



## **CHAPTER 1 / РОЗДІЛ 1**

### **DIAGNOSTIC TOOLS FOR DETERMINING THE STRENGTH PROPERTIES OF ROAD STRUCTURES**

Дорожній одяг особливо шару покриття є найбільш відповідальним елементом дорожньої конструкції з позиції масової частки навантаження від дії транспортних засобів, що сприймається та впливу тепло – вологісних факторів при їх значній вартості в порівнянні з вартістю всієї конструкції.

Серед практичних методів визначення міцності конструкції дорожнього одягу найбільш розповсюджені методи, засновані на визначенні величини відклику конструкції на зовнішню дію. В якості інформативного компонента відклику приймається значення деформації поверхні покриття у вигляді прогину під дією статичного або змінного в часі навантаження. Отримане в результаті випробувань значення загального модуля пружності характеризує несучу здатність всієї конструкції, та для визначення міцностних параметрів шарів покриття може бути використане лише зі значними припущеннями. Визначення окремих розрахункових характеристик монолітних шарів без їх руйнування можливе лише за умови поетапного визначення загального прогину при виконанні робіт з влаштування асфальтобетонних шарів. Даний підхід не можливо реалізувати при аналізі фактичного стану конструкцій, що знаходяться в експлуатації.

Серед методів, що застосовуються, найпростішими з позиції практичної реалізації є статичні методи конструювання і оцінки міцності дорожнього одягу.

Суть статичних методів оцінки міцності полягає в створенні на поверхні покриття питомого тиску, відповідного по значенню дії під колесом розрахункового автомобіля жорсткими металевими штампами, або здвоєними колесами самого розрахункового автомобіля. В першому випадку, дія на поверхню покриття здійснюється через жорсткий штамп, площею, рівною відбитку сліду розрахункового автомобіля.

Для випробувань дорожнього одягу, рекомендується, застосовувати двовісний автомобіль, у якого навантаження на заднє колесо знаходиться в



межах 30-50 кН з нормативним тиском повітря в шинах [5]. В якості вимірювального приладу при навантаженні колесом розрахункового автомобіля використовують прогиноміри різних конструкцій (КП-204, ПД-2,5, МАДИ – ЦНИЛ, VEC130 та ін., рисунок 1) та високоточні нівеліри [5]. Вперше прилад, принцип дії якого був заснований на вимірі прогину дорожньої конструкції під дією статичного навантаження, був сконструйований А.Ц. Бенкельманом, та випробуваний на дорогах США у 1954 р [6].

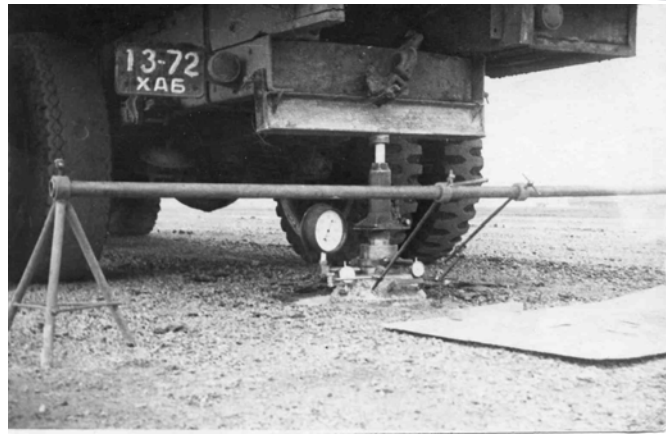


**Рисунок 1 – Прогиномір VEC130**

Статичне навантаження штампом виконують за допомогою пересувного або навісного пресу [6, 7] (рисунок 2). Застосування такого обладнання дозволяє дослідити роботу дорожньої конструкції під дією однократного статичного навантаження, що прикладається ступенями заданої величини до повного згасання осідання від навантаження кожного ступеня, та під дією багатократного навантаження. Але значна складність, трудомісткість, та не висока продуктивність таких досліджень дозволяє використовувати їх лише в наукових цілях та при детальних дослідженнях.



а)



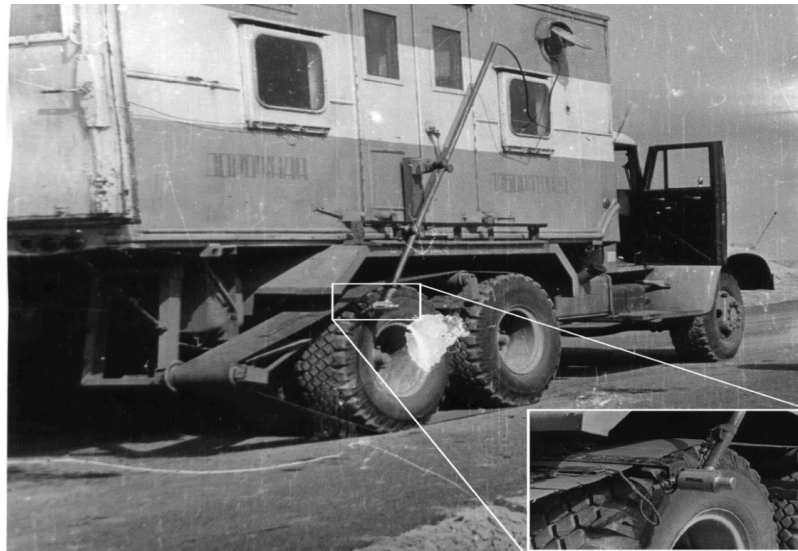
б)

**Рисунок 2 – Дорожні преси, а – КАДІ, б – ХАДІ**

Статичні методи оцінки міцності, що використовуються в нашій країні, не враховують геометрію чаші прогину (згинальну жорсткість дорожнього одягу). Методи врахування параметрів чаші прогину при статичному навантаженні не отримали широкого розповсюдження з причини великої трудомісткості польових випробувань. Характер роботи дорожньої конструкції з позиції виникнення в ній горизонтальних, дотичних і розтягуючих напружень при традиційних статичних випробуваннях не розглядається. Загальним недоліком всіх статичних методів є неможливість оцінки подібними засобами міри здатності дорожньої конструкції сприймати динамічну дію, що має місце при реальному русі автомобільного транспорту.

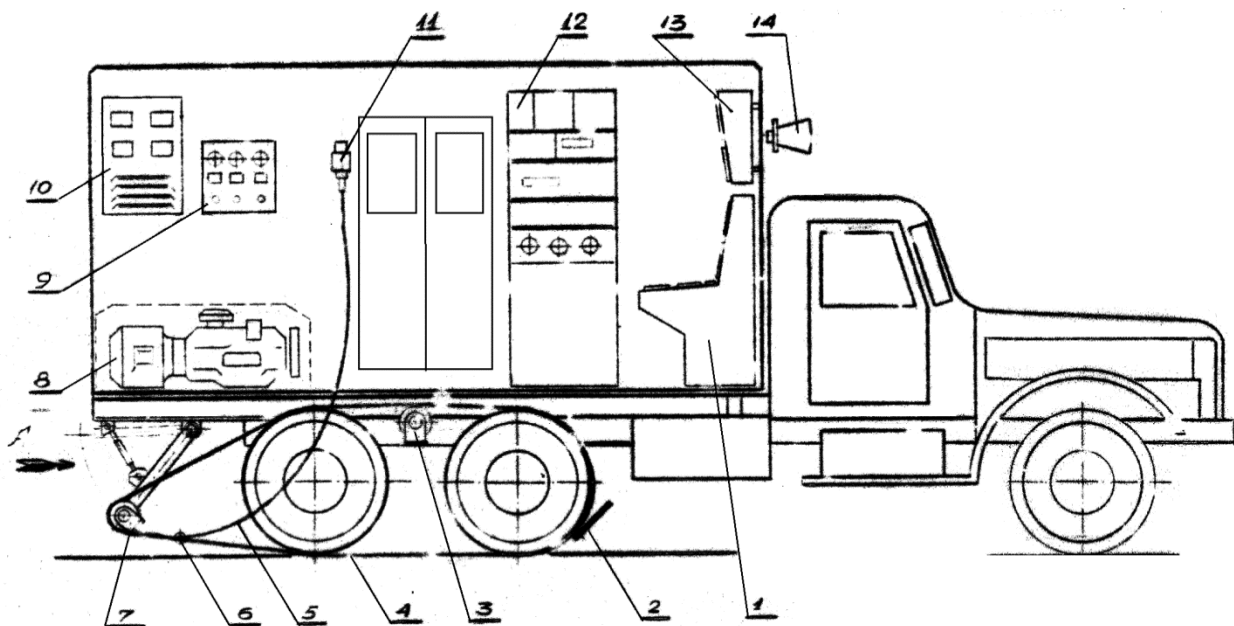
Квазістатичне навантаження дорожнього одягу займає проміжне положення між статичним і динамічним.

У Харківському автодорожньому інституті для визначення міцності дорожнього одягу в процесі руху автомобіля була розроблена установка безупинного контролю міцності дорожнього одягу [4] (рисунки 3, 4). За допомогою цієї установки, що базувалася на автомобілі типу КРАЗ, вимірювався радіус кривизни поверхні покриття під навантаженням, а потім з використанням спеціальних тарувальних іспитів визначався шляхом перерахування загальний модуль пружності дорожнього одягу.



**Рисунок 3 – Установка безупинного контролю міцності дорожнього одягу**

### ХАДІ



- 1 – пульт управління центру; 2 – тензометричні датчики; 3 – направляючий ролик; 4 – гнучка  
лента; 5 – гнучкий вал; 6 – пристрій кріплення гнучкого вала; 7 - натіжний пристрій;  
8 – електростанція; 9 – Пульт допоміжних механізмів; 10 – пульт електростанції;  
11 – струмознімач ртутний; 12 – вимірювальний стенд; 13 – інформаційне табло; 14 – гучномовець

**Рисунок 4 – Установка безупинного контролю міцності дорожніх одягів**





На спарені колеса середнього та заднього моста (навантаження на одиночну вісь 7-10 т.) автомобіля Краз-256 надіта нескінченна гнучка стрічка на ній закріплена пластина яка копіюють чашу прогину дорожнього одягу за допомогою тензометричних датчиків, число каналів вимірювання 28, джерело живлення електростанція 8АБТ-400, обслуговуючий персонал 4 людини.

Установка контролює міцність зі швидкістю 5-8 км / год з точністю 5-7 %, яка може бути визнана досить високою , так як коливання фактичних значень міцності в силу неоднорідності конструкції значно більше вказаних величин. Установка дозволяє робити оцінку міцності через кожні 1,75-3,350 м на всьому протязі випробувальної ділянки.

Подібний принцип роботи реалізований в курвіметрі СЕВТР (Франція). Вимірювання прогину дорожнього покриття за допомогою спеціальних рухомих прогиномірів та системи механічних тяг реалізовано в установках типу Лакруа, УНК КАДИ, дефлектографах GRASHOPPER [29] (рисунок 5), FLASH, А175 та ін.



**Рисунок 5 – Дефлектограф GRASHOPPER, Датський дорожній інститут, 1970 р.**

Більшість розрахункових методів, що використовуються в США і країнах Західної Європи, засновані на емпіричній залежності між несучою здатністю ґрунту земляного полотна (CBR), числом прикладення навантаження і еквівалентною товщиною дорожнього одягу [2]. Це методи: Лідл (Асфальтовий інститут США); Інженерного корпусу (США); Асфальтового інституту (США);



Центральної лабораторії шляхів сполучення (Франція); Нафтової компанії Шелл (США); дорожньо-дослідницької лабораторії (Великобританія) і ін. Характерним в цьому напрямку розвитку уявлень про розрахунок і конструювання дорожнього одягу є метод Шук і Фінн, заснований на аналізі експериментів AASHO.

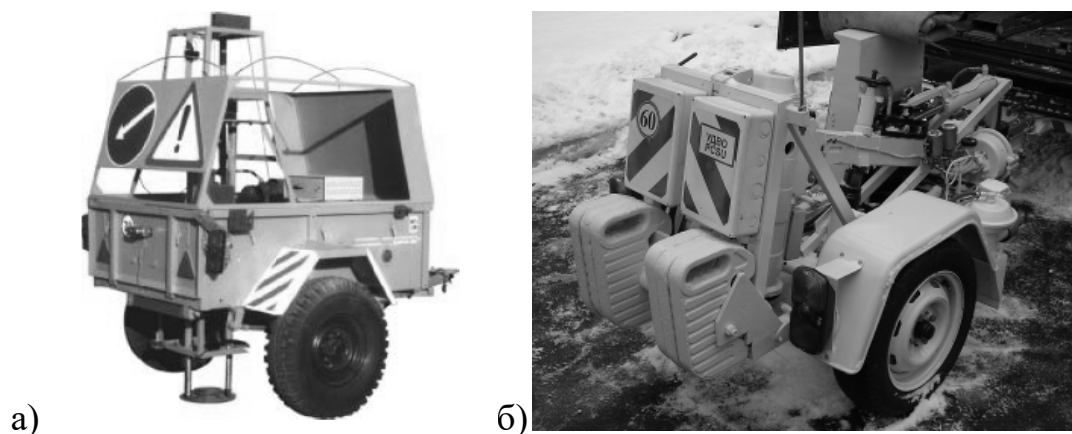
В цілому, всі статичні розрахункові схеми і методи оцінки придатні для встановлення несучої здатності дорожніх конструкцій з погляду їх можливості протистояти дії, що значно перевищує за часом реальну від автомобільного транспорту, що рухається, і що не викликає в їх структурі виникнення ефектів, обумовлених рухливістю навантаження. Приведення отриманих у такому разі показників статичної міцності за допомогою різних “ динамічних коефіцієнтів ” до прогнозованих об'єму і складу руху по автомобільній дорозі – це емпіричний перехід від представлень статичних рішень теорії пружності до вивчених в недостатньому ступені механізмів руйнування дорожніх конструкцій від динамічної дії. В реальних умовах, з погіршенням рівності покриття, динамічна дія автомобільного транспорту зростає. Це виражається, перш за все, в збільшенні енергії, що сприймається дорожньою конструкцією.

Для більш об'єктивної оцінки стану дорожнього одягу доцільно використовувати дію, аналогічну той, що виникає при русі автомобільного транспорту. З позиції адекватності тестового навантаження реальному навантаженню рухомого транспортного засобу методи, що використовують динамічне навантаження значно перевершують статичні. Аналіз напружено-деформованого стану конструкції під дією динамічного навантаження буде більш інформативним з позиції визначення здатності дорожньої конструкції сприймати динамічну дію автомобілів. На відміну від статичних підходів, динамічні моделі напружено-деформованого стану теоретично здатні врахувати ефекти, обумовлені рухливістю навантаження. Відсутність чіткої кореляційної залежності між модулями пружності отриманими шляхом статичних та динамічних випробувань обумовлена особливостями в прояві в'язких та

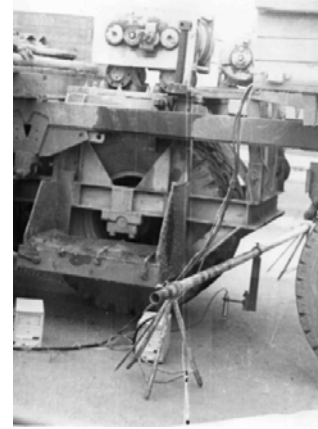


інерційних властивостей дорожньою конструкцією при дії статичного та динамічного навантаження [4].

Практичне використання при оцінці міцності дорожнього одягу в Україні знаходять різні конструкції установок динамічного навантаження. Найпоширенішими в нашій країні є установки типів УДН-Н, Діна-3М та УДВО-НТУ (рисунок 6) в розробці яких приймали участь такі вчені як В.К. Апестін, А.П. Васильєв, Ю.М. Яковлев, М.С. Коганзон, С.В. Коновалов, С.С. Коновалов, А.М. Стрижевський, Д.О. Павлюк та ін. Динамічне зусилля, що виникає при скиданні вантажу (до 60 кН) близьке по величині і тривалості дії (0,02-0,03 с) до навантаження від колеса розрахункового автомобіля групи А<sub>2</sub>, що рухається. Однією з перших установок динамічного навантаження в радянському союзі була створена установка динамічного навантаження ХАДІ (рисунок 6-8). На відміну від багатьох сучасних екземплярів в установці ХАДІ використовувалося навантаження покриття через реальний пневматик.



**Рисунок 6 – Установки динамічного навантаження «Діна – 3М» (а) та УДВО-НТУ (б)**

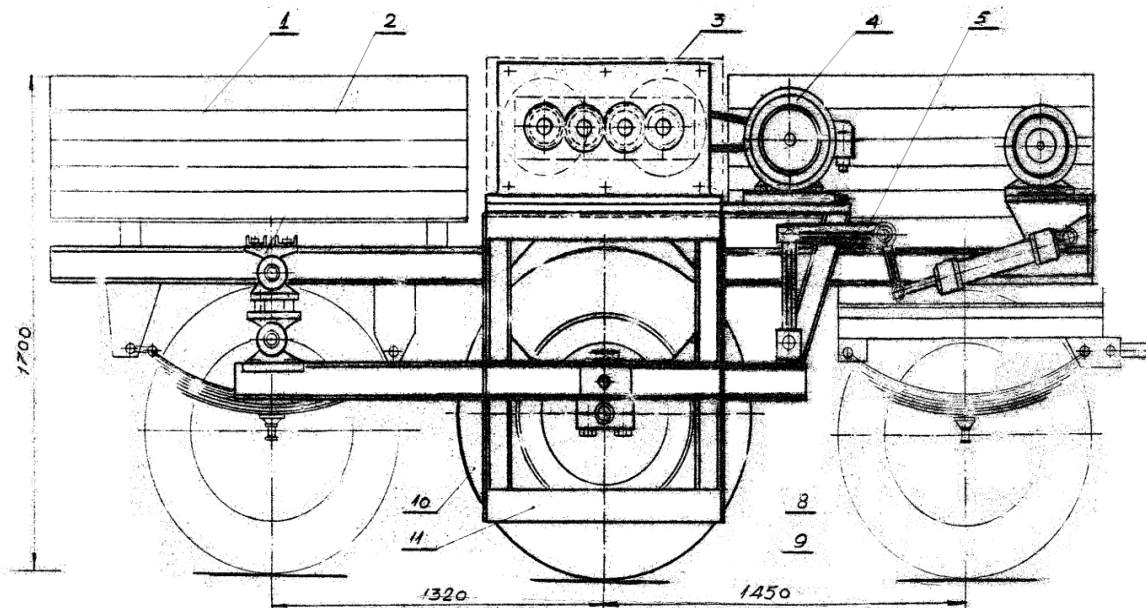


а)

б)

а) загальний вигляд; б) обладнання для реєстрації переміщення поверхні покриття

**Рисунок 7 – Установка динамічного навантаження ХАДІ**



1 – причеп автомобільний; 2 – балансирна підвіска; 3 – вібратор; 4 – двигун; 5 – механізм підйому; 6 – тахогенератор; 7 – гідростанція; 8 – рама силова 9 – датчик навантаження; 10 – колесо навантаження; 11 – грузи додаткові

**Рисунок 8 – Схема установки динамічного навантаження ХАДІ**

Дія, що генерується падаючим вантажем, більш точно відповідає реальним навантаженням при русі автомобільного транспорту, але прийнятий підхід до обробки результатів не повною мірою використовує інформативні переваги динамічного напружено-деформованого стану, що досліджується в ході





випробувань. Прогин поверхні покриття під металевим штампом установок ударного типу не повною мірою відображає здатність конструкції чинити опір вертикальним короткочасним діям, оскільки в даному випадку ігнорується радіус і розміри чаші прогину, що визначає її загальну згинальну жорсткість. Крім того, як показує детальний аналіз напружень в елементах дорожньої конструкції, існують відмінності в напружено-деформованому стані дорожньої конструкції під дією ударного навантаження та рухомого транспортного засобу.

Використання методів визначення величини пружного прогину під дією як статичного так і динамічного навантаження дозволяє з певною точністю визначити загальний модуль пружності дорожньої конструкції. Щодо визначення характеристик несучої здатності окремих шарів покриття, використання зазначених методів суттєво обмежене. Це обмеження полягає в першу чергу у неможливості виділення впливу властивостей окремих шарів на загальний модуль пружності. Таким чином застосування методів, що засновані на визначенні величини прогину конструкції дорожнього одягу, для контролю якості влаштування окремих асфальтобетонних шарів одягу є не ефективним.

Використання методів визначення величини пружного прогину під дією як статичного так і динамічного навантаження дозволяє з певною точністю визначити загальний модуль пружності дорожньої конструкції. Щодо визначення характеристик несучої здатності окремих шарів покриття, використання зазначених методів суттєво обмежене. Це обмеження полягає в першу чергу у неможливості виділення впливу властивостей окремих шарів на загальний модуль пружності. Таким чином застосування методів, що засновані на визначенні величини прогину конструкції дорожнього одягу, для контролю якості влаштування окремих асфальтобетонних шарів одягу є не ефективним.

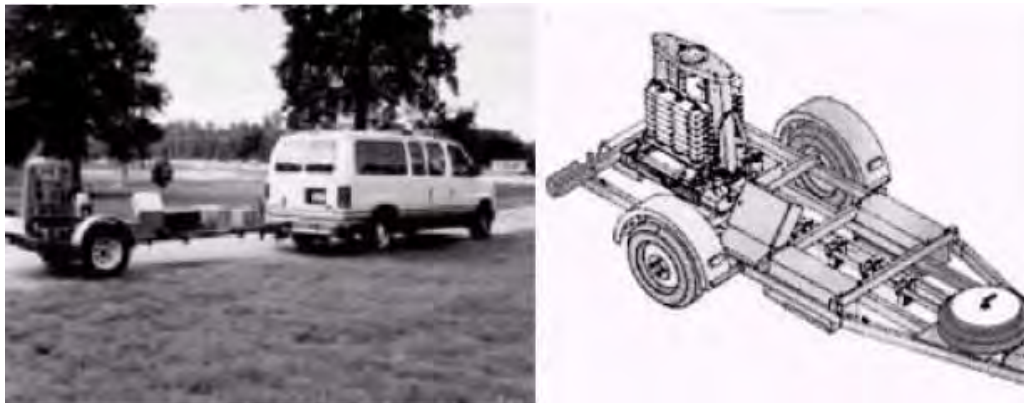
В міжнародній класифікації серед установок, що використовують динамічну дію в якості тестового навантаження розділяють дефлектометри падаючого вантажу (FWD) і колеса, що рухається (RWD, HSD, TSD та інш.).

В міжнародній класифікації серед установок, що використовують динамічну дію в якості тестового навантаження розділяють дефлектометри



падаючого вантажу (FWD) і колеса, що рухається (RWD). Дані методи і технічні засоби отримали широке розповсюдження в Голландії, Фінляндії, Данії, Швеції, Франції, США і інших країнах [1, 2].

Наприклад, дефлектомір DYNATEST 8000 FWD (виробництво Данія) забезпечує до 60 вимірювань в годину і має широкий діапазон навантажень (від 7 до 120 кН). Установка являє собою одновісний причеп, на якому змонтований механізм ударних навантажень і до дев'яти інерційних датчиків з перетворенням лінійних переміщень в електричний сигнал (рисунок 9). Використання аналітико-емпіричної методики визначення міцності, втіленої в програмному забезпеченні, дозволяє діагностувати міцність дорожніх конструкцій на основі параметрів чаші прогину.



**Рисунок 9 – Дефлектомір DYNATEST 8000 FWD**

Серед інших закордонних установок, що використовують падаючий вантаж, можна відмітити DYNAPLAQUE 2, PRI 2100 FWD та ін.

Обробка результатів експериментальних досліджень при дії падаючим вантажем в закордонних методах оцінки міцності зводиться до рішення “зворотної задачі” теорії пружно-пластичної деформації.

Ефективність методу аналізу міцності дорожньої конструкції за даними аналізу її згинальної жорсткості під дією тестового навантаження підтверджена багаторічним світовим досвідом. Для практичної реалізації методу використовуються автоматизовані та напівавтоматизовані вимірювальні комплекси змонтовані на одно або двовісних візках, що транспортуються до місця випробування за допомогою транспортних засобів, або безпосередньо



змонтовані в транспортному засобі. Серед найбільш відомих світових виробників таких комплексів слід відмітити компанії JILS (рисунки 10, 11), Grontmij (в минулому CarlBro) (рисунок 12), ERES International (рисунок 13), Dynatest (рисунки 14, 15) [8].



**Рисунок 10 – Установка фірми JILS – JILS-20 FWD**

*Джерело: [8]*



**Рисунок 11 – Установка на базовому автомобілі фірми  
JILS – JILS-20T-FWD**

*Джерело: [8]*



**Рисунок 12 – Установка фирмы Grontmij – PRIma-X FWD trailer**

*Джерело: [8]*



**Рисунок 13 – Установка фирмы ERES International – ERI KUAB FWD**

*Джерело: [8]*



**Рисунок 14 – Установка фирмы Dynatest – Dynatest Model 8082  
Heavy Weight Deflectometer**

*Джерело: [8]*





**Рисунок 15 – Установка на базовом автомобиле фирмы Dynatest  
Dynatest 8000 TMD (Truck Mounted Deflectometer)**

*Джерело: [8]*

Загальна концепція методу полягає в вимірюванні часті прогину поверхні дорожнього одягу, що утворюється під дією короткочасного (імпульсного) навантаження. Імпульсне навантаження, як правило, утворюється за допомогою скидання вантажу на амортизуючу пружину. Величина навантаження регулюється за рахунок зміни висоти скидання. Використання амортизуючих пристроїв дозволяє підібрати час дії навантаження та форму часової залежності імпульсу подібні до навантаження від рухомого транспортного засобу. Фактичні значення параметрів навантаження, що передається на покриття, реєструються безпосередньо після кожного імпульсу.

На основі світового досвіду та багаторічних досліджень кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ХНАДУ виконано обґрунтування загальної конструкції та комплектації експериментального зразка устаткування з визначення і оцінки жорсткості дорожніх конструкцій.

Прийнято рішення реалізувати устаткування у вигляді причіпного обладнання, що транспортується звичайним легковим автомобілем. На відміну від варіантів самохідних комплексів, змонтованих на базі легкових автомобілів, варіант причіпного комплексу має низку переваг, а саме: меншу вартість за



рахунок можливості використання звичайного автомобіля в якості тягача, спрощення конструкції, пов'язане з відсутністю необхідності переобладнання базового автомобіля та ін.

Згідно з діючими нормативними документами в якості розрахункового навантаження для вимірювання міцності дорожніх одягів прийнято навантаження групи  $A_2$ . В якості тестового навантаження в устаткуванні необхідно використати пристрій, що дозволить забезпечити необхідні характеристики навантаження, а саме: час дії, максимальну амплітуду, форму зміни навантаження протягом часу дії.

Для забезпечення максимальної подібності тестового навантаження до навантаження розрахункового автомобіля прийнято наступні характеристики: час дії навантаження 0,02 с, максимальна амплітуда 50 кН, форма часової залежності – половина періоду синусоїди.

Тестове навантаження доцільно створювати за допомогою скидання вантажу. З використанням такої схеми величину навантаження можна регулювати в достатньо широких межах за рахунок зміни висоти скидання. Для забезпечення необхідних характеристик часу дії навантаження та форми його часової залежності доцільно використати таровану амортизуючу металеву пружину.

Для забезпечення необхідної точності вимірювань та сталого навантаження фактичні значення характеристик навантаження, що передається на покриття, необхідно реєструвати безпосередньо після кожного імпульсу за допомогою датчику навантаження.

Для мінімізації пластичних деформацій матеріалу покриття в зоні дії та максимальної подібності тестового навантаження до навантаження від розрахункового автомобіля передачу навантаження на покриття необхідно виконувати за допомогою спеціального штампу – індентору. Форму індентору прийнято круглу. Для рівномірного розподілення навантаження за площею контакту прийняте рішення реалізувати індентор у вигляді сегментованої



пластини. Діаметр індентору 300 мм, що відповідає прийнятому розрахунковому навантаженню.

Реєстрацію чаші прогину, що утворюється під дією тестового навантаження, вирішено виконувати за допомогою контактних датчиків, що встановлюються безпосередньо на покриття. В якості датчиків доцільно використати сейсмометри, що забезпечують достатню точність реєстрації переміщення в інформативному частотному діапазоні.

Датчики раціонально встановити в лінію вздовж смуги руху. Кількість датчиків – вісім, що цілком задовольняє необхідній точності вимірювання геометрії чаші прогину. Схема встановлення датчиків передбачає наступні відстані від центру прикладання навантаження: 0 мм, 200 мм, 300 мм, 400 мм, 600 мм, 900 мм, 1300 мм, 1800 мм. Відстані між датчиками обрано на основі аналізу типових форм чаш прогину, отриманих закордонними дослідниками та в результаті власних багаторічних досліджень розробника. Перший датчик розташовується в центрі прикладання навантаження та призначений для реєстрації максимального значення прогину. Відстань до другого датчика обумовлена діаметром індентору та його великою згинальною жорсткістю, що робить вимірювання на меншій відстані не доцільними. Подальше збільшення відстані між наступними датчиками пов'язане з поступовим затуханням деформації та зменшенням значень першої похідної функції прогину поверхні з віддаленням від центру прикладання навантаження. Максимальна відстані до восьмого датчика має забезпечити перекриття переважної більшості радіусів динамічних чаш прогину.

Для функціонування устаткування необхідно розробити та створити систему просторового позиціонування елементів реєстраційного обладнання. Система має виконувати дві основні функції: забезпечення надійного притискання датчиків до поверхні покриття дорожнього одягу протягом процесу реєстрації параметрів деформації та забезпечення переведення компонентів комплексу в транспортне та робоче положення.



Для реєстрації та можливості подальшого врахування при розрахунках устаткування буде обладнане безконтактним датчиком температури покриття.

Для полегшення позиціонування устаткування на точці вимірювання передбачається установка відеокамери.

Додатково, для формування звіту по результатам вимірювань, устаткування буде обладнане системою глобального супутникового позиціонування.

Реєстрація та попередня обробка результатів вимірювання буде виконуватись за допомогою спеціалізованого електронного блоку.

Для живлення електричних та електронних компонентів передбачається обладнання устаткування системою живлення.

Запис та подальша обробка отриманої інформації буде виконуватись за допомогою спеціалізованого промислового комп'ютера та панелі оператора, що будуть змонтовані в базовому автомобілі.

Конструктивно, устаткування виготовлено у вигляді двовісного причепа, що транспортується до місця виконання робіт звичайним легковим автомобілем або мікроавтобусом (рисунок 16).



**Рисунок 16 – Устаткування УДН-ХНАДУ для оцінки міцності дорожньої конструкції за методом FWD**



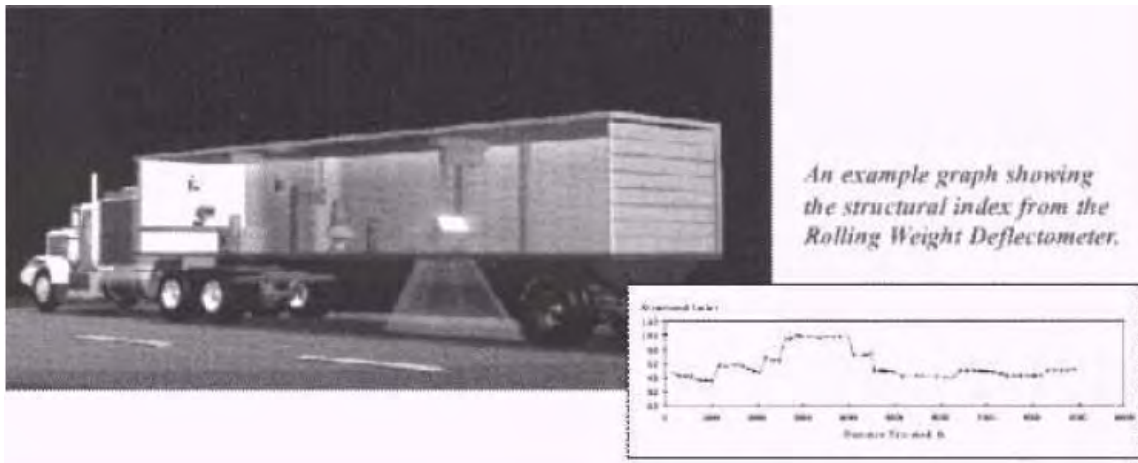


Параметри чаші прогину визначаються шляхом порівняння профілів поверхні покриття до навантаження заднім колесом напівпричепа і в місці дії. Вимірювання забезпечується оптичними вузлами сканерів, що здійснюють амплітудну модуляцію лазерного випромінювання з вимірюванням зсуву фази відображеного від поверхні покриття сигналу. Програмне забезпечення комплексу дозволяє розрахувати на основі даних про шари дорожнього одягу очікувані деформації і ітеративним способом досягти узгодження передбачених і замірених даних.

Дефлектометри колеса, що рухається (RWD), дозволяють виконувати вимірювання зі звичайною для автомобільних доріг швидкістю руху ходової лабораторії. Як правило, подібні установки являють собою довгобазовий (до 14 м) навантажений напівпричіп з вимірювальним обладнанням, що включає контрольний і вимірювальний лазерні сканери, джерело живлення і потужний блок для цифрової обробки інформації (рисунок 17). Параметри чаші прогину визначаються шляхом порівняння профілів поверхні дорожньої конструкції до навантаження заднім колесом напівпричепа і після дії тестового навантаження. Вимірювання забезпечується оптичними вузлами сканерів, що здійснюють амплітудну модуляцію лазерного випромінювання з вимірюванням зсуву фази відображеного від поверхні покриття сигналу. Програмне забезпечення комплексу дозволяє розрахувати на основі існуючих даних про шари дорожнього одягу очікувані деформації і ітеративним способом досягти узгодження передбачених та фактично вимірених даних.

Установки RWD надзвичайно складні у виготовленні і юстируванні лазерних сканерів, мають підвищене енергоспоживання і високу вартість.

Інший підхід до вимірювання чаші прогину, розроблений фахівцями Данії (фірма Greenwood Engineering A/S), втілений у високошвидкісній установці вимірювання прогину дорожнього одягу (HSD) (рисунок 18). На відміну від установок з падаючим вантажем, установка вимірює не вертикальні переміщення точок поверхні покриття, а швидкість її деформації за допомогою лазерних доплеровських датчиків з подальшим інтегруванням.



**Рисунок 17 – Установа RWD**



**Рисунок 18 – Високошвидкісна установка вимірювання прогину (HSD)**

Змінне навантаження створюється переміщенням вантажу уздовж платформи від кабіни до заднього моста автомобіля. Швидкість руху установки при вимірюваннях складає до 70 км/год. Серед недоліків установки можна відзначити складність калібрування вимірника, оскільки необхідно врахувати вплив стиснення шин і ресор, та ще більшу вартість.

Перераховані засоби оцінки міцності дорожніх конструкцій безумовно перевершують статичні способи, як в точності отримуваних результатів, так і в мобільності проведення експериментів. Але найголовнішою перевагою на пряму динамічних методів є подібність (в методі HSD навіть адекватність)



навантажень, що утворюються при дослідженнях, навантаженням від дії автомобільного транспорту.

Широкий досвід використання динамічного аналізу в ході випробувань дорожнього одягу доводить перспективність розвитку цього напрямку в області оцінки міцності. Найбільш інформативним є аналіз динамічного напружено-деформованого стану дорожніх конструкцій.

На відміну від найбільш прогресивних методів, що використовують динамічне навантаження, статичним методам конструювання і оцінки міцності дорожніх конструкцій властиві наступні недоліки:

- ігнорування динамічних процесів, що мають місце в дорожніх конструкціях при реальному русі автомобільного транспорту і заміна теоретичних обґрунтувань впливу динамічності навантаження емпіричною залежністю, що отримана за певних умов та має обмежену область використання;

- статичні способи дозволяють діагностувати здатність дорожніх конструкцій сприймати дії, що значно перевищують по тривалості навантаження від автомобільного транспорту і є неінформативними в оцінці міри розвитку втомних процесів в матеріалах конструктивних шарів дорожнього одягу;

- вимірювання виконується в тестових точках (властиве також більшості динамічних методів);

- невисока продуктивність та значна трудомісткість випробувань;

Серед загальних недоліків методів заснованих на визначені величини пружного прогину можна відмітити наступне:

- не дозволяють визначити міцностні властивості та товщину окремих шарів конструкції дорожнього одягу;

- отримане значення загального модуля пружності являє собою усереднену характеристику конструкції в межах чаші прогину, що не дозволяє контролювати однорідність міцностних характеристик та товщини по площі.

Перед появою видимих руйнувань дорожнього покриття в структурі дорожнього одягу або земляного полотна протікають приховані процеси (утворення пустот, замулювання дренажних шарів, перезволоження ґрунту



земляного полотна, інфільтрація ґрунтових вод та ін.), своєчасне виявлення яких дозволило б вчасно вживати відповідних заходів. Стан дорожнього одягу можна оцінити по кернях, отриманих в результаті його буріння керно-отбірником, або за результатами випробувань приладами динамічного і статичного навантаження. Вказаними методами виконується оцінка стану дорожньої конструкції в тестових точках, що не дозволяє отримувати безперервну інформацію про товщину і стан конструктивних шарів дорожнього одягу і ґрунтів земляного полотна.

Робота приладу радіолокації підповерхневого зондування (в загальноприйнятій термінології – георадара) базується на використанні класичних принципів радіолокації. Георадар – пристрій, призначений для отримання трансформованого розрізу середовища, що досліджується. Передаючою антеною приладу випромінюються надкороткі електромагнітні імпульси (одиниці і доли наносекунди), що мають 1,0-1,5 періоди квазігармонійного сигналу і достатньо широкий спектр випромінювання.

Випромінюваний в досліджуване середовище імпульс відображається від предметів або неоднорідностей середовища, що знаходяться в ньому та мають відмінну від середовища діелектричну проникність або провідність, приймається приймальною антеною, посилюється в широкосмуговому підсилювачі, перетворюється в цифровий вигляд за допомогою аналого-цифрового перетворювача і запам'ятовується для подальшої обробки. Після обробки отримана інформація відображається на індикаторі (рисунок 19).

В транспортному будівництві (автомобільні і залізничні дороги, аеродроми) георадари використовуються для визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу і якості ущільнення дорожньо-будівельних матеріалів, вишукування кар'єрів дорожньо-будівельних матеріалів, оцінки основ під транспортні споруди, визначення глибини промерзання в ґрунтових масивах і дорожніх конструкціях, вмісту вологи в ґрунті земляного полотна і підстиляючих ґрунтових основах, ерозії ґрунтів на ділянках мостових переходів.





a)



б)

**Рисунок 19 – Георадар "ОКО-М1" з екранованими антенними блоками АБ-250 і АБ-400 (а) та RADAR Systems Inc. (б)**

Гамаденсиметр – це прилад призначений для вимірювання щільності і вологості ґрунту і будівельних матеріалів на глибині. У прилад вбудовуються різні джерела радіоактивності (цезій 137 (Cs 137), америцій 241-берилій (Am 241-Be) ).

Мобільний гамаденсиметр 174С (рисунок 20) розроблений для безперервного вимірювання щільності асфальтобетону. Він добре підходить для визначення товщини і щільності дорожнього одягу. Прилад використовує власне джерело радіовипромінювання.



**Рисунок 20 – Гамаденсиметр 174С**

Пристрій управляється дистанційно через інфрачервоний канал зв'язку. Таким же чином передаються дані, отримані в результаті вимірювань.

Разом з явними перевагами, що надають наведені технології, які полягають в першу чергу в значній інформативності методів, є також низка істотних недоліків, серед яких ключову позицію займає наступний: георадар та гамаденсиметр не ініціюють в дорожній конструкції динамічні процеси, що виникають в ній під дією рухомого навантаження. Таким чином, на підставі таких досліджень складно прогнозувати поведінку конструкції в експлуатаційних умовах, аналізувати напружено-деформований стан як конструкції так і окремих її елементів під дією динамічного навантаження з метою визначення її несучої здатності та довговічності. Крім того незначні відмінності в діелектричній проникності та електропровідності матеріалів шарів асфальтобетонної основи та покриття не дозволяють розрізнити окремі шари при аналізі отриманих даних.

Для визначення щільності асфальтобетону в польових умовах використовують щільно міри різних конструкцій.



Принцип роботи електромагнітних щільномірів асфальтобетону полягає у визначенні параметрів розповсюдження електромагнітного поля в середовищі асфальтобетону (рисунок 21).



а)



б)

а) PQI-301; б) ПАБ-1.0

**Рисунок 21 – Електромагнітні щільноміри асфальтобетону**

Технологія вимірювання базується на використанні низькочастотних електромагнітних полів чутливих до електричних характеристик матеріалу. Підхід до вимірювання засновано на створенні тороїдального електрочуттєвого поля в матеріалі, що досліджується, контактною пластиною, яка встановлюється безпосередньо на поверхню матеріалу. Загальна щільність та коефіцієнт ущільнення вимірюється по реакції електрочуттєвого поля на зміни в електричному імпедансі матриці матеріалу, що в свою чергу є функцією опору і діелектричної проникності матеріалу.

Оскільки елементи матриці матеріалу мають відмінні показники опору та діелектричних властивостей, прилад спочатку калібрується на матеріал, що контролюється. Серед переваг таких приладів слід відмітити те, що для роботи з ними не потрібен спеціальний контроль безпеки життєдіяльності та атестація персоналу як для радіоізотопних методів. Для контролю якості ущільнення



дрібнозернистих та піщаних асфальтобетонів також застосовуються пенетрометри різних конструкцій (рисунок 22).



а)



б)

а) ПАБ-3М; б) ПАБ-2М

**Рисунок 22 – Пенетрометри асфальтобетонні**

Роботу пенетрометрів засновано на визначенні параметрів проникнення робочого органу під дією навантаження від падаючого вантажу. Як і електромагнітні щільноміри, динамічні пенетрометри потребують попереднього калібрування для конкретного асфальтобетону.

Необхідність попереднього калібрування щільномірів значно ускладнює використання таких приладів при визначенні середньої щільності влаштованих асфальтобетонних шарів. Без попереднього відбору проб асфальтобетонної суміші та достатньо тривалого випробування калібрувальних зразків використання щільномірів можливе лише для порівняльного аналізу та виявлення місць відносного не доущільнення з подальшою обов'язковою їх перевіркою з використанням руйнівних методів.

Враховуючи характер дії транспортного засобу, що рухається, на дорожню конструкцію раціональним є представлення виникаючих в конструкції процесів



у вигляді сукупності коливань в її елементах. Характер розповсюдження коливань від дії динамічного навантаження в конструкції залежить від характеристик елементів конструкції і є відображенням їх фактичного стану. Шляхом реєстрації і подальшого аналізу параметрів хвильових процесів, що виникають в дорожній конструкції, представляється можливим виконати аналіз властивостей реології елементів конструкції, параметрів, що характеризують їх фактичний стан і здатність чинити опір дії навантажень від рухомого складу без руйнувань і деформацій під впливом кліматичних чинників.

За законом Гуку, при дії зовнішньої збуджуючої сили, що має форму імпульсу, в деякій невеликій області поверхні дорожньої конструкції, в цій області утворюються також змінні в часі деформації, з якими пов'язане переміщення часток. Переміщення часток викликає зміну напружень в області простору, що оточує початкову область збудження. Під дією змінних напружень в середовищі виникають деформації, що змінюються в часі. Від області збудження в усіх напрямках поступово розповсюджується зміна початкового стану деформацій та напружень у вигляді імпульсу. Через конструкцію проходить так звана пружна хвиля.

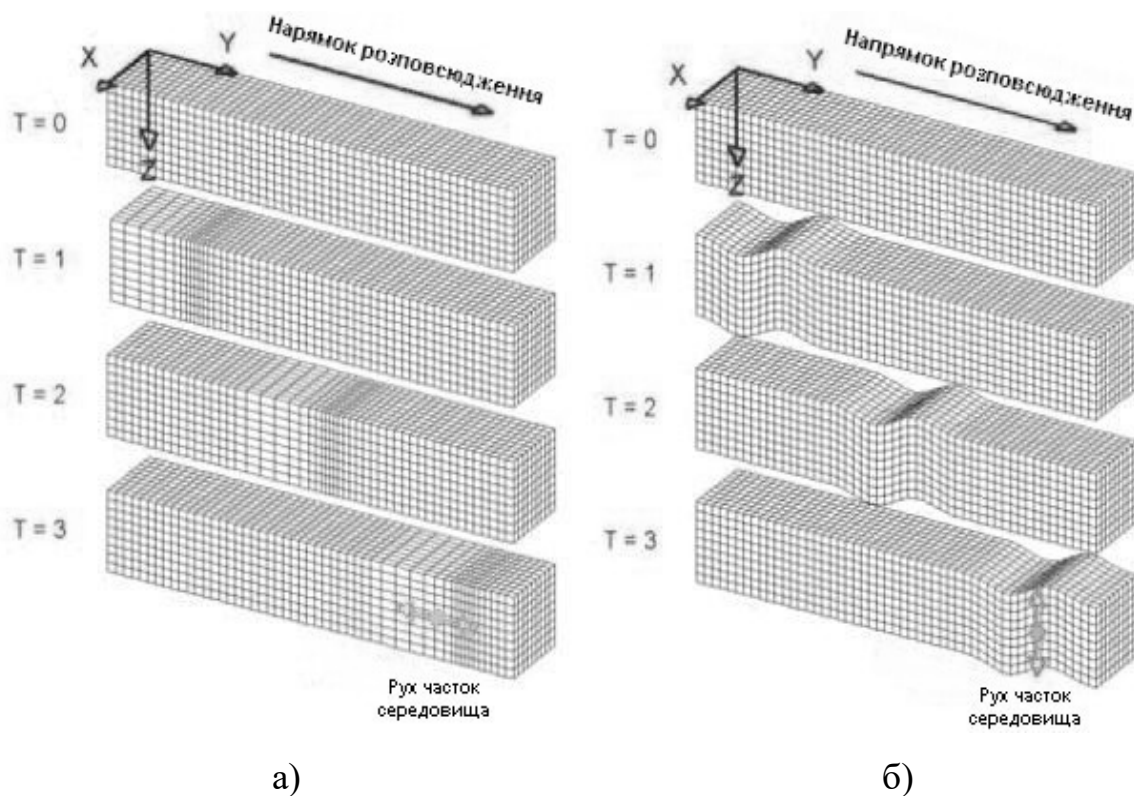
Перша форма розповсюдження пружної хвилі характеризується коливанням часток середовища в напрямку, що співпадає з напрямком розповсюдження хвилі та має назву Р-хвиль або первинних хвиль, тому що вони мають найбільшу швидкість розповсюдження серед усіх форм пружної хвилі [9-11, 13, 14]. Первинні хвилі також називають повздовжніми хвилями стиску, тому що їх розповсюдження супроводжується з періодичним стиском та розтягом матеріалу середі розповсюдження (рисунок 23а).

Друга форма розповсюдження пружної хвилі характеризується рухом часток в напрямку, перпендикулярному напрямку розповсюдження хвилі. Швидкість розповсюдження таких хвиль менша за швидкість хвиль стиску, тому їх прийнято називати вторинними хвилями або S-хвилями [9-11, 13, 14]. Розповсюдження таких хвиль не супроводжується зміною об'єму матеріалу.





Напрямок руху часток призводить до їх відносного зсуву, тому такий тип хвиль також прийнято називати поперечними хвилями зсуву (рисунок 23б).

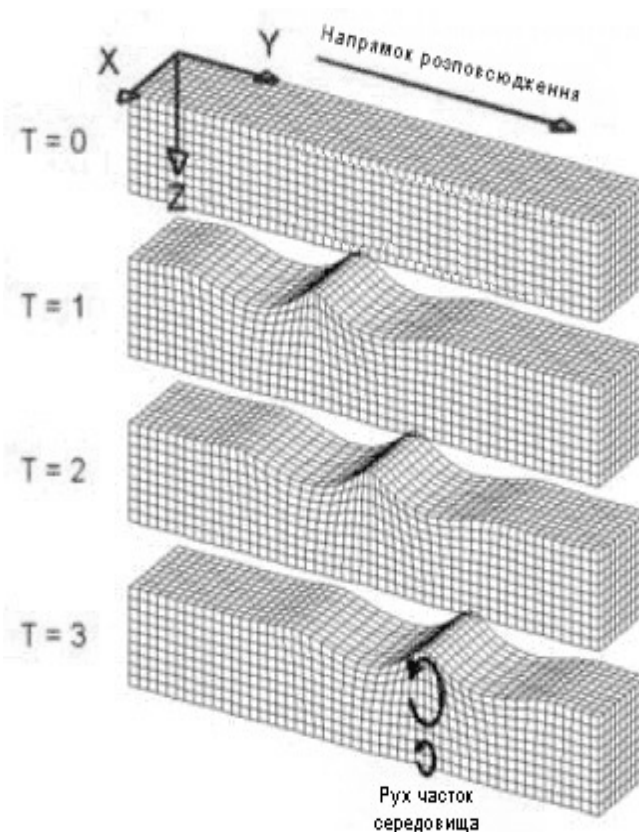


**Рисунок 23 – Повздовжня хвиля стиску (а), поперечна хвиля зсуву (б)**

Ще у XVIII сторіччі сейсмологами було встановлено, що відомих на той час перших двох форм розповсюдження пружних хвиль (хвиль стиску та зсуву) не достатньо для інтерпретації записів коливань земної поверхні. При аналізі розповсюдження хвилі від землетрусу встановлено, що за першими двома хвилями, що відповідають хвилі стиску та зсуву, розповсюджується ще одна невідома на той час хвиля. Тільки в 1887 році наявність третьої форми розповсюдження пружної хвилі була математично обґрунтована лордом Релеєм [11]. Лорд Релей показав, що третя форма пружної хвилі розповсюджується вздовж поверхні землі. Така форма пружної хвилі отримала назву поверхневої хвилі Релея. Математичне обґрунтування хвилі Релея за допомогою положень теорії пружності стало можливим при введенні лордом Релеєм поняття пружного напівпростору, що характеризується наявністю вільної поверхні. Так само як і



хвилі стиску та зсуву, поверхнева хвиля характеризується параметрами руху часток середовища та швидкістю розповсюдження хвилі. Швидкість розповсюдження поверхневої хвилі менша за швидкість розповсюдження перших двох форм. На відміну від хвиль стиску та зсуву поверхнева хвиля Релея розповсюджується тільки вздовж поверхні середовища, а рух часток характеризується більш складними залежностями. Рух елементарних часток середовища розповсюдження хвилі обмежується вертикальною площиною та складається з вертикального та горизонтального компонентів переміщення, що мають однакову швидкість розповсюдження та відносний зсув фази у  $90^\circ$  (рисунок 24).



**Рисунок 24 – Поверхнева хвиля Релея**

В сейсмології та геології використовуються методи аналізу сейсмічних поверхневих хвиль для отримання трансформованих розрізів поверхневого шару земної кори. Застосування методу дозволяє отримувати інформацію щодо



кордонів залягання пластів корисних копалин, положення тектонічних плит тощо.

Але суттєві відмінності значно ускладнюють використання достатньо напрацьовані та досліджені методи геолога та сейсмозвідки для потреб дорожнього господарства. Серед цих відмінностей можна відмітити наступні: значно відмінні масштаби середовищ, що досліджуються (глибина геологічних розрізів сягає сотень метрів, інформативна зона дорожньої конструкції обмежується кількома метрами); дорожня конструкція, на відміну від геологічного розрізу, має так звану «аномальну будову», тобто щільність шарів зменшується з глибиною, що значно ускладнює використання стандартних алгоритмів аналізу [3]. Таким чином використання цих методів для потреб дорожнього господарства потребує значної адаптації.

Концепція використання поверхневих хвиль для визначення властивостей підповерхневого середовища вперше сформульована в 1950-х роках у вигляді методу хвилі Релея [8]. Цей метод пропонувався для дослідження пружних властивостей дорожньої конструкції, але так і не отримав широкого застосування з причини суттєвої складності, значної тривалості випробувань та відсутності компактного обладнання для лінійних випробувань. В 1980-х роках метод отримав розвиток з урахуванням вдосконалення методів обробки сигналів та властивостей нестационарних впливів. Використання зазначених концепцій та сучасних досягнень в галузі електроніки дозволило використання методу для потреб дорожнього господарства. Метод аналізу поверхневих хвиль з використанням техніки обробки сигналів отримав назву методу спектрального аналізу поверхневих хвиль (Spectral Analysis Surface Waves або SASW).

Метод SASW базується на характері розподілення, або дисперсії, поверхневих хвиль в шаруватому середовищі [12]. Дисперсія хвилі Релея означає, що швидкість розповсюдження хвилі в шаруватому середовищі залежить від її частоти. Ця залежність може бути використана для визначення механічних властивостей серед розповсюдження хвилі. Графічне зображення



залежності швидкості хвилі Релея від частоти або довжини хвилі має назву дисперсійна крива.

Метод включає три етапи [2, 8]: проведення польових вимірювань, що дозволяють отримати записи поверхневих хвиль за допомогою спеціалізованого обладнання (рисунок 25) [3].

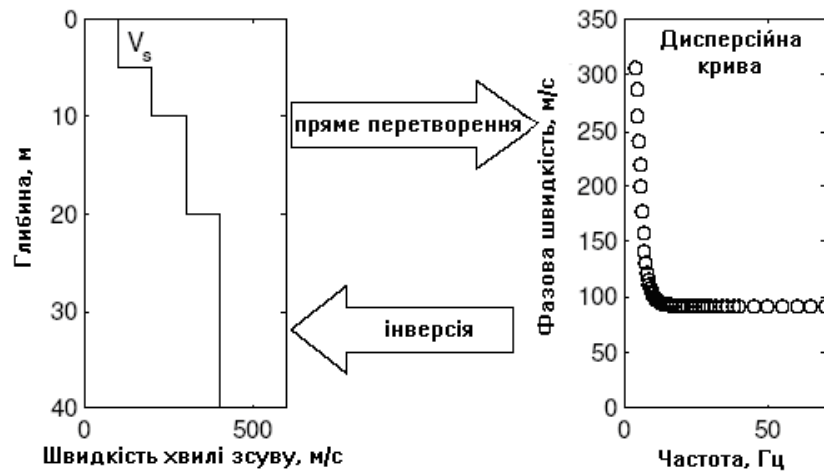


**Рисунок 25 – Комплекс обладнання, що використовується для реєстрації параметрів поверхневих хвиль**

Знаходження з отриманих записів дисперсійних кривих (залежності фазової або групової швидкості від частоти); визначення розподілів швидкостей поперечних хвиль в середовищі, що мають дисперсійні криві, близькі до отриманих з вимірювань (відновлення розрізу) (рисунок 26).

До теперішнього часу було розроблено досить багато модифікацій методу SASW, що розрізняються типом хвиль, що досліджуються (основна гармоніка хвиль Релея, вищі гармоніки), режимом проведення спостережень (активний, пасивний) і частотним діапазоном вимірювань [3, 8].

Метод спектрального аналізу поверхневих хвиль (SASW) є неруйнівним методом визначення профілю хвилі зсуву ( $V_s$ ). Існує ряд методологічних проблем пов'язаних з рішенням задачі відновлення профілю швидкості хвилі зсуву (інверсії даних SASW).



**Рисунок 26 – Відновлення розрізу швидкостей поперечних хвиль за даними дисперсійної кривої**

Для зниження впливу суб'єктивного чинника необхідно окрім конкретних значень  $V_s$  визначати діапазон можливих відхилень. Для вирішення поставленої задачі можливе використання методу Монте-Карло і статистичного методу максимальної правдоподібності [3].

Конструкція дорожнього одягу являє собою шарувате середовище з відмінними фізико-механічними властивостями окремих шарів. Закономірність зміни властивостей середовища з глибиною прийнято називати розрізом. Таким чином розріз швидкості розповсюдження хвилі зсуву являє собою закономірність зміни значення швидкості хвилі зсуву по глибині конструкції. За відомим розрізом можливо визначити як модуль пружності окремих шарів, так і їх товщину. Вихідними даними для побудови розрізу швидкості розповсюдження хвилі зсуву є дисперсійна крива отримана експериментальним шляхом.

Процес відтворення розрізу швидкості розповсюдження хвилі зсуву за даними експериментальної дисперсійної кривої прийнято називати інверсією. Фактично для виконання процедури інверсії використовуються залежності між довжиною хвилі Релея і глибиною її локалізації, та між швидкостями розповсюдження хвилі Релея і поперечної хвилі зсуву.





Існує декілька методів виконання інверсії, що базуються на побудові теоретичної дисперсійної кривої. За загальними закономірностями їх можна поєднати в групи процедур локального та глобального пошуку.

Процедура локального пошуку базується на послідовному наближенні теоретичного значення до експериментального. Багато методів реалізують описану процедуру. Вони відрізняються способами побудови теоретичної дисперсійної кривої, порівняння її з експериментальною і методами оновлення початкового профілю. Найважливішою характеристикою процедур локального пошуку є початкова інформація, що необхідна для виконання інверсії.

Процедура глобального пошуку – це процес, який направлений на визначення області можливих рішень і пошук глобального мінімуму для подальшого моделювання. Основна відмінність процедур глобального пошуку полягає в методі вибору значення параметра для подальшої ітерації. В інверсійному методі використовується випадковий або псевдовипадковий генератор, що називається методом Монте-Карло.

Необхідність використання теоретичної дисперсійної кривої виникає в першу чергу при аналізі багат шарових конструкції. Швидкість розповсюдження окремої гармоніки хвилі зсуву фактично відображає середньозважені характеристики середовища кінцевої глибини, тому при необхідності аналізу властивостей глибинних шарів значення швидкості розповсюдження хвилі зсуву може бути спотворене внаслідок дії властивостей поверхневих шарів. Аналіз властивостей тільки поверхневого шару дозволяє значно спростити процедуру відновлення профілю швидкості хвилі зсуву без зменшення точності аналізу.

Фактично, відновлення профілю швидкості хвилі зсуву для вирішення поставленої задачі полягає у зіставленні швидкості розповсюдження хвилі зсуву з ефективною глибиною дії, що дорівнює від половини до однієї треті довжини хвилі. Це припущення виникає з аналізу залежності відносної амплітуди хвилі Релея від глибини її локалізації. Аналізуючи дану залежність можна стверджувати, що хвиля Релея переважно розповсюджується в середовищі до



глибини, що дорівнює довжині хвилі. При проходженні скрізь середовище хвиля Релея відображає середньозважені властивості матеріалу середовища, таким чином при встановленні ефективної глибини обрана середньозважена глибина проникнення.

Після побудови профілю швидкості хвилі зсуву, товщина шарів визначається шляхом відокремлення ділянок профілю з постійним значенням швидкості. Всі чисельні операції мають супроводжуватись обчисленням точності для встановлення діапазону відхилень при визначенні модуля пружності та товщини асфальтобетонних шарів.

На основі виконаного аналізу та з урахуванням світового досвіду в якості ефективного напрямку вдосконалення методів оцінки міцності обрано методи з реєстрацією параметрів чаші прогину, що виникає під дією тестового навантаження; Проаналізовано комплекс показників, що використовується для оцінки параметрів чаші прогину. Обрано найбільш інформативні показники, такі як:

- величина максимального прогину;
- радіус кривизни центральної зони чаші прогину;
- індекс шару покриття;
- індекс шару основи;
- індекс робочого шару.

З урахуванням інформативності показників, що досліджуються, визначення параметрів чаші прогину є перспективним напрямком вдосконалення методів оцінки міцності дорожніх конструкцій.

Також метод спектрального аналізу хвильових полів представляється перспективним методом неруйнівної діагностики зважаючи на достатню інформативність параметрів дорожньої конструкції, що досліджуються.