf P. Effect of Metal Lathe Waste Addition on the Mechanical and Thermal Properties of Concrete. *Materials (Basel)*. 2021 May 23;14(11):2760. doi: 10.3390/ma14112760. PMID: 34071033; PMCID: PMC8197122.

14. Yan, J.; Gao, Y.; Fan, T.; Xu, Q.; Yuan, W.; Zhao, X. Experimental Study on Flexural Performance of Recycled Steel Fiber Concrete Beams. *Buildings* 2023, 13, 3046. <https://doi.org/10.3390/buildings13123046>

15. Method for installing insulation on a building facade : пат. WO2003056112A1 Міжнародна організація інтелектуальної власності / винахідники : J. R. Brand, R. J. J. Van Den Berg. Заявл. 20.12.2002 ; опубл. 10.07.2003 [Електронний ресурс]. Google Patents. Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/WO2003056112A1/en>

16. Fiber cement slate having a natural slate appearance and process for its manufacture : пат. US6235108B1 США / винахідники : L. Van Der Heyden, J.-P. P. M. F. C. Van Biervliet ; патентовласник : Etex Holding S.A. Заявл. 23.03.1999 ; опубл. 22.05.2001 [Електронний ресурс]. Google Patents. Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US6235108B1/en>

17. Sound-absorbing panel and wall lined with such panels : пат. EP1282751B1 Європейське патентне відомство / винахідник : J.-M. G. M. Come. Заявл.

11.05.2001 ; опубл. 22.10.2003 [Електронний ресурс]. Google Patents. Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/EP1282751B1/en>

18. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності [із зміною № 1]. [Чинний від 2009-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 24 с. (Національний стандарт України).

19. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [На заміну ГОСТ 10180-90; чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с. (Національний стандарт України).

20. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Ст. 668. (Зі змінами та доповненнями).

21. Кодекс законів про працю України : Закон, Кодекс від 10.12.1971 № 322-VIII. Відомості Верховної Ради УРСР. 1971. (Додаток до № 50). Ст. 375. (Зі змінами та доповненнями).

22. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України від 23.09.1999 № 1105-XIV. Відомості Верховної Ради України. 1999. № 46–47. Ст. 403. (Зі змінами та доповненнями).

23. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення (НПАОП 45.2-7.02-12) : ДБН А.3.2-2-2009. – [Чинний від 2012-01-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 75 с. – (Державні будівельні норми України).

24. Конституція України : Закон від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // Відомості Верховної Ради України. 1996. № 30. Ст. 141. (Із змінами, ст. 43, 45, 46).

25. НПАОП 45.2-7.03-17. Мінімальні вимоги з охорони праці на тимчасових або мобільних будівельних майданчиках : затверджено наказом Міністерства соціальної політики України від 23.06.2017 № 1050. – Київ, 2017. – (Нормативно-правовий акт з охорони праці).

26. Про будівельні норми : Закон України від 05.11.2009 № 1704-VI. Відомості Верховної Ради України. 2010. № 5. Ст. 43. (Зі змінами та доповненнями).

27. Каспрук, В. Б. (2024). Методичні вказівки до написання розділу з охорони праці в будівництві для спеціальності 192" Будівництво та цивільна інженерія". І. Пулюя, 15.

28. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С. Стручок. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.

29. Стручок В. С. // Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека» : навч. посіб. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022. – 150 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424>

30. Методичний посібник для виконання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 192 “Будівництво та цивільна інженерія”// Ковальчук Я.О., Крамар Г.М., Мещерякова О.М., Тернопіль, 2020. – 56 с.