

**Литі емульсійно-мінеральні суміші з використанням
сульфату алюмінію для влаштування тонкошарових
покриттів**

АНОТАЦІЯ

наукової роботи під шифром «Ефективний шар»

Однією із сучасних технологій, яка дозволяє вирішити проблеми захисту верхніх шарів конструкцій дорожніх одягів і швидкого відновлення їх транспортно-експлуатаційних властивостей, є влаштування тонкошарових покриттів (ТП) із литих емульсійно-мінеральних сумішей (ЛЕМС). Основним завданням влаштування ТП з ЛЕМС є продовження терміну служби існуючих покриттів в результаті герметизації волосяних тріщин і невеликих вибоїн, суттєвого підвищення шорсткості та зчіпних властивостей, рівності покриття, попередження тріщиноутворення, захисту від водонасичення, загалом – відновлення зношеного або збереження існуючого верхнього шару дорожнього покриття.

Актуальність роботи. Ця технологія набуває все більшого розповсюдження в Україні, проте є недостатньо вивченим етап проектування складу суміші. Одним із виявлених проблемних місць застосування технології є використання в ролі регулятора розпаду сумішей матеріалів, що знижують швидкість набору когезійної міцності укладеної литої суміші, а відтак інтенсивне формування і твердіння тонкошарових покриттів і своєчасне відкриття руху по них.

Метою роботи є запроектувати та дослідити склади ЛЕМС із включенням сульфату алюмінію для влаштування тонкошарових покриттів.

Об'єкт дослідження: підбір оптимального складу литих емульсійно-мінеральних сумішей в залежності від технологічних (розпад суміші) та міцнісних (формування шару зносу, вологий знос покриття) критеріїв.

Предмет дослідження: лита емульсійно-мінеральна суміш для тонкошарових покриттів.

Завдання досліджень полягає в наступному:

1. Проаналізувати питання з дослідження литих емульсійно-мінеральних сумішей.

2. Опрацювати методи досліджень та визначити показники якості вихідних матеріалів для ЛЕМС.

3. Запроектувати оптимальні склади ЛЕМС за технологічним критерієм розпаду.

4. Визначення час формування шару зносу, показник вологого зносу покриття при використанні традиційного та нетрадиційного регулятора розпаду.

5. Встановлення доцільності використання сульфату алюмінію, як регулятора розпаду для ЛЕМС та його економічності.

В роботі використанні стандартні методи та методики досліджень згідно з українськими СОУ та нормативами міжнародної асоціації ISSA (International Slurry Surfacing Association).

Загальна характеристика наукової роботи. Робота містить анотацію, зміст, вступ, п'ять розділів, а саме: стан з питання дослідження литих емульсійно-мінеральних сумішей, матеріали для ЛЕМС, методи досліджень, експериментальна частина, економічна частина. Наприкінці роботи наведено висновки та список використаної літератури. Обсяг роботи без списку використаних джерел склав 28 сторінок. Праця містить 13 таблиць, 15 рисунків, 22 використані літературні джерела.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. СТАН ПИТАННЯ З ДОСЛІДЖЕННЯ ЛИТИХ ЕМУЛЬСІЙНО-МІНЕРАЛЬНИХ СУМІШЕЙ (ЛЕМС).	6
2 МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЛЕМС	10
2.1 Бітумна емульсія	10
2.2. Кам'яний матеріал	10
2.3. Мінеральний наповнювач	11
2.4. Регулятор розпаду	12
2.5. Вода	12
3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	13
3.1 Визначення фізико-технічних показників емульсій	13
3.2 Визначення адсорбції метилену синього кам'яного матеріалу	13
3.3 Визначення розпаду суміші	14
3.4 .Визначення швидкості формування ТП	15
3.5 Визначення втрати матеріалу при вологому абразивному зносі (ВМВЗ)	17
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	18
4.1 Виготовлення та встановлення фізико-технічних показників емульсії	18
4.2. Випробування кам'яного матеріалу для ЛЕМС	19
4.2.1 Визначення адсорбції метилену синього	19
4.2.2 Визначення відповідності зернових складів кам'яних матеріалів типам ЛЕМС	20
4.3 Проектування складу ЛЕМС за критерієм розпаду	20
4.4 Визначення часу твердіння ЛЕМС з ТП	23
4.5 Визначення втрати матеріалу при вологому абразивному зносі	26
5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	27
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	29

ВСТУП

Початок історії тонкошарових покриттів з ЛЕМС, а саме покриттів типу Сларрі Сіл (Slurry Seal) та Майкросерфесінг (Micro-surfacing) припадає на 1930-ті роки, коли в Німеччині вперше дорога була покрита сумішшю із дрібнозернистого щебеню, бітумного в'язучого та води. Нанесення такої поверхні було незвичайним для ремонту дорожніх покриттів в той час і отримало назву Сларрі Сіл (шламова ізоляція / ізоляція рідким розчином). Протягом наступних років у світі почався період експериментів щодо впровадження саме цієї технології. Проте, застосування Сларрі Сіл стало актуальним в 1960-х роках. Застосування суміші стало можливим за рахунок введення нових емульгаторів і механізмів, які можуть виконувати якісне перемішування усіх компонентів суміші. Якісні емульсії та сучасне обладнання призвели до того, що сьогодні технології Сларрі Сіл та її «побратим» Майкросерфесінг (холодний литий асфальтобетон на модифікованій емульсії) найчастіше використовують для поточного ремонту покриття (рис. 1).



Рис. 1 Влаштування ЛЕМС

1. СТАН ПИТАННЯ З ДОСЛІДЖЕННЯ ЛИТИХ ЕМУЛЬСІЙНО-МІНЕРАЛЬНИХ СУМІШЕЙ (ЛЕМС)

Тонкошарові покриття, виконані за технологією ЛЕМС, мають високі експлуатаційні властивості та низьку вартість. У наші дні Сларрі Сіл та Майкросерфесінг широко застосовують державні і приватні організації для поточного ремонту, покриття велодоріжок, автодоріг, аеродромів, парків (рис.2.) [1].

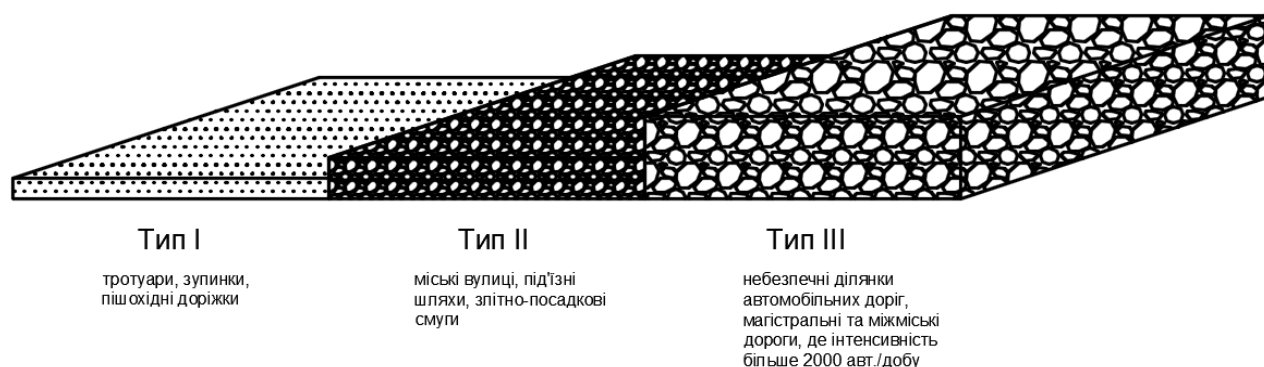


Рис.2. Класифікація ЛЕМС за способом використання (відповідно до ISSA)

Значна кількість дослідників та науковців, як в Україні, так і за її межами досліджують питання, що стосуються технології ЛЕМС та ТП на їх основі. Становлення покриттів із ЛЕМС відбулося завдяки технічним працям вітчизняних і зарубіжних дослідників: О.П.Архіпова, Й.Броссауд, М.Аудеон, О.В.Бернштейн, С.Ф.Балашов, В.І.Братчун, М.Вів'єр, Б.Бруле, П.Гебель, Р.Вітлінгер, Ф.П.Гончаренко, П.Дюпонт, А.А.Горнаєв, С.В.Єгоров, Е.О.Казарновська, Г.М.Ільяшов, Л.Ф.Кириченко, М.Г.Кононов, А.Кларак, Л.Я.Кремнев, В.В. Назаров, М.І.Кучма, І.І.Раб, М.Ф.Нікішина, Р.Петерс, Г.Оле, І.А.Плотникова, С.О.Попченко, М. Раденберг, Ф.Рашиг, Н.В.Редьков, Е.М.Рвачева, С.І.Романов, П.А.Ребіндер, Р.Спілмаєкер, Л.Ф. Ступакова, Х.Хартрідж, К.Такамура, Д.Шміт та інші. Звичайно, дана технологія прийшла в Україну із заходу. Провідна роль у розробці і поширенні даної технології належить Міжнародній асоціації будівельників шламкових покриттів (ISSA – International Slurry Surfacing Association). Німецька асоціація контролю щодо якості холодних сумішей, Центральна лабораторія доріг та мостів Франції

також здійснили вагомий внесок у науку цих сумішей. Вітчизняні методи дослідження ЛЕМС розроблялися у 1970 – 1980-х рр. співробітниками СоюздорнДІ та ДержшляхнДІ [2].

Проблемами влаштування ЛЕМС також займалися Ю.Ф.Гончаренко, С.В.Кіщинський, Е.М.Гончаренко. Науковцями ДерждорНДІ проведені дослідження та зроблені висновки щодо кам'яних матеріалів ряду кар'єрів на придатність їх до застосування в ЛЕМС, встановлено додаткові вимоги яким повинні відповідати бітуми, що застосовуються для приготування ЛЕМС [3].

О.Г.Островерхим запропоновано характеристики напружено-деформованого стану тонкошарових покриттів на основі ЛЕМС, запропоновано метод розрахунку ЛЕМС для нежорсткого одягу за двома критеріями: міцності на зсув та вирівнювання основи [4].

За останні 10 років чимало праць пов'язаних з технологією ЛЕМС опубліковано в найавторитетнішому науково-виробничому журналі України – «Автошляховик України». Отже, дана технологія набуває все більшої зацікавленості та розповсюдження на теренах нашої Батьківщини і потребує подальшого вивчення [5,6,7-9].

Російські дослідники одноголосні в тому, що дана технологія успішно використовується для утримання й ремонту автомагістралей, основних і другорядних доріг, міських вулиць, під'їзних доріг до житлових масивів. Окрім цього, суміші застосовуються при влаштуванні покриттів проїжджої частини мостів, тротуарів, доріжок в аеропортах, злітно-посадкових смуг, паркових доріжок у відпочинкових місцях. Проте основне призначення ЛЕМС – це продовження терміну служби існуючих бетонних і асфальтобетонних покриттів [10-14].

Аналіз ефективності використання технології ремонту автомобільних доріг на основі ЛЕМС в порівнянні до застосування традиційних гарячих сумішей показує, що триразове використання Сларрі Сіл для ремонту покриттів за 15-річний термін їх служби, при забезпеченні нормативної міцності конструкції, коштуватиме у п'ять разів дешевше двохразового

ремонту верхніх шарів з використанням гарячого асфальтобетону. Іноземний досвід показав, що при поточному ремонті 1 км міських вулиць (при ширині проїжджої частини 9 м) використання одного шару суміші Майкросерфесінг із товщиною 1-1,2 см виходить в 2,2 рази дешевше, ніж влаштування шару асфальтобетону із товщиною 2,5 см, та в 3,5 раз дешевше для влаштування асфальтобетонного покриття товщиною 5 см. При цьому використання емульсійно-мінеральної суміші не вимагає ані фрезерування, ані перестановки бортового каменю, ані величезних обсягів автотранспортних робіт.

При будівництві та ремонті доріг у великих містах актуальним є питання щодо впливу різних технологій на навколишнє середовище. Компанія «BASF» провела дослідження, які показують, що при ремонті одного кілометра автомобільної дороги руйнівний вплив на озоновий шар ЛЕМС у 4 рази нижчий, ніж при застосуванні асфальтобетону. При цьому Сларрі Сіл і Майкросерфесінг у 3,8 рази «чистіший» за складом CO_2 і в 4 рази за складом NO_2 в розрахунках на 1 кілометр. Значення «шумності» покриття являються на 10-15% нижчими, ніж традиційне асфальтобетонне покриття та на 15-20% нижчі, ніж покриття, яке влаштоване методом поверхневої обробки.

Окрім економічних та екологічних значень оцінювання цієї технології, існує також перевага ЛЕМС у відповідності до правил безпеки дорожнього руху. Показником даного оцінювання безпечності руху наводився коефіцієнт зчеплення. Лабораторія Національного Аерокосмічного Агентства США (NASA) провела вимірювання на аеродромах з покриттями Сларрі і Майкросерфесінг. Встановлено, що коефіцієнти зчеплення з покриттям на швидкостях 30, 60 і 90 км/год відповідно являються в 1,12; 1,37; 2,9 рази вищі, ніж на типовому асфальтобетонному покритті [14].

Особливо цікавими являються праці європейських дослідників, що займаються питаннями ЛЕМС, особливо праці Алана Джеймса (старший науковий співробітник компанії Akzo Nobel Asphalt Applications). В листопаді 2008 року на Міжнародному симпозіумі він представив доповідь із технології бітумних емульсій у Вашингтоні. Алан Джеймс та його колега Тоні Нг

запропонували інформацію щодо впливу цементу на покриття Сларрі, а також навели результати досліджень Akzo Nobel по емульсійних системах із фосфорною кислотою. При представленні доповіді на засіданні АЕМА в Мексиці (лютий 2008 р.), Алан Джеймс навів опис катіонних емульсій із швидкою та середньою усадкою, які приготовлені в системі фосфornoї кислоти для покриття Сларрі Сіл [15].

Таким чином, огляд вітчизняних та закордонних джерел показує, що технологія ЛЕМС має достатньо переваг порівняно з технологіями гарячого асфальтобетону і поверхневої обробки: нижча енергоємність процесу, екологічність, висока адгезія, безшумність та висока водонепроникність, зчіпні властивості до існуючої поверхні, можливе виконання робіт при середньодобовій температурі повітря вище + 5 °С. Окрім цього, покриття типу Сларрі Сіл являється економічним, відповідає санітарно-гігієнічним та екологічним вимогам (відведення поверхневої води, безпильність, зручне механічне прибирання), підвищує комфорт та безпеку дорожнього руху. Структура поверхні влаштованого тонкошарового покриття з ЛЕМС зображена на рис. 3.



Рис 3 Структура поверхні влаштованого тонкошарового покриття з ЛЕМС

2. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЛЕМС

2.1 Бітумна емульсія

Для приготування сумішей застосовують середньо- та повільнорозпадні катіонні бітумні емульсії (не модифіковані та модифіковані) марок ЕКП-60, ЕКП-65, ЕКС-65, ЕКПМ-60, ЕКПМ-65 та ЕКСМ-65 згідно з ДСТУ Б В.2.7-129. 2013 «Емульсії бітумні дорожні. Технічні умови» [16]. Масова частка бітуму з емульгатором повинна бути від 60 % до 65 %. Для приготування катіонних бітумних емульсій необхідно застосовувати бітуми згідно з ДСТУ 4044[17].

2.2 Кам'яний матеріал

Визначальну роль у забезпеченні експлуатаційних властивостей ТП з ЛЕМС відіграє кам'яний матеріал. Основними, значущими властивостями кам'яного матеріалу є міцність, зносостійкість і опір поліруванню. Проте в Україні існує явна проблема з гранулометричним складом і піщаним еквівалентом (вмістом глини) кам'яного матеріалу. Нерідко дуже важко знайти кам'яний матеріал, що відповідає вимогам до даної технології по піщаному еквіваленту та за критерієм адсорбції метилену синього. Кам'яний матеріал слід попередньо промивати для видалення наявної в ньому глини. Завжди необхідне додаткове просіювання кам'яного матеріалу, що вимагає наявності грохота. Для приготування сумішей застосовують кам'яні матеріали (щебінь і відсів) згідно з ДСТУ Б В.2.7-30, ДСТУ Б В.2.7-75, ДСТУ Б.В.2.7-32, ДСТУ Б.В.2.7-76, які отримують при подрібненні переважно вивержених або метаморфічних гірських порід із границею міцності на стиск не менше 100 МПа. Кам'яний матеріал (щебінь) повинен проходити двохстадійне дроблення. Форма зерен має максимально наближатися до кубовидної, а лещадність – не перевищувати 10 %. Загальна поверхнева активність глинистих часток, органічних домішок, шкідливих мінералів (слюди, гідрослюди, хлоридів, магнетитів, гематитів, гетитів тощо) кам'яного матеріалу, оцінюється за адсорбцією метилену синього і повинна складати від 5 мл до 10 мл.

Зерновий склад кам'яного матеріалу сумішей повинен відповідати вимогам, що наведені у табл. 3. При перевищенні вказаних меж, кам'яний матеріал є непридатним для використання у цих сумішах [18].

Таблиця 3

Типи ЛЕМС за зерновим складом

Діаметр отворів сит, мм	Повний прохід через сито, % за масою, для сумішей типу		
	Тип 1	Тип 2	Тип 3
15	100	100	100
10	100	100	80–94
5	100	91–100	71–90
2,5	90–100	65–90	45–70
1,25	67–91	46–71	29–51
0,63	41–66	31–51	20–35
0,315	24–41	17–29	12–24
0,14	14–28	9–20	7–18
0,071	10–20	5–15	5–15

2.3 Мінеральний наповнювач

Для регулювання часу розпаду бітумної емульсії і пластичності суміші використовують цемент згідно з ДСТУ Б В.2.7-46. Допускається одночасно із цементом або замість нього використовувати такі мінеральні тонкодисперсні наповнювачі: молотий вапняк, доломіт, базальт, золу тощо згідно з ДСТУ Б В.2.7-121. Додавання іонів кальцію дозволяє контролювати змішування. Ретельно вибираючи комбінації емульгаторів і регуляторів розпаду залежно від хімічного складу заповнювача, можна контролювати збільшення або зменшення швидкості схоплювання суміші [18]. Зерновий склад наповнювача повинний бути в межах, які зазначені у табл. 4.

Таблиця 4

Зерновий склад мінерального наповнювача

Назва компонента суміші	Вміст за масою, у відсотках, мінеральних зерен, менших даного розміру, мм		
	0,315	0,140	0,071
Мінеральний наповнювач	90–100	75–100	67–100

2.4 Регулятор розпаду

Нетрадиційним регулятором розпаду або регулюючою добавкою (присадкою), що була запропонована для використання є сульфат алюмінію (рис.4), а точніше його 50%-й водний розчин. Сульфат алюмінію – це сіль білого кольору із блакитним, сірим або рожевим відтінком, у природніх умовах має вигляд кристалогідрату $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, тобто безбарвних кристалів. Втрачає воду, якщо нагрівати, не плавлячись; якщо прожарювати, то розпадається на Al_2O_3 і SO_3 . Має добру розчинність у воді. Технічний сульфат алюмінію одержують, при обробці сульфатною кислотою глини або бокситу, а чистіший продукт, якщо розчиняти $\text{Al}(\text{OH})_3$ у гарячій концентрованій H_2SO_4 . Сульфат алюмінію легко займається, окрім того, він дуже гігроскопічний – поглинає воду з навколишнього середовища і утримує її всередині [19]. В ролі традиційної присадки для ЛЕМС було використано 10 %-й водний розчин емульгатора Redicote E-11 (Akzo Nobel, Швеція).



Рис.4. Сульфат алюмінію: а – 1-го сорту; б – вищого сорту

2.5 Вода

Для приготування сумішей необхідно використовувати питну воду згідно з ГОСТ 2874 або технічну воду згідно з ГОСТ 6709 або ГОСТ 23732 без механічних домішок із середньою жорсткістю не вище 6 мг-екв/л.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

ЛЕМС випробовували згідно з міжнародними нормами ISSA A105 [20], ISSA A143 [21] та вітчизняним СОУ 42.1-37641918-119:2014 [18].

3.1 Визначення фізико-технічних показників емульсій

Дослідження запропонованих рецептів бітумних емульсій проводилось згідно нормативних вимог [22] за такими показниками: встановлення зовнішнього вигляду емульсії; дослідження показника концентрації водневих іонів (рН); однорідність емульсії; визначення частки вмісту бітуму з емульгатором; встановлення умовної в'язкості; визначення зчеплюваності в'язучого, який виділився з емульсії, з поверхнею щебеню; змішуваність із сумішами зернових складів.

3.2 Визначення адсорбції метилену синього кам'яного матеріалу

Даним методом вимірюється здатність наповнювача до адсорбції метилену синього. Так, як синій метилен адсорбується переважно глиною, органічними компонентами, шаруватими силікатами і гідроксидом заліза, то це випробування дає уявлення про загальну поверхневу активність усіх цих компонентів. На рис. 5 приведений порядок виконання випробування метилену синього (МС).

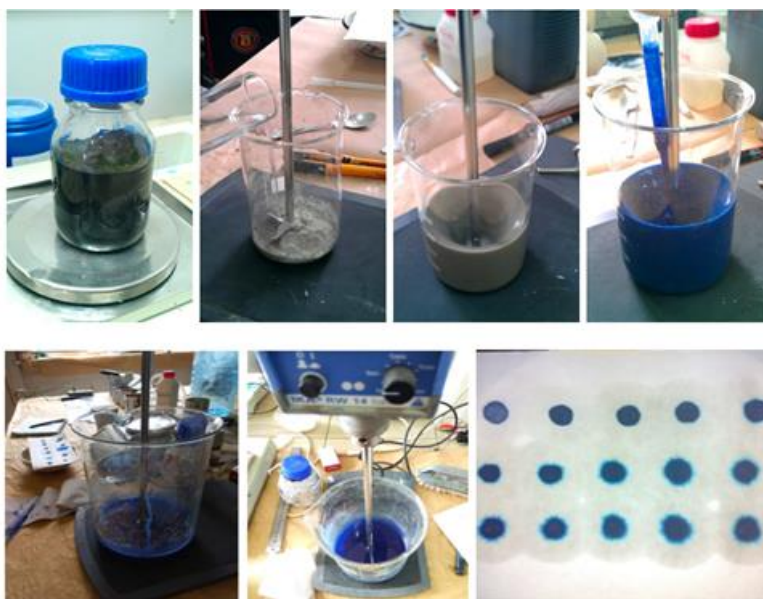
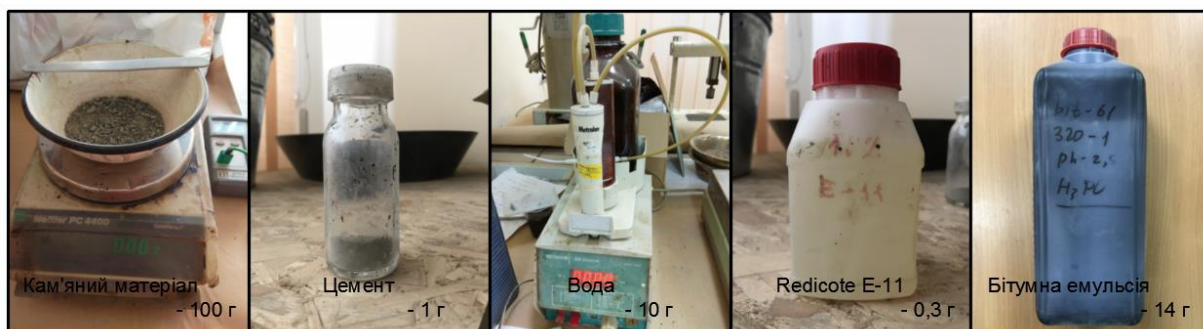


Рис. 5. Порядок проведення випробування з визначення адсорбції метилену синього

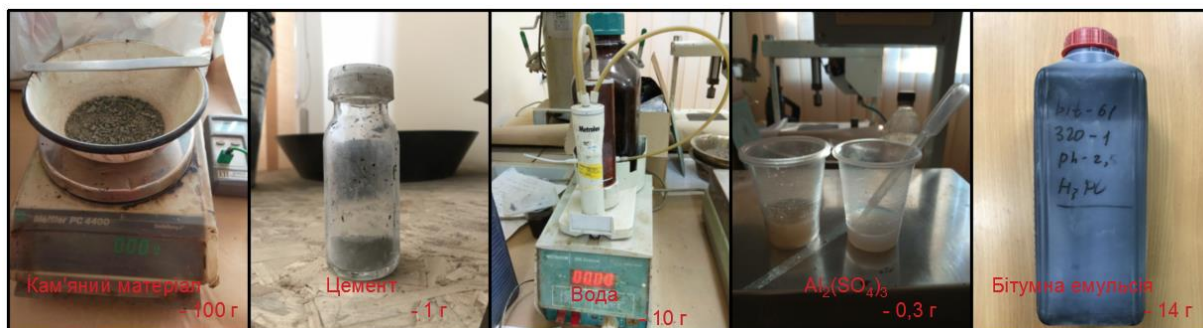
Високі значення метилену синього і, відповідно, висока поверхнева активність викликають прискорену реакцію наповнювача з бітумними емульсіями і добавками, що може привести до передчасного розпаду або поганого зчеплення (адгезії). Показник метилену синього повинен бути в межах 5-10 мл [18].

3.3 Визначення розпаду суміші

Випробування з визначення часу розпаду суміші проводили відповідно до [18]. Розпад ЛЕМС – це процес від початку змішування усіх компонентів суміші до того моменту часу, коли вона втрачає рухливість і подальше перемішування неможливе. Критерій розпаду визначає час, протягом якого суміш має бути виготовлена та укладена в тонкошарове покриття. За критерієм розпаду оптимальним складом ЛЕМС можна вважати вміст кам'яного матеріалу, мінерального наповнювача(ів), води, присадки та бітумної емульсії, що забезпечує розпад суміші не швидше 120 або 180 секунд залежно від типу суміші за раціонального вмісту кожного із складників (рис. 6) [18,20].



Склад з розчином Redicote E-11



Склад з розчином $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Рис.6. Компоненти у складах ЛЕМС

Загальна методика встановлення розпаду ЛЕМС є наступною (рис.7): змішування в емальованому посуді мінеральних складників, води, регулюючої добавки (присадки) й емульсії (рис.7 а); ручне перемішування одержаної суміші шпателем в похиленому посуді для можливості оцінки рухливості суміші упродовж усього часу перемішування (рис.7 б); фіксація часу розпаду суміші, як часу від змішування всіх складників суміші до моменту, коли вона втрачає рухливість та можливість подальшого перемішування (рис.7 в).

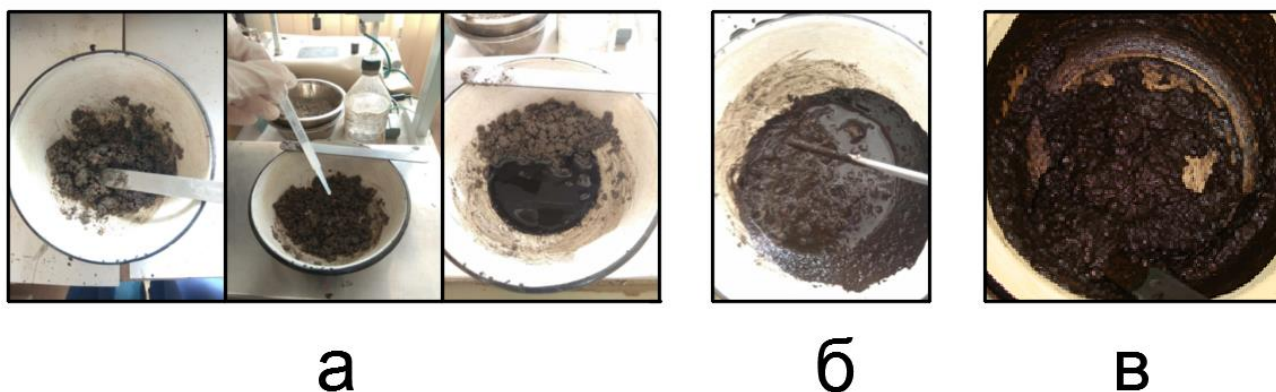


Рис. 7 Визначення розпаду ЛЕМС

3.4 .Визначення швидкості формування ТП

Когезійна міцність – міцність внутрішніх структурних зв'язків матеріалу. Визначення швидкості формування шару зносу ЛЕМС виконують згідно з шляхом формування встановлених зразків суміші та випробування через певні періоди часу на модифікованому когезійному приладі (рис.8).



Рис.8. Модифікований когезійний прилад: 1 – повітряний циліндр;

2 – шток циліндра; 3 – гумовий наконечник; 4 – пластина з толі або руберойду; 5 – манометр для вимірювання тиску в циліндрі; 6 – регулятор тиску повітря; 7 – динамометричний ключ; 8 – регулятор опускання штоку циліндра

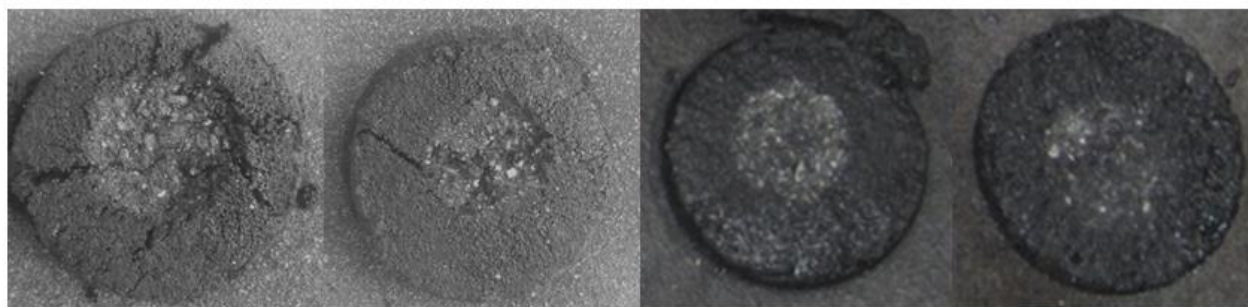
Випробуванні зразки з ЛЕМС класифікуються за характером руйнування і відповідним значенням крутного моменту на типи (рис.9) [18,20-21]:

1.«N» – Normal (стандартне) – характеризується майже повним руйнуванням зразка із наявністю радіальних тріщин. Рівнозначна величина крутного моменту становить 12-13 кг*см.

2.«NS» – Normal Spin (нормальне кручення) – охарактеризовується наявністю тільки однієї руйнуючої радіальної тріщини. Рівнозначна величина крутного моменту становить 20-21 кг*см.

3.«S» – Spin (кручення) – характеризується відсутністю тріщин, але спостерігаємо викришування зерен кам'яного матеріалу чи зміщення їх по колу. Рівнозначна величина крутного моменту становить 23 кг*см.

4.«SS» – Solid Spin (тверде кручення) – характеризується відсутністю тріщин. Зразок цілісний, можливе зміщення або видалення частинок бітуму. Рівнозначна величина крутного моменту становить 26 кг*см.



1.«N»-12-13 кг•см 2.«NS»-20-21 кг•см 3.«S»-23 кг•см 4.«SS»-26 кг•см

Рис.9. Руйнування зразків з ЛЕМС за типами

Своєю чергою за типами визначаємо певний етап формування структури ЛЕМС та можливість відкриття руху транспортних засобів по влаштованому ТП (табл.5)

Визначення етапів формування ТП з ЛЕМС

Характеристики міцності		Етапи формування ТП з ЛЕМС
Характер руйнування	Значення крутного момент, кг*см	
«N» – Normal	12-13	Схоплювання
«NS» – Normal Spin	20-21	Самоущільнення (відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год)
«S» – Spin	23	Ущільнення
«SS» – Solid Spin	26	Затвердіння (відкриття руху без обмежень швидкості)*
*Після даного етапу протікає етап остаточного набору когезійної міцності.		

3.5 Визначення втрати матеріалу при вологому абразивному зносі (ВМВЗ)

Метод полягає у визначенні втрати маси матеріалу, насиченого водою, із суміші при механічному стиранні гумовою поверхнею тривалістю 5 хв. Це випробування приведене до умов зносу колесами автомобілів на вологому покритті (рис. 10) [22]. ВМВЗ обчислюють за формулою 1.

$$ВМВЗ = (m_0 - m_1) \times k, \quad (1)$$

де ВМВЗ – втрата маси матеріалу при вологому зносі, г;

m_0 , m_1 – відповідно маса зразка до і після зносу;

k – перевідний коефіцієнт, який залежить від марки змішувача і змінюється в діапазоні від 29 до 35



Рис.10 а – планетарний змішувач «Hobart C-100»; б – готові зразки

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 Виготовлення та встановлення фізико-технічних показників емульсії

Для приготування бітумної емульсії було використано бітум нафтовий дорожній в'язкий окислений марки БНД 60/90 ТОВ «Мозирський НПЗ» (Білорусь), що відповідає вимогам ДСТУ 4044-2001 [17]. Розроблено наступні рецепти бітумної емульсії (табл.5) та встановлені фізико-технічних показники емульсій (табл.6).

Таблиця 5

Рецепти бітумних емульсій для ЛЕМС

Компоненти емульсій	№ рецепту, мас.%	
	1	2
Бітум БНД 60/90	62	62
Емульгатор Redicote 404	1,1	1,1
Спів-емульгатор Redicote 540	0,25	–
Спів-емульгатор Redicote 505	–	0,25
Соляна кислота у водній фазі до рівня рН	1,5	1,5
Вода	до 100	до 100

Таблиця 6

Фізико-технічні показники емульсії

Назва показника	Вимоги	Рецепти емульсій	
	ЕКП-60	1	2
1. Зовнішній вигляд	Однорідна темно-коричнева рідина	Відповідає	
2. Показник концентрації водневих іонів, рН	1,5-6,5	2,13	2,14
3. Однорідність (залишок на ситі № 014), %, не більше	0,25	0,03	0,03
4. Вміст залишкового в'язучого, %	58-62	61,22	61,21
5. Умовна в'язкість, за температури 20 °С на апараті з діаметром отвору витоку 4 мм, с	5-25	9,0	9,2
6. Стійкість при зберіганні після 7 діб : залишок на ситі № 014, %, не більше:	0,3	0,09	0,09

Продовження таблиці 6

7. Зчеплюваність залишкового в'язучого з поверхнею щебеню, балів, не менше		5,0	5,0	5,0
8. Змішуваність із сумішами зернових складів	пористого	Так	Так	Так
	щільного	Так	Так	Так

В склади емульсій вводилися рідкі спів-емульгатори Redicote 505 та Redicote 540 компанії Akzo Nobel (Швеція), що дають змогу покращити швидкість формування структури ТП з ЛЕМС. Були проведені дослідження з визначення. Встановлено, що рецепти бітумних емульсій відносяться до марки ЕКП-60 (катіонні немодифіковані повільнорозпадні) та відповідають ДСТУ Б В.2.7-129:2014 [22].

4.2. Випробування кам'яного матеріалу для ЛЕМС

4.2.1 Визначення адсорбції метилену синього

При виборі кам'яних матеріалів для ЛЕМС було обрано щебені та щебеневі висівки наступних виробників: Малинський кар'єр (Житомирська область), ТОВ «Полонський спецкар'єр» (Хмельницька область). На першому етапі визначили загальну поверхневу активність кам'яних матеріалів (фракції менше 0,071 мм) за показником метилену синього (табл. 7)

Таблиця 7

Визначення адсорбції метилену синього

Кам'яний матеріал	Фактичні дані, мл	Вимоги СОУ 42.1-37641918-119:2014 [17]
Малинський кар'єр	13	Від 5 мл до 10 мл
ТОВ «Полонський спецкар'єр»	11	

Показник метилену синього обох кам'яних матеріалів перевищує нормативні вимоги (5-10 мл) діючого СОУ 42.1-37641918-119:2014 [18]. В наступних дослідженнях використовували кам'яний матеріал ТОВ «Полонський спецкар'єр», адже його «реактивність» є нижчою.

4.2.2 Визначення відповідності зернових складів кам'яних матеріалів типам ЛЕМС

Визначення відповідності зернового складу кам'яного матеріалу ТОВ «Полонський спецкар'єр» проводили для трьох типів ЛЕМС згідно з вимогами СОУ 42.1-37641918-119:2014 [17]. Грансклад використаного щебеню (щебенева суміш 0-15 мм) найбільш близький до граничних меж третього типу ЛЕМС (рис.11).

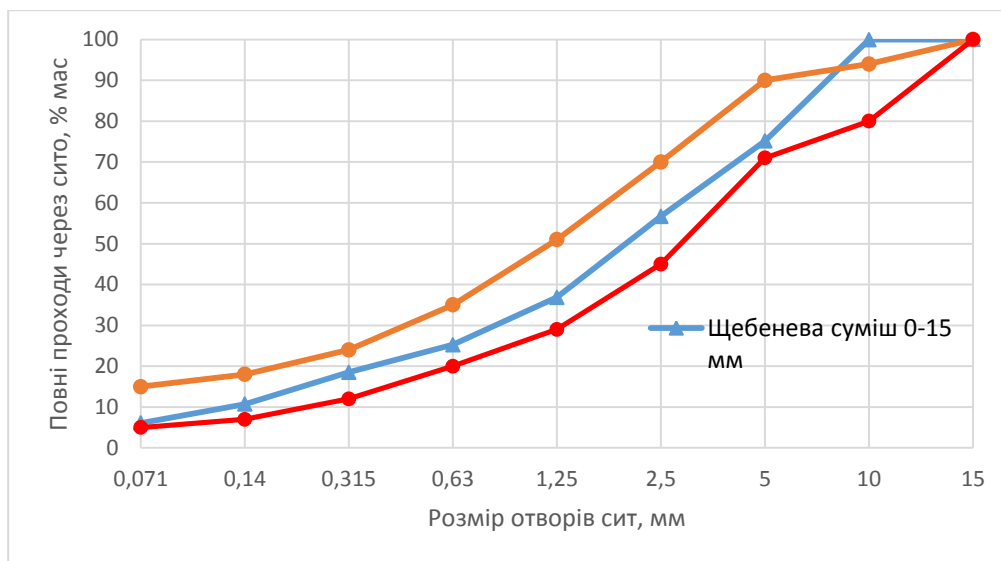


Рис.11 Граничні криві згідно з СОУ 42.1-37641918-119:2014 для типу 3 ЛЕМС

4.3 Проектування складу ЛЕМС за критерієм розпаду

Дозування всіх вихідних складників виконують в процентному відношенні від маси кам'яного матеріалу. Після введення всіх потрібних складників в суміш включається секундомір та відбувається перемішування суміші. Перемішування триває до тих пір, поки суміш не втратить рухливість та не перестане перемішуватися тоді зупиняють секундомір і фіксують час розпаду. [18].

Для проектування складу суміші використали два розроблені рецепти бітумних емульсій та щебенева суміш ТОВ «Полонський спецкар'єр», а також портландцемент ПЦ ІІ/А-ІІІ-400, воду питну, як регулюючу добавку (присадку) взято 10% розчин емульгатора Redicote E-11 та розчин сульфату алюмінію (вищого та першого сорті).

Внаслідок оптимізації складів за критерієм розпаду (час розпаду суміші не раніше 120 с) визначили оптимальні складі на двох досліджуваних емульсіях (табл.8 та 9).В табл. 8 та 9: ПКМ – це початок набору когезійної міцності (комкування) [2], Р- час розпаду, БЕ – бітумна емульсія, А – сульфат алюмінія $Al_2(SO_4)_3$ (А1–першого сорт, АВ–вищий сорт), Е – 10% водний розчин емульгатора Redicote E-11.

Таблиця 8

Склади ЛЕМС за критерієм розпаду на основі бітумної емульсії 1.«R 540»

№ складу	Компоненти				P≥ 120с (тип 3)	ПКМ,с
	Цемент	Вода	Присадки (Е/А)	БЕ R 540		
Т=22°C						
1	1,0	10	-	14	-	-
2	1,0	10	0,5 Е	14	0:46	0:59
3	1,0	10	0,75 Е	14	1:34	1:45
4	1,0	10	0,85 Е	14	3:00	3:24
5	1,0	10	1,0 Е	14	>4:00	>5:00
6	1,0	10	0,75 А1	14	2:00	2:15
7	1,0	10	0,85 А1	14	2:52	3:01
8	1,0	10	1,05 А1	14	>4:00	>5:00
9	1,0	10	1,25 А1	14	>4:00	>5:00
Т=19°C						
1	1,0	10	0,5 А1	14	>4:00	>5:00
2	1,0	10	0,3 А1	14	2:50	3:15
3	1,0	10	0,3 Е	14	2:25	2:40
4.	1,0	10	0,3 АВ	14	>4:00	>5:00
5.	1,0	10	0,15 АВ	14	2:15	2:35

На рис.12 зображено порівняння складів ЛЕМС за критерієм розпаду за включення водних розчинів Redicote E-11 та $Al_2(SO_4)_3$. на бітумній емульсії 1.«R 540». Аналізуючи табл. 8 та рис. 12 встановлюємо, що $Al_2(SO_4)_3$ як вищого сорту, так і першого може використовуватись в ролі ефективного регулятора розпаду ЛЕМС. Його дія схожа на вплив 10% водного розчину емульгатора Redicote E-11, він продовжує розпад ЛЕМС прямо пропорційно до збільшення його вмісту. А при використанні $Al_2(SO_4)_3$. вищого сорту можна зменшити його вміст суміші в порівнянні з традиційною присадкою за досягнення оптимального часу розпаду.

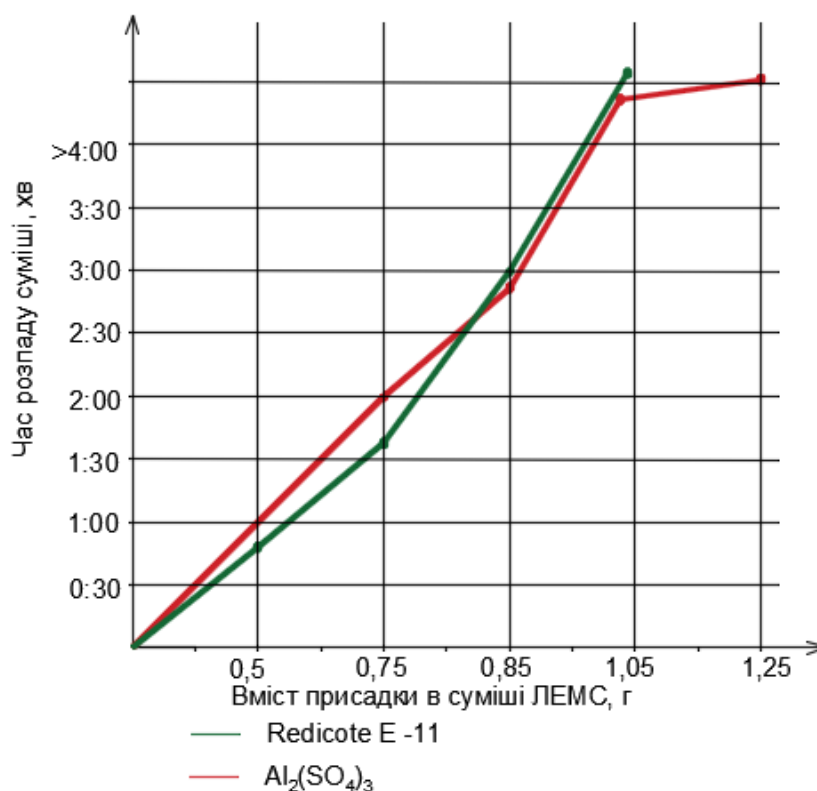


Рис. 12. Порівняння складів ЛЕМС за критерієм розпаду за включення водних розчинів Redicote E-11 та $Al_2(SO_4)_3$ на бітумній емульсії 1.«R 540».

Таблиця 9

Склади ЛЕМС за критерієм розпаду 2.«R 505»

№ складу	Компоненти				P≥ 120с (тип 3)	ПКМ,с
	Цемент	Вода	Присадки (Е/А)	БЕ R 505		
T=22°C						
1	1,0	10	-	14	-	-
2	1,0	10	0,5 Е	14	0:56	1:09
3	1,0	10	0,75 Е	14	1:44	1:55
4	1,0	10	0,85 Е	14	3:10	3:34
5	1,0	10	1,0 Е	14	>4:00	>5:00
6	1,0	10	0,75 А1	14	2:10	2:25
7	1,0	10	0,85 А1	14	2:57	3:09
8	1,0	10	1,05 А1	14	>4:00	>5:00
9	1,0	10	1,25 А1	14	>4:00	>5:00
T=19°C						
1	1,0	10	0,5 А1	14	>4:00	>5:00
2	1,0	10	0,3 А1	14	2:57	3:25
3	1,0	10	0,3 Е	14	2:35	2:50
4.	1,0	10	0,3 АВ	14	>4:00	>5:00
5.	1,0	10	0,15 АВ	14	2:25	2:45

На рис.13 зображено порівняння складів ЛЕМС за критерієм розпаду за включення водних розчинів Redicote E-11 та $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ на бітумній емульсії 2.«R 505».

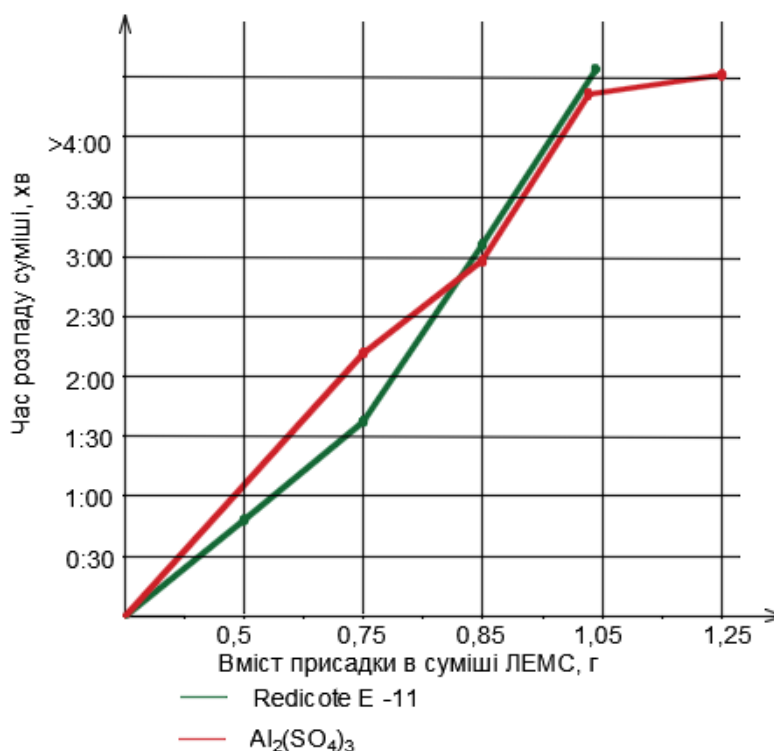


Рис.13. Порівняння оптимальних складів ЛЕМС за критерієм розпаду на основі бітумної емульсії 2.«R 505»

Динаміка розпаду ЛЕМС на бітумній емульсії №2 .«R 505» (табл. 9, рис.13) є схожою до бітумної емульсії №1 .«R 540», але використання співемульгатора Redicote 505 дає можливість дещо продовжити розпад суміші порівняно з Redicote 540.

4.4 Визначення часу твердіння ЛЕМС з ТП

Визначення часу твердіння (швидкості формування) ЛЕМС з ТП визначали в узгодженні з вимогами українського стандарту [18], нормативів Міжнародної асоціації будівельників шламових покриттів ISSA (International Slurry Surfacing Association) [20] та європейського стандарту [21] шляхом формування відповідних зразків суміші та випробування їх через певні періоди часу за допомогою модифікованого когезійного приладу (рис.14). Випробуванні зразки з ЛЕМС класифікували відповідно до вимог наведених в пункті 3.4.

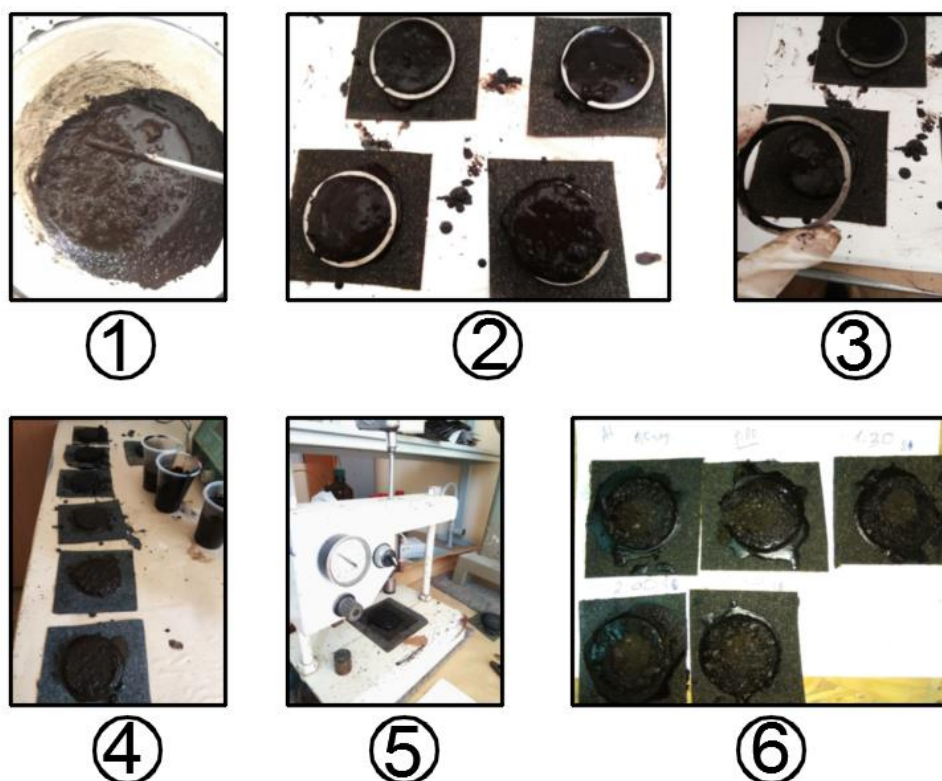


Рис.14. Порядок визначення часу твердіння ЛЕМС з ТП: 1 – замішування суміші потрібного складу протягом 30-40 с; 2 – заповнення форм сумішшю та ручне ущільнення; 3 – звільнення зразків із форм; 4 – набір когезійної міцності (час до випробування); 5 – випробування зразків на когезійному тестері; 6 – випробувані зразки із встановленим типом

Дослідження проводились за температури повітря $t=19^{\circ}\text{C}$ та відносної вологості повітря $\varphi=75\%$. Вміст компонентів понад масу кам'яного матеріалу склав: регуляторів розпаду у всіх випадках 0,3% мас, цементу 1,0% мас, води 10,0% мас., бітумної емульсії 14,0 % мас. Результати визначення швидкості формування шару зносу ЛЕМС двох оптимальних складів за критерієм розпаду суміші наведені в табл.10 та зображенні на рис.15.

Аналізуючи табл. 10 та рис. 15 встановлюємо, що $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ вищого та першого сорту за їх використання в ролі присадки для ЛЕМС дає можливість не тільки регулювати розпад суміші, але й покращити показники формування ТП. За ідентичного вмісту в суміші з 10-% розчином Redicote E-11, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ демонструє в середньому на 1,5 години швидший приріст когезії. Відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год за використання $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ можливе

від 1 год до 1,5 год, а без обмеження швидкості за 3 год, відповідно до норм наведених в табл. 5. За використання 10-% розчину Redicote E-11 відкриття руху з обмеженням швидкості до 40 км/год можливе також від 1 год до 1,5 год, а без обмеження швидкості лише за 4,5 год. Дані залежності зберігаються як для бітумної емульсії №1 із спів-емульгатором Redicote 540 (рис.15), так і для емульсії №2 із спів-емульгатором Redicote 505.

Таблиця 10

Швидкість формування шару зносу ЛЕМС

Склад БЕ №	Час випробування, год.	Характер руйнування	Прикладений крутний момент, кг*см
1. «R 540». +E	0,5	N	12
	1,0	N	13
	2,0	NS	20
	2,5	NS	20
	3,0	S	23
	4,5	SS	26
1. «R 540». +A1	0,5	N	12
	1,0	N	13
	1,5	S	23
	2,0	S	23
	2,5	S	24
	3,0	SS	26
1. «R 540». +AB	0,5	N	12
	1,0	N	13
	1,5	S	20
	2,0	S	23
	2,5	S	24
	3,0	SS	26
2. «R 505». +E	0,5	N	12
	1,0	N	13
	2,0	NS	20
	2,5	NS	20
	3,0	S	23
	4,5	SS	26
2. «R 505». +A1	0,5	N	12
	1,0	N	13
	1,5	S	23
	2,0	S	23
	2,5	S	24
	3,0	SS	26
2. «R 505». +AB	0,5	N	12
	1,0	N	13
	1,5	S	20
	2,0	S	23
	2,5	S	24
	3,0	SS	26

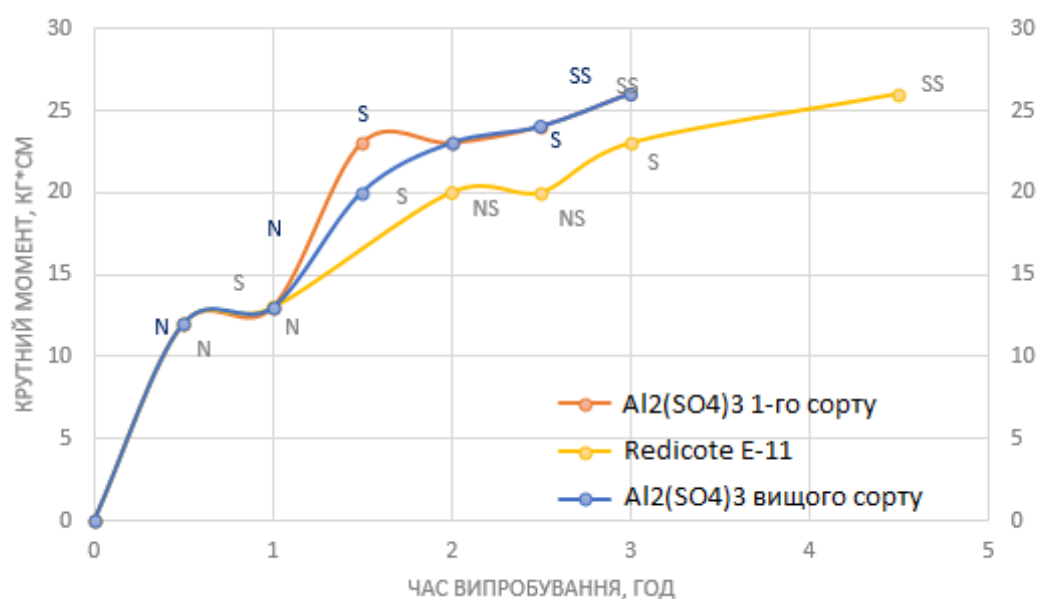


Рис.15. Швидкість формування ТП з ЛЕМС на прикладі складу БЕ №1

4.5. Визначення втрати матеріалу при вологому абразивному зносі

Для визначення ВМВЗ було взято склад ЛЕМС з присадками $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ першого сорту та Redicote E-11 (табл. 11).

Таблиця 11

ВМВЗ складів ЛЕМС

Склад ЛЕМС	ВМВЗ, г/м ²	Вимоги СОУ 42.1-37641918-119:2014 [18]
БЕ Redicote 505 (10% E-11)	1066	Не більше 530 г/м ²
БЕ Redicote 540 (10% E-11)	1012	
БЕ Redicote 505 ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)	528	
БЕ Redicote 540 ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)	525	

Використання $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ в ролі присадки дає змогу знизити показники ВМВЗ до нормативних, це свідчить про те що ЛЕМС з такою присадкою характеризується кращою стираністю суміші під дією води, що вказує про кращі адгезійні та когезійні властивості таких сумішей. У порівнянні із використанням традиційної присадки знижує показник приблизно на 50%. Використання нетрадиційної присадки підвищує властивості стійкості та міцності покриття.

5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Вартість ЛЕМС різних складів зазвичай змінюється в залежності від складу використаної бітумної емульсії. Оскільки вартість спів-емульгаторів Redicote 505 та 540 є однаковою та рецепти бітумних емульсій за % мас. збігаються то загальна вартість бітумних емульсій 1 та 2 буде ідентичною (табл.12) Економічна доцільність використання розглянутих регуляторів розпаду за однакового їх вмісту наведено в табл. 13.

Таблиця 12

Вартість 1 т бітумної емульсії базового складу

Компоненти бітумної емульсії	Витрата на 1 т		Вартість компонента за 1 т	Вартість витрат на 1 т БЕ
	%	т	грн	грн
Бітум БНД 60/90	62,0	0,62	8500	5270
Емульгатор Redicote 404	1,1	0,011	182000	2002
Спів-емульгатор Redicote 505 чи 540	0,25	0,0025	202000	505
Соляна кислота у водній фазі до рівня рН	1,5	0,015	7800	117
Вода	35,15	0,3515	8,0	2,812
Разом	100	1	400308	7897

Таблиця 13

Розрахунок вартості ЛЕМС з регуляторами розпаду за однакового їх вмісту

Компоненти	Вміст, %	Кількість, т	Вартість за одиницю, грн/т	Сумарна вартість, грн
Кам'яний матеріал	100,0	1,0	270	270
Цемент	1,0	0,01	2600	26
Вода	10,0	0,1	8,0	0,8
БЕ	14,0	0,14	7897	1105,58
10%мас. Redicote E-11	0,3	0,003	18200	54,6
Разом з E-11	125,3	1,253	28975	1457
50%мас $Al_2(SO_4)_3 - A1$	0,3	0,003	6000	18
Разом $Al_2(SO_4)_3$	125,3	1,253	193375,1	1420

За даними розрахунків встановили, що випробувана нетрадиційна присадка $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - \text{A1}$ доцільна для використання в ЛЕМС та є економічно вигіднішою ніж традиційний аналог. Використання приводить до зменшення ціни відповідно на 1 т суміші. на 37 грн або 3 %. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 - \text{A1}$ є вітчизняним продуктом, і за великих об'ємів робіт значно здешевить вартість ТП з ЛЕМС, крім того його технічний ефект є безсумнівним перед закордонним аналогом.

ВИСНОВКИ

1). Проаналізовано питання з дослідження литих емульсійно-мінеральних сумішей.

2). Розроблено рецепти бітумних емульсій для технології ЛЕМС та визначено їх фізико-механічні показники. При проведенні дослідження встановлено марку бітумної емульсії ЕКП – 60 відповідно до нормативних вимог ДСТУ Б.В.2.7-129:2014

3). Встановлено загальну поверхневу активність кам'яних матеріалів за показником метилену синього. Визначено зерновий склад кам'яних матеріалів та встановлено їх відповідність до типів ЛЕМС.

4). Запроектовано оптимальні склади ЛЕМС за критерієм розпаду на основі розроблених рецептів бітумних емульсій. Встановлено, що використання нетрадиційної присадки позитивно впливає на формування сумішей ЛЕМС та сповільнює їх розпад відповідно до вмісту.

5). Визначено час формування ТП запроектованих складів ЛЕМС. За ідентичного вмісту із 10-% розчином Redicote E-11, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ демонструє в середньому на 1,5 години швидший приріст когезії.

6). ЛЕМС з присадкою $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ характеризується кращою стираністю суміші під дією води, що вказує про кращі адгезійні та когезійні властивості таких сумішей. У порівнянні із використанням традиційної присадки знижує показник приблизно на 50%.

7). Встановлено економічну доцільність використання $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сларри Сил [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
www.metrayol.com.tr/katalog/Slurry_Seal_Ru.pdf
2. Сідун Ю.В. «Підвищення швидкості набору когезійної міцності литих холодних емульсійно-мінеральних сумішей». Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Науковий керівник / консультанти: д.т.н., проф. Солодкий С.Й. Національний університет "Львівська політехніка", Міністерство освіти і науки України, Львів, 2017.
3. Дороги і мости: Збірник наукових праць. Кіщинський С.В., Гончаренко Ю.Ф., Гнатюк Е.М., Досвід та проблеми влаштування на дорогах України тонкошарових покриттів типу «Сларрі Сіл». – К.: ДерждорНДІ, 2008. – Випуск 10.
4. Островерхий О.Г. Проектування тонкошарових емульсійно мінеральних покриттів дорожніх одягів: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.11 / О.Г. Островерхий / Нац. транспорт. ун-т. — К., 2002. — 16 с.
5. Коваль П.М. Міжнародна науково-технічна конференція «Бітумоемульсійні матеріали і технології дорожніх робіт // Автошляховик України. - 2003. - № 3. - С. 32.
6. Нагайчук В.М. Досвіду влаштування тонкошарових покриттів з емульсійно-мінеральних сумішей // Автошляховик України. - 2005. - № 4. - С. 47-48.
7. В.Я. Савенко ; О.Г.Островерхий, В.І.Каськів. Влаштування тонкошарових покриттів на автомобільних дорогах державного значення // Автошляховик України. - 2007. - № 1. - С. 40-42.
8. Климчук С. М. Вимоги до технології влаштування тонкошарових покриттів з сумішей литих емульсійно-мінеральних та холодних асфальтобетонних. // Автошляховик України. - 2003. - № 1. - С. 31-33.
9. Солодкий С.Й., Сідун Ю.В., Волліс О.Є. Кінетика набору когезійної міцності холодних литих емульсійно-мінеральних сумішей на бітумах різного походження // Автошляховик України. - 2013. - № 3. - С. 36-40.

10. Поводырев М. Что такое микросюрфейсинг / Автомобильные дороги, 2006, № 4, с. 52-53.
11. Скрыпник Т.В., Петрович В.В., Могильченко Д.Ю., Лисянец А.А. Усовершенствование технологических параметров устройства тонкослойного покрытия. 36. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», Київ: НТУ, 2004, № 71, с. 45-49.
12. Поводырев Г. Сургутская прописка Сларри-Сил // Автомобильные дороги, 2001, № 4, с. 12-14.
13. Устройство тонкослойных покрытий из литых эмульсионно минеральных смесей «Сларри Сил». Стандарт предприятия СТП ДИСиТ 03 02. Технологический регламент. Сургут. 2002. С. 29.
14. Петров А.В. Опыт применения литых эмульсионно-минеральных смесей на дорогах РФ. Проблемы и пути развития. Каталог-справочник «Дорожная Техника - 2006». Информационно-поисковая система строителя. Stroit.Ru » Библиотека » Дорожная техника» Применение литых эмульсионно-минеральных смесей.
15. AkzoNobel Surface Chemistry. Інформаційний бюлетень відділу дорожніх добавок – Європа. Випуск 80, осінь 2009.
16. ДСТУ Б В.2.7-129:2013. «Емульсії бітумні дорожні. Технічні умови.» - Київ : Мінрегіон України., 2014.
17. ДСТУ 4044-2001. «Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови.» - Київ: Держстандарт.2001
18. СОУ 42.1-37641918-119:2014 Суміші литі емульсійно-мінеральні. Технічні умови - Київ: Укравтодор.2014.
19. <http://krasivovnorme.ru/harchuvannja/1929-sulfat-aljuminiju-2.html>
20. ISSA Technical Bulletin A105 (Revised) May 2003, Recommended Performance Guidelines for Emulsified Asphalt Slurry Seal, International Slurry Surfacing Association, Annapolis, MD.
21. ISSA Technical Bulletin 139. Test Method to Classify Emulsified

Asphalt/Aggregate Mixture Systems by Modified Cohesion Tester Measurement of Set and Cure Characteristics, International Slurry, Surfacing Association, Washington, DC, 1990.

22. ДСТУ Б В.2.7-129:2013. «Емульсії бітумні дорожні. Технічні умови.» - Київ : Мінрегіон України., 2014.