

**Пиріг Я. І.**

**НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ВЛАСТИВОСТІ БІТУМНИХ  
В'ЯЖУЧИХ ТА АСФАЛЬТОБЕТОНІВ: МЕТОДИ  
ВИЗНАЧЕННЯ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ**

*Монографія*



**Міністерство освіти і науки України**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-  
ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Пиріг Я. І.**

**НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ВЛАСТИВОСТІ БІТУМНИХ  
В'ЯЖУЧИХ ТА АСФАЛЬТОБЕТОНІВ: МЕТОДИ  
ВИЗНАЧЕННЯ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ**

**Монографія**

**Харків  
2023**

УДК 665.775 + 691.168 + 539.563

П 33

Затверджено до видання Вченою радою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (дозвіл № 58/23/6.12 від 7.11.2023 р.)

Рецензенти:

*А.М.Онищенко*, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національного транспортного університету;

*Т. О. Костюк*, д-р техн. наук, проф., професор кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій Харківського національного університету міського господарства;

*С.О. Бугаєвський*, д-р техн. наук, професор кафедри мостів, конструкцій та будівельної механіки ім. В.О. Російського Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

П33 Пиріг Я. І. Низькотемпературні властивості бітумних в'язучих та асфальтобетонів: методи визначення та критерії оцінювання. Харків: ФОП Бровін О.В., 2023. 230 с.  
ISBN 978-617-8238-22-3

В роботі наведено огляд методів, що використовуються для оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів та асфальтобетонів. Для кожного з наведених методів представлені методики визначення температур розтріскування органічних в'язучих та асфальтобетонів, а також переваги та недоліки, притаманні тому чи іншому методу. Використовуючи наведені в роботі залежності між низькотемпературними характеристиками є можливість співставлення результатів, отриманих різними методами, та прогнозування поведінки бітумних в'язучих і асфальтобетонів в дорожньому покритті.

Монографія може бути корисною для наукових та інженерно-технічних працівників дорожньої галузі.

УДК 665.775 + 691.168 + 539.563

ISBN 978-617-8238-22-3

© Пиріг Я. І., 2023

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1 ІСТОРИЧНИЙ ОГЛЯД РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІТУМНИХ В'ЯЖУЧИХ</b> .....	7
1.1 Перші методи оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів.....	7
1.2 Визначення температури крихкості за методом Фраасу....	13
1.3 Сучасні методи оцінки низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих.....	32
1.3.1 Випробування бітумів за допомогою балочного реометру.....	32
1.3.2 Випробування бітумів методом випробування на прямий розтяг.....	47
1.3.3 Дослідження в'язучих за допомогою динамічного зсувного реометру.....	54
1.3.4 Випробування за допомогою пристрою для розтріскування бітумних в'язучих.....	63
1.3.5 Сучасні тенденції розвитку методів оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів .....	70
1.3.6 Вітчизняні методи визначення температури крихкості в'язучих.....	81
<b>РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОНІВ</b> .....	87
2.1 Методи визначення низькотемпературного розтріскування асфальтобетону, основані на положеннях механіки суцільних середовищ.....	90
2.1.1 Метод випробування на непрямий розтяг.....	91
2.1.2 Випробування асфальтобетонів за допомогою балоч- ного реометру.....	97
2.1.3 Випробування на граничне низькотемпературне напруження.....	101
2.1.4 Визначення низькотемпературних характеристик за допомогою аналізатору термічного розтріскування асфальтобетону.....	121

2.2 Методи визначення низькотемпературного розтріскування асфальтобетону, основані на положень механіки руйнування твердого тіла.....	124
2.2.1 Метод випробування балки з одностороннім надрізом.....	130
2.2.2 Метод випробування на напівкруглий згин.....	133
2.2.3 Метод випробування на розтяг на зразках-дисках.....	142
2.2.4 Випробування асфальтобетонів за методом Fenix.....	146
2.2.5 Випробування за методом Texas Overlay Test.....	151
2.2.6 Випробування методом Dog-Bone Direct Tension Test.	155
2.2.7 Випробування за допомогою приладу для розтріскування асфальтобетону.....	157
2.2.8 Тенденції в розробках сучасних методів оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, основаних на теорії руйнування твердих тіл .....	160
2.3 Випробування на основі акустичної емісії.....	168
2.4 Вітчизняні методи оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів.....	172
<b>3 РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ</b>	
<b>ТЕМПЕРАТУРИ КРИЖКОСТІ В'ЯЖУЧИХ.....</b>	<b>187</b>
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>205</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>206</b>

## ВСТУП

*Кращий спосіб ознайомитися з будь-яким предметом - написати книгу про нього.*

*Бенджамін Дізраелі*

Асфальтобетонне покриття автомобільних доріг впродовж всього часу експлуатації піддається впливу навантажень від руху автомобільного транспорту та впливу різноманітних погодно-кліматичних факторів – вологи, температури, повітря, сонячної радіації.

Суттєвого впливу на властивості асфальтобетонного покриття та його довговічність надає температура навколишнього середовища – занадто високі літні температури сприяють збільшенню пластичних деформацій на покритті, що призводить до колієутворення, а занадто низькі зимові температури сприяють тріщиноутворенню з подальшим руйнуванням покриття. Для запобігання цього вибір бітумного в'язучого під час проектування асфальтобетону повинен здійснюватися з врахуванням кліматичних умов експлуатації автомобільної дороги.

Починаючи з середини минулого століття у зв'язку з інтенсивним підвищенням інтенсивності дорожнього руху та збільшенням грузонапруженості головною проблемою в різних країнах світу стало підвищення зсувостійкості асфальтобетонних покриттів. Вирішення цієї проблеми здійснювалось двома шляхами: перший – розробка та впровадженням в дорожні галузі різних країн світу каркасних типів асфальтобетонних сумішей (середнещебєневих та щебєнево-мастикєвих); другий – підвищення в'язкєстє бітумних в'язучих, в тому числє й шляхом використання високов'язких бітумів, або розширення їх інтервалу пластичностє за рахунок направленою модифікування різноманітними добавками (полімери різних класів, структуруючи добавки, комплексні добавки, тощо). В той же час застосування заходів, направлєних на підвищення коліє- та зсувєстєжкєстє асфальтобетонних покриттів частково призвєло до загострення проблеми їх низькотемпературного розтріскування, оскільки асфальтобетони на високомодифікованих та твердих бітумних в'язучих є більш схильними до розтріскування за низьких зимових температур.

Початок систематичних досліджень питань низькотемпературного розтріскування асфальтобетонних покриттів відноситься до 60-х років минулого століття [1]. В США для вирішення проблеми коліє-,

зсуво- та тріщиностійкості асфальтобетонів в 90-х роках минулого століття була розроблена принципова нова система проектування асфальтобетонних покриттів – Superpave, в якій запропоновані нові підходи до підбору вихідних матеріалів та розроблені нові прилади для оцінювання і прогнозування властивостей асфальтобетонів, в тому числі й низькотемпературних.

Значного розвитку в останні роки отримала тенденція визначення та прогнозування зміни з часом експлуатації низькотемпературних властивостей асфальтобетонів шляхом випробування саме асфальтобетонних зразків, замість використання експериментально отриманих значень температури крихкості бітумних в'язучих. Для цього розроблюються нові методи випробування, орієнтовані на визначення фундаментальних показників якості асфальтобетонів (модулів пружності та релаксації, податливості при повзучості та інше) та нові моделі термічного розтріскування, основані на теорії руйнування твердих тіл.

Незважаючи на значні дослідницькі зусилля науковців різних країн світу та практичні випробування, проблема низькотемпературного розтріскування асфальтобетонних покриттів є й досі актуальною.

# **1 ІСТОРИЧНИЙ ОГЛЯД РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІТУМНИХ В'ЯЖУЧИХ**

Ранні методи оцінювання низькотемпературних властивостей органічних в'язучих були запропоновані на початку минулого століття. Через низьку точність та суб'єктивність отримуваних результатів вони не отримали широкого поширення при оцінюванні якості дорожніх бітумів. Підтвердженням цього є відсутність цих методів в перших технічних умовах на дорожні в'язкі бітуми, що були прийняті на початку минулого століття в різних країнах світу. Так, наприклад, в технічних умовах на дорожній бітум, прийняті в США в 1931 р. до номенклатури нормованих показників якості входили такі показники, як penetрація та розтяжність за 25 °С, температура розм'якшеності за методом «Кільця і Кулі», температура спалахнення у відкритому тиглі за методом Клівленда, зміна значень penetрації за 25 °С після старіння та розчинність в розчинниках [2]. Подібна номенклатура показників якості нафтових бітумів (температура розм'якшеності за Кремер-Сарновим, penetрація та розтяжність за 25 °С, розчинність в сірковуглецю, температура спалаху за методом Бренкену та зміна penetрації після старіння) була прийнята й в ранніх вітчизняних специфікаціях.

## **1.1 Перші методи оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів**

Найперший та найпростіший метод оцінювання низькотемпературних властивостей органічних в'язучих був органолептичним і полягав у визначенні відсутності сліду на поверхні охолодженого в'язучого після дряпання його нігтем [3]. Подібний принцип було використано й в перших лабораторних методах – двох методах І. Маркуссона [4] та Knife Test [3].

Перший метод І. Маркуссона полягав у тому, що колбу ртутного термометру занурювали в нагрітий до рідкого стану бітум та швидко виймали, в результаті чого на склі утворювався тонкий шар бітуму. Для визначення температури крихкості термометр охолоджували, спочатку на повітрі, а потім за допомогою води чи спирту, та поверхню бітуму дряпали кінчиком ножа або вдавлювали ніж в шар бітуму. За температуру крихкості приймали температуру, за якої на поверхні

шару бітуму не залишалось відмітин або шар бітуму легко відокремлювався від скла [4].

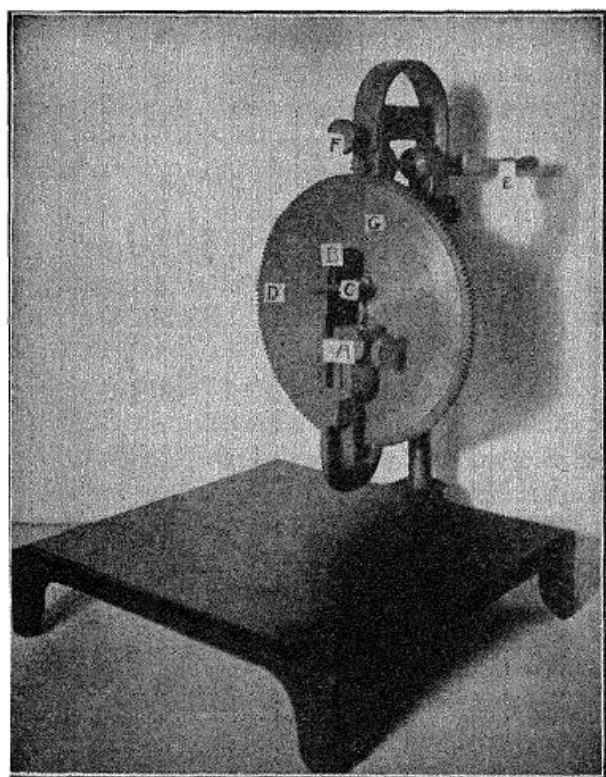
Згідно другого методу І. Маркуссона бітум розігрівали на мідній пластині, яку в свою чергу розташовували над водяною банею, до тих пір, поки бітум не розподілявся на поверхні пластини шаром товщиною близько 1 мм. Після охолодження в'язучого мідну пластину з шаром бітуму занурювали у теплу воду (температура води повинна бути вищою на 10 – 12 °С ніж передбачувана температура крихкості) налиту в фарфорову чашку. Визначення температури крихкості полягало в зниженні температури води зі швидкістю 1 °С (при випробуванні бітумів, що мали низьку температуру крихкості замість води використовувався насичений розчин кухонної солі) та спроби відгинання краю бітумного шару за допомогою плаского леза ножа. Температура за якої відбувалось втрата суцільності шару бітуму приймалась за температуру крихкості.

Подібним до методу І.Маркуссона був Knife Test [3]. У відповідності з цим методом на металеву пластину наносили бітум товщиною 1/16 дюйма ( $\approx 1,59$  мм). Після остигання до температури навколишнього середовища зразок з бітумом занурювали у воду чи в спеціальний водний розчин з температурою, що не менше ніж на 20 °F ( $\approx 7$  °С) була вищою, ніж передбачувана температура крихкості в'язучого. Після цього здійснювали поступове охолодження зразка з інтервалом в 5 °F ( $\approx 2,8$  °С) та термостатування за кожної температури впродовж 5 хв. Випробування полягало в тому, що після термостатування зразка між шаром бітуму та поверхнею металевої пластини, паралельно пластині, наскільки це можливо вставляли лезо ножа з подальшим його витягуванням та швидким накручуванням бітуму на лезо. За температуру крихкості вважали температуру за якої бітум не розтягувався, а крихко ламався.

Характерною ознакою вищенаведених методів визначення температури крихкості є суб'єктивність отримуваних результатів через відсутність нормування багатьох параметрів (наприклад, товщина леза ножа, сила тиску лезом ножа на шар бітуму, площа поверхні бітуму та інше). Певний вплив на значення температур крихкості могли надавати й розчини, в яких відбувалось охолодження зразків.

З метою запобігання суб'єктивності отримуваних результатів та підвищення збіжності результатів визначення крихкості бітумів були розроблені механізовані лабораторні методи. Одним з перших таких

методів був Reeve and Yeager's Method [3, 5], в якому для визначення температури крихкості використовувався прилад, що вже використовувався в той час для визначення гнучкості бітумної кровлі (рис. 1.1).



А – затискач, В – зразок бітуму, С - штифт, D – колесо, G – транспортер з градуйованою шкалою, Е – ручка, F – установчий гвинт  
Рисунок 1.1 – Прилад для визначення гнучкості в'язучих, [3, 5]

Для визначення температури крихкості бітумів застосовували бітумні зразки завтовшки  $\frac{1}{4}$  дюйма ( $\approx 0,64$  см), шириною 1 дюйма ( $\approx 2,54$  см) та довжиною 4 дюйма ( $\approx 10,16$  см). Бітум нагрівали до температури, яка забезпечувала його рухомість (для запобігання старіння в'язучого застосовували якомога нижчу температуру) та заливали його в латунну форму відповідних розмірів, внутрішні стінки якої покривали ртуттю. Після охолодження бітуму до кімнатної температури зразок вставляли в прилад, який в свою чергу розміщували в водяній бані з температурою, дещо вищою за орієнтовну температуру крихкості та витримували впродовж 15 хв. Охолоджений зразок згинали навколо штифта радіусом  $\frac{3}{16}$  дюйма ( $\approx 0,48$  см) на кут в  $180^\circ$  за 10 секунд (для відліку часу використовувався метроном). Якщо зразок не ламався, в зажим приладу вставляли новий зразок, температуру

знижували на 10 °F ( $\approx 5,4$  °C) та після термостатування зразка випробування повторювали. Після досягнення температури за якої бітумний зразок ламався виконували додаткові випробування на нових зразках з поступовим підвищенням температури на 2 °F ( $\approx 0,5$  °C). Таким чином метод дозволяв визначити температуру крихкості з похибкою в 0,5 °C.

Визначення температури крихкості бітумних в'язучих за принципом згинання охолодженого зразка було прийнято в подальшому під час розробки методу Фраасу, який став найбільш поширеним методом та використовується й досі в різних країнах світу.

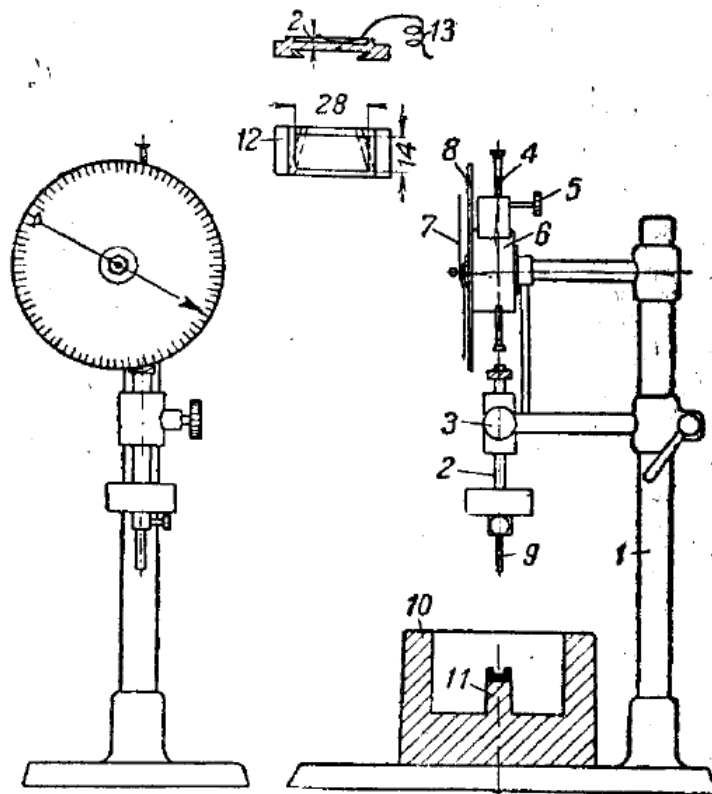
В першій половині минулого століття для визначення низькотемпературних властивостей бітумів деякими науковцями було запропоновано використовувати й непрямі методи. Так, наприклад, Е.І. Баргом та В.Н. Хорьковою було розроблено метод, згідно якого за температуру крихкості приймали температуру за якої penetрація дорівнює  $0 \times 0,1$  мм.

Ще один метод, запропонований Е.І. Баргом, полягав у визначенні penetрації стандартним пенетрометром. Стандартна penetраційна чашка з бітумом в який було занурено ртутний шарик термометру охолоджувався впродовж 2 год за кімнатної температури. Penetraційну чашка з бітумом розміщували в ізольованому товстостінному скляному стакані з кришкою, в якій був отвір для penetраційної голки. Після заморожування бітуму твердим двоокисом вуглецю починали визначати глибину проникності голки (час занурювання голки 10 с) з поступовим нагрівом зразка (низька швидкість нагріву дозволяла виконувати 2 – 3 визначення penetрації за час підвищення температури на 1 °C). В якості низькотемпературного показника приймали температуру, за якої глибина проникності становить 0,3 мм.

Подібний принцип використовувався й в методі визначення температури затвердіння за Гепфнер-Метцгером [6]. У відповідності з запропонованим методом використовувався спеціально сконструйований пенетрометр (рис. 1.2), в якому, на відміну від поширеного пенетрометру Річардсона, що використовувався для стандартизованого визначення глибини проникності голки за температурою 25 °C, застосовувалась циліндрична сталевна голка діаметром 0,5 мм, що мала плоско зрізаний кінець, а навантаження на голку складало 450 г.

Визначення температури затвердіння бітуму полягало у встановленні температури, за якої penetрація дорівнює 0,1 мм. Випробування

передбачало визначення глибини проникності голки впродовж 60 с за температур, що на  $\pm 5^\circ\text{C}$  відрізняються від орієнтовної температури застигання. Для охолодження в'язучого було передбачено використання охолоджувальної рідини, яка складалась з вуглекислоти у вигляді снігу та 96 % етилового спирту. Визначення температури здійснювали термоелектричним шляхом за допомогою термопари. За даними розробників цього методу було можливо визначати температуру затвердіння бітумів до мінус  $40^\circ\text{C}$  з похибкою в  $0,4^\circ\text{C}$ .

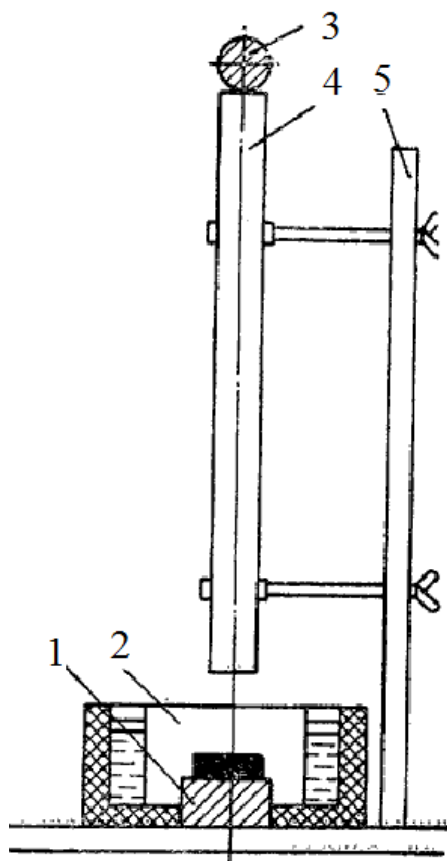


1 – штатив, 2 – тримач голки, 3 – стопорний гвинт, 4 – зубчата рейка, 5 – кремальєра, 6 – коробка з шестернями, 7 – стрілка, 8 – циферблат, 9 – голка, 10 – термоізолюваний посуд, 11 – підставка для човника, 12 – човник, 13 – термопара

Рис. 1.2. Прилад Гепфнер-Метцгера для визначення температури затвердіння бітумів, [6]

Незважаючи на те, що в подальшому було створено значну кількість різноманітних приладів для визначення низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих, що використовували складне обладнання та дозволяли автоматизовано визначати температури крихкості, деякі розробники орієнтувалися при створенні нових методів на прості принципи. Так, наприклад, Бахрах Г.С. та Косогляд Е.С. в

1972 р. запатентовали метод визначення «динамічної крихкості» матеріалів на основі органічних в'язких, згідно якого за температуру крихкості запропоновано використовувати температуру за якої, відбувається руйнування зразка, на який падає з певної висоти металевий шарик певної ваги (рис. 1.3). Випробування здійснювали на попередньо виготовлених зразках, які перед випробування витримували за температури  $+5 \dots +7 \text{ }^\circ\text{C}$  впродовж 0,5 год в лабораторній холодильній камері. Після термостатування зразок розмішували на фіксуючому прошарку (солідолі) на ковалдо та на зразок через направляючу трубку скидався шарик певної ваги. Випробування за однієї температури здійснювався на трьох зразках. Якщо у двох випадках з трьох зразок не розтріскався, температуру випробування знижували, а випробування повторювали. За думкою розробників, температура за якої фіксується розтріскування зразків можна вважати температурою переходу матеріалу з пружньо-в'язко-пластичного в крихкий стан.



1 – ковалдо, 2 – холодильник, 3 – шарик,  
4 – направляюча трубка, 5 – штатив

Рисунок 1.3 – Прилад для визначення «динамічної крихкості»

## 1.2 Визначення температури крихкості за методом Фраасу

Одним з найбільш поширених у світі методів визначення низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих був на протязі тривалого часу та залишається й досі є метод Фраасу, який було розроблено на початку 30-х років минулого століття в Німеччині [7, 8]. Суть методу полягає в багаторазовому згинанні прямокутної металевієї пластини з пружинної сталі розміром  $41 \times 20$  мм та товщиною 0,15 мм на поверхню якої нанесено шар бітумного в'язучого завтовшки 0,5 мм, з поступовим зниженням температури в приладі (рис. 1.4) зі швидкістю  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$ . Згинання пластини з в'язучим виконується зі швидкістю 1 згинання в хвилину. За температуру крихкості приймається температура, за якої на поверхні шару в'язучого з'являється тріщина.

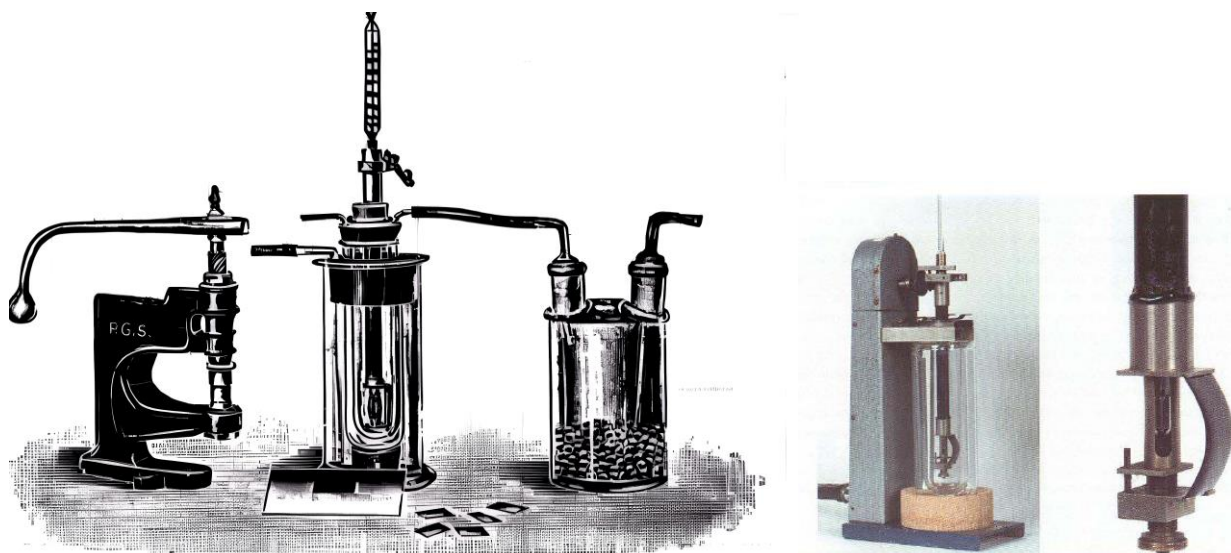


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд приладу Фраасу – початковий [3] та сучасний [9]

Майже відразу після розробки методу Фраасу його було стандартизовано, а показник температури крихкості став нормуватися в специфікаціях різних країн світу (за виключенням США, де він ніколи не входив в перелік нормованих показників якості дорожнього бітуму). Незважаючи на це починаючи з самого початку використання метод Фраасу піддавався критиці. Головною причиною цього була суттєва залежність отримуваних результатів від багатьох факторів, до яких відносяться: матеріал підкладки; температура, за якої здійснюється розподілення в'язучого по пластині-підкладці; товщини бітумної плівки; швидкості охолодження зразка; швидкості прикладання наванта-

ження; величини деформації, що виникає в матеріалі в результаті випробування та інше [7, 10 – 12].

В одній з перших робіт, присвячених випробуванню бітуму методом Фраасу, опублікованій в 1934 р. наведені дані, що ілюструють залежність температури крихкості від ваги наважки (зміна ваги наважки бітуму, що була розподілена по поверхні металевої пластини, з 0,523 г до 0,603 г, призводить до зменшення температури крихкості з  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), від часу розподілення бітуму по поверхні металевої пластини (при коливанні часу розподілення бітуму впродовж 20 хв, значення температури крихкості змінювались в межах  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), від товщини шару бітуму (при зміні товщини шару бітуму з 0,125 мм до 0,5 мм температура крихкості підвищується з  $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), від зчеплюваності в'язучого з поверхнею металевої пластини (чим краще зчеплюваність, тим нижче температура крихкості).

В роботах [13 – 14] автором наведені дані, які ілюструють залежність температури крихкості від товщини шару бітуму та швидкості охолодження в'язучого під час проведення випробування (рис. 1.5), згідно з якими залежність температури крихкості від товщини шару в'язучого є нелінійною. Найбільше підвищення температури крихкості спостерігається зі збільшенням товщини шару в'язучого з 0,25 мм до 0,5 мм та з 0,75 мм до 1,00 мм. В діапазоні товщини від 0,5 мм до 0,6 мм значення температури крихкості майже не залежить від товщини шару в'язучого. Слід зазначити, що товщина шару бітуму на пластині під час випробування методом Фраасу становить 0,15 мм, тобто похибка в товщині шару бітуму може суттєво позначитися на значення температури крихкості. На залежності температури крихкості від швидкості охолодження (рис. 1.5) також є ділянка, на якій температура крихкості майже не залежить від швидкості охолодження зразка в'язучого, але швидкість охолодження менше  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$  може призводити до значної похибки у визначенні температури крихкості.

В подальшому ці залежності були підтверджені й вітчизняними науковцями. Так, наприклад, згідно з даними, які наводили в своїх роботах Гун Р.Б., Печений Б.Г., Фрязінов В.В., Железко Е.П., Железко Т.В.; Руденська І.М. та Руденський А.В [10], зі зменшенням товщини шару в'язучого значення температури крихкості знижуються. Гун Р.Б. вказував, що зменшення товщини плівки бітуму з 2 мм до 0,1 мм призводить до зниження температури крихкості з мінус  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до мінус  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

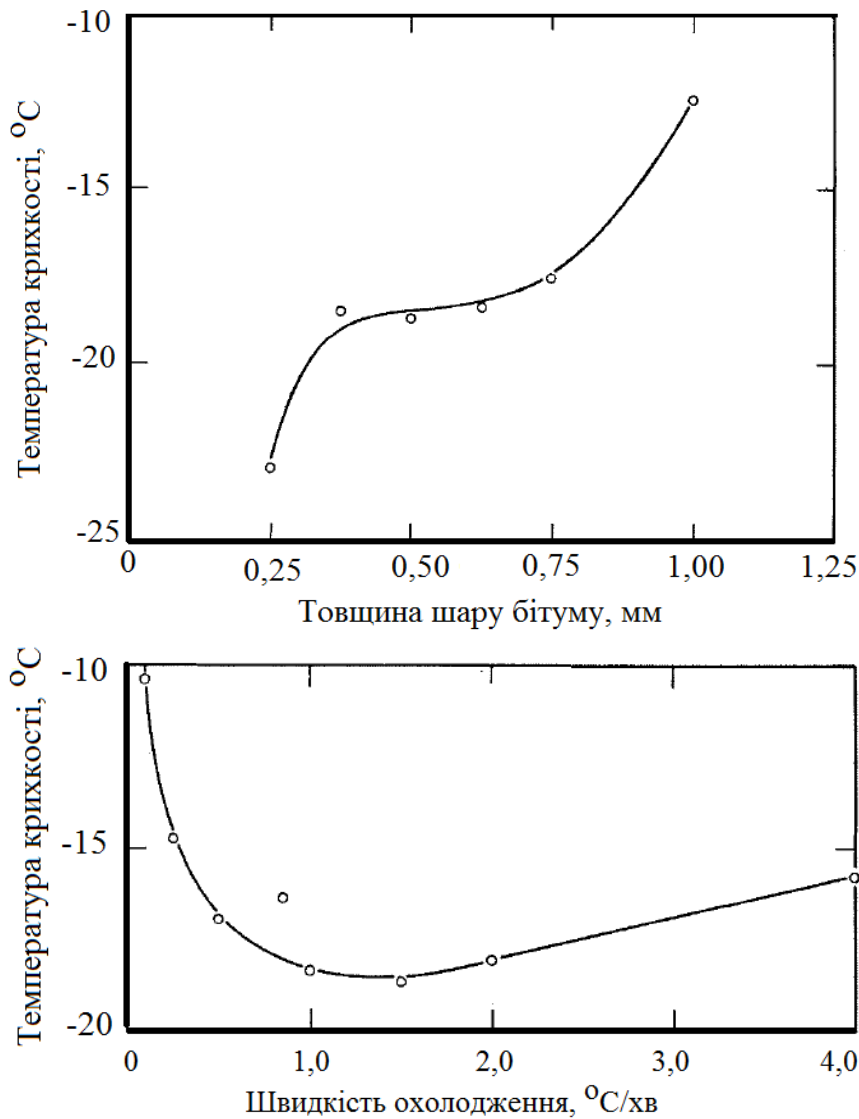


Рисунок 1.5 – Залежність температури крихкості від товщини шару в'язучого та швидкості охолодження, згідно з [13, 14]

Железко Е.П. наводив дані [10], які ілюструють зміну значень температури крихкості бітумів різних марок, виготовлених за різними технологіями (окислення, дистиляція, компаундування) зі зміною товщини плівки бітуму та з часом витримування їх в різних умовах перед випробуванням. Встановлено, що зі зменшенням товщини плівки бітуму, значення температури крихкості знижується. Автор пояснює це тим, що під час визначення температури крихкості методом Фраасу фактично вимірюється не температура переходу бітуму в крихкий стан, а температура, за якої в'язуче руйнується за прийняте у випробуванні подовження зразка, яке в свою чергу залежить від товщини зразка. При цьому стверджується, що температура крихкості не по-

винна розглядатися як нижня низькотемпературна межа роботи дорожнього покриття.

Печеним Б.Г. та Фрязіновим В.В. [10] встановлено, що зміна температури крихкості зі зміною товщини пояснюється зміцненням тонких шарів в'язучого через дію адсорбційних сил підкладки.

Експериментально отримані на кафедрі ТДБМ дані підтвердили залежність зміни температури крихкості зі зміною товщини в'язучого (табл. 1.1). При збільшенні товщини шару бітуму в 2 рази (з товщини 0,5 мм, яка є стандартною за прийнятих в методі Фраасу умов, до 1 мм), значення температури крихкості підвищується в 1,3 – 1,5 рази. При цьому це відношення майже не залежить від консистенції (значення пенетрації, визначеної за 25 °С) в'язучого.

Таблиця 1.1 – Залежність температури крихкості за методом Фраасу від товщини шару бітумів різної консистенції

Показники якості		Бітуми							
Пенетрація за 25 °С, 0,1 мм		48	77	123	160	50	56	94	132
Температура розм'якшеності, °С		57,4	49,4	43,2	42,8	53,3	50,3	45,4	41,6
Температура крихкості, °С при товщини шару бітуму	0,5 мм	-22,0	-23,0	-26,5	-27,0	-19,0	-21,5	-21,5	-25,0
	1 мм	-14,5	-15,5	-17,0	-19,5	-14,0	-16,0	-17,0	-18,0

Куть'їн Ю.О. [10] визначив вплив на зміну значень температури крихкості, визначених за методом Фраасу, зміни радіусу вигину пластини, на яку нанесено шар бітуму. Було встановлено, що зі збільшенням радіусу вигину пластини, значення температури крихкості знижуються. Вказуючи на вади визначення температури крихкості за методом Фраасу, Куть'їн Ю.О. зробив висновок що метод Фраасу дозволяє отримувати температуру, за якою можливо порівнювати бітуми між собою, але не можливо визначити за показником температури крихкості дійсну морозостійкість в'язучого.

Печений Б.Г. та Фрязінов В.В. [10] встановили, що під час випробування за методом Фраасу: у в'язучому виникають деформації, значення яких перевищують більш ніж в 100 разів значення граничних деформацій, що виникають у покритті; швидкість охолодження в'язучого приблизно в 30 разів вище, ніж в реальних умовах; швидкість де-

формування плівки в'язучого в 10 разів вище, ніж в умовах експлуатації покриття. Цими ж авторами встановлено залежність результатів визначення температури крихкості від матеріалу підкладки, на яку наноситься в'язуче, що випробується та від температури, за якої розподіляють в'язуче по пластині-підкладці.

Залежність значень температури крихкості від стількох факторів призводить до суттєвих похибок під час експериментального визначення температури крихкості, значення яких може досягати 10 °С. Про незначну точність визначення температури крихкості за методом Фраасу свідчать й значні величини повторюваності та відтворюваності, які згідно стандарту ДСТУ EN 12593-2015 [15] становлять, відповідно, 3 °С та 6 °С.

Можливим засобом зменшення похибок під час визначення температури крихкості методом Фраасу є використання автоматичних приладів. Однак, за даними ряду дослідників [12, 16] існує певна різниця між значеннями температури крихкості, визначеними на різних модифікаціях приладу Фраасу (ручному, полуавтоматичному, автоматичному). За думкою Железко Е.П. [10] поясненням цього може бути те, що в автоматичних приладах не реалізується візуальне виявлення першої тріщини на поверхні зразка, який покладено в принцип роботи приладу Фраасу, що й приводить до заниження значень температури крихкості (на 5 – 8 °С).

До того як були розроблені полуавтоматичні та автоматичні прилади визначення температури крихкості за методом Фраасу деякі дослідники для зменшення похибок, обумовлених особливостями підготовки зразків та їх випробування, здійснювали модернізацію класичного приладу Фраасу. Так, наприклад, на початку 60-х років минулого століття в Національній дослідницькій Раді штату Онтаріо в Канаді було [7] було вдосконалено прилад Фраасу – використовувався електричний привід для згинання пластини; використані прозорі пластини з поліефірної плівки, що дозволяли оглядати пластину в прохідному світлі; зменшена площа пластини майже вдвічі; для підготовки пластин використовувався спеціальний прес, за допомогою якого в'язуче необхідної товщини розподілялось по всій площі металевої пластини. Запропонована конструкція дозволила дещо підвищити збіжність отримуваних результатів [17].

У Великобританії в 50-х роках минулого століття було модифі-

ковано прилад Фраасу під випробування пеків, але залишалась можливість й випробування бітумних в'язучих [18]. Основні зміни полягали: у влаштуванні електричного механізму, що забезпечував рівномірне згинання/розгинання металевих пластин з в'язучим; у влаштуванні циркуляції охолоджувальної рідини в середині приладу, що забезпечувало рівномірність зниження температури; у використанні прозорих пластин з поліефірної плівки, що дозволяло спостереження за тріщиноутворенням в прохідному світлі. Зовнішній вигляд приладу з системою охолодження наведено на рис. 1.6.

За допомогою створеного приладу автор здійснив експериментальне дослідження температури крихкості бітумів та пеків і встановив наявність лінійної залежності між температурою крихкості та температурою еквів'язкості.

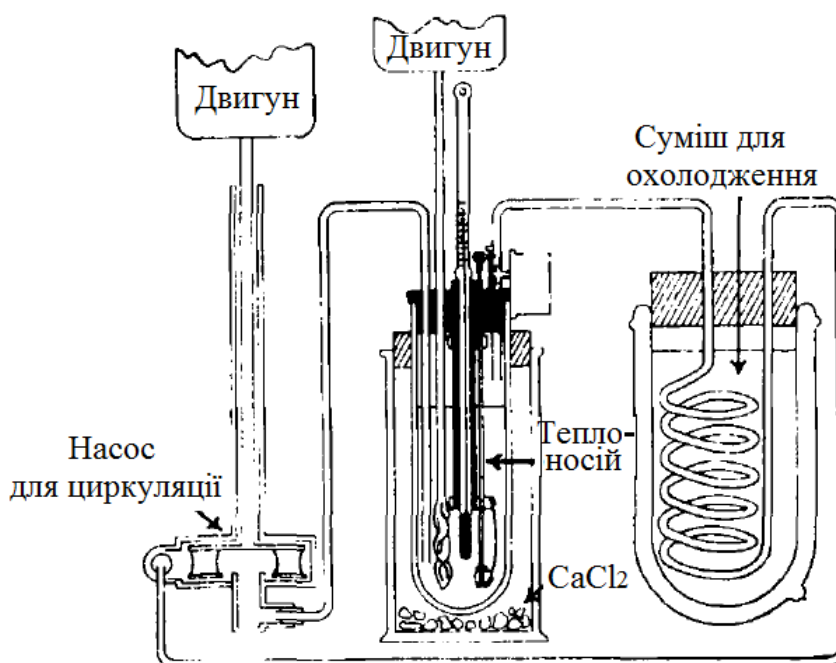
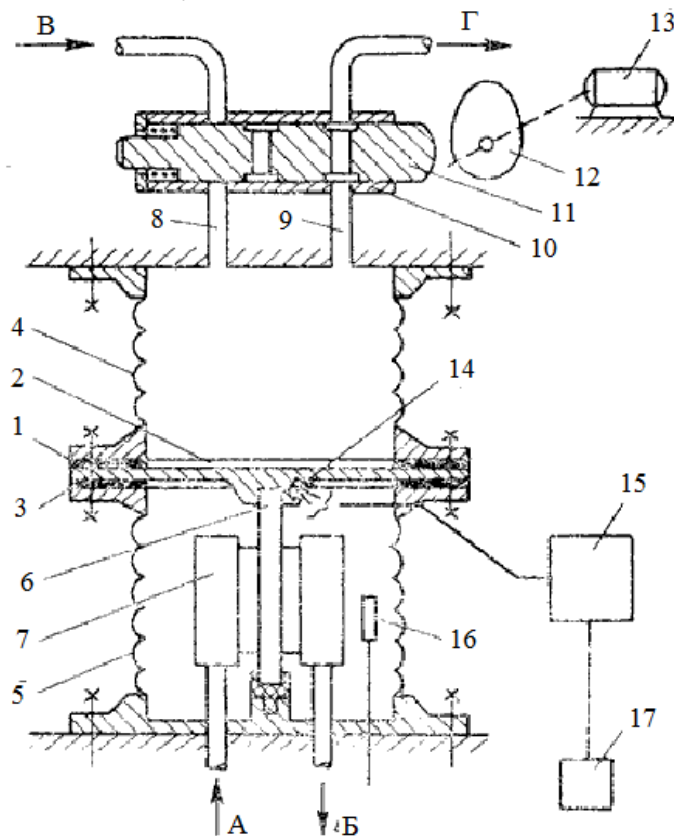


Рисунок 1.6 – Модифікація приладу Фраасу, [18]

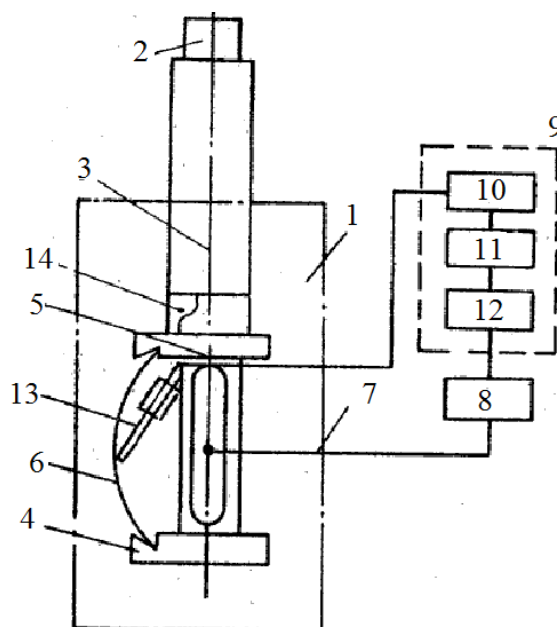
Наприкінці 60-х років вітчизняними розробниками (Паллей С.С. та Орловський В.Б.) з метою автоматизації роботи приладу Фраасу та підвищення точності визначення температури крихкості було здійснено вдосконалення конструкції оригінального приладу. Для цього для нанесення в'язучого запропоновано використовувати пластину з пружного пористого матеріалу. Ця пластина закріплювалась в приладі між двома гнучкими герметизуючими елементами, а до порож-

нини одно з яких підключався манометр. Під час випробування в'язучих при утворенні тріщини порушується цілісність шару бітумного в'язучого і стислий газ, що використовується для охолодження в'язучого фіксується індикатором тиску, розташованим з другою сторони випробувальної пластини (рис. 1.7). Незважаючи на те, що дана конструкція, за думкою розробників, повинна була підвищувати точність отримуваних результатів, даний прилад не отримав поширення у дорожній галузі і промислово не виготовлявся. До недоліків цієї конструкції приладу можна віднести, ймовірно, складність розподілення бітумного в'язучого по поверхні пористої пластини та неоднорідність шару в'язучого по товщині, що повинно знижувати точність отримуваних результатів.



1 – пориста пружня пластина, 2 – робоча поверхня пластини з бітумом, 3 – теплоізолююча прокладка, 4 – верхній сильфон, 5 – нижній сильфон, 6 – стрижень, 7-холодильне обладнання, 8 – 9 – з'єднувальні трубки, 10 – розподілювач, 11 – шток, 12 – ексцентриковий кулачок, 13 – електродвигун, 14 – датчик температури, 15 – стандартний вторичний прилад, 16 – індикатор тиску, 17 – релейний елемент  
Рисунок 1.7 – Конструкція приладу, запропонованого Палеем С.С. та Орловським В.Б., для визначення температури крихкості бітумів

В 1983 р. Валієв М.Х. та Клімов А.В. запатентували модифікацію приладу Фраасу, відмінністю якого від оригінального пристрою було використання п'єзоелектричного реле з пружним п'єзоелементом, що сприяло вдосконаленню системи індикації температури крихкості (рис. 1.8).

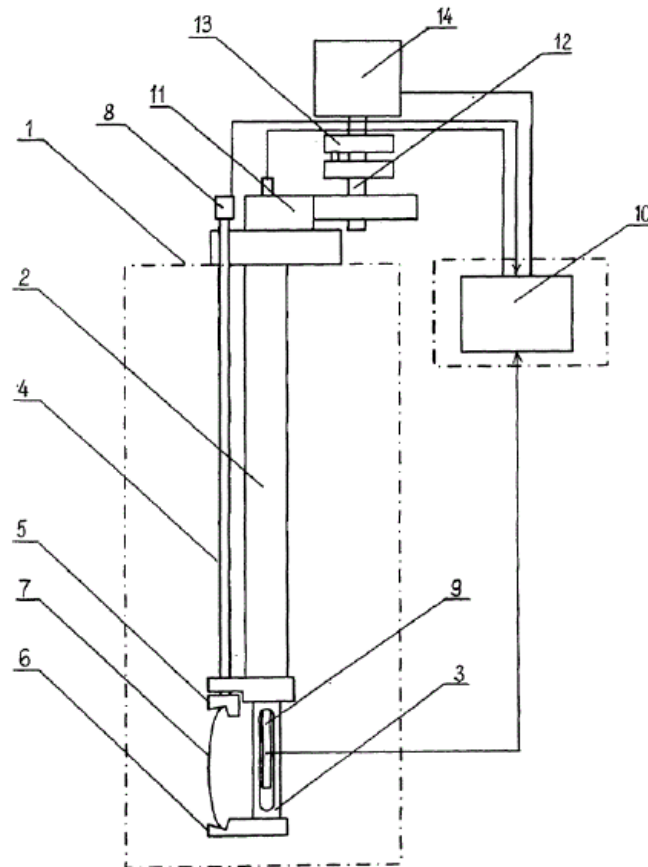


1 – термостат, 2 – 3 – концентричні трубки, 4 – 5 – захвати, 6 – металева пластина з в'язучим, 7 – термопара, 8 – система реєстрації температури, 9 – система індикації температури крихкості, 10 – підсилювач, 11 – пороговий прилад, 12 – блок сигналізації, 13 – п'єзоелемент

Рисунок 1.8 – Модифікація приладу Фраасу, яку запропонували Валієв М.Х. та Клімов А.В.

За даними авторів запропонована ними модифікація дозволяла виключити вплив місця, форми та напрямку тріщини на спрацювання системи індикації температури крихкості, що в свою чергу повинно сприяти підвищенню збіжності та відтворюваності отримуваних результатів. Пізніше ця модель приладу Фраасу була додатково вдосконалена через те, що вона виявилась занадто чутлива до сторонніх шумів, що в свою чергу призводило до спрацьовування передчасної фіксації приладу. Крім цього через розміщення п'єзоелементу в зоні установки металевої пластини з бітумним в'язучим існувала можливість руйнування п'єзоелементу. Ці вади були усунені в приладі, кон-

струкція якого наведена на рис. 1.9. Згідно з конструкцією під час розтріскування в'язучого на металевій пластині відбувається різке зниження зусилля тиску з боку пластини 7 на стрижень 4, що й фіксується тензодатчиком, сигнал з якого передається на мікропроцесор та приймається як температура крихкості.



1 – термостат, 2 – 3 – зовнішня та внутрішня концентричні трубки, 4 – стрижень, 5 – верхній захват, 6 – нижній захват, 7 – металева пластинка з нанесеним бітумним в'язучим, 8 – тензодатчик, 9 – датчик температури, 10 – мікропроцесор, 11 – каретка, 12 – гвинт, 13 – муфта, 14 – шаговий двигун

Рисунок 1.9 – Модифікація приладу Фраасу, яку запропонували Вольферц М.В. та Краснокутський Н.І.

На кафедрі ТДБМ ХНАДУ в 70-х роках минулого століття Золотарьовим В.О. та Рабіновичем Б.Я. [6] було модифіковано прилад Фраасу за рахунок заміни системи охолодження на мікрохолодильник ТЛМ, що промислово виготовлявся в той час в країні (рис. 1.10). Це дозволило досягти стабільно рівномірного охолодження зі швидкістю 1 °С/хв до температури мінус 35 °С, що в свою чергу позначилось на

точності та збіжності отримуваних результатів. Крім цього завдяки конструкції запропонованого приладу з'явилась можливість позбутися необхідності використання кошторисних матеріалів, необхідних для охолодження в'язучого, а також труднощів, пов'язаних із забезпеченням необхідної швидкості охолодження.

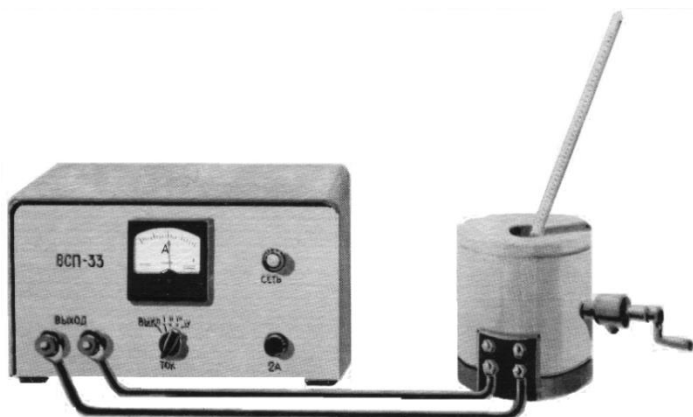


Рисунок 1.10 – Модернізація приладу Фраасу [6]

Ще одна модифікація приладу Фраасу була запропонована в Японії [19]. Відмінності від класичного приладу Фраасу полягали: у використанні в якості хладагенту металону, що дозволило зменшити коливання температури; у зміні конструкції зажимів пластини з бітумом; в обладнанні приладу тензодатчиками, що фіксували робочий хід пластини з бітумом та навантаження на бітум в процесі вигину металеві пластини, що використовується в якості підкладки (рис. 1.11). За рахунок такого вдосконалення розробники отримали можливість під час випробування визначати міцність бітуму, деформації при руйнуванні, модуль пружності та релаксацію напруження. Крім цього збіжність результатів була підвищена до  $\pm 2$  °C.

В Австралії в 80 – 90-х роках минулого століття [20] розроблено дві модифікації методу Фраасу, що отримали назву Fast Fraass (швидкий Фраас) та Large Fraass (численний Фраас) [21]. Головною відмінністю цих методів від класичного методу Фраасу було значно коротший час вигинання металеві пластини, на яку нанесено бітумне в'язуче, яке становило 0,025 с. Розробники цих модифікацій методу Фраасу вважали, що прийнятий ними менший час деформування зразка відповідає часу навантаження на асфальтобетонне покриття при проїзді транспортного засобу. Зменшення часу деформування зразка призвело до підвищення температур крихкості, що визначались за

цими методами (середні значення варіювались від  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В модифікації Fast Fraass використовувалась електрогідравлічна випробувальна машина для контролю вигину стандартних пластин з нанесеним в'язучим, яка забезпечувала вигин пластин з похибкою до  $0,05\text{ мм}$  та похибкою в часі до  $0,001\text{ с}$ . Температурний режим контролювався за допомогою апарату Вітта, що забезпечувало дотримання температури з похибкою  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

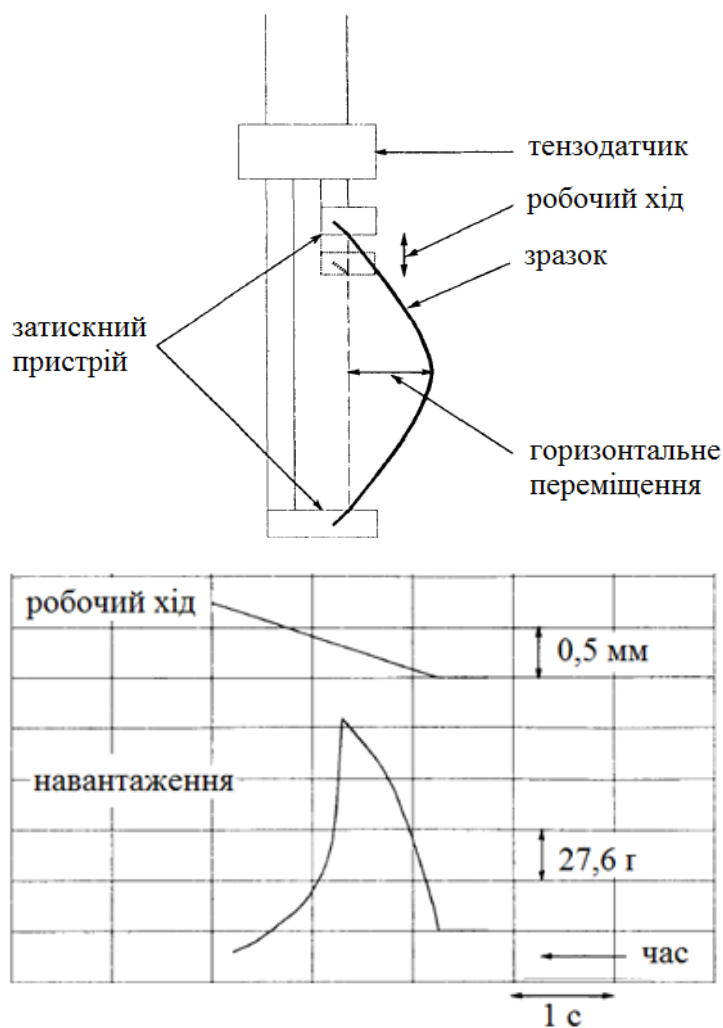


Рисунок 1.11 – Модифікація приладу Фраасу та типовий графік фіксування часу навантаження та деформації бітуму [19]

Модифікація Fast Fraass використовувалась виключно в дослідницьких цілях та не отримала широкого застосування через досить низьку збіжність результатів, яка становила  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що є більшим, ніж збіжність результатів, визначених класичним методом Фраасу [20].

В модифікації що отримала назву Large Fraass для випробування застосовувалась металеві пластини розміром  $50 \times 75\text{ мм}$ , по поверхні

яких розподіляли бітум шаром 2,5 мм. Пластини з в'язучими численно вигибали за температури 4 °С з частотою 1 Гц. Розтріскування в'язучих здійснювалось за допомогою тензодатчика. За показник, що характеризував в'язуче приймалось кількість циклів вигину пластину, які здійснено до появи видимих тріщин. Не модифіковані бітумні в'язучи розтріскувалась практично відразу, кількість циклів до розтріскування модифікованих полімерами бітумів досягало декілька сотень, а зразки, модифіковані 15 % та 18 % гумової крихти зовсім не розтріскались у доступних умовах випробувань. Фактично дана модифікація дозволяла визначати втомленісне руйнування в'язучого.

Через експериментальні труднощі, що виникли під час техніко-економічних обґрунтувань, необхідність внесення подальших поліпшень у конструкцію приладу, а також необхідність у проведенні робіт з оптимізації умов випробувань, подальші роботи з розробки модифікацій методу Фраасу – Fast Fraass та Large Fraass не проводились.

Згідно з висновком, зробленим в [12], подальше вдосконалення методики визначення температури крихкості бітумів за Фраасом та модернізація обладнання є одним з основних шляхів зменшення похибок визначення температури крихкості, та відповідно цього підвищення збіжності та відтворюваності отримуваних результатів. На даний час роботи в цьому напрямку здійснюється в різних країнах світу. Наприклад, науковці Японії оснастили прилад Фраасу пристроєм, що фіксує деформації та напруження в бітумному в'язучому, що в свою чергу дозволяє видалити візуальну або електричну фіксацію розтріскування, за рахунок цього є можливим збільшити точність отримуваних результатів з  $\pm 3 \dots 4$  °С до  $\pm 1$  °С. Можливим шляхом підвищення збіжності та відтворюваності отримуваних результатів є застосування пристрою для виготовлення зразків шляхом їх формування (особливо це актуально для випробування високов'язких або високомодифікованих бітумних в'язучих). В [12] звертається увага на актуальність робіт, направлених на створення випробувальної методики Фраасу, в якій було б механізовано всі процеси підготовки зразків та повністю автоматизовано процес випробування.

У відповідності з [22] підвищення збіжності та відтворюваності результатів визначення температури крихкості за Фраасом можна досягти й шляхом більшої конкретизації всіх етапів підготовки зразків до випробування. Наприклад, за рахунок того, що в методику визна-

чення температури крихкості методом Фраасу було введено 2 обмежено (температура нагріву бітуму під час розподілення його по металевій пластині не більше 90 °С, а час розподілення бітуму по трьох пластинах – не більше 3 хв) вдалось знизити збіжність отримуваних результатів з 5 ... 6 °С до 1 ... 2 °С.

За час використання методу Фраасу в якості методу визначення низькотемпературних характеристик бітумів неодноразово здійснювались спроби встановити фізичну сутність цього показника та його зв'язок зі складом бітумів та з умовними стандартними і фундаментальними показниками якості. Тим не менше єдина думка, щодо сутності цього показника на даний час відсутня.

У відповідності з [23] температура крихкості за Фраасом визначається кількістю асфальтенів в складі в'язучого незалежно від його марки (рис. 1.12). За даними Р.Б. Гуна низьку температуру крихкості бітумів обумовлюють парафіно-нафтонові та моноциклічні ароматичні з'єднання у складі в'язучих. В той же час у відповідності з [24] значення температури крихкості не зв'язане напряду з кількістю парафінів в складі бітуму.

Фрязіновим В.В. проілюстровано експериментальними даними залежність температури крихкості від коефіцієнту розчинної здатності (сума процентної долі вуглеця, що входить в склад ароматичних кілець та 1/3 процентної долі атомів вуглеця, що входять в склад нафтових кілець), згідно з якими спостерігається підвищення температури крихкості при збільшенні коефіцієнту розчинної здатності масляного компоненту бітуму (рис. 1.13).

Згідно [25] міцність на розрив за температури крихкості методом Фраасу знаходиться в межах від  $2 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup> до  $3 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup> (в середньому може бути прийнято  $3 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup>). Також встановлено, що при опорі розриву  $3 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup> жорсткість за температури розтріскування методом Фраасу при тривалості навантаження 10 с становить  $10^8$  Н/м<sup>2</sup>. [26]. В той же час згідно [22] температура крихкості відповідає жорсткості балки на вигин в 200 МПа. Горелишева Л.О. визначила, що значення модуля пружності бітумів за температури крихкості дорівнюють 60 – 120 МПа. За інформацією, наведеною в [25], температура крихкості за методом Фраасу являє собою температуру, за якої модуль пружності бітумів при тривалості навантаження 11 с однаковий для всіх бітумів і становить  $1,07787 \times 10^8$  Н/м<sup>2</sup>, при цьому максимальна деформація складає 1,64 %.

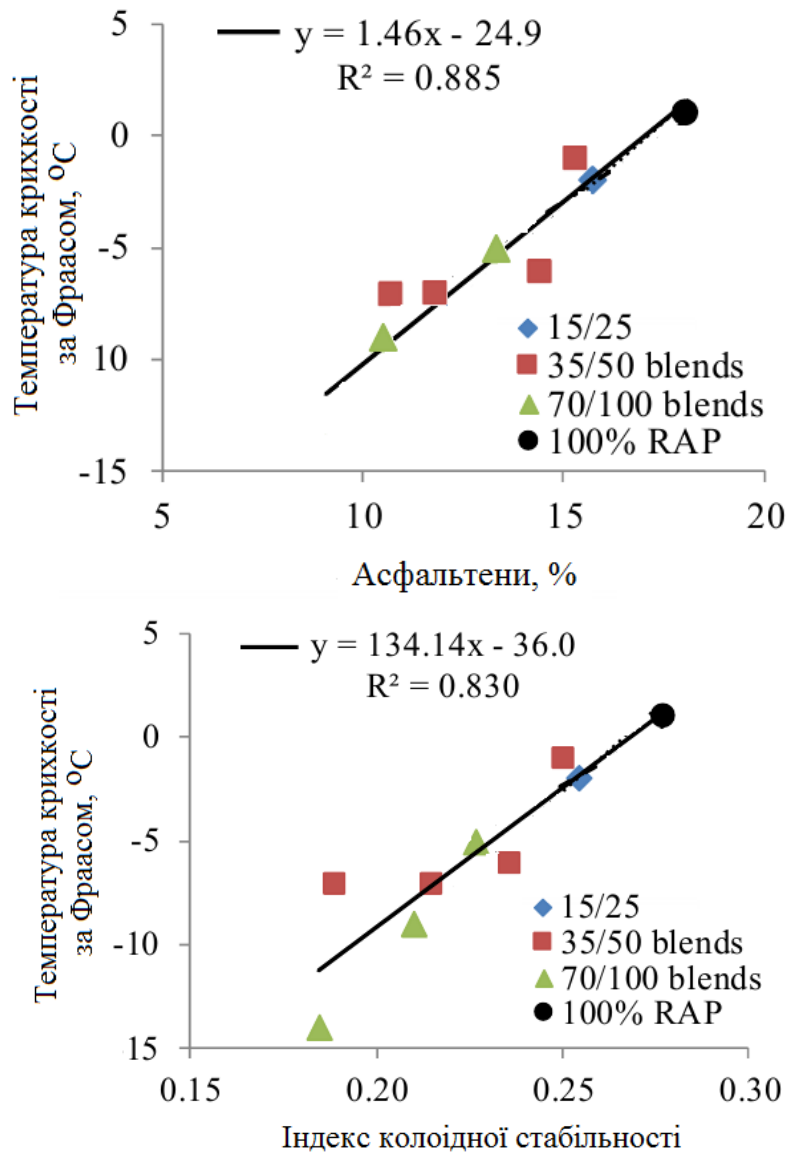


Рисунок 1.12 – Залежність температури крихкості за Фраасом від кількості асфальтенів у бітумному в'язучому, [23]

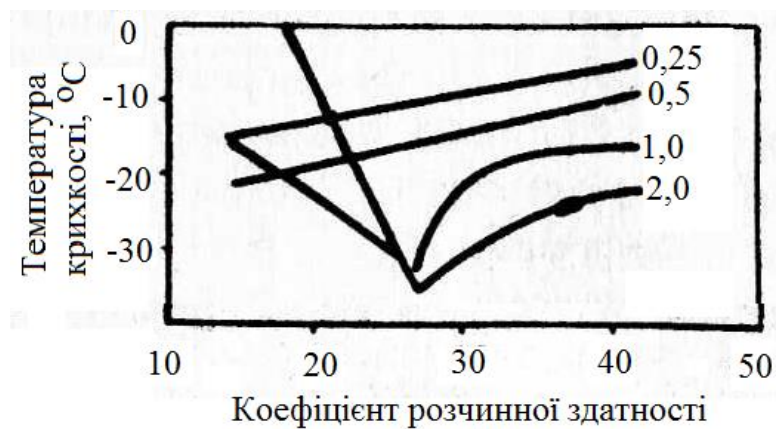


Рисунок 1.13 – Залежність температури крихкості бітуму від коефіцієнту розчинної здатності (значення на лініях – відношення кількості асфальтенів до кількості смол), отримана Фрязіновим В.В.

В роботі канадських дослідників [27] встановлено, що температура крихкості за Фраасом є еквів'язкою температурою, за якою в'язкість бітумних в'язучих складає  $4 \times 10^9$  пуаз. Вітчизняними науковцями встановлено, що: в'язкість за температури крихкості дорівнює  $10^{12} - 10^{13}$  ст (дані Гуна Р.Б.); в'язкість бітумів складає  $\sim 10^{12}$  Па·с, а penetрація дорівнює  $1,25 \times 0,1$  мм (дані Поконовою Ю.В.).

В [28] наведені залежності між значеннями температури крихкості бітумів за Фраасом та стандартними показниками якості:

- penetрацією за температури  $4^\circ\text{C}$  (коефіцієнт кореляції дорівнює 0,853):

$$P_4 = -1,135 \cdot T_{кр} + 2,504, \quad (1.1)$$

де  $P_4$  – penetрація бітуму за  $4^\circ\text{C}$  (200 гр, 60 с), 0,1 мм,

$T_{кр}$  – температура крихкості, визначена методом Фраасу;

- температурою склування ( $T_{скл}$ ), визначеною методом диференційної скануючої калориметрії (коефіцієнт кореляції дорівнює 0,85):

$$T_{кр} = 0,717 \cdot T_{скл} + 4,3, \quad (1.2)$$

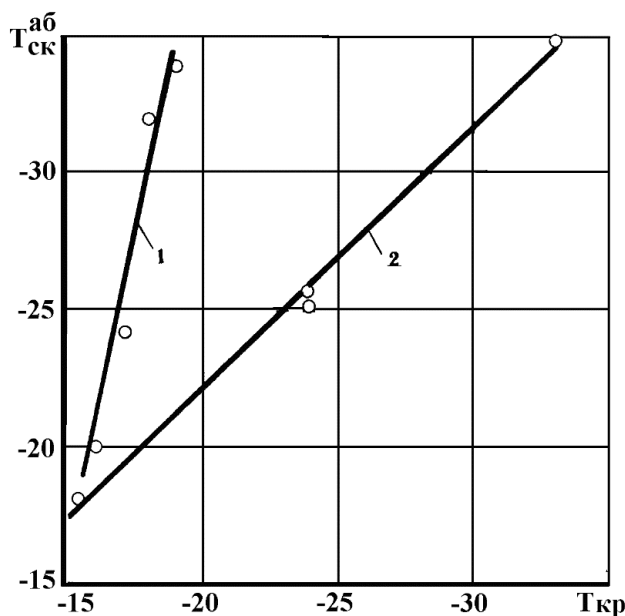
В [29] на основі встановлених даних визначені залежності між температурою крихкості за Фраасом та penetрацією бітуму за  $25^\circ\text{C}$  (коефіцієнт кореляції становить 0,64) і температурою розм'якшеності за методом КіК (коефіцієнт кореляції становить 0,18).

Згідно з [30] температура розм'якшеності в'язучого характеризує міцність його внутрішньої структури та залежить від кількості коагуляційних контактів та відстані між частинками дисперсної фази, а температура крихкості характеризує якість дисперсійного середовища. Черняков О.В. встановив, що температура крихкості за методом Фраасу, залежить як від в'язкості в'язучого, так і від його міцності.

У відповідності з дослідженнями Колбановської А.С., здійсненими на створеному приладі - пружномірі, який став прототипом обладнання, що використовується в даний час для випробування бітумних в'язучих методом ВВР, встановлено, що температура крихкості за методом Фраасу є нижньою границею інтервалу пластичності. Са-

бсай О.Ю. визначила, що температура крихкості за Фраасом є температурою за якої відбувається перехід бітумів з пружньо-пластичного в пружньо-крихкий стан. В той же час у відповідності з даними Горелишевої Л.А. при досягненні температури крихкості, визначеної методом Фраасу, бітуму має значний запас пластичних та міцносних властивостей, який залежить від інтервалу пластичності: чим більшим є інтервал пластичності, тим більшим є запас пластичності та більші навантаження може витримування бітум; чим меншим є інтервал пластичності, тим швидше бітуми переходять в склоподібний стан з різким зростанням внутрішніх напружень, які перевищують міцність бітуму.

За даними, отриманими В.О. Золотарьовим на кафедрі ТДБМ ХНАДУ, існує пряма залежність (рис. 1.14) між значеннями температури крихкості в'язучих різних марок та різних реологічних типів та умовною температурою механічного склування асфальтобетону (тобто температурою, за якої модуль пружності асфальтобетону досягає значення  $10^4$  МПа). Ця залежність простежується як для асфальтобетонів, виготовлених на бітумах, так і виготовлених на бітумах, модифікованих полімерами (в якості модифікатора використовувався полімер типу СБС в кількості 3 %) (табл. 1.2).



1 – піщаний асфальтобетон, виготовлений на бітумах БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, БНД 130/200;

2 - піщаний асфальтобетон, виготовлений на бітумах «гель», «золь-гель», «золь»

Рисунок 1.14 – Залежність між умовною температурою склування при частоті 0,01 Гц асфальтобетону та температурою крихкості бітуму за методом Фраасу, згідно даних В.О. Золотарьова

Judycki J. та Jaskula P. [31] довели існування тісної кореляції (коєфіцієнт кореляції знаходиться в межах 0,8 – 0,9) між міцністю на вигин за температури – 20 °С асфальтобетону та температурою крихкості

бітуму за методом Фраасу. В той же час Pangarova D. та Nikolov A. [30] довели існування кореляційної залежності між температурою крихкості за Фраасом та міцністю асфальтобетону на непрямий розтяг (ITS), визначеного за 0 °С (коефіцієнт кореляції становить 0,887).

Таблиця 1.2 – Вплив модифікації бітумів на температури крихкості та склування в'язучих, за даними Золотарьова В.О.

Показники якості	Окислені бітуми				Дистиляційні бітуми			
	вихідні		модифіковані		вихідні		модифіковані	
	ЛБ2	ЛБ3	ЛБП2	ЛБП3	АН2	АН3	АНП2	АНП3
Пенетрація за 25 °С, 0,1 мм	75	105	45	57	79	118	59	80
Температура розм'якшеності, °С	49,5	47,0	56,9	54,1	44,7	40,8	51,2	49,8
Температура крихкості за Фраасом, °С	-15,5	-18,0	-14,0	-16,5	-10,0	-13,0	-11,0	-16,0
Умовна температура механічного склування, °С	-14,0	-17,5	-12,5	-15,0	-9,0	-12,5	-8,0	-15,5

В роботі [33] представлені дані, що підтверджують високу кореляцію між значеннями температури крихкості бітумів за Фраасом та TFT (Theoretical Fracture Temperature – теоретичною температурою руйнування) асфальтобетону (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Залежність між температурою крихкості за Фраасом бітуму та температурою TFT асфальтобетону, [33]

Температура TFT представляє собою температуру за якої накопичене в асфальтобетону низькотемпературне термічне напруження дорівнює міцності асфальтобетону (рис. 1.16). Виходячи з цього повинна існувати кореляція між значеннями температури крихкості за Фраасом бітуму та показниками якості асфальтобетону, що можуть бути отримані при його низькотемпературному випробуванні, наприклад, на розтяг.

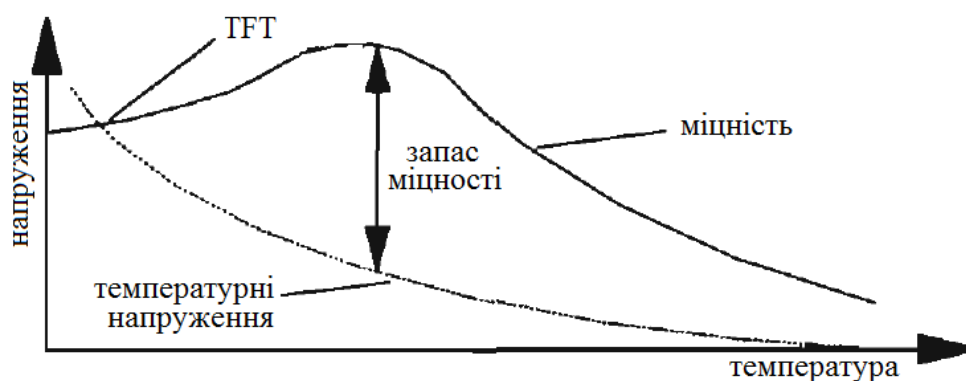


Рисунок 1.16 – Схематичне визначення температури TFT, [33]

Однією з причин низької кореляції температур крихкості бітумів, визначених методом Фраасу, з низькотемпературними характеристиками асфальтобетонів, за думкою авторів роботи [34] є те, що випробуванню піддається не зістарене в'язуче, в той час, як у складі асфальтобетону знаходиться бітум, властивості якого вже піддалися певним змінам, викликаним технологічним старінням. В підтвердження цього австралійські дослідники [20] здійснили порівняння значень температури крихкості бітумів, визначених методом Фраасу, до та після зістарення за методами RTFOT та PAV (витримування під тиском за температури 100 °C впродовж 4, 8 та 16 діб). Наведені в табл. 1.3 дані свідчать, що визначення температури крихкості бітумів, підданих старінню є більш доцільним, оскільки в цьому випадку враховується схильність або стійкість властивостей в'язучих до старіння, що дозволяє більш точно порівнювати низькотемпературні властивості бітумів та асфальтобетонів.

Враховуючи, що в даний час значного поширення в дорожніх галузях усіх країн світу отримали бітуми, модифіковані різноманітними добавками, важливим є питання можливості використання методу Фраасу для оцінювання модифікованих бітумних в'язучих, особливо бітумів, модифікованих полімерами. Так, наприклад, в [35] згадується

про труднощі виявлення (фіксації) тріщини під час випробування методом Фраасу бітумів, модифікованих полімерами. В Технічному комітеті RILEM 242-РІМ нещодавно було виконано масштабну роботу з залученням 17 дослідницьких лабораторій (13 з країн Європи та 4 із США) з визначення методів, що можуть використовуватися для оцінювання якості бітумів, модифікованих різноманітними добавками [36]. Враховуючи отримані результати було висловлено сумнів щодо можливості оцінювання наявності модифікаторів у в'язучих за даними температури крихкості за Фраасом.

Таблиця 1.3 – Вплив старіння на результати визначення температури крихкості бітумів за методом Фраасу, [20]

Бітум	Значення температури крихкості за Фраасом, °C				
	вихідного	після старіння методом RTFOT	після старіння методом PAV		
			100 °C 4 доби	100 °C 8 діб	100 °C 16 діб
A	-17	-13	-7	-4	-6
B	-23	-16	-7	-9	-14
C	-21	-17	-8	-12	-21

Не зважаючи на присутні методи недолікі та доволі низьку збіжність та відтворюваність отримуваних результатів, температура крихкості за методом Фраасу входить в номенклатуру стандартних показників якості бітумних в'язучих багатьох країн світу. Крім цього результати визначення низькотемпературних властивостей бітумів, що встановлюються за допомогою методів, які були розроблені після введення в дію методу Фраасу, обов'язково порівнюються з результатами температури крихкості, визначеними методом Фраасу та зазвичай здійснюється встановлення кореляційних залежностей між показниками. Таким чином метод Фраасу може використовуватися як певний умовний репер, відносно якого можливо порівнювати результати визначення температур крихкості різними методами. Подібні висновки були висловлені й на семінарі Eurobitume Workshop 99, на якому в ході розгляду різноманітних методів оцінювання низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих та виготовлених на їх основі асфальтобетонів, запропоновано вважати метод Фраасу як «розумний предиктор низькотемпературного розтріскування немодифікованих бітумів» [12]. Враховуючи, що актуальність використання методу Фраасу

для оцінювання модифікованих в'язучих є сумнівною, запропоновано в цьому випадку орієнтуватися на результати оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, встановлених методом TSRST.

### **1.3 Сучасні методи оцінки низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих**

На протязі майже 40 років (з 40-х років минулого століття) найпоширенішим у світі та єдиним стандартизованим методом визначення низькотемпературних характеристик бітумів був метод Фраасу. Лише у 80-х роках минулого століття в США в рамках виконання Стратегічної програми досліджень автомобільних доріг (SHRP) було розроблено відразу декілька різноманітних методів визначення температури крихкості бітумів, які в подальшому вдосконалювались та апробувалися в лабораторіях різних країн.

#### **1.3.1 Випробування бітумів за допомогою балочного реометру**

Основним методом оцінювання низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих, що був розроблений під час виконання програми SHRP та застосовується зараз в системі Superpave є VBR (Bending Beam Rheometer – балочний реометр). За допомогою цього методу визначаються два показники – жорсткість бітумних в'язучих під час випробування на повзучість при згині та  $m$ -значення (швидкість повзучості), яке представляє собою значення нахилу кривої логарифму жорсткості віднесене до логарифму часу. Жорсткість повзучості ( $S$ ) є реологічною змінною, яка характеризує опір в'язучого постійним навантаженням за низьких температур, а значення « $m$ » характеризує зміну жорсткості в'язучого з часом.

Прообразом методу VBR можна вважати створений в СоюздорНДІ в 60-х роках минулого століття прилад-упругомір, що було розроблено для оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів (рис. 1.17) [6]. Випробування полягало у визначенні прогину зразка-балки, виготовлені з бітуму. На основі отриманих даних проводилось обчислення модуля пружності бітуму та будувалась температурна залежність модуля пружності, що мала вигляд ламаної лінії з точкою перегину, яка за думкою розробників методу, здатна характеризувати перехід бітуму з пружно-пластичного в пружно-крихкий стан та

майже повністю збігається з температурою крихкості, визначеною методом Фраасу. На жаль ця вітчизняна розробка не отримала подальшого розвитку.

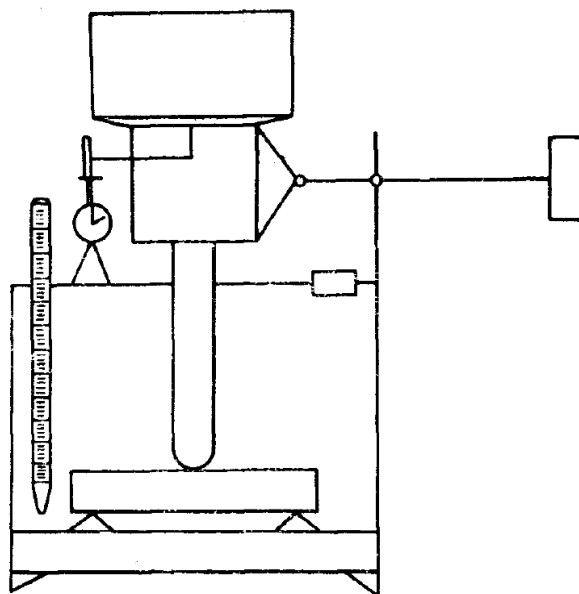


Рисунок 1.17 – Схема упругоміру, [6]

Випробування методом ВВР є стандартизованим як в американській [37, 38], так і в європейській, а також й українській [39] системах оцінювання якості бітумів та бітумних в'язучих.

Основним обладнанням, що використовується в методі ВВР є навантажувальна рама, рідинна баня та система збору даних (рис. 1.18).

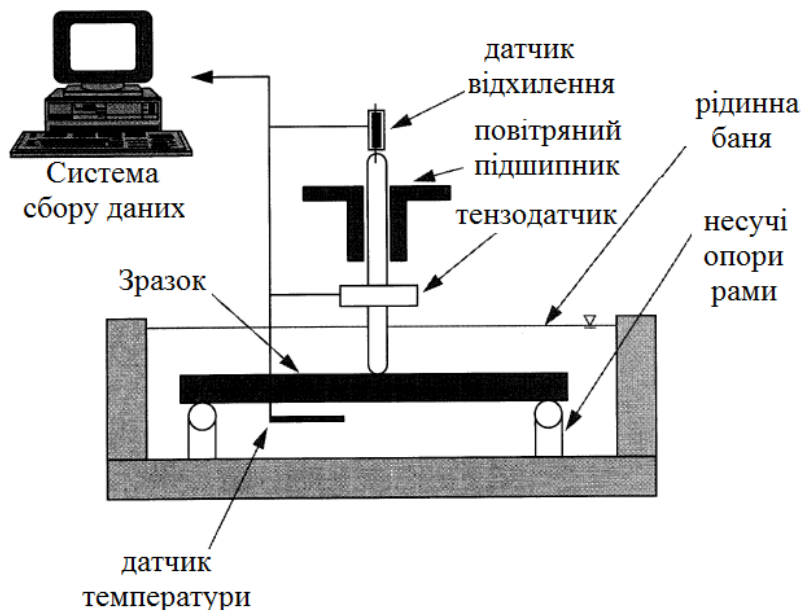


Рисунок 1.18 – Принципова схема балочного реометру, [40]

Для випробування підготовлюють у розбірній металевій формі бітумні зразки у вигляді прямокутного паралелепіпеду з розмірами, що наведені на рис. 1.19. Випробування повинно бути здійснено впродовж 4 год після виготовлення зразків.

На розмішену на двох опорах балку прикладають в середині зразка за допомогою стрижня із закругленим кінцем навантаження з використанням тиску стисненого повітря. На стрижні змонтовані датчики навантаження та переміщення (рис. 1.18).

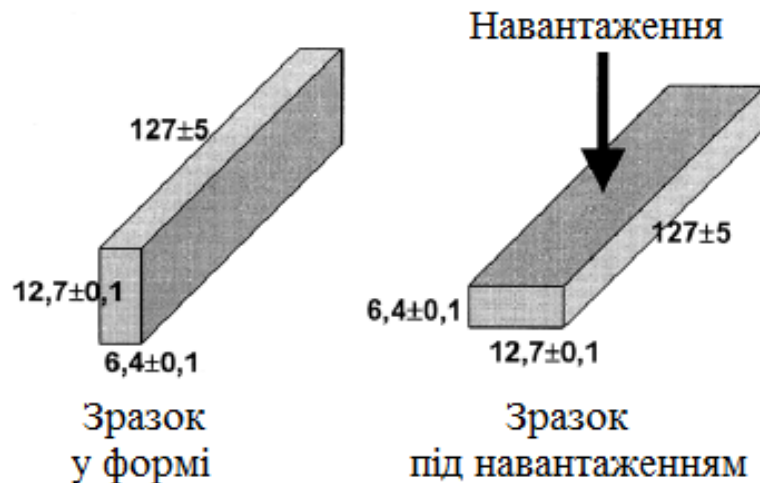


Рисунок 1.19 – Зразки-балки для випробування методом ВВР, [39]

Випробування полягає в прикладанні на зразок-балку певного навантаження (980 мН) впродовж певного часу (зазвичай впродовж 240 с) та реєстрації її прогину. Під час випробування на монітор безперервно виводяться графіки залежності навантаження та прогину від часу (рис. 1.20).

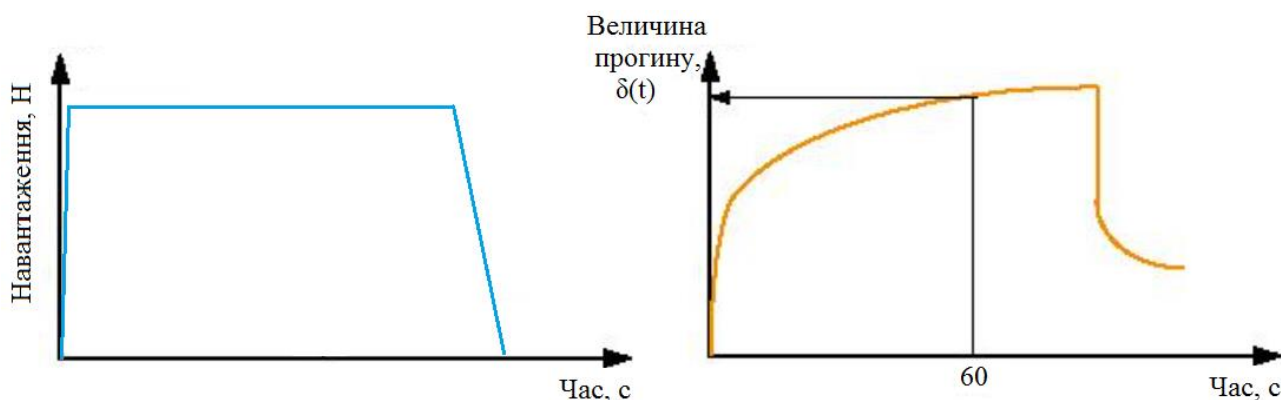


Рисунок 1.20 – Результати вимірювань випробувань методом ВВР

Розрахунок жорсткості при повзучості здійснюється за формулою:

$$S(t) = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta(t)}, \quad (1.3)$$

де  $S(t)$  – жорсткість при повзучості в момент часу  $t$ , МПа,  
 $P$  – вимірне випробувальне навантаження, Н,  
 $L$  – відстань між опорами зразка-балки, мм,  
 $b$  – ширина досліджуваного зразка-балки, мм,  
 $h$  – товщина досліджуваного зразка-балки, мм,  
 $\delta(t)$  – прогин (переміщення) зразка-балки за час  $t$ , мм.

Ця формула автоматично розраховується програмним забезпеченням приладу, використовуючи залежність прогину від часу (зазвичай приймаються значення тривалості навантаження в 8, 15, 30, 60, 120 та 240 с). На основі отриманих даних розраховується поліномінальна функція другого ступеня логарифму вимірних значень жорсткості в'язучих в залежності від логарифму тривалості навантаження, загальний вигляд якої наведено на рис. 1.21. За розрахованою залежністю також автоматично за допомогою програмного комплексу реометру визначається  $m$ -значення.

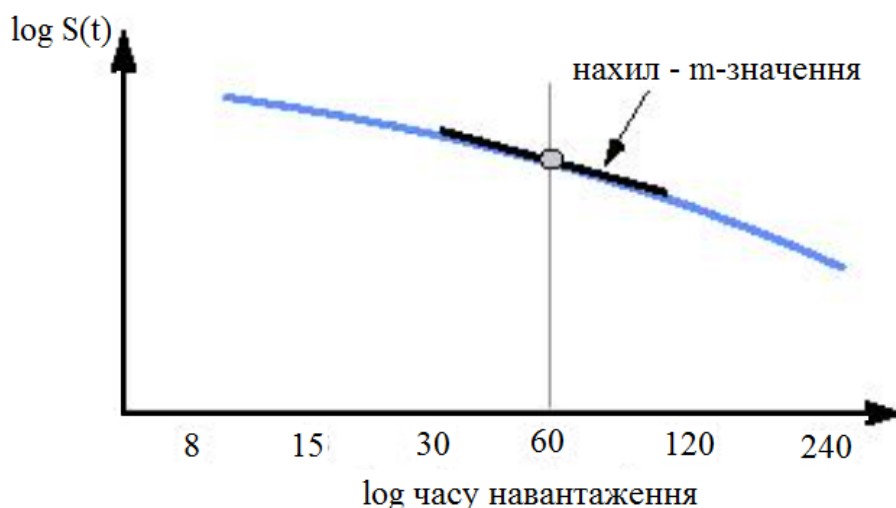


Рисунок 1.21 – Визначення  $m$ -значення при випробуванні в'язучих методом BBR

Згідно з вимогами, прийнятими в системі Supergrape, значення

жорсткості після 60 с дії навантаження не повинна перевищувати 300 МПа, а  $m$ -значення також після 60 с дії навантаження повинно перевищувати або бути рівним 0,3. У випадку якщо прогин балки є меншим 0,08 мм або більшим ніж 4 мм результати вважаються сумнівними. Значення  $S = 300$  МПа  $m = 0,3$  визначаються екстраполяцією чи інтерполяцією експериментально отриманих даних.

В основі методу BBR лежить принцип температурно-часової суперпозиції. Ідея нормування низькотемпературних властивостей як в'язучих, так і асфальтобетонів, виготовлених на цих в'язучих, на основі значень жорсткості розглядалась різними науковцями ще в 50-х роках минулого століття [41]. Під час виконання програми SHRP її розробниками було прийнято за основу дані, які отримав в 1972 р. Е.Е. Readshaw під час аналізу дорожнього покриття в провінції Британська Колумбія (Канада). Е.Е. Readshaw встановив, що низькотемпературне розтріскування в більшій мірі спостерігалось на асфальтобетонних покриттях, які були виготовлені на бітумах, жорсткість яких за номограмою Ван-дер-Поля при 2 ч навантаження не перевищувало 200 МПа [42 – 45]. Не зважаючи на те, що в роботі Е.Е. Readshaw були певні припущення при прийнятті значення жорсткості (відсутні дані, щодо температур, які спостерігались в районі розташування асфальтобетонних покриттів та призвели до їх розтріскування; в'язучі, для яких визначалась жорсткість були екстраговані з покриття та відновленні, що могло сказатися на точності характеристик в'язучих) [43], розробники з дослідницької групи програми SHRP на основі додаткової інформації збільшили це значення до жорсткості в 300 МПа при навантаженні впродовж 2 год при самій низькій температурі та прийняли його в якості критерію низькотемпературної характеристики бітуму. Для скорочення часу випробування використовуючи принцип температурно-часової суперпозиції було встановлено, що подібні ж значення можуть бути отримані при визначенні жорсткості впродовж 60 с прикладання навантаження за температури, що на 10 °С вище мінімальної температури експлуатації дорожнього покриття. Таким чином, критерії низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих за методом BBR ( $S \leq 300$  МПа,  $m \geq 0,3$ ) були прийняті виключно на основі обмеженої кількості експериментальних даних та не мають ніякого наукового обґрунтування [43, 45, 46].

Згідно даних випробувань бітумних в'язучих, що використовуву-

вались для влаштування асфальтобетонних покриттів в США протягом 1993 – 1999 р.р. [47] між жорсткістю та  $m$ -значенням існують залежності, які можуть бути описані наступними лінійними залежностями:

- для модифікованих полімерами в'язучих:

$$BBR_{S(t)} = 1,806 + 1,061 \cdot BBR_m, \quad (1.4)$$

- для не модифікованих бітумів:

$$BBR_{S(t)} = -9,230 + 0,541 \cdot BBR_m. \quad (1.5)$$

За допомогою методу BBR здійснюється визначення граничної температури жорсткості (LST – the limiting stiffness temperature – температури, за якої жорсткість при навантаженні впродовж 60 с становить 300 МПа) та граничної температури  $m$ -значення (LmT – the limiting  $m$  temperature – температури, за якої  $m = 0,3$  при навантаженні впродовж 60 с). Зазвичай ці дві температури не співпадають, тому для подальших розрахунків приймають найвищу граничну температуру (HLT – the highest limiting temperature), яка відповідно є найвищою з температур LST та LmT. Різниця між значеннями температур LST та LmT суттєво збільшується у випадку модифікованих полімерами чи іншими модифікаторами в'язучих або високов'язких бітумів, наприклад бітумів мультигрейд (MG) (рис. 1.22).

Через те, що отримувані за методом BBR результати є чутливими до умов підготовки зразків та їх випробування, метод характеризується доволі низькими значеннями збіжності та відтворюваності результатів. Згідно з ДСТУ EN 14771 [39] збіжність для показника жорсткості та  $m$ -значення становить відповідно 9 % та 4 %, а відтворюваність – відповідно 27 % та 13 %. На отримувані результати суттєво впливають такі фактори, як [43, 49]: не відповідність часу та температури витримування виготовлених зразків-балок може призводити до стеричного старіння в'язучого, що позначиться на його жорсткості та дасть похибку у визначенні низькотемпературних характеристик; коливання температури випробування через охолодження форм у випробувальній рідинній бані; похибки налаштування програмного забезпе-

чення; збій центрування прикладання навантаження; похибки екстраполяції даних жорсткості при визначенні температур розтріскування в'язучих.

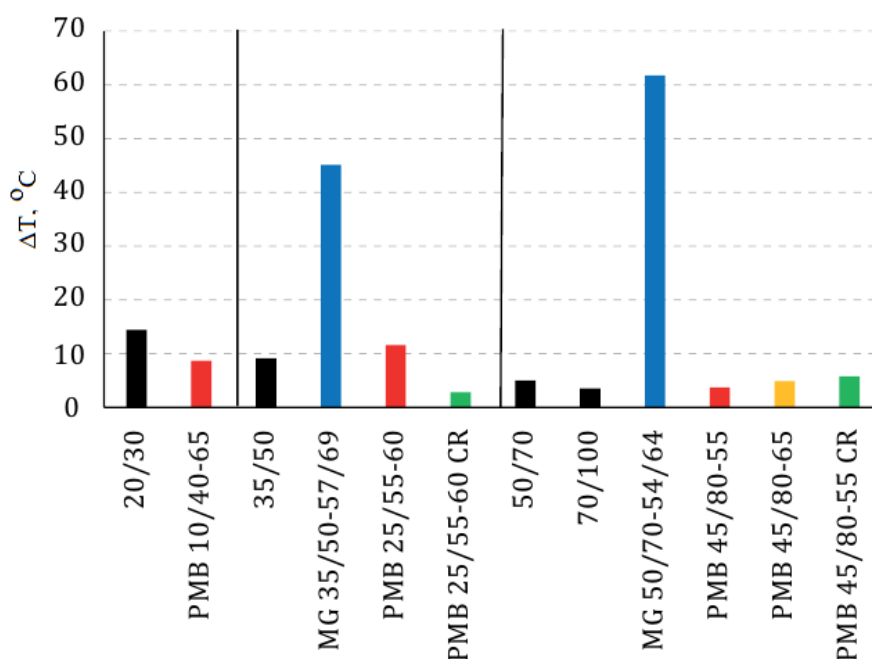


Рисунок 1.22 – Різниця між значеннями температур LST та LmT, [48]

Враховуючи те, що для проведення випробування за методом ВВР потрібна доволі значна кількість в'язучих, а саме випробування є доволі тривалим (для визначення жорсткості за трьох температур при використанні щонайменше двох зразків на одну температуру, мінімальна кількість в'язучого складає 90 г, а час випробування перевищує 6 год), в країнах Європейському Союзу на даний час використовується практика визначення жорсткості в'язучих лише за однією температурою в мінус 18 °С, що фактично відповідає низькотемпературному значенню PG XX-28. Якщо жорсткість за цієї температури не перевищує 300 МПа, вважається, що в'язуче має задовільні низькотемпературні характеристики. Вибір температури випробування (мінус 18 °С) обумовлено кліматичними характеристиками більшості країн Європи, в яких температура в зимовий період роки не знижується нижче 28 °С.

Враховуючи, що за температурою розтріскування, визначеною методом ВВР жорсткість бітумів становить 300 МПа, а за температурою крихкості, визначеною методом Фраасу бітуми мають жорсткість в межах 60 – 200 МПа, між значеннями температур крихкості в'язу-

чих, визначених цими показниками повинна існувати кореляція. Підтвердженням цього є результати лабораторних випробувань, отриманих дослідниками різних країн світу. Так, наприклад, в роботі [32] встановлено існування високої кореляції між температурою розтріскування бітумів методом Фраасу та жорсткістю, визначеною методом ВВР за температури мінус 18 °С (коефіцієнт кореляції 0,808), а в [22] встановлено існування тісної кореляції між значеннями температури крихкості бітумів за Фраасом та температурою, за якою, жорсткість бітуму, визначеного методом ВВР, становить 200 МПа.

У відповідності з даними, наведеними в роботі [34], між значеннями температури розтріскування бітумів, виготовлених в різних країнах світу з різних нафт та за різною технологією, визначених методами ВВР та Фраасу існує лінійна кореляція, що характеризується коефіцієнтом кореляції 0,72 (рис. 1.23).

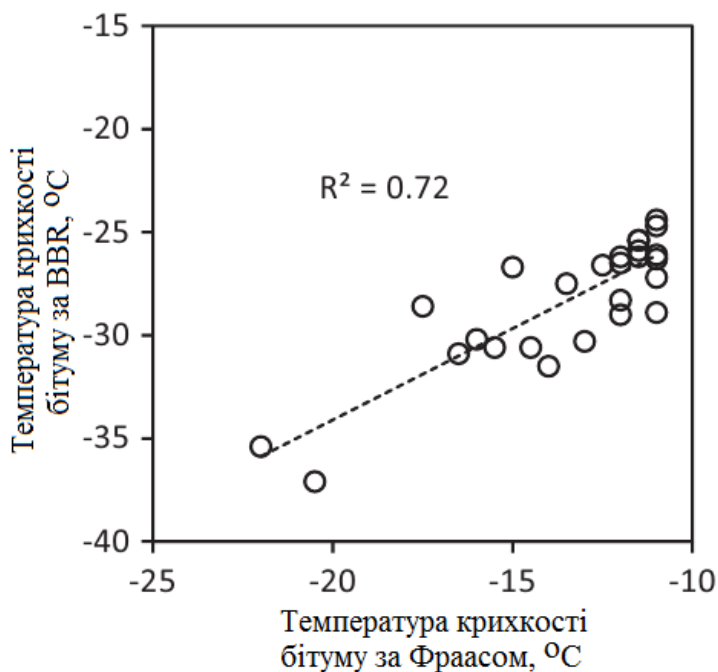


Рисунок 1.23 – Залежність між низькотемпературними характеристиками бітумів, визначених методом ВВР та Фраасу, [34]

Авторами роботи [50] встановлено для бітумів, що були зістарені методами RTFOT + PAV, наявність лінійної кореляції між жорсткістю, визначеною методом ВВР та температурою крихкості, визначеної методом Фраасу (коефіцієнт кореляції складає 0,75):

$$T_{кр} = 1,0181 \cdot T_{ВВР} + 21,851 \quad (1.6)$$

В [28] наведені дані, що підтверджують існування лінійної кореляції (рис. 1.24) між температурою, за якої модуль жорсткості, визначений методом ВВР, становить 300 МПа та температурою крихкості бітумів, визначених методом Фраасу. Залежність, що описується нижченаведеним рівнянням, характеризується коефіцієнтом кореляції 0,911:

$$T_{кр} = 1,38 \cdot T_{300MPa} + 10,49 \quad (1.7)$$

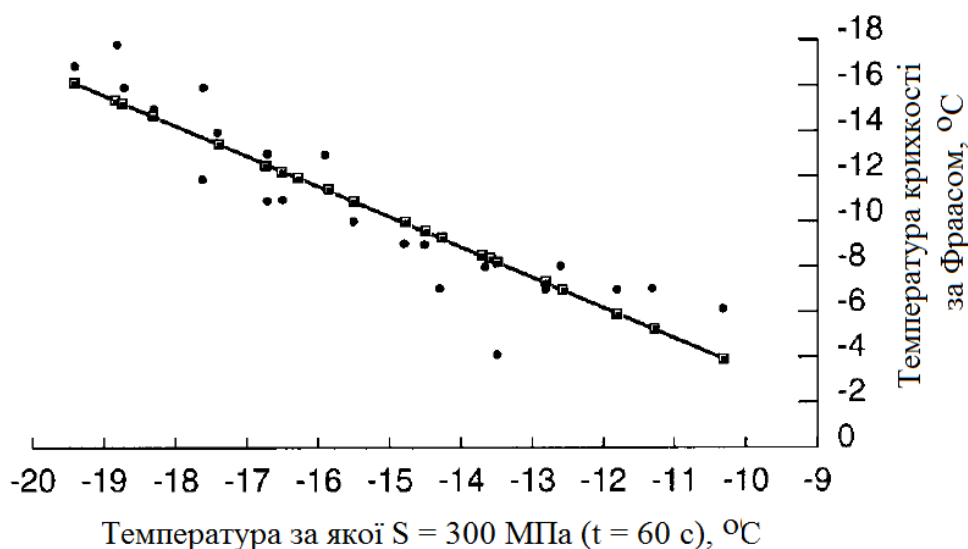


Рисунок 1.24 – Кореляція між значеннями температур крихкості бітумів, визначених методами ВВР та Фраасу, [28]

У відповідності з даними, представленими на рис. 1.24 температури крихкості бітумів, визначених методом ВВР є меншими відповідних температур, визначених методом Фраасу.

Також в роботі [28] представлені лінійні кореляційні залежності між температурою крихкості бітумів, визначених методом ВВР ( $S = 300$  МПа при часі навантаження 60 с) та:

- температурою розм'якшеності, визначеної методом «Кільця та Кулі» (коефіцієнт кореляції складає 0,709):

$$T_{KiK} = 2,06 \cdot T_{300MPa} + 90,54 \quad (1.8)$$

- кількістю асфальтенів в складі бітуму (коефіцієнт кореляції складає 0,432):

$$\text{Кількість асфальтенів, \%} = 0,68 \cdot T_{300\text{MPa}} + 25,78 \quad (1.9)$$

Крім цього, Migliori F. [28] встановив, що старіння за методом RTFOT надає незначний вплив на зміну показників крихкості бітумів, визначених методами VBR та Фраасу (не більше 1 °C).

Ще одне співвідношення між температурами крихкості бітумних в'язучих, визначених методами Фраасу та VBR представлені в роботі [51]. Лінійна залежність (рис. 1.25) між цими показниками характеризується коефіцієнтом кореляції 0,7. Згідно представлених даних з загальної залежності випадають два бітуми (позначені світлими квадратами), які характеризуються низькою температурною чутливістю, тобто бітуми, що відносяться до структурно-реологічного типу «гель». Таким чином, можна припустити, що для окислених бітумів, що в більшості своїй відносяться до структурно-реологічного типу «золь-гель» з наближенням до типу «гель» залежність між температурами крихкості, визначених методами VBR та Фраасом, буде низькою.

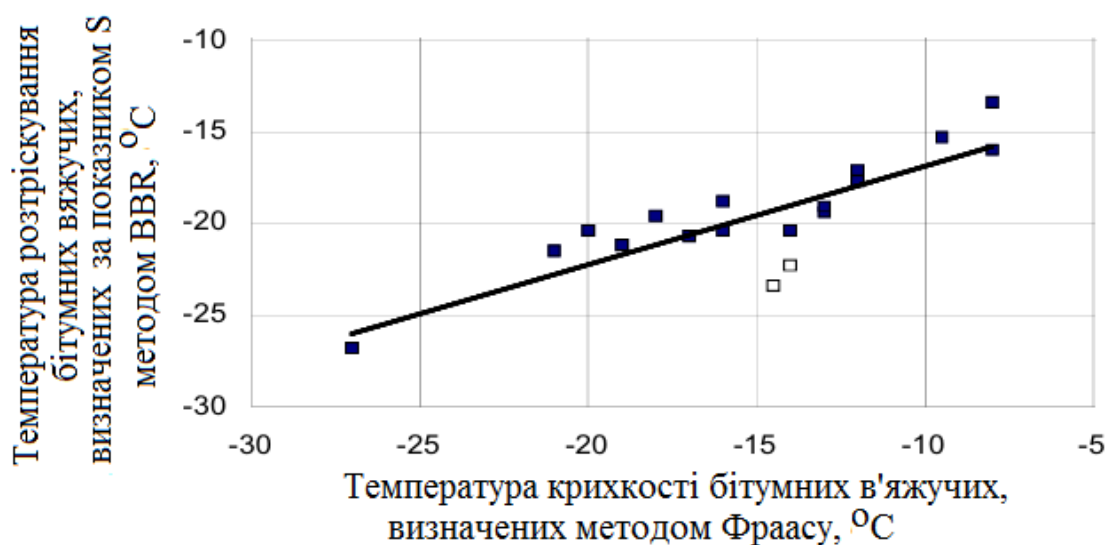


Рисунок 1.25 – Залежність між температурами крихкості бітумних в'язучих, визначених методами VBR та Фраасом, [51]

Ще одні кореляційні залежності між низькотемпературними характеристиками, встановленими методом VBR та значеннями температури крихкості бітумів, визначених методом Фраасу, представлені в [52]. Авторами встановлено, що кореляційні залежності безпосередньо між цими показниками характеризуються низькою кореляцією:

- кореляція з показником жорсткості характеризується коефіцієнтом детермінації, рівним 0,52:

$$T_{300MPa} = 0,5244 \cdot T_{фраас} - 13,524 \quad (1.10)$$

- кореляція з  $m$ -показником характеризується  $R^2 = 0,08$ :

$$T_m = 0,1585 \cdot T_{фраас} - 20,909 \quad (1.11)$$

В той же час, при врахуванні реологічного типу бітуму, шляхом використання його стандартних показників якості, спостерігається більш висока кореляційна залежність [52]:

$$T_{300MPa} = -7,333 - 0,137 \cdot P_{25} + 0,388 \cdot T_{фраас}, (R^2 = 0,885) \quad (1.12)$$

$$T_{300MPa} = -6,917 - 0,121 \cdot P_{25} + 0,074 \cdot T_{КиК}, (R^2 = 0,816) \quad (1.13)$$

Залежність між температурами розтріскування вихідних та зістарених бітумів, визначеними методом Фраасу та BBR ( $m = 0,3$ ) наведені на рис. 1.26.

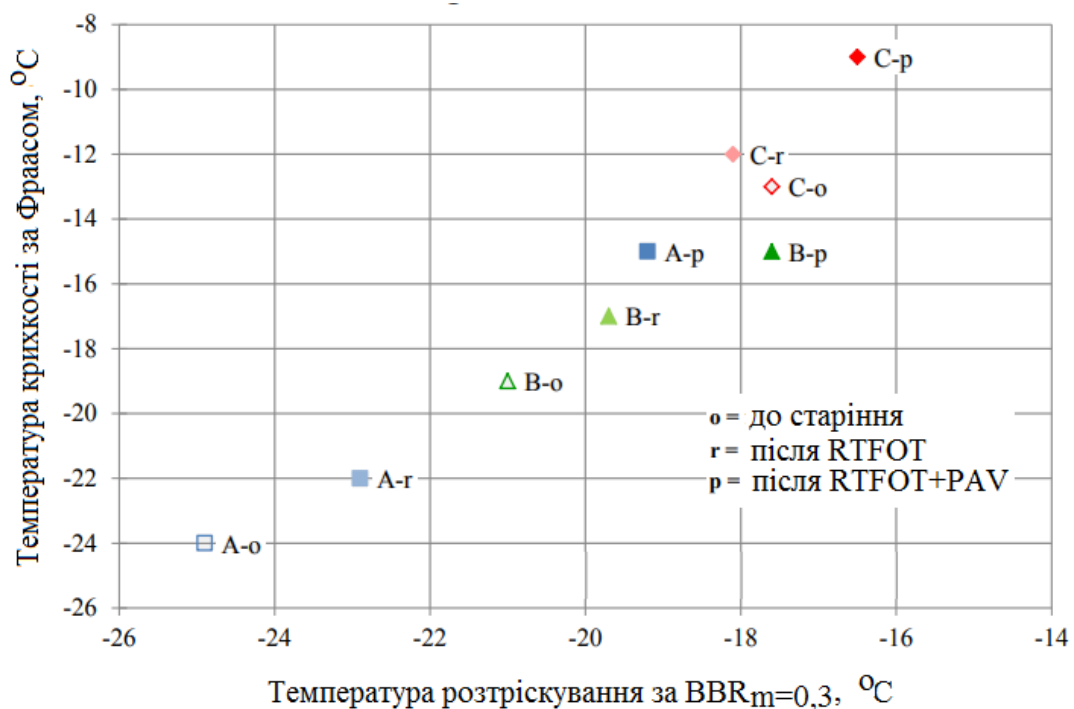


Рисунок 1.26 – Вплив старіння на залежність між температурами розтріскування бітумів, визначених за Фраасом та BBR ( $m = 0,3$ ), [54]

В роботі [54] авторами встановлено наявність тісної кореляційної залежності (коефіцієнт детермінації становить 0,91 – 0,913) між значеннями пенетрації, визначеної за температури 25 °С, бітумів виготовлених в Іраку, що відносяться до марок 40-50 та 60-70 та значеннями жорсткості, визначеними методом ВВР за температури 0 °С.

Не зважаючи на те, що ВВР в даний час є доволі поширеним методом оцінювання низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих та використовується в різних країнах світу, він має значні недоліки, до яких можна віднести [55]:

- значну кількість в'язучого, потрібного для проведення випробування – при масі бітуму для одного випробування в 15 г, загальна вага в'язучого для всього комплексу випробувань (2 – 3 повтори при 3 температурах) може досягати 135 г, що є значним обсягом, враховуючи, що випробуванню піддаються в'язучі, зістарені за методами RTFOT та PAV, або екстраговані з асфальтобетонного покриття;

- важку та трудомістку підготовку зразків для випробування, ретельність виконання якої позначається на точності отримуваних результатів (порушення цілісності грані при обрізці зайвого бітуму; викривлення граней зразка, виготовленого з в'язучого низької в'язкості та інше);

- використання етанолу в якості рідини, що використовується для охолодження зразків може впливати на хімічні та фізичні властивості бітумного в'язучого (згідно [56] при термостатуванні та випробуванні зразків-балок у етанолі значення жорсткості та  $m$ -значення на 10 – 30 % є меншими, ніж значення визначені у повітрі, а в середньому різниця може досягати 6 °С, при цьому зі зниженням температури випробування ця різниця збільшується (рис. 1.27));

- складність в забезпеченні однорідності температурного поля в обсязі рідинної бані;

- різний рівень стеричного твердіння бітумних в'язучих під час зберігання зразків перед випробуванням – у відповідності з [57] збільшення часу термостатування з 1 год до 3 год та навіть 72 год суттєві підвищило точність отримуваних результатів та їх відповідність значенням температур розтріскування асфальтобетонних покриттів на дорозі;

- можливість похибок за рахунок некоректного ручного попереднього навантаження зразка-балки.

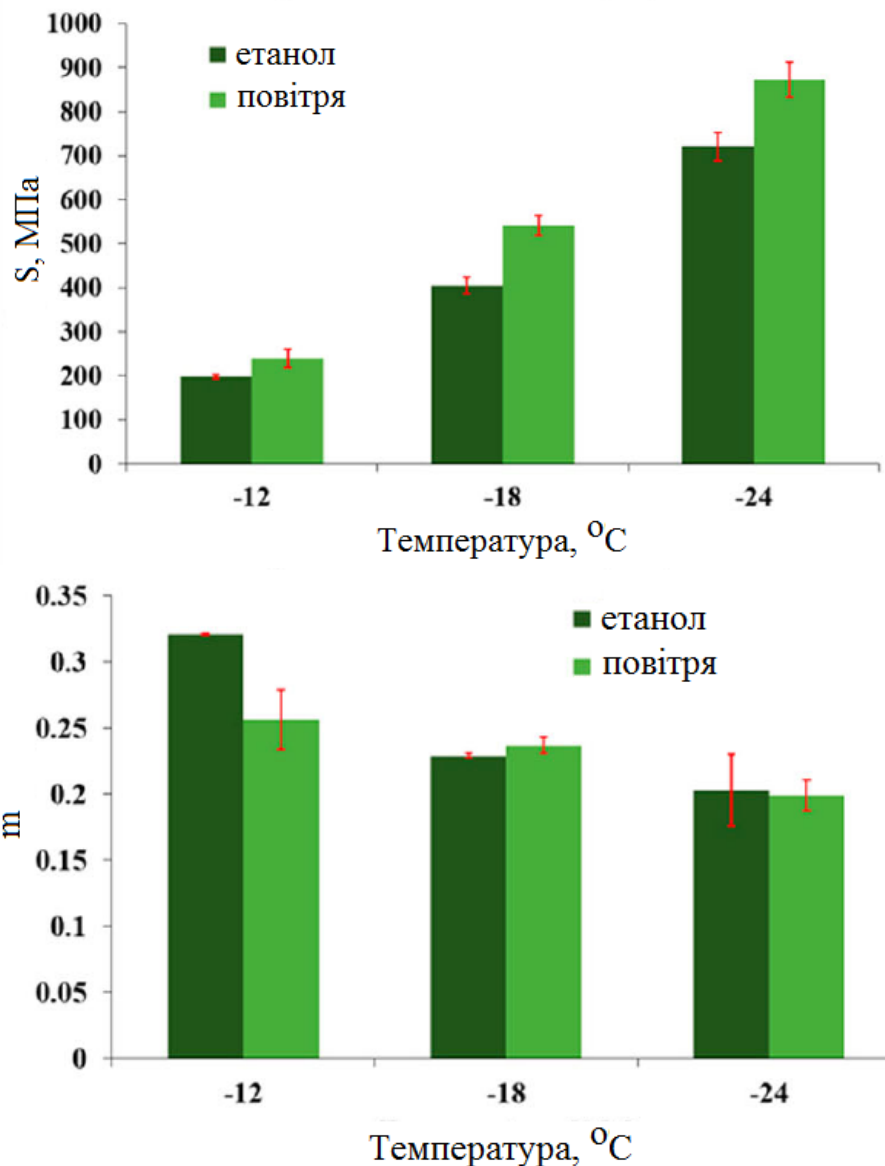


Рисунок 1.27 – Вплив середовища термостатування зразків на значення низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих, визначених методом ВВР (на прикладі бітуму марки 50/70), [56]

Для запобігання вище перелічених недоліків здійснюються вдосконалення приладів та методики визначення низькотемпературних властивостей методом ВВР. Так, наприклад, німецькі дослідники [58] запропонували змінити час, за яким встановлюються значення жорсткості та показника  $m$  з 60 с на 120 с. Причиною цього є те, що при часі навантаження 60 с різноманітні в'язучі знаходяться в різному стані. Порівнюючи результати випробування 19 різноманітних бітумів та бітумних в'язучих автори встановили, що для всіх в'язучих вихід на ділянку лінійної в'язкісної поведінки спостерігається після не менш ніж 120 с навантаження (рис. 1.28).

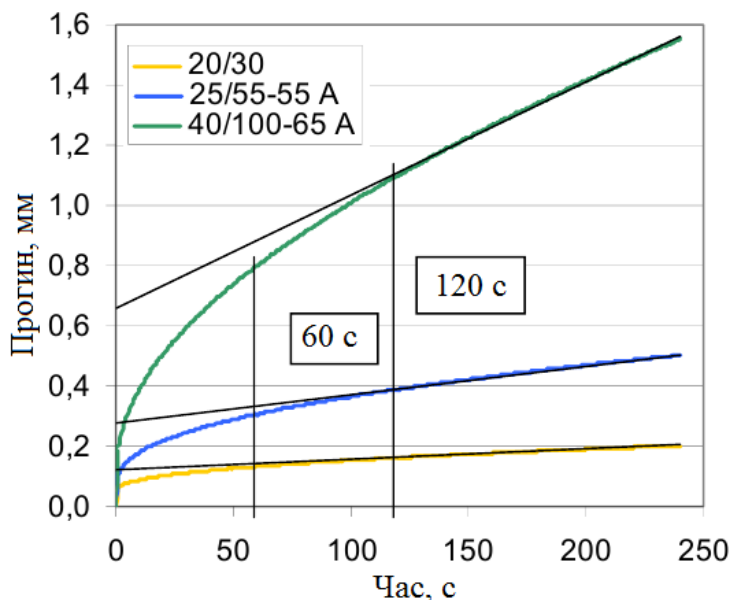


Рисунок 1.28 – Типова залежність деформації від часу прикладання навантаження під час випробування методом BBR, [58]

Також німецькими дослідниками запропоновано модифікацію методики визначення низькотемпературних властивостей в'язучих методом BBR за рахунок використання динамічного зсувного реометру MCR 702 MultiDrive, що зазвичай, використовується для встановлення комплексного модулю зсуву та фазового кута методом DSR (зовнішній вигляд пристрою наведено на рис. 1.29) [55]. За рахунок того, що даний прилад оснащений лінійним приводом з трьох точковою системою вимірювання прогину зразка довжиною 50 мм, є можливість здійснювати випробування бітумних в'язучих на вигин. Термостатування зразків здійснюється за допомогою повітряної системи охолодження (використовується інертний газ або повітря), обладнаною конвекційною піччю, що забезпечує проведення випробувань в діапазоні від мінус 20 °C до 180 °C з похибкою, що не перевищує  $\pm 0,19$  °C.

Для випробування приймаються зразки довжиною 50 мм, шириною 5 мм та висотою 3 мм (прийняті розміри мають такі ж співвідношення, як і в стандартизованих зразках-балках, що використовуються в методі BBR), операції з виготовлення яких наведені на рис. 1.30.

За рахунок використання силіконової форми спрощується виготовлення зразків та забезпечується їх цілісність при вийманні з форми. Обладнання пристрою забезпечує автоматичне попереднє навантаження зразка, завдяки цьому запобігають можливим помилкам за рахунок ручного навантаження, що здійснюється зазвичай при випробуванні стандартизованою методикою.

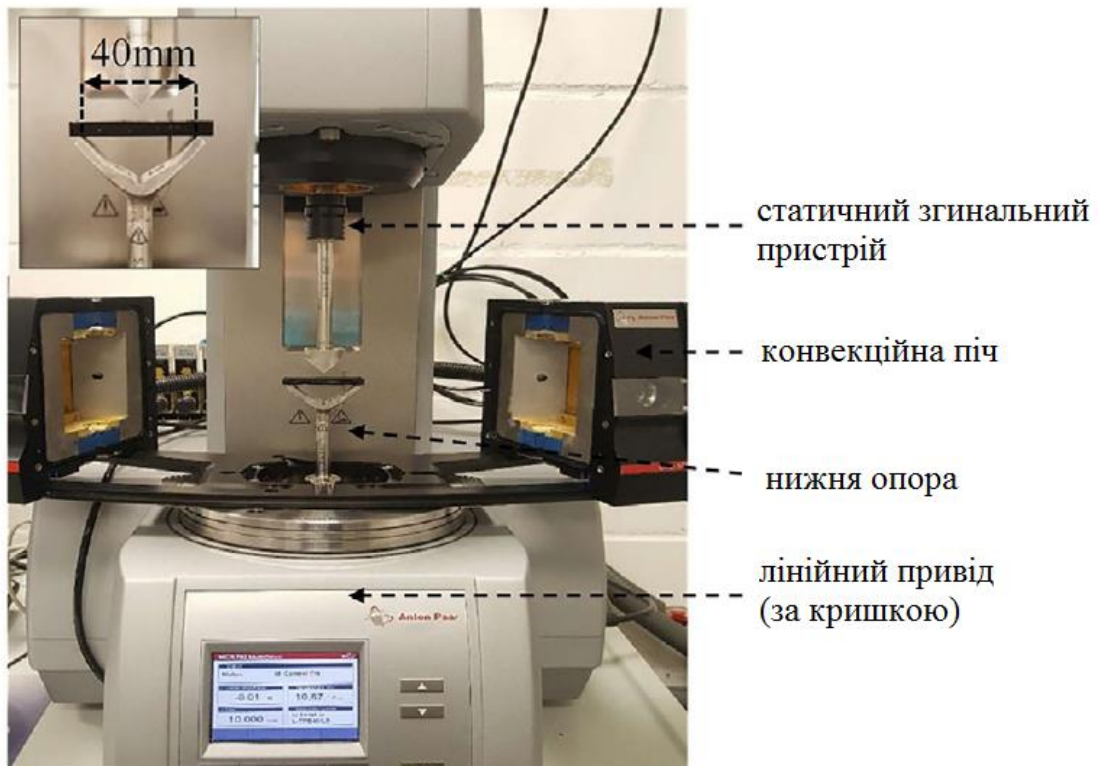


Рисунок 1.29 – Зовнішній вигляд реометру для випробування бітумних в'язучих методом VBR, [55]



а – заливка бітуму в силіконову форми, в – зрізання зайвого в'язучого, с – охолодження зразка перед вийманням з форми

Рисунок 1.30 – Операції з виготовлення зразків-балок, [55]

Випробування зразка здійснюється шляхом прикладання к ньому навантаження в розмірі 220 мН впродовж 240 с зі здійсненням фіксації деформації зразка-балки кожні 0,25 с. Схема навантаження запропонованим методом, порівняно зі стандартною методикою випробування VBR, наведена на рис. 1.31.

За даними розробників [55] запропонована методика забезпечує більш високу точність визначення жорсткості та  $m$ -значення бітумних в'язучих – коефіцієнт варіації знаходиться в межах 8 – 10 %.

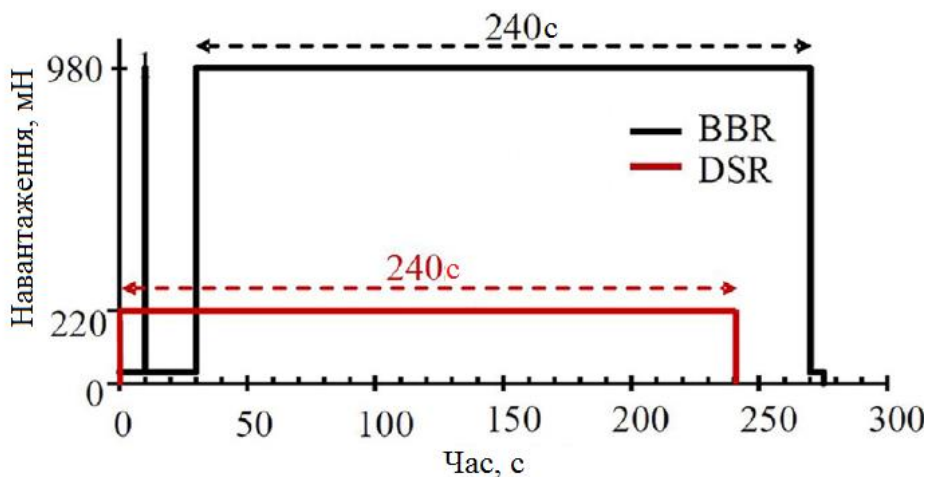


Рисунок 1.31 – Схема прикладання навантаження на зразок під час випробування за стандартною (BBR) та зміненою (DSR) методиками, [55]

На основі отриманих результатів авторами встановлено існування тісної кореляції між значеннями жорсткості та  $m$ -значення, встановленими згідно стандартизованого обладнання у відповідності з прийнятою методикою визначення BBR та на обладнанні, призначеному для визначення показників бітумних в'язучих методом DSR, за модифікованою методикою (коефіцієнт лінійної регресії становить 0,97 для значення жорсткості та  $m$ -значення).

Незважаючи на всі особливості та недоліки методу BBR, згідно з даними, наведеними в [60] та встановленими кореляціями між значеннями температур крихкості бітумів та розтріскування асфальтобетонів, метод BBR наданий час є найкращим для оцінювання низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих.

### 1.3.2 Випробування бітумів методом випробування на прямий розтяг

Виходячи з того, що основним фактором низькотемпературного руйнування асфальтобетонів є розтягуючі напруження, які виникають в матеріалі в результаті зниження температури, найбільш перспективним методом визначення низькотемпературних властивостей бітумів, що був розроблений в ході виконання програми SHRP в США є метод випробування на прямий розтяг [12, 59], особливо у випадку оцінювання якості бітумів, модифікованих полімерами.

Принцип випробування бітумів методом прямого розтягування (Direct Tension Tester (DTT) test) полягає у розтягуванні зразка у формі

«собачої кістки» (рис. 1.32) з постійною швидкістю 1 мм/хв до тих пір, поки зразок не зруйнується. Випробування здійснюється на зістареному чи не зістареному бітумному в'язучому в діапазоні температур від мінус 36 °С до 6 °С. При температурі випробування бітумне в'язуче повинно бути в крихкому або крихко-в'язкому стані, при цьому деформація руйнування не повинна перевищувати 10 % [60].

Для виготовлення зразків, що випробують методом ДТТ, використовують силіконові форми або прес-форми [61]. Розміри зразка для випробування наведені на рис. 1.32. Вставки, за які здійснюється кріплення зразка в універсальній навантажувальній машині, виготовляються з пластика, що має подібний до бітуму коефіцієнт температурного розширення (наприклад, поліметилметакрилат).

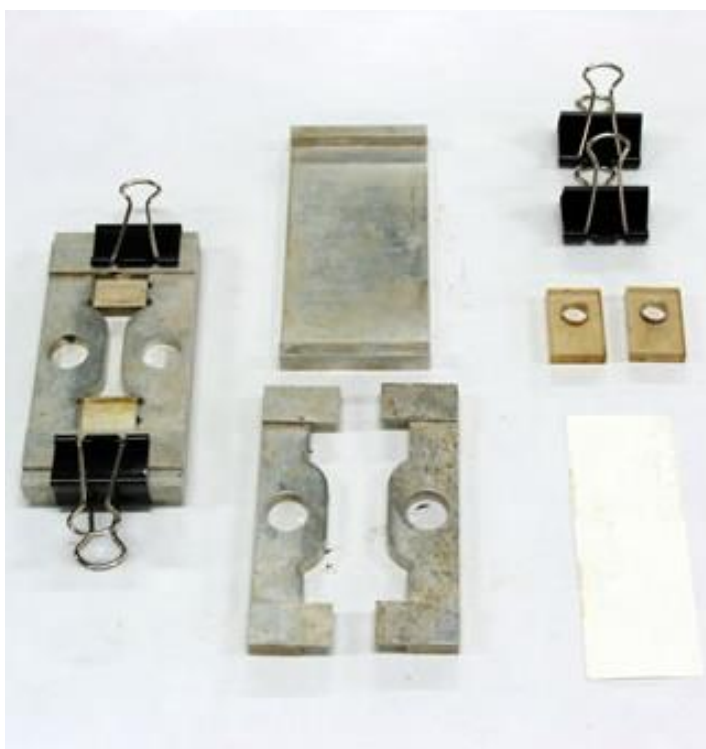
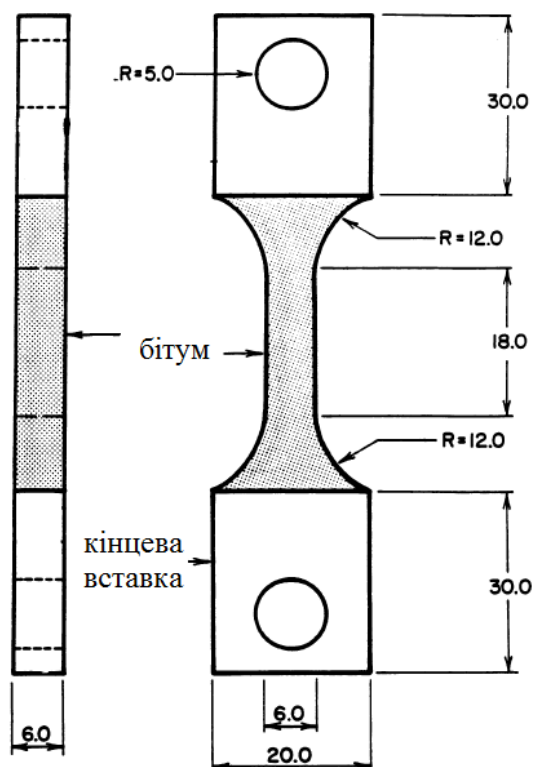


Рисунок 1.32 – Форма та розміри зразка для випробування методом ДТТ, [60, 62], а також прес-форма, [61]

Розтяг зразка здійснюється за допомогою універсальної навантажувальної машини, яка забезпечує зусилля не менш 500 Н та швидкість розтягу 1 мм/хв, а також обладнана електронною системою вимірювання зусилля з точністю  $\pm 0,1$  Н. Для запобігання передчасного руйнування використовується система кріплення зразків до настановних штоків, за допомогою яких до зразка прикладається розтягуюче

зусилля. До складу системи кріплення входять шарові шарніри, що запобігають вигинання зразка.

Для фіксування зміни довжини зразка при випробуванні використовується лазерний мікрометр. Охолодження та саме випробування здійснюється в холодильній установці, яка забезпечує підтримання необхідної температури випробування з точністю до 0,1 °С. Загальний час випробування, що включає підготовку зразка та його термостатування становить приблизно 4 год.

Під час випробування фіксується подовження зразка, на основі якого розраховується деформація руйнування та напруження зразка при руйнуванні (рис. 1.33), що дає можливість розраховувати енергію руйнування та модуль пружності при розтягу.

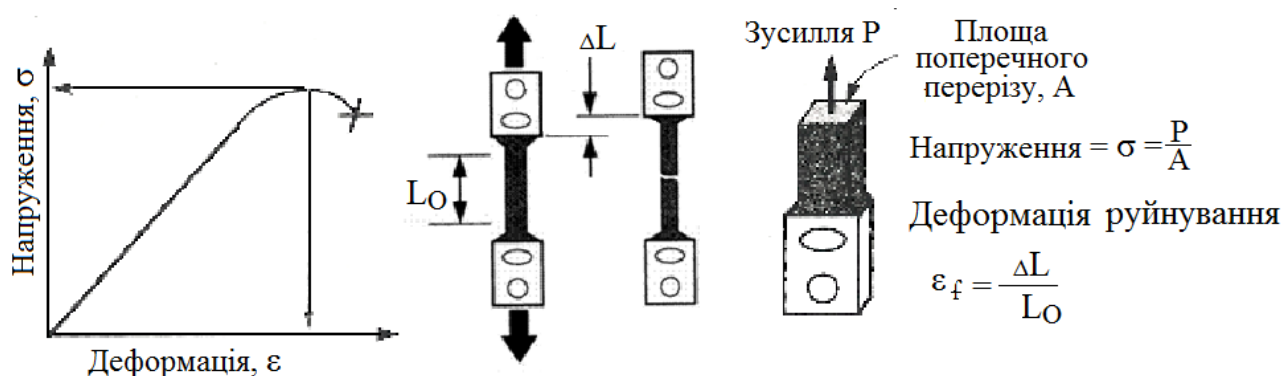


Рисунок 1.33 – Зовнішній вигляд залежності та формули для розрахунку, [63]

Результати вважаються достовірними якщо розрив зразка відбувся на ділянці ефективної довжини зразка, де площа поперечного перерізу є постійною.

Метод DTT є стандартизованим в США - AASHTO T 314 «Standard Method of Test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)» та ASTM-D6723 «Standard Test Method for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)».

У відповідності з вимогами до нормування результатів випробування методом DTT, наведених в [40], деформації при руйнуванні під час випробування за температури, що на 10 °С перевищує нижню температуру згідно PG, повинні бути більшими 1 % (у випадку коли деформація менше 1 % в'яжуче вважається крихким). Випробуванню на

прямий розтяг не піддають бітумні в'язучі, для яких жорсткість повзучості за мінімальною температурою по PG, є меншою ніж  $3 \times 10^5$  кПа. Розробниками показника передбачалось, що випробуванню на прямий розтяг будуть піддаватися переважно модифіковані бітумні в'язучі, які характеризуються високою жорсткістю за низької температури, але мають значну деформацію руйнування (рис. 1.34).

Метод є дуже чутливим до дотримання умов виготовлення зразка та підготовки його до випробування [64 – 66]. Виходячи з цього для методу є характерними доволі низькі значення точності – згідно [67] коефіцієнт варіації при визначенні руйнівного напруження становить 5 – 10 %, а при визначенні деформації руйнування – 20 – 25 %. Згідно з [63] результати випробування залежать навіть від прийнятого охолоджуючого середовища, в якості якого може застосовуватися повітря, ацетат калію чи етанол. В [67] наведені дані, що свідчать про вплив попереднього нагріву в'язучих на збіжність та результати визначення руйнівного напруження. Також до недоліків методу DTT може бути віднесено відносно висока вартість обладнання, яка, втім згідно [53], знаходиться на рівні вартості обладнання для випробування в'язучих методом Фраасу, та відносно велика кількість в'язучого, необхідного для проведення випробування [68].

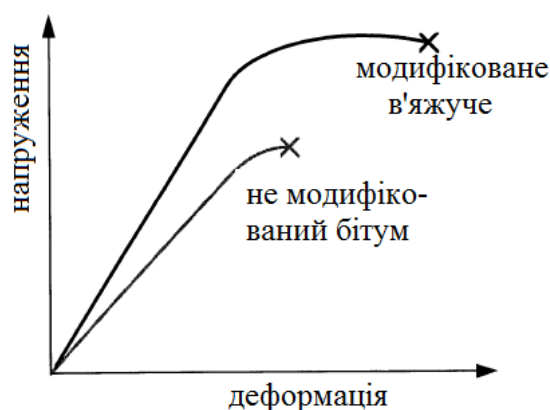


Рисунок 1.34 – Типові залежності для не модифікованих та модифікованих бітумних в'язучих, [40]

В [51] представлені дані, що ілюструють наявність лінійної кореляційної залежності між температурою, за якою жорсткість в'язучих, визначених методом BBR становить 300 МПа, та температурою за якої деформація, визначена методом DTT, складає 1 % (коефіцієнт детермінації 0,91):

$$T_{DTT} = 3,3 \cdot T_{300MPa} + 48 \quad (1.14)$$

Згідно з [12] умови визначення низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих методами ДТТ та Фраасу є доволі близькі – швидкості деформування зразків відрізняються лише в 3,4 рази, а напруження в 2,3 рази. Мабуть це є причиною доволі високої кореляції результатів випробування немодифікованих бітумів методами ДТТ та Фраасу – коефіцієнт кореляції дорівнює 0,86. В той же час для модифікованих полімерами в'язучих коефіцієнт кореляції складає лише 0,12. Виходячи з коефіцієнтів кореляції для не модифікованих бітумів автори роботи [12] пропонували використовувати у виробничих умовах для визначення низькотемпературних характеристик метод ДТТ замість методу Фраасу.

Ще одне дослідження, направлене на співставлення результатів визначення низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих, отриманих методами ВВР та ДТТ представлено в [47]. Використовуючи дані випробувань бітумів, що застосовувались для влаштування асфальтобетонних покриттів на різних дорогах США з 1993 р. по 1999 р. авторам вдалось встановити кореляційні залежності, що характеризуються коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,82 \dots 0,86$ :

- для не модифікованих та модифікованих полімерами в'язучих:

$$T_{DTT} = -3,333 \cdot T_{BBR-S(t)} \quad (1.15)$$

- для не модифікованих бітумів:

$$T_{DTT} = -2,359 + 0,703 \cdot T_{BBR-m} \quad (1.16)$$

- для модифікованих полімерами бітумних в'язучих:

$$T_{DTT} = -5,984 + 0,703 \cdot T_{BBR-m} \quad (1.17)$$

Також через подібність схеми випробування результати визначення низькотемпературних властивостей бітумів за методом ДТТ відповідають результатам встановлення температури руйнування асфальтобетонів, визначених методом TSRST – коефіцієнт кореляції дорівнює 0,99 [63].

Перевагою методу DTT є чутливість до наявності модифікатору у складі бітумного в'язучого на що не здатні ні метод Фраасу, а ні метод VBR [69].

На стадії розробки методу DTT передбачалось що це буде самостійне випробування, результати якого дозволять оцінювати низькотемпературні характеристики доволі жорстких за низьких температур бітумних в'язучих, зокрема модифікованих полімерами (жорсткість при повзучості, визначена методом VBR, може знаходитися в межах від 300 МПа до 600 МПа, але повинна дотримуватися умова щодо того, що мінімальне значення  $m = 0,3$ ). Саме тому передбачалось, що випробування бітумів методом DTT буде здійснюватися після випробування методом VBR.

В 2000 р. було запропоновано методику визначення низькотемпературного руйнування бітуму на основі механістичної моделі, в якій використовуються результати випробувань в'язучого за методами DTT та VBR [70]. На основі реологічних даних, отриманих при випробуванні методом VBR, прогнозуються термічні напруження в'язучого, а на основі результатів руйнування за методом DTT визначаються напруження руйнування. Накладаючи на один графік температурні залежності термічних напружень та напружень руйнування графічно визначають критичну температуру низькотемпературного руйнування бітумного в'язучого (рис. 1.35). При виробничих дослідженнях є достатнім випробування в'язучого за методом DTT за двома температурами.

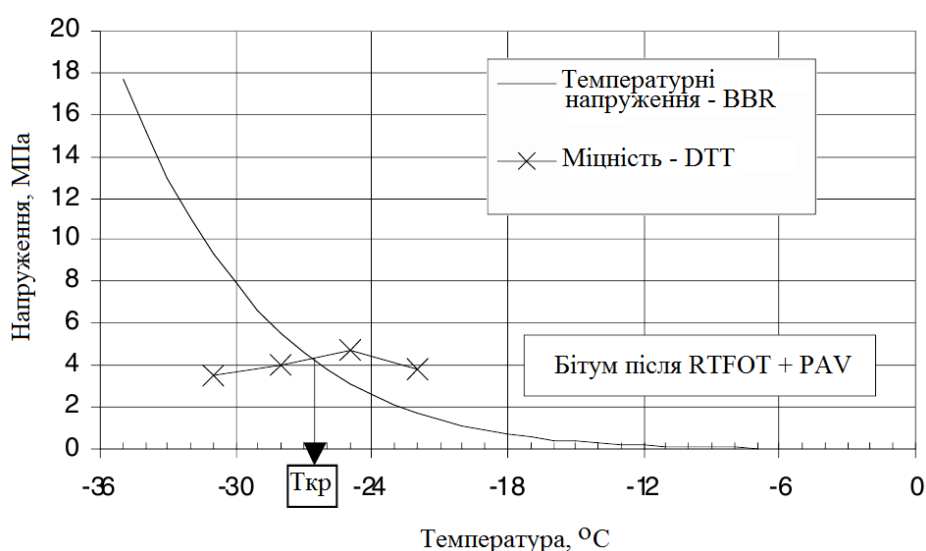


Рисунок 1.35 – Типова схема визначення критичної температури низькотемпературного руйнування в'язучого, [70]

Виконана авторами роботи [70] виробнича перевірка підтвердила подібність результатів визначення температури розтріскування бітуму за запропонованою методикою температурам низькотемпературного руйнування асфальтобетонного покриття на дорозі. У відповідності з [66] за допомогою цієї методики є можливість більш точно оцінювати низькотемпературне руйнування бітумів, модифікованих полімером, окислених бітумів та в'язучих з підвищеною кількістю парафіну. Встановлено, що для бітумів, модифікованих полімерами, зокрема полімером СБС, результати критичної температури, що визначені на основі комплексного випробування методами ВВР та DDT, є на 3 – 6 °С нижчими, ніж температури, встановленої методом ВВР. В той же час в роботі [71] наведені порівняльні дані випробування низькотемпературних характеристик бітумів, модифікованих різноманітними полімерами, визначених при випробуванні методом ВВР, DDT, та спільно ВВР і DDT, які свідчать про несуттєву різницю між отриманими температурами (табл. 1.4). Тим не менше автори стверджують, що методика визначення низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих, основана на спільному випробуванні методами DDT та ВВР, дозволяє відрізнити від не модифікованих бітумів в'язучі, модифіковані навіть низькою концентрацією полімеру, а лабораторні дані випробувань мають добру кореляцію з температурами розтріскування асфальтобетонних покриттів на дорозі.

Таблиця 1.4 – Визначення температур руйнування бітумних в'язучих за різними методами, [71]

Метод визначення	Температури руйнування для бітуму								
	бі-туму	з СБС				3 % EVA	з поліолефіном		
		2,5 %	3 %	5 %	7,5 %		2 %	4 %	8 %
ВВР (S = 300 МПа)	-28,6	-28,8	-28,7	-29,3	-33,6	-29,3	-29,3	-28,6	-26,8
ВВР (m = 0,3)	-28,2	-28,4	-29,1	-28,3	-29,6	-30,4	-28,2	-26,2	-21,7
DDT (ε = 1 %)	-26,7	-29,4	-30,5	-32,5	-35,4	-29,6	-29,7	-28,9	-24,8
ВВР + DDT	-26,5	-28,0	-29,3	-28,8	-32,4	-29,2	-28,1	-26,4	-25,2

Випробування методом DDT не обмежується бітумними в'язучими. Так, наприклад, в [72, 73] пропонується використовувати це випробування для оцінки низькотемпературних характеристик герметиків, що використовуються для асфальтобетонних покриттів та їх класифікації.

### 1.3.3 Дослідження в'язучих за допомогою динамічного зсувного реометру

Не зважаючи на те, що для випробування виключно низькотемпературних характеристик в'язучих в системі Superave використовуються два методи – BBR та DTT, недоліки, притаманні цим методам (значна кількість в'язучого, яка є потрібною для проведення випробування; відносно велика тривалість; підготовка зразків при підвищених температурах, що є неможливим для випробування ряду в'язучих, наприклад в'язучих, виділених з емульсії, рідких бітумів, бітумних герметиків для заливки тріщин, тощо), підштовхнули дослідників до розробки методу, який би дозволяв проводити швидке випробування на малій кількості в'язучого [74]. Таким став модифікований метод DSR, в якому замість випробування металевих пластин діаметром 8 мм та 25 мм, було запропоновано використовувати пластини діаметром 4 мм (зазор для зразка в'язучого прийнято в 1,75 мм). Виходячи з цього метод отримав назву «DSR 4 мм» (ця назва залишилась за методом навіть після того, як було встановлено, що випробування може здійснюватися й на пластинах діаметром 8 мм та 25 мм).

Призначенням динамічного зсувного реометру (DSR – dynamic shear rheometer) в системі Superave є оцінювання впливу на в'язучі одночасної дії навантаження, температури та часу. За допомогою динамічного зсувного реометру є можливим вимірювати такі реологічні характеристики, як комплексний модуль зсуву та фазовий кут в інтервалі нормальних та підвищених температур.

Принцип дії приладу у випадку вимірювання низькотемпературних властивостей полягає в прикладанні до в'язучого, яке розміщується між двома круглими металевими пластинами, одна з яких є рухомою, а друга – нерухомою, поворотно-коливального зсуву з постійною частотою (1,59 Гц або 10 радіан/с) (рис. 1.36).

Комплексний модуль зсуву  $G^*$  є характеристикою повного опору бітумного в'язучого деформації під впливом періодичного зсувного напруження та складається з двох складових:

- модуля пружності ( $G'$ ), який характеризує відновлювану частину деформації,
- модуля втрат ( $G''$ ), що характеризує не відновлювану частину деформації

Фазовий кут визначає співвідношення між пружної та в'язкої складовими.

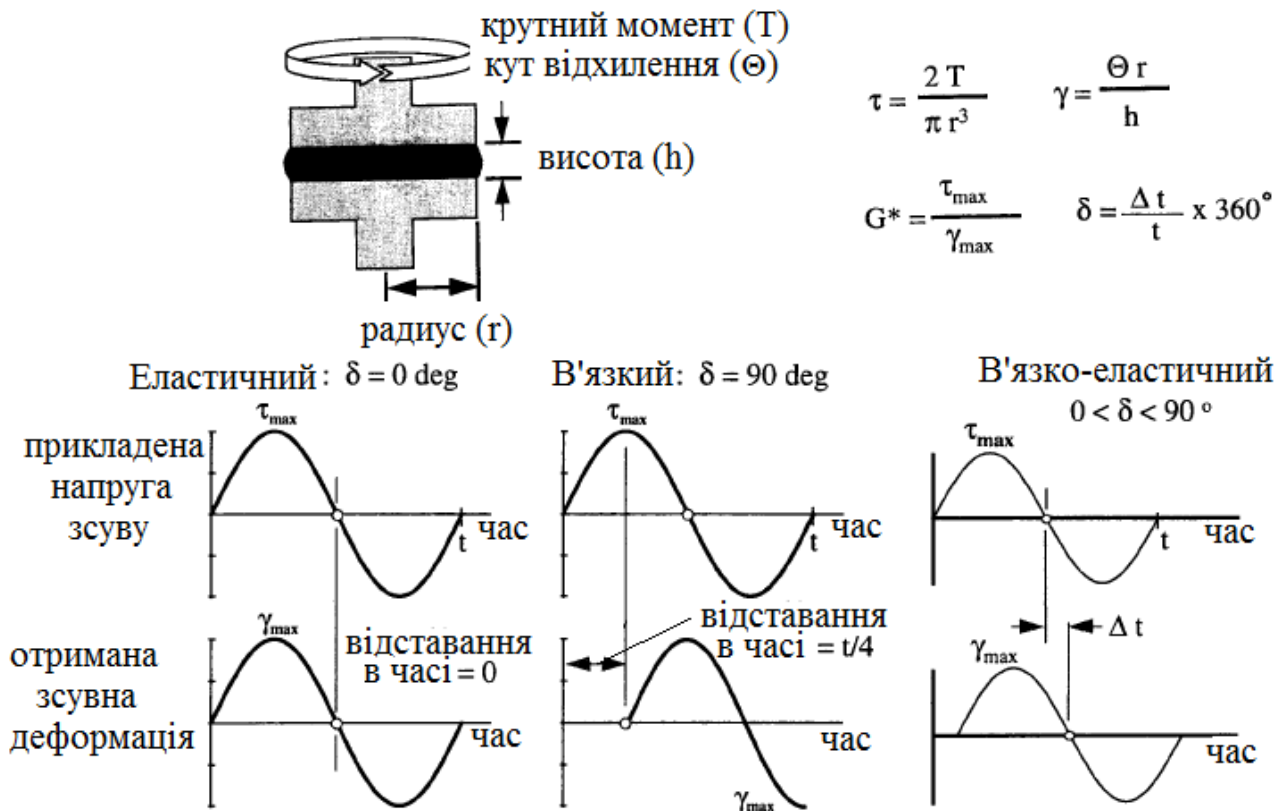


Рисунок 1.36 – Принцип випробування методом DSR, [40]

Потенційно динамічний зсувний реометр може використовуватися для випробування бітумних в'язких в широкому температурному діапазоні, що включає як високі, так і низькі температури. Під час розробки системи Supergravel виконувались пошукові роботи по використанню методу DSR для оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів, однак було встановлено, що за температур, які є нижчими ніж 5 °C спостерігаються значні похибки у визначенні вимірюваних показників [75]. Причиною цього було те, що за низьких від'ємних температур податливість в'язучого суттєво зростала та навіть могла наближатися до значень податливості випробувальних елементів приладу. Це приводило до того, що повинні були враховуватися напруження елементів приладу (під час випробування за помірних чи високих температур за рахунок значної різниці між напруженнями бітуму та елементів приладу, останніми можливо було знехтувати) [74]:

$$\gamma_{\text{виміряна}} = \gamma_{\text{зразка}} + \gamma_{\text{приладу}} = \frac{\tau}{G_{\text{зразка}}} + \frac{\tau}{G_{\text{приладу}}}, \quad (1.18)$$

де  $G$  – модуль,

$\tau$  – напруження,  
 $\gamma$  – деформація.

Використання методу DSR для оцінювання низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих стало можливим завдяки вирішенню двох задач:

- в [76] було запропоновано підхід до корегування значень податливості матеріалів при випробуваннях на зсувних реометрах та внесені певні зміни в програмне забезпечення приладів, які дозволяли вносити поправки в налаштування в режимі реального часу;

- групою науковців з Western Research Institute (США) вдалось встановити кореляційну залежність між даними релаксації напруження, встановленими методом DSR при 2 год прикладання навантаження та значеннями жорсткості повзучості, визначеними методом BBR при 60 с прикладання навантаження за температурою випробування, що є на 10 °С нижчою (рис. 1.37) [74].

У відповідності з встановленою кореляцією критеріями оцінювання низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих за допомогою методу DSR є: модуль релаксації напруження при зсуві  $G(t) \leq 160$  МПа, швидкість релаксації  $m_r \geq 0,26$ .

В подальшому цей підхід було дещо переглянуто та встановлено кореляцію між значеннями, отриманими методами DSR та BBR за однієї температури:

$$S(60\text{ c}) = 2,01 \cdot G(60\text{ c}) + 12,72, \quad (R^2 = 0,95), \quad (1.19)$$

$$m_c(60\text{ c}) = 0,72 \cdot m_r(60\text{ c}) - 0,10, \quad (R^2 = 0,86). \quad (1.20)$$

За рахунок встановлення нових залежностей змінилися й критерії низькотемпературних характеристик:  $G(t) \leq 143$  МПа,  $m_r \geq 0,28$ .

В запропонованому методі «DSR 4 мм» для випробування застосовується всього 25 мг в'язучого замість 15 г, що використовуються для приготування зразків-балок в методі BBR. Крім цього під час виготовлення зразків відсутня необхідність у нагрівання в'язучого до високих технологічних температур. Випробування низькотемпературних властивостей бітумів може здійснюватися до температури мінус 40 °С [68, 74].

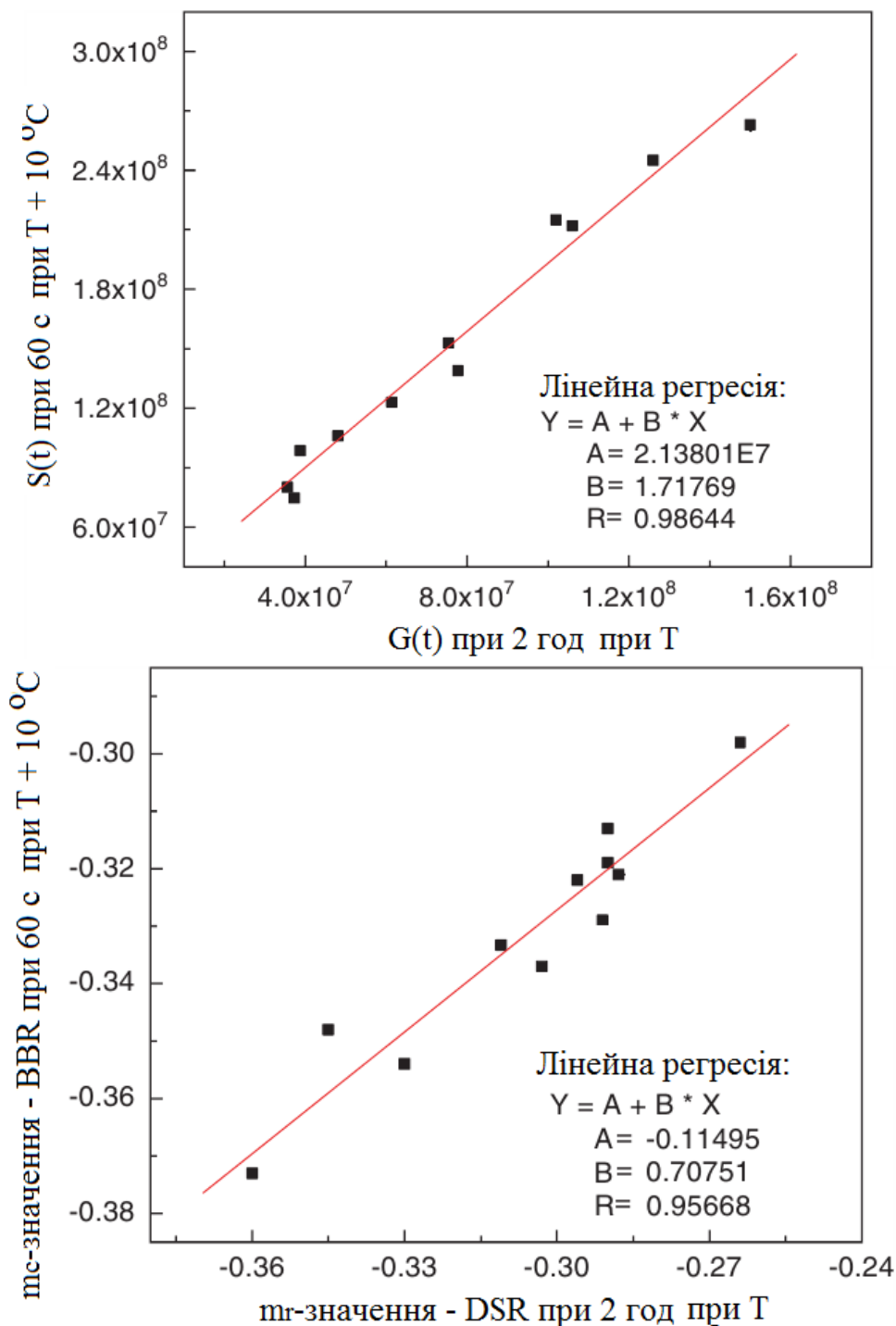


Рисунок 1.37 – Кореляція між низькотемпературними значеннями бітумних в’язучих, визначених методами DSR та BBR, [74]

Виготовлення зразків повністю відповідає методиці, прийнятій для проведення випробувань у відповідності з нормованою методикою, наведеною наприклад в EN 14770 [77] (рис. 1.38). Зразки нагріваються до температури 50 – 70 °С та заливають у спеціальні форми, виготовлені з матеріалів, до яких відсутнє прилипання в’язучого, наприклад, силікон. Після остигання в’язучого зразки зрізають до потрібної

висоти, розміщують на реометрі між пластинами та термостатують за температурою випробування. В залежності від конструкції динамічного реометру можливими є наступні випробування:

- до зразка прикладають поворотно-коливальний зсув до відомого напруження та вимірюють деформацію в'язучого, яка є реакцією на напруження;

- до зразка застосовують поворотно-коливальний зсув до відомої деформації та вимірюють напруження зсуву.



Рисунок 1.38 – Підготовка зразків за методом «DSR 4 мм», [78]

Діапазон та кількість частот за якими здійснюється випробування приймається в залежності від температури випробування та в'язучого. Після проведення випробування за однієї температури здійснюється перехід на наступну температуру та повторюють випробування. Керування параметрами та реєстрація отриманих результатів здійснюється за допомогою комп'ютерної програми.

На відміну від широко поширених, динамічні зсувні реометри, що використовуються для оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів додатково оснащуються агрегатом з рідким азотом, який застосовується для термостатування зразків та проведення випробувань в діапазоні температур до мінус 40 °С [74].

Визначення  $S$  та  $m$ -значення за допомогою методу DSR здійснюється за наступною схемою:

- на основі отриманих даних визначення модуля пружності за різними частотами за температур  $PG + 10\text{ °C}$  та  $PG + 20\text{ °C}$  будують частотну залежність (рис. 1.39);

- наступним шагом за допомогою макросу програми Excel здійснюють визначення коефіцієнту горизонтального зсуву ( $aT$ ) згідно рівняння Вільямса-Ландела-Ферри для переміщення розгортки частоти

PG + 20 °C таким чином, щоб вона перекрила розгортку частоти PG + 10 °C, та будується графік модуля як функції помножених частот:

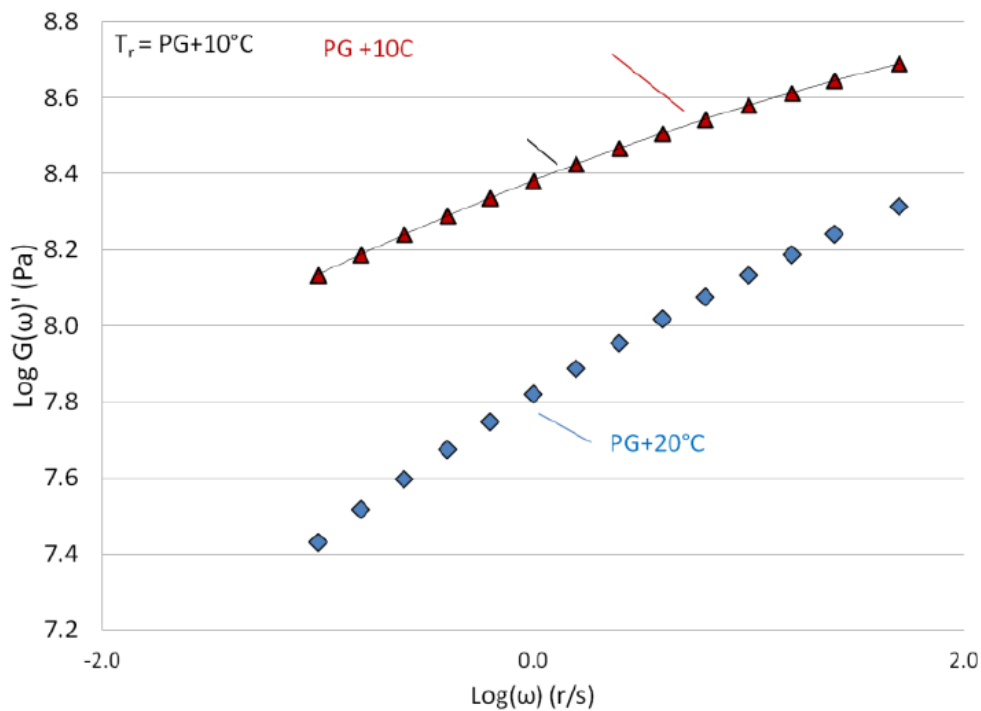


Рисунок 1.39 – Частотна залежність модуля пружності за методом DSR, [75]

$$\log a_T(T) = -\frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)}, \quad (1.21)$$

де  $T_0$  – еталона температура,  
 $c_1$  – константа,  
 $c_2$  – температурна константа;

- визначають модуль релаксації  $G(t)$  шляхом взаємоперетворення модуля пружності за рівнянням:

$$G(t) \approx G'(\omega)_{|\omega=2/\pi t}, \quad (1.22)$$

- за отриманою залежністю визначають  $m$ -значення шляхом отримання першої похідної поліному 2-го порядку (рис. 1.40).

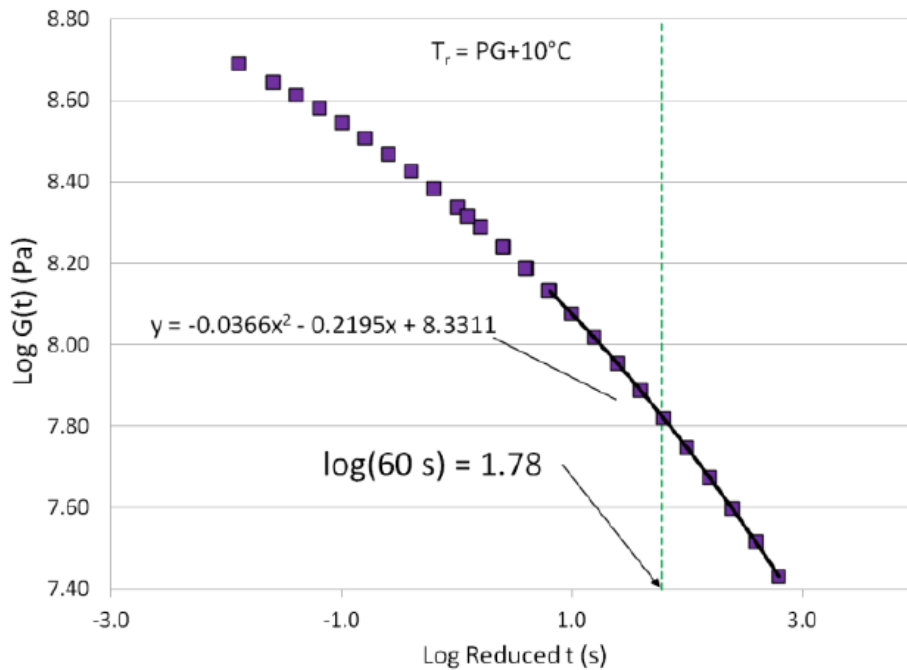


Рисунок 1.40 – Розрахунок жорсткості та  $m$ -значення, [75]

У відповідності з [8] до переваг методу «DSR 4 мм» може бути віднесено: мала кількість в'язучого, що є потрібною для проведення випробування; для підготовки зразка не потрібно нагрівати в'язуче до технологічних температур (вище 135 °C); можливість випробувати як не модифіковані, так і модифіковані в'язучі; прийнятна збіжність та відтворюваність отримуваних результатів. В той же час недоліками методу є: потреба в дотриманні високої точності під час підготовки зразків до випробування та необхідність у висококваліфікованих спеціалістах для проведення обробки отриманих результатів.

Згідно [78] низькотемпературні характеристики бітумних в'язучих, отримані методом «DSR 4 мм» є дещо вищими за відповідні значення, отримані методом VBR.

У відповідності з експериментальними даними, наведеними в [22], існує тісний зв'язок між значеннями температури крихкості, отриманими методом Фраасу та методом DSR (рис. 1.41) – різниця між цими значеннями для випробуваних бітумів знаходиться в межах 1 – 3 °C. На основі отриманих результатів автори роблять висновок про взаємозамінність цих методів для оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів.

Експериментальні дані, наведені в роботі [79], також підтверджують можливість оцінювання низькотемпературних властивостей біту-

мних в'язучих за допомогою методу «DSR 4 мм» та існування кореляційних залежностей між значеннями встановленими після випробування методом BBR та «DSR 4 мм».

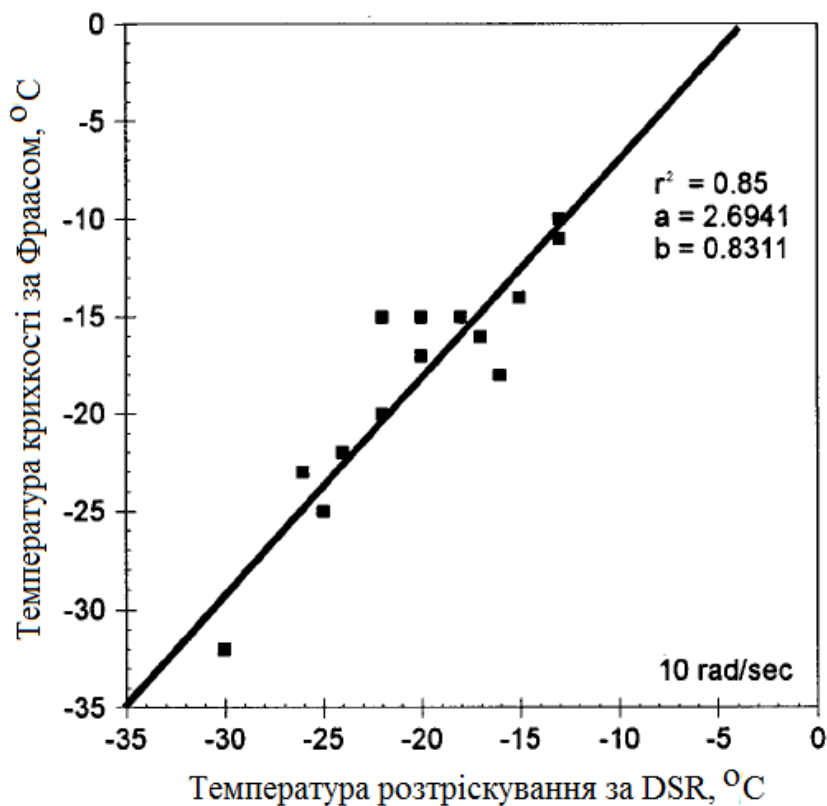


Рисунок 1.41 – Залежність між температурами крихкості бітумів, отриманих методами Фраасу та DSR, [22]

Метод «DSR 4 мм» не отримав на даний час значного поширення, причиною чого може бути як відсутність прийнятого стандарту на проведення випробування (підготовлено проект стандарту AASHTO «Determining the Low Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear» [75]), так і роботи з вдосконалення методу, що виконуються науковцями в різних країнах світу. Так, наприклад, німецькими дослідниками з Брауншвейзького технічного університету [80 – 82] запропоновано модифікацію приладу та методики, згідно з якої: збільшена товщина шару в'язучого до 3 мм; виготовлена спеціальна розбірна силіконова прес-форма-метелик (рис. 1.42) та вдосконалена методика випробувань.

Технологічні операції з підготовки бітумного зразка до випробування наведено на рис. 1.43. Запропонована методика спрощує процедуру підготовки зразка та підвищує точність отримуваних результатів

за рахунок меншої зміни властивостей в'язучих через їх старіння (в'язуче для заливки у форму нагрівається до температури його текучості).

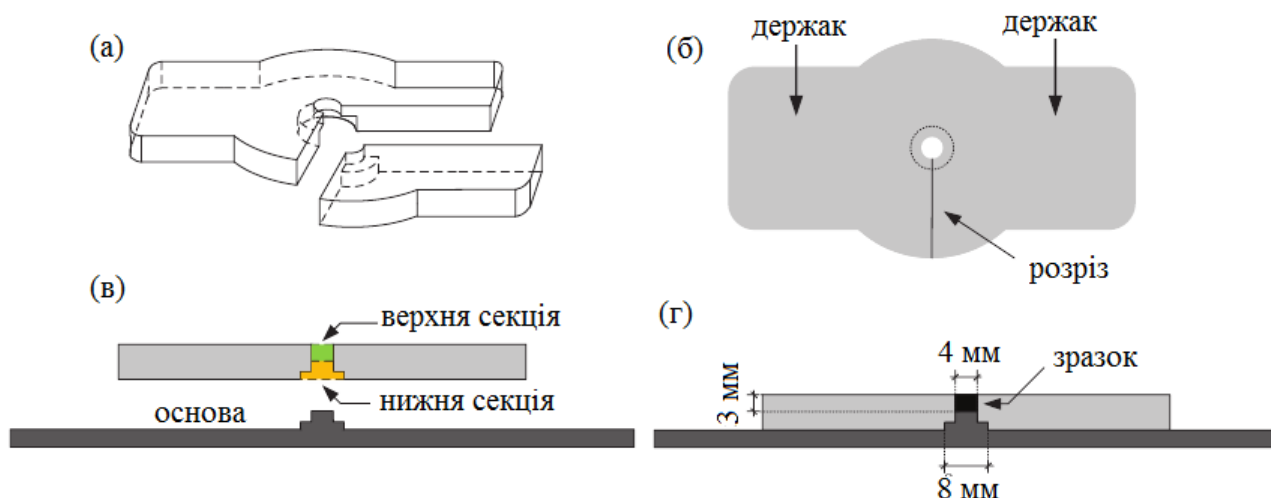


Рисунок 1.42 – Силіконова прес-форма для виготовлення зразків, що використовуються в методі «DSR 4 мм», [80]

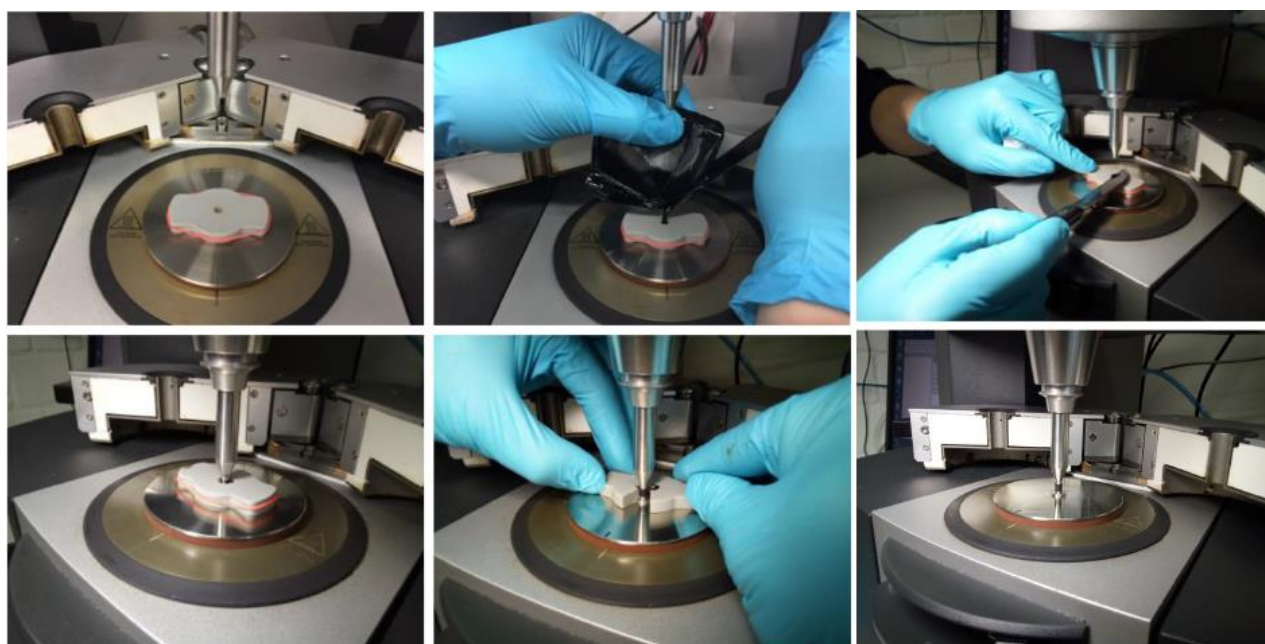


Рисунок 1.43 – Підготовки зразка для випробування бітумів методом «DSR 4 мм», [80]

Випробування згідно з вдосконаленою методикою здійснюється в діапазоні температур від мінус 30 °С до 80 °С з шагом температур в 10 °С з використанням частот в діапазоні від 0,05Гц до 10 Гц (0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,59; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10 Гц). Для випробування в різних температурних діапазонах використовуються

металеві диски різного діаметру: для випробування в діапазоні від +30 °С до + 80 °С приймається диск діаметром 25 мм, а висота зразка в'язучого становить 1 мм; в діапазоні температур від + 40 °С до мінус 10 °С застосовується диск діаметром 8 мм, а товщина шару бітуму становить 2 мм; при випробуванні за температурою від + 10 °С до мінус 30 °С використовується диск діаметром 4 мм, а товщина бітуму становить  $3,1 \pm 0,15$  мм, при цьому [82] точна товщина визначається безпосередньо автоматикою приладу, та враховується під час проведення випробування.

В 2020 р. для наведеної в роботах [80 – 82] модифікації приладу було розроблено програмне забезпечення та здійснено міжлабораторні випробування, які підтвердили можливість визначення з відносно високою точністю випробувань бітумних в'язучих в температурному діапазоні від мінус 30 °С до + 80 °С та зокрема визначень низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих методом «DSR 4 мм». Крім цього встановлено, що запропонованим методом можливо не тільки оцінювати характеристики бітумних в'язучих, а й асфальтов'язучих речовин (мастик). Це ж підтверджується й в роботі [83], де авторами запропоновано дещо вдосконалену методику визначення низькотемпературних властивостей асфальтов'язучих речовин за допомогою методу «DSR 4 мм».

#### **1.3.4 Випробування за допомогою пристрою для розтріскування бітумних в'язучих**

На початку 2000-х років в американському державному дослідницькому університеті Огайо (Ohio University) в рамках Національної програми спільних досліджень автомобільних доріг (NCHRP) було розроблено метод дослідження низькотемпературних досліджень бітумних в'язучих та відповідне обладнання, що отримали назву Пристрій для розтріскування бітумних в'язучих (ABCD - Asphalt Binder Cracking Device). Даний метод було орієнтовано на випробування насамперед модифікованих бітумних в'язучих, оскільки випробування цих в'язучих за допомогою поширених стандартизованих методів не завжди дозволяє отримати адекватні результати.

Обладнання, що використовується в методі ABCD наведено на рис. 1.44 та складається з полого циліндричного кільця, виготовленого з інвару (діаметр кільця складає 2 дюйма (50,8 мм), висота стінки – 0,5 дюйма (12,7 мм), резистивного датчика температури, що кріпиться

до внутрішньої поверхні кільця та гнучкої силіконової форми. Кільце з інвару розміщується в силіконовій формі та в простір між зовнішньою поверхнею кільця та форми заливається бітумне в'язуче, утворюючи зразок у вигляді кільця завтовшки 75 мм [84].



Рисунок 1.44 – Обладнання для випробування за ABCD, [85, 86]

Матеріал кільця підібрано таким чином, щоб його коефіцієнт температурного розширення (у інвару він дорівнює  $1,4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) значно відрізнявся від коефіцієнту температурного розширення бітуму, який зазвичай становить  $170 \dots 200 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  [87].

Принцип дії методу полягає в тому, що з поступовим зниженням температури у в'язучому (згідно діючому стандарту AASHTO TP 92-2014 використовується швидкість зниження температури в  $20 ^\circ\text{C}/\text{год}$ ) розвиваються розтягуючі температурні напруження, які зрештою призводять до розтріскування зразка. Деформація інварового кільця, яка фіксується за допомогою тензодатчика використовується для розрахунку напруження руйнування бітумного в'язучого. Під час розтріскування зразка накопичене температурне напруження слабшає, що проявляється у вигляді різкого падіння значень деформації (рис. 1.45). Температура за якої спостерігається таке різке зниження деформації й приймається за температуру розтріскування в'язучого.

Під час випробування методом ABCD крім температури розтріскування можливо визначати й напруження руйнування за формулою, наведеною нижче:

$$\sigma = \frac{K \cdot F_{ABCD}}{A}, \quad (1.23)$$

де  $K = 2$  – коефіцієнт концентрації напруження,  
 $F_{ABCD}$  – температурне зусилля в кільці, Н  
 $A = 4,03225 \times 10^{-5} \text{ м}^2$  – площа поперечного перерізу зразка.

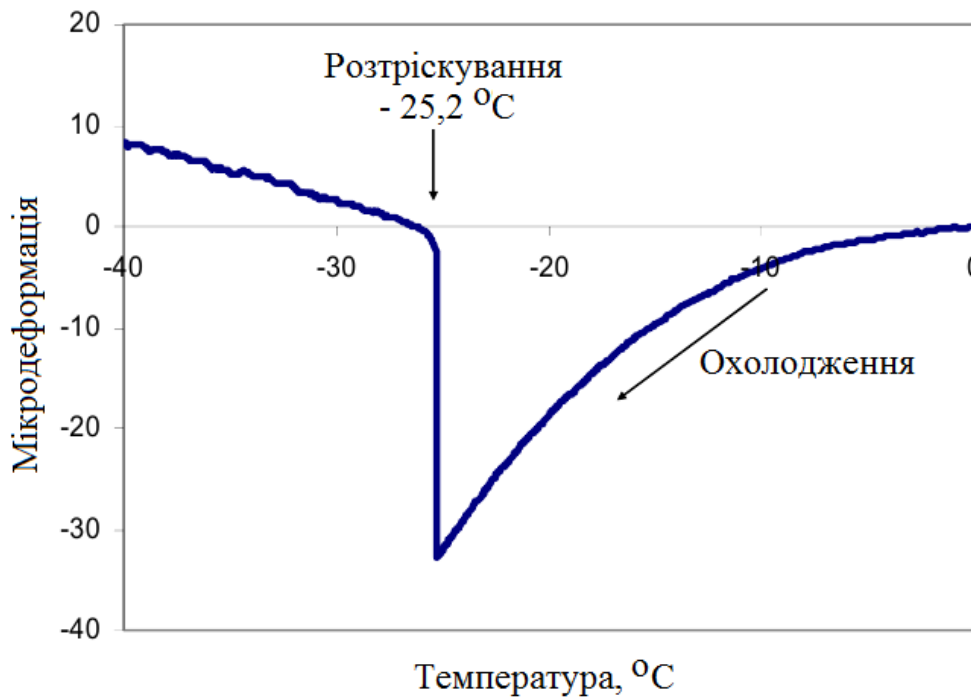


Рисунок 1.45 – Типова залежність під час випробування методом ABCD, [85]

Також напруження руйнування може бути визначено за різницею встановлених значень мікродеформацій до та після розтріскування зразка (рис. 1.46) помножених на коефіцієнт 0,157 [88].

В 2008 – 2010 р. в США була виконана робота по міжлабораторному дослідженню результатів випробування бітумних в'язучих методом ABCD, в якому прийняли участь 23 лабораторії [89]. На основі проведених досліджень встановлено, що значення збіжності отриманих результатів не перевищують 0,95 °C, а відтворюваності – 1,36 °C. Крім того було внесені певні зміни в методику випробування, що сприяли підвищенню точності отримуваних результатів (запропоновано видалити обрізку та змазування форми). На основі результатів між лабораторних досліджень було розроблено специфікацію на визначення низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих, яка була в подальшому затверджена асоціацією AASHTO - AASHTO TP 92-2014 Standard Method of Test for Determining the Cracking Temperature of Asphalt Binder Using the Asphalt Binder Cracking Device (ABCD).

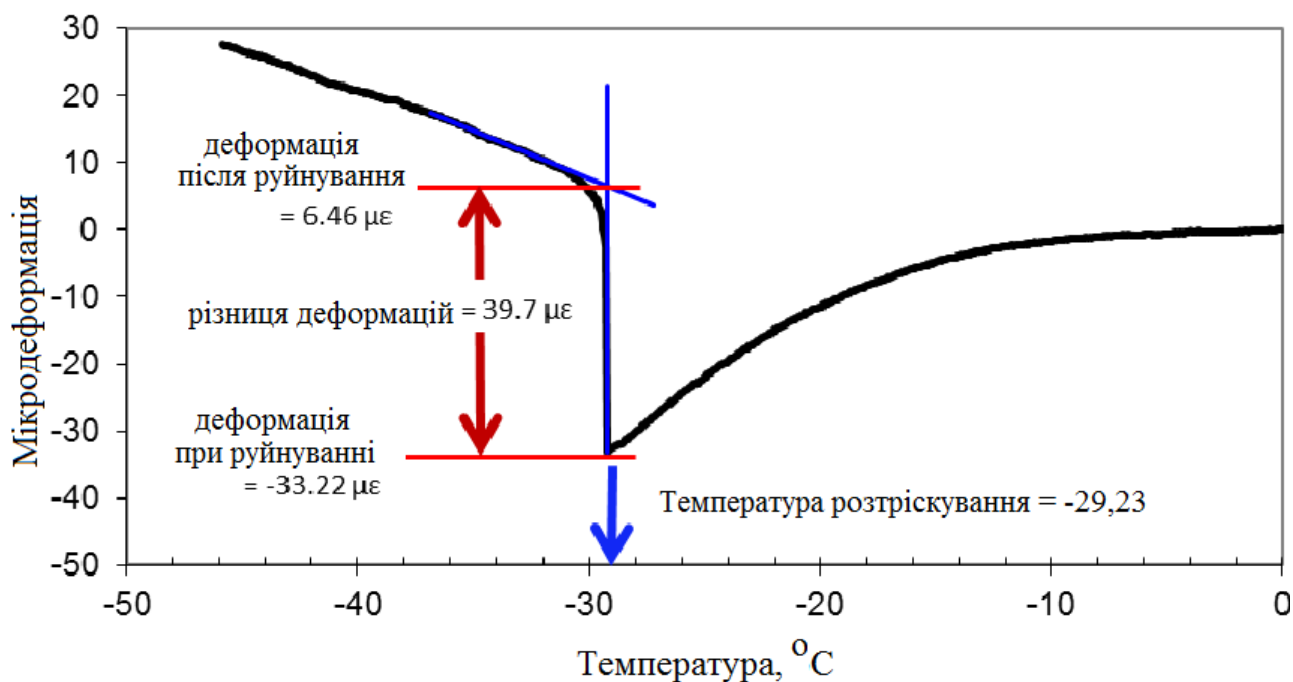


Рисунок 1.46 – Визначення деформацій бітуму під час випробування методом ABCD, [89]

Окрім між лабораторних досліджень здійснено й співставлення температури розтріскування бітумних в'язучих, визначених за методом ABCD, з результатами спостереження за станом асфальтобетонних покриттів на дослідних ділянках ряду автомобільних доріг. Результати такого співставлення наведені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Значення коефіцієнту детермінації ( $R^2$ ) для оцінки залежності між температурами розтріскування асфальтобетонного покриття та низькотемпературними значеннями бітумних в'язучих, визначених різними методами, [89]

Штат США, де була розташована випробувальна ділянка	Коефіцієнт детермінації між температурами розтріскування асфальтобетонного покриття та температурою розтріскування в'язучого, визначеного методом		
	ABCD	BBR	BBR + DTT
Пенсильванія	0,94	0,21	0,95
Альберта	0,92	0,79	0,76
Онтаріо	0,80	0,92	0,56

Під час між лабораторних випробувань методу ABCD [89] встановлено, що цей метод є чутливим до наявності в складі бітумного

в'язуючого полімерних модифікаторів. В той час, як за результатами визначення низькотемпературних характеристик методом BBR бітумів, модифікованих полімером СБС, зі збільшенням кількості полімеру у в'язуючому температура розтріскування майже не змінювалась, значення температури розтріскування, встановлені методом ABCD, постійно знижувалися (рис. 1.47).

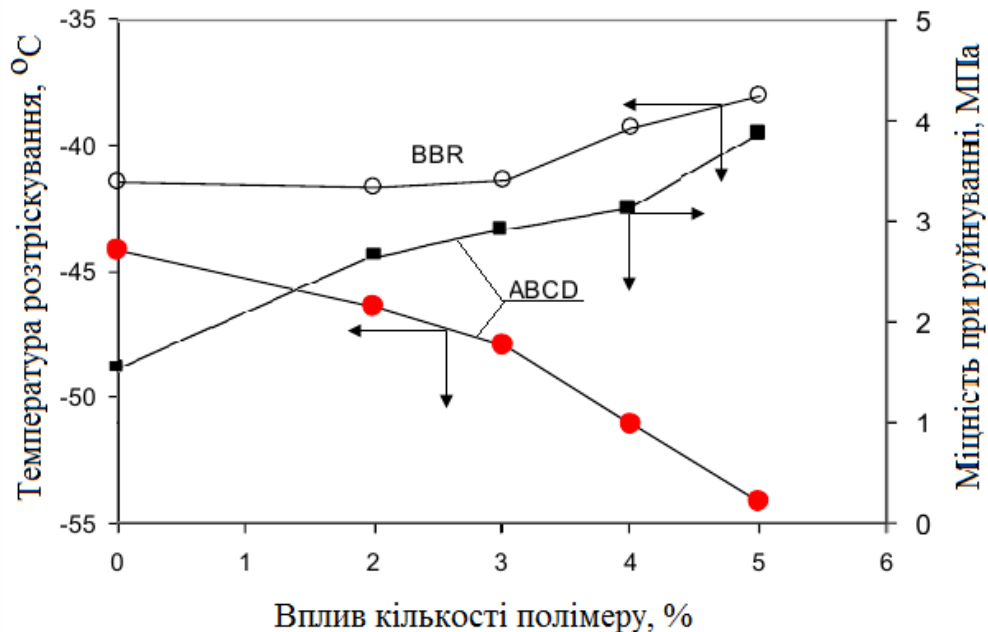


Рисунок 1.47 – Температура розтріскування бітумів, модифікованих різною кількістю полімеру, визначена методом BBR та ABCD, [89]

Крім визначення температури розтріскування методом ABCD є можливість встановлювати й межу міцності в'язуючого за температури розтріскування (рис. 1.47).

Згідно з [8] значними перевагами методу ABCD є те, що:

- за допомогою цього методу є можливим випробувати як немодифіковані, так і модифіковані різноманітними добавками в'язучі;
- метод характеризується прийнятною збіжністю (для не модифікованих бітумів не більше 1 °C, а для модифікованих – порядку 1,5 °C) та відтворюваністю результатів;
- метод дозволяє безпосередньо визначати температуру розтріскування, не застосовуючи додаткових розрахунків;
- отримувані результати мають високу кореляцію з температурами розтріскування асфальтобетонних покриттів, що підтверджується чисельними випробуваннями в різних штатах США [87, 90].

В той же час метод ABCD має й недоліки: за рахунок використання тензодатчиків обладнання є доволі громіздким; для підготовки одного зразка потрібно 15 г бітуму, що є дуже багато у випадку випробовування екстрагованого з покриття в'язучого. Також до недоліків може бути віднесена вартість обладнання, яка складала на час розробки приладу порядку 40000 \$, але за думкою авторів методу, за рахунок масового виготовлення обладнання та його широкого використання вартість повинна знизитися [91].

Порівняно з іншими методами оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів, значення температури розтріскування, визначені методом ABCD, є суттєво нижчими. Наприклад, згідно даних, наведених в [88], температура розтріскування за методом ABCD є більше ніж на 10 °C нижчою температури крихкості в'язучого, визначеного методом Фраасу. Це ж підтверджують дані, наведені на рис. 1.48 [53], при цьому при старінні бітуму ця різниця значно збільшується. Температури розтріскування не модифікованих бітумів, визначені методами BBR та ABCD відрізняються на 0,8 – 1,4 °C, в той час як різниця в значеннях температур розтріскування модифікованих в'язучих сягає 10,5 – 11,8 °C (табл. 1.6) [88].

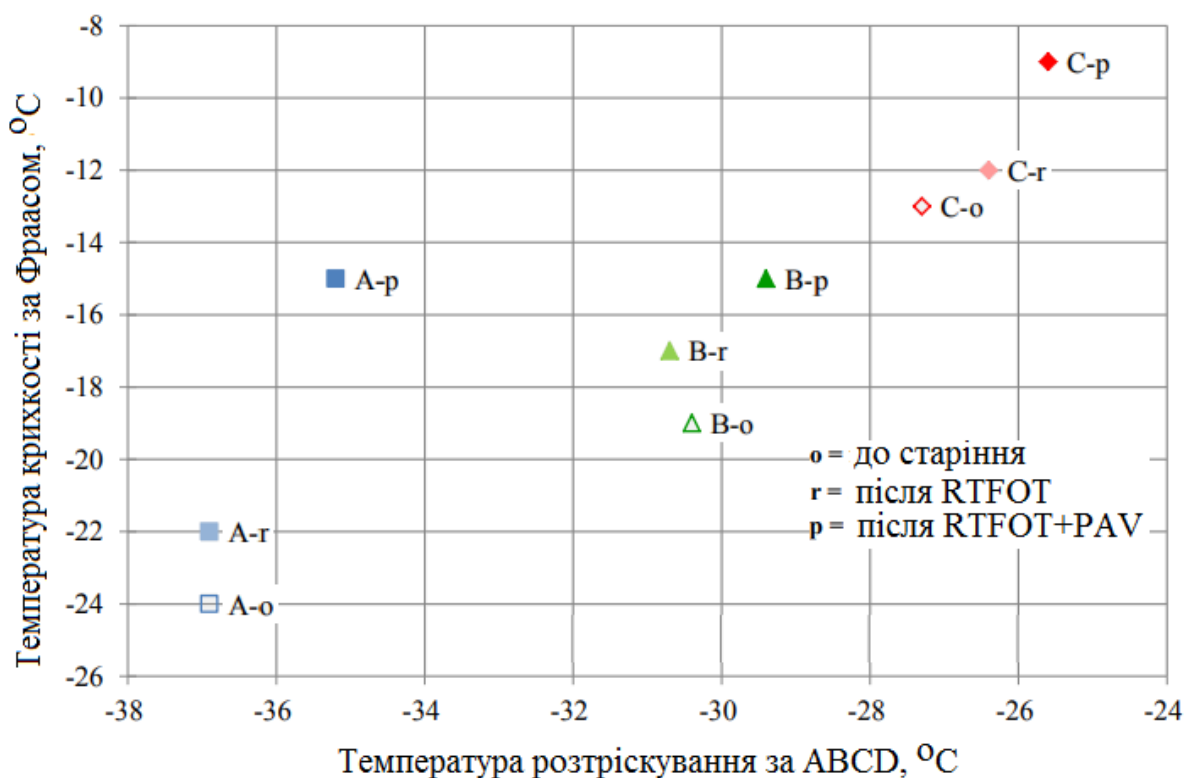


Рисунок 1.48 – Вплив старіння бітуму на залежність температур розтріскування, визначених методом Фраасу та BBR, [53]

Таблиця 1.6 – Співставлення низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих, визначених різними методами, [88, 92, 93]

Посилання	Бітум	Температура розтріскування, °С, визначена методом				
		Фраасу	BBR <sub>s</sub>	BBR <sub>m</sub>	DTT	ABCD
[88] <sup>1)</sup>	160/220	-23	-33,7			-35,1
	160/220 + 5 % SBS	-27	-33,7			-43,5
	75/100	-16	-30,4			-31,2
	75/100 + 5 % SBS	-17	-27,6			-38,1
[92] <sup>2)</sup>	PG 76-16		-28,1	-16,1	-37,5	-31,7
	PG 64-22		-29,3	-23,9	-39,0	-33,2
	PG 70-22		-31,8	-22,2	-39,1	-31,4
	PG 58-28		-32,8	-28,1	-45,4	-33,2
[93] <sup>2)</sup>	PG 70-22	-9	-17	-19		-28
	PG 70-16	-8	-16	-17		-27
	PG 70-16	-10	-16	-17		-26
	PG 76-16	-2	-10			-23
	PG 76-16	-4	-12	13		-24
	PG 76-10	-6	-16	-14		-30
	PG 64-22	-12	-16	-17		-28
	PG 64-16	-9	-17	-18		-28

Примітка: <sup>1)</sup> бітумні в'язучі випробувалися до старіння,

<sup>2)</sup> бітумні в'язучі випробувалися після старіння RTFOT та PAV.

В даний час здійснюються роботи по вдосконаленню методу ABCD. При цьому певного поширення набули дослідження по застосуванню методу ABCD як додаткового до стандартизованих методів. В [Elwardany M.] запропоновано замінити методом ABCD метод Direct Tension Tester test (DTT), який в свою чергу використовується як додатковий метод після визначення значень низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих за допомогою VBR (особливо модифікованих), які не відповідають встановленим нормам. На користь такого підходу автори звертають увагу на більш високу точність температур розтріскування, визначених методом ABCD, а також нижчу вартість обладнання та більшу простоту в експлуатації.

В дослідженні [94] запропоновано метод, який отримав назву 4-мм DSR/ABCD та представляє собою синергетичну комбінацію

двох методів визначення низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих – «DSR 4 мм» та ABCD. На основі результатів випробування бітумного в'язучого, що можуть бути отримані за допомогою запропонованих методів (значення податливості при повзучості, які можуть бути отримані під час випробування методом «DSR 4 мм» та міцність в'язучого на розрив, що може бути отримана під час випробування методом ABCD) можливо отримати вихідні дані для розрахунку асфальтобетонів дорожнього покриття згідно Посібника з механіко-емпіричному проектуванню дорожнього покриття (MEPDG – Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) та глобальної системи оцінювання старіння бітумних в'язучих (GAS – global aging system). При цьому випробуванню піддаються бітумні в'язучі послідовно зістарені методами RTFOT та PAV.

Автори методу 4-мм DSR/ABCD [94] рекомендують його в якості альтернативи комплексу методів, що використовуються для оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів (наприклад методу IDT – Indirect tensile test).

### **1.3.5 Сучасні тенденції розвитку методів оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів**

Починаючи з 2000-х років певного поширення в оцінюванні низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих набувають методи, які вже певний час використовуються для визначення температур розтріскування асфальтобетонів, а саме методів, оснований на принципах та положеннях механіки руйнування. Переважна більшість таких методів орієнтована на випробування асфальтобетонних зразків (більш детально ці методи розглянуті в розділі 2), але є ряд методів, які дозволяють визначати температури розтріскування саме бітумних в'язучих. Одним з таких є метод вигину балки з надрізом на одній кромці (SENB - Single-Edge Notch Bending test).

Цей метод давно та широко використовується для випробування різноманітних матеріалів, зокрема металів. На початку 2000-х років цей метод було адаптовано під випробування бітумних в'язучих [95, 96]. Запропонована схема випробування та формула для розрахунку в'язкості руйнування наведена на рис. 1.49.

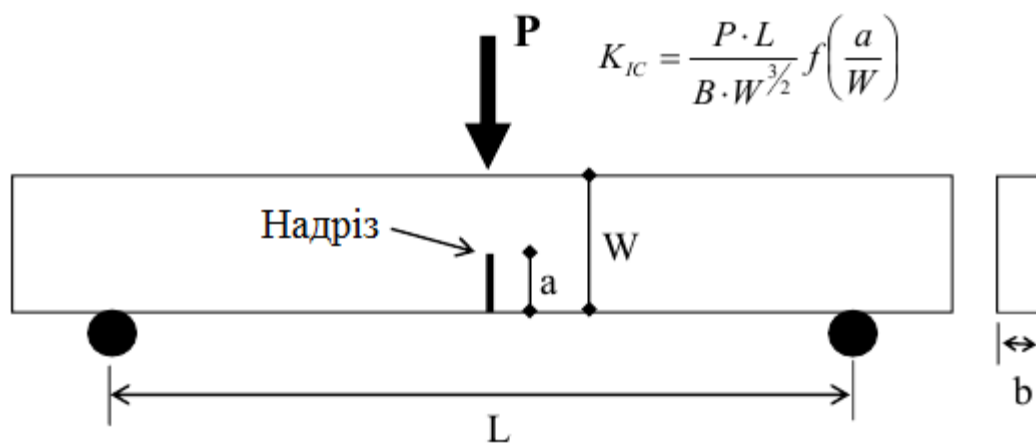


Рисунок 1.49 – Схема випробування бітумів методом SENB, [96]

Для зменшення кількості в'язучого на початку було запропоновано використовувати балку, що складалась з двох металевих частин та бітумного зразка між ними (рис. 1.50). Однак через низьку адгезійну міцність в'язучих до поверхні металевих форм часто спостерігалось передчасне руйнування зразка в місті поєднання в'язучого з металевими формами, що унеможливило проведення випробування. Для вирішення цього питання було запропоновано використовувати для випробування форми для виготовлення бітумних зразків, які використовуються для випробування за методом BBR [96]. За винятком виїмки глибиною в 3 мм, що відповідає 20 – 25 % товщині зразка-балки та яка виконується на боковій стороні зразка, балка-зразок за вагою (10 г в'язучого) та геометричними розмірами повністю відповідає балкам, які використовуються в методі BBR (рис. 1.51).

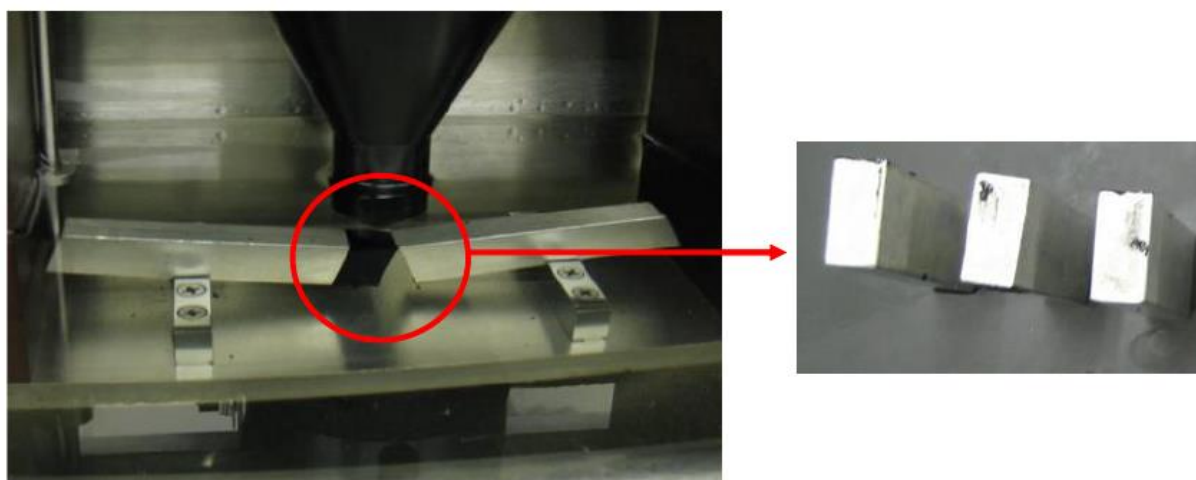


Рисунок 1.50 – Використання складної балки для випробування бітумних в'язучих методом SENB, [96]

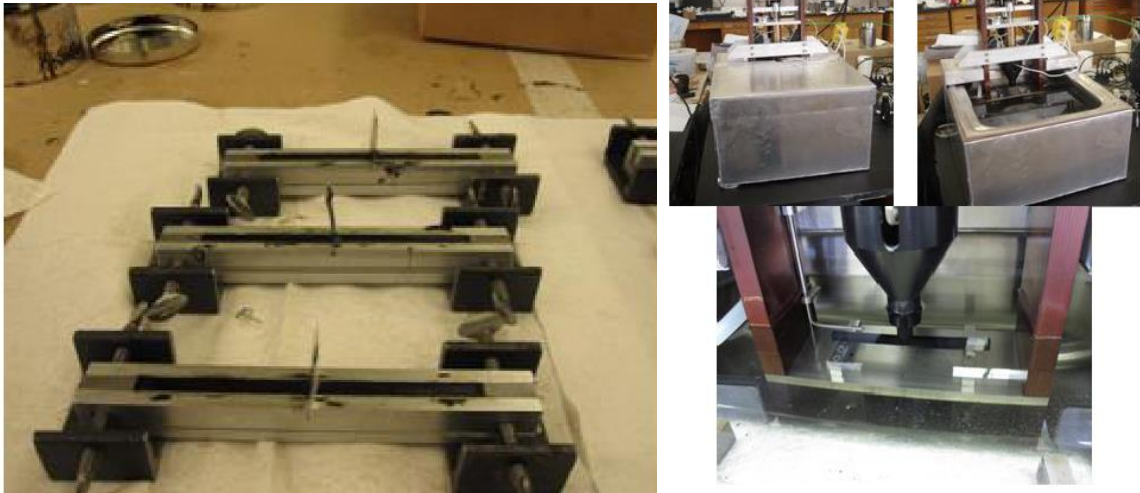


Рисунок 1.51 – Нова конструкція бітумного зразка та зовнішній вигляд обладнання для випробування методом SENB, [96]

Випробування здійснюється за певної температури (наприклад, мінус 12 °С, мінус 18 °С, мінус 24 °С). Під час випробування балку-зразок попередньо навантажують зі швидкістю 0,01 мм/с впродовж 1 с, після чого здійснюється основне навантаження, яке забезпечує постійне зміщення середини балки відносно вертикальної осі 0,01 мм/с впродовж 100 с. Зовнішній вигляд устаткування для випробування в'язучих методом SENB наведено на рис. 1.51. Устаткування є подібним до обладнання, що використовується в методі BBR – різниця полягає в наявності навантажувального двигуна, який забезпечує переміщення балки під час випробування, та тензодатчика більшої вантажопідйомності.

Типові результати випробування бітумних в'язучих методом SENB наведені на рис. 1.52. Наведені залежності свідчать про можливість визначення переходу в'язучого від пластичного до крихкого стану під час випробування за низьких температур.

Під час випробування в'язучих методом SENB визначаються навантаження та переміщення балки в ході випробування та безпосередньо в момент руйнування зразка, на основі яких розраховується в'язкість та енергія руйнування (методика визначення цих показників детально наведена в 2 розділі).

В країнах Європи з 2010 р. діє загальноєвропейський стандарт CEN/TS 15963:2010 «Bitumen and bituminous binders - Determination of the fracture toughness temperature by a three point bending test on a

notched specimen», в якому наведено ще одна характеристика руйнування зразка-балки під час випробування методом SENB, а саме «температура руйнування», що представляє собою найнижчу температуру, за якої під дією максимального навантаження спостерігається переміщення (прогин) балки на 0,3 мм (рис. 1.53). Ця температура визначається шляхом інтерполяції залежності переміщення при максимальному навантаженні, визначеному за різних температур випробування у вигляді експоненціальної кривої. Згідно з отриманими даними більшість бітумів за температури руйнування мають жорсткість, визначену методом BBR, що не перевищують 300 МПа [97].

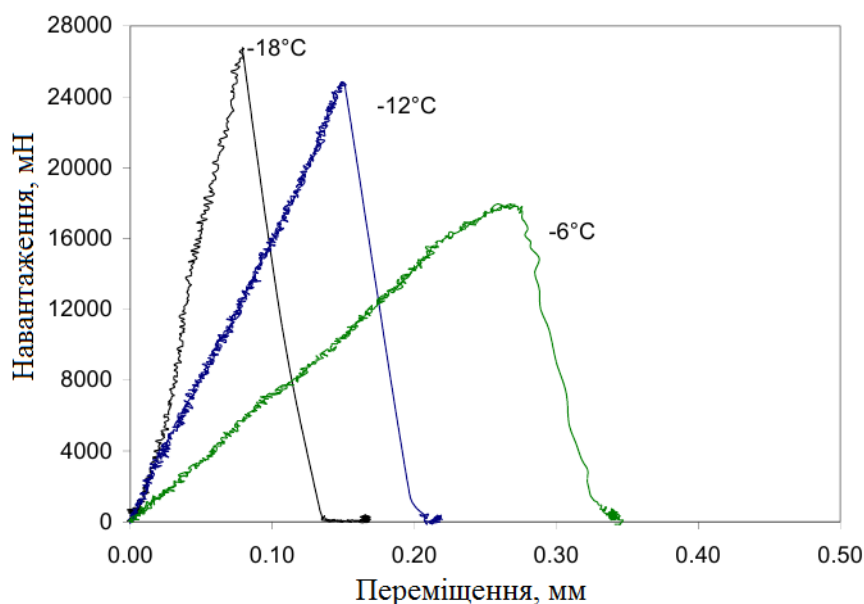


Рисунок 1.52 – Типові результати випробування методом SENB, [96]

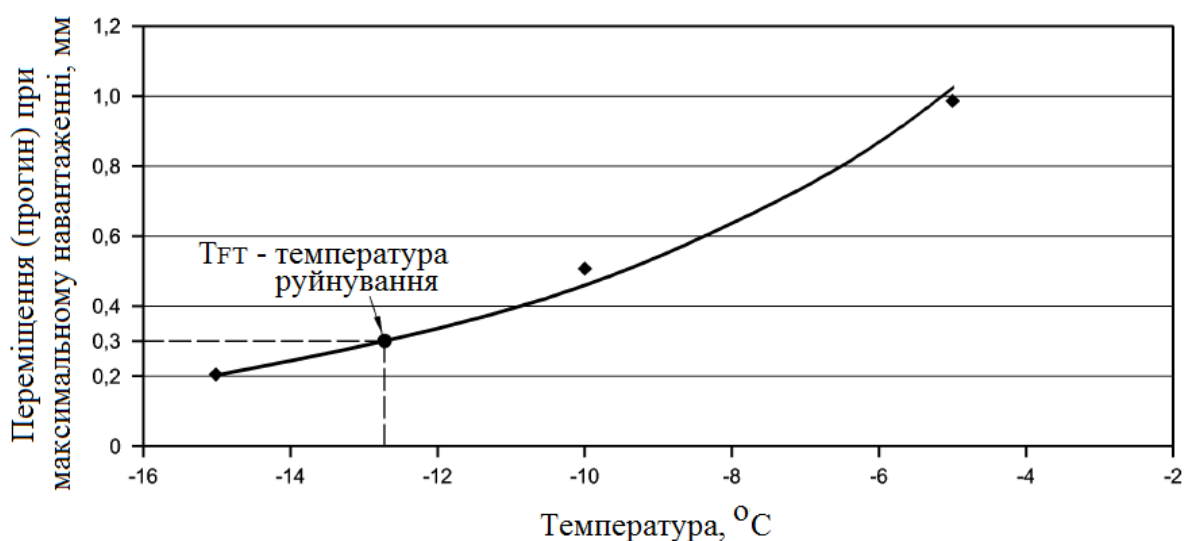


Рисунок 1.53 – Визначення температури руйнування в'язучого під час випробування методом SENB, згідно CEN/TS 15963, [96]

В роботі [96] наведено співставлення результатів випробування бітумних в'язучих за методами BBR, ABCD та SENB, у відповідності з якими встановлено, що:

- існує тісна залежність (коефіцієнт детермінації знаходиться в межах 0,92 – 0,94) між значеннями жорсткості, визначеними методом BBR та навантаженням і деформацією під час руйнування, встановленими при випробуванні методом SENB (випробування за одних і тих же температур) (рис. 1.54);

- залежність значеннями  $m$ -показника, визначеного методом BBR та навантаженням і деформацією під час руйнування, встановленими при випробуванні методом SENB (випробування за одних і тих же температур) є помірною (коефіцієнт детермінації знаходиться в межах 0,43 – 0,46);

- встановлена помірна залежність між значеннями температури руйнування бітуму ( $T_{FT}$ ) за методом SENB та температурою розтріскування за методом ABCD (коефіцієнт детермінації дорівнює 0,54), при цьому значення температури розтріскування бітумного в'язучого за методом ABCD в середньому на 20 °C є нижчим (рис. 1.55);

- визначена помірна кореляція між значеннями температури розтріскування за методом ABCD та навантаженням і деформацією під час руйнування зразка за методом SENB (коефіцієнт детермінації становить відповідно 0,69 та 0,65).

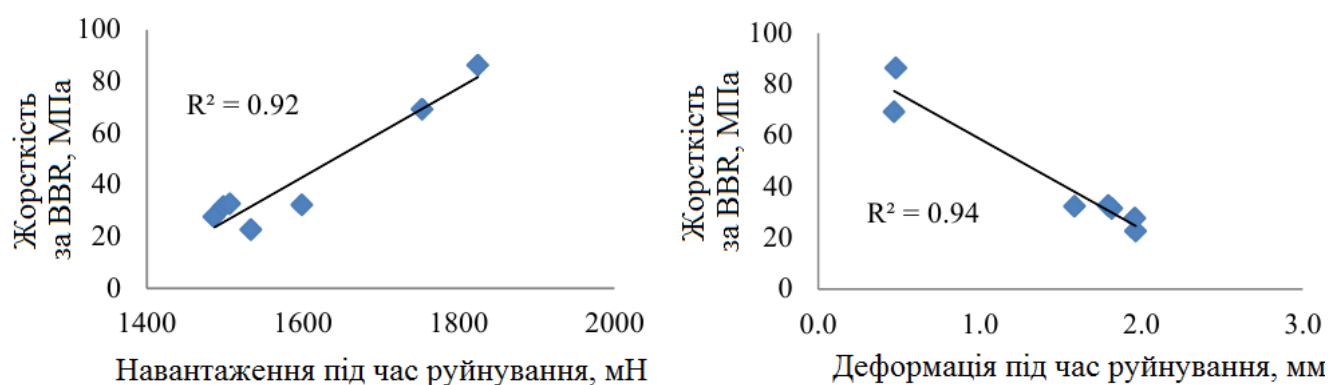


Рисунок 1.54 – Залежність між характеристиками в'язучих, отриманих методами BBR та SENB під час випробування за – 12 °C, [96, 97]

Ще однією перевагою методу SENB є тісна кореляція визначених значень температури руйнування бітумних в'язучих з температурою склування, визначеною дилатометричним способом.

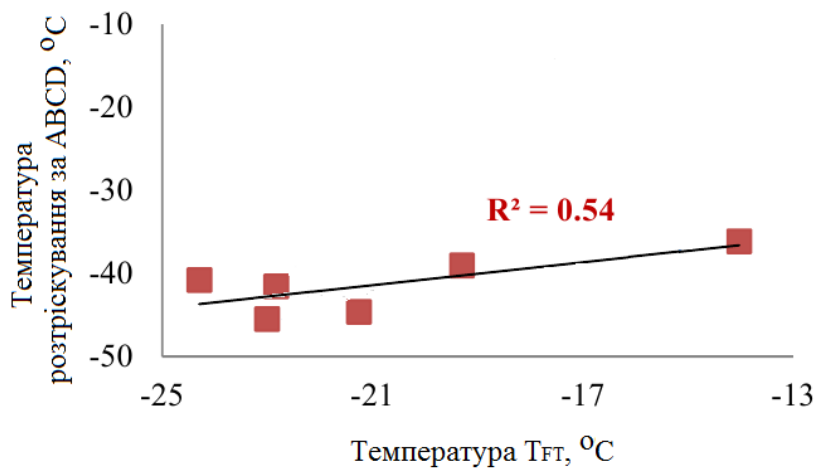


Рисунок 1.55 – Залежність між температурою руйнування бітуму, визначеному методом SENB та температурою розтріскування за методом ABCD, [96, 97]

На основі отриманих даних та встановлених залежностей автори робіт [8, 96 – 97] вказують на переваги методу SENB: відносна простота; час випробування дорівнює часу випробування методом VBR; можливість фіксувати нелінійну поведінку в'язучого; можливість визначити модуль релаксації та опір руйнування; краща кореляція між визначеними показниками та експлуатаційними характеристиками асфальтобетонного покриття, ніж при порівнянні експлуатаційних характеристик покриття з показниками, визначеними за методами, прийнятими в системі Superpave. Враховуючи це запропоновано використання методу SENB в якості стандартного методу для визначення низькотемпературних характеристик бітумних в'язучих замість методу DTT. Передбачається, що використовуючи показники енергії руйнування та температури руйнування можливо більш точно оцінювати низькотемпературні властивості бітумних в'язучих та ідентифікувати наявність у в'язучому різноманітних добавок [97 – 99]. В той же час методу притаманні й недоліки, при цьому одним з найбільш вагомих є потреба у висококваліфікованих спеціалістах для роботи на обладнанні та інтерпретації отриманих даних.

В роботі [100] розглянуто можливість використання для оцінювання низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих двох методів, що, зазвичай, використовується для оцінки властивостей асфальтобетонних зразків – випробування на розтяг дисків (compact tension test – CT) та на непрямий розтяг (Indirect Tension test – IDT).

Розміри зразка та схема випробування бітумів методом IDT наведена на рис. 1.56. Для приготування зразків використовується силіконова форма, в яку заливається нагріте в'язуче (рис. 1.57).

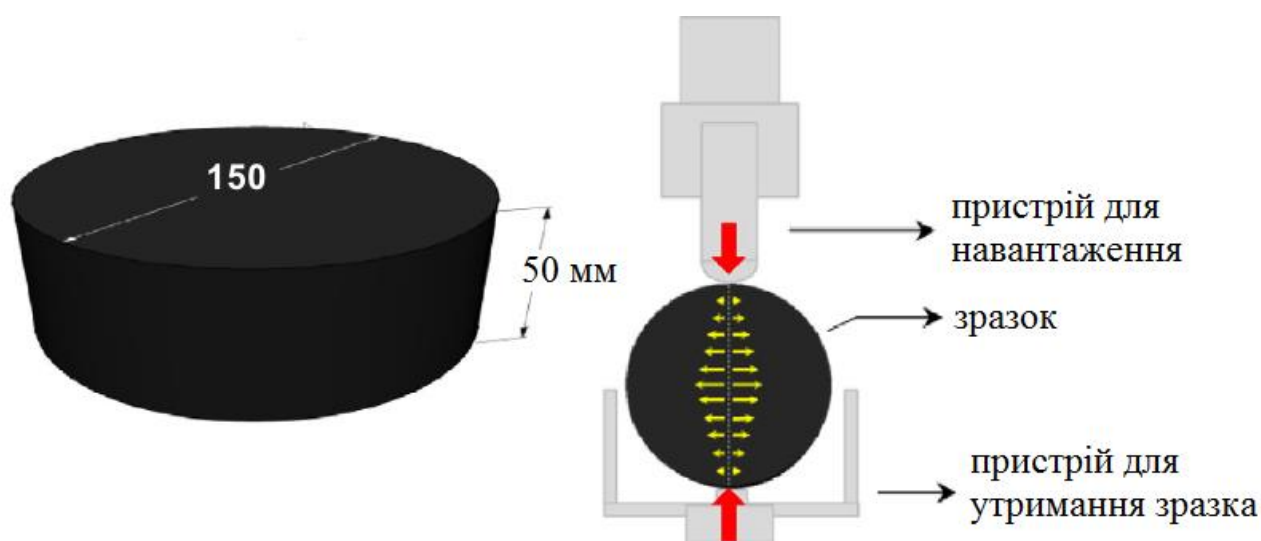


Рисунок 1.56 – Схема бітумного зразка та його випробування методом IDT, [100]

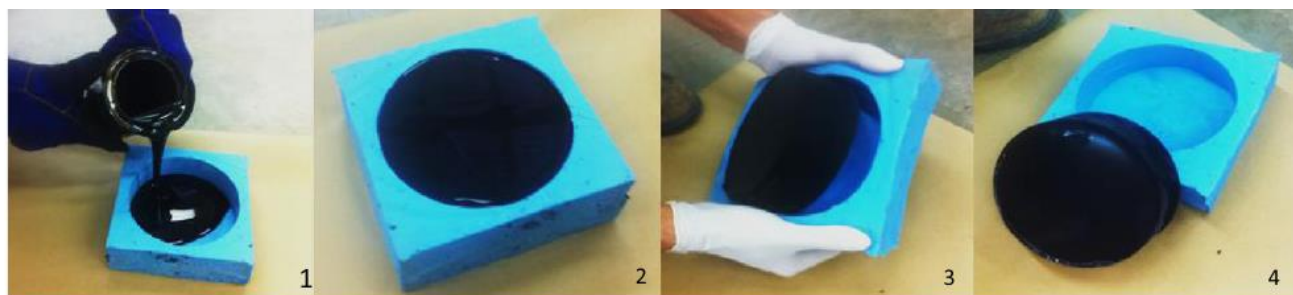


Рисунок 1.57 – Методика підготовки зразків для випробування бітумів методом IDT, [100]

Після остигання за температурою навколишнього середовища впродовж 2 год, силіконова форма з бітумом розташовується в холодильній камері та додатково витримується ще 2 год за температури мінус 10 °С. Охолоджений зразок виймають з форми та розміщують в кліматичній камері для витримання за температури випробування ще впродовж 2 год. Випробування полягає у прикладенні на зразок циліндричної форми стискаючого навантаження. В [100] випробування здійснювали за температурами мінус 12 °С, мінус 22 °С та мінус 30 °С навантажуючи зразки зі швидкістю 12,7 мм/хв. Під час випробування фіксується переміщення зразка та найбільше навантаження, що при-

водить до його руйнування. Отримані дані використовуються для розрахунку міцності на розтяг.

Інформація щодо визначення в'язкості та енергії руйнування бітуму методом СТ наведена в роботі [100]. Розміри зразка та схема його випробування приведені на рис. 1.58. Зразки також виготовляються шляхом заливки в'язучого у силіконову форму відповідного розміру. Під час заливки в'язучого у формі встановлюють дві металеві завантажувальні втулки та пластину, як забезпечує утворення щілини в тілі зразка довжиною 65 мм та товщиною 12,5 мм.

Випробування здійснюється за температури  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  шляхом прикладання на зразок розтягуючого зусилля зі швидкістю зміщення гирла тріщини  $0,2\text{ мм/хв}$ , яке фіксується за допомогою тензодатчика.

Температуру розтріскування бітумних зразків визначали за методикою, що докладно наведена в 2 розділі. Автори [100] визначали, що комбіноване використання двох методів (IDT та СТ) дозволяє отримати дані для розрахунку низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих на основі положень механіки руйнування, при цьому за рахунок використаного підходу є можливим більш чутливо оцінювати вплив різноманітних модифікаторів на низькотемпературні властивості модифікованих в'язучих.

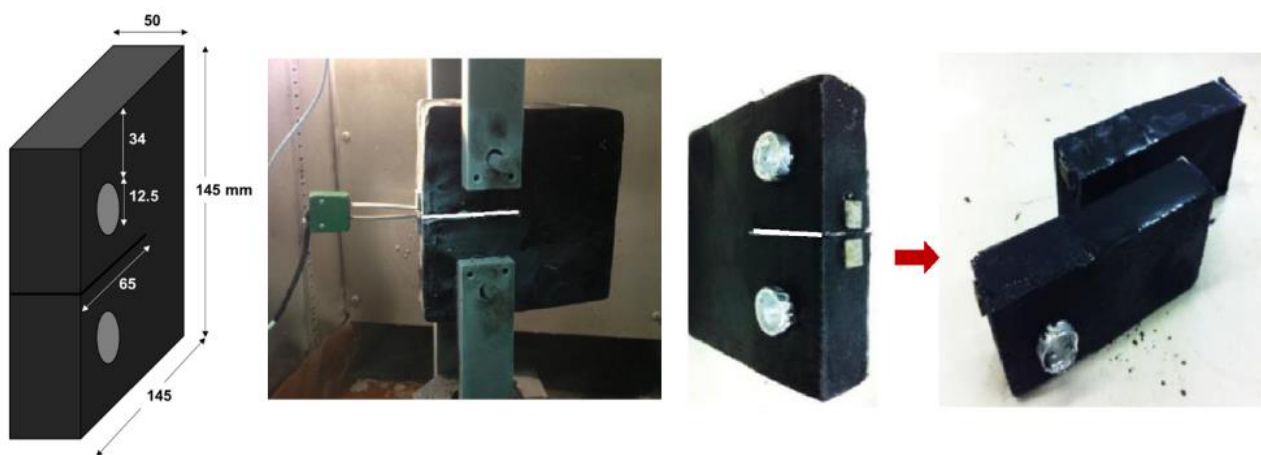


Рисунок 1.58 – Розміри бітумного зразка та схема його випробування методом СТ, [100]

Суттєвим недоліком запропонованого підходу є значний обсяг бітумного в'язучого, необхідного для виготовлення зразків.

Ще один досвід застосування методу СТ для встановлення в'язкості та енергії руйнування наведено в [101], при цьому авторам вдалось суттєво зменшити обсяг в'язучого для проведення випробування

за рахунок зміни форми та розмірів зразка (рис. 1.59). Випробування здійснено шляхом розтягування зразка зі швидкістю 0,01 мм/с за температур мінус 16 °С, мінус 22 °С та мінус 28 °С.

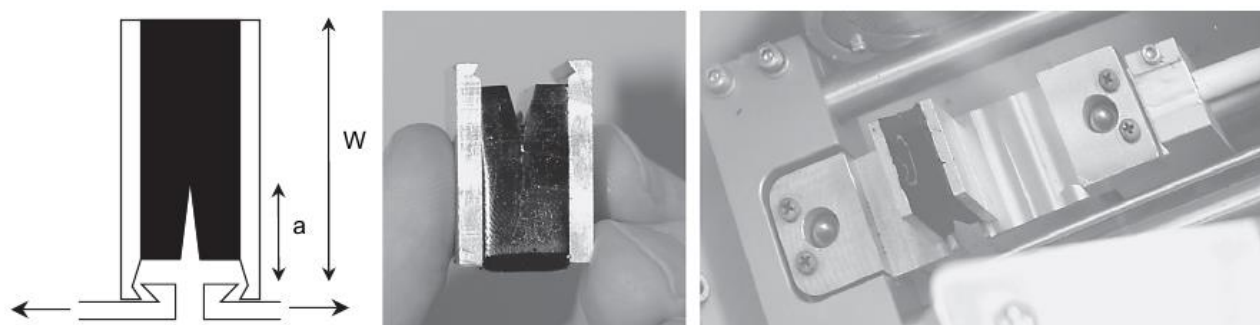


Рисунок 1.59 – Схема, зовнішній вигляд та прилад для випробування зразків методом СТ, [101]

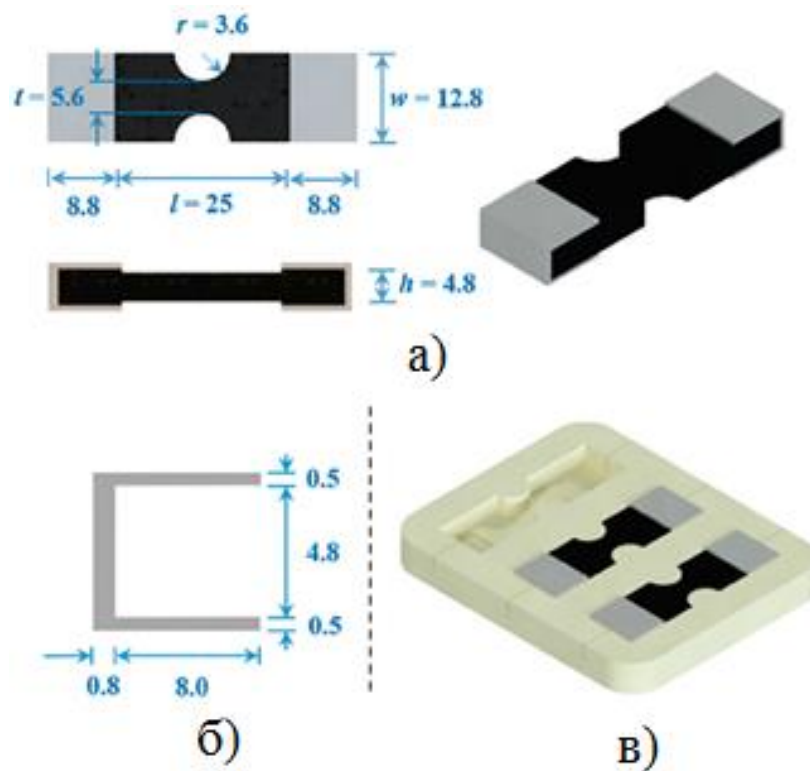
За даними розробників цього методу, за рахунок вдосконаленої форми зразків є можливим визначати з високою точністю в'язкість та енергію руйнування, а запропонований метод може бути більш точно ніж інші методи оцінювати вплив різноманітних модифікаторів на низькотемпературні властивості в'язучих.

В [102] представлено результати використання розробленого методу випробування зразка з надрізом (notched specimen cracking test – NSCT) для оцінювання низькотемпературних властивостей в'язучих. За допомогою представленого методу є можливість безпосереднього визначення температурного напруження та температури розтріскування бітумів. Для випробування використовується зразок з надрізом, який жорстко закріплюється в пристосуванні з інварової сталі та піддається охолодженню з встановленою швидкістю. Принцип методу є подібним принципу визначення низькотемпературних характеристик асфальтобетону методом TSRST (розглянуто в розділі 2).

Розміри зразка та форми для його фіксування наведені на рис. 1.60. Форма та розміри зразка підбрані на основі розрахунку таким чином, щоб найбільш точно моделювати механічні деформації від розтягу, які виникають у в'язучому, під час стискання асфальтобетонного покриття, викликаного зниженням температури.

Під час виготовлення зразка в силіконову форму встановлюють кінцеві форми з алюмінію та заливають нагріте до температури  $160 \pm 5$  °С в'язуче (у випадку використання бітуму, модифікованого полімером температура в'язучого підвищується до  $180 \pm 5$  °С). Після

охолодження зразка за кімнатної температури впродовж 1 год, його переносять до водяної бані з температурою води + 5 °С, де й витримують впродовж 30 хв. Охолоджений зразок виймають з силіконової форми та ретельно оглядають на наявність тріщин, сколів та повітряних порожнин. У випадку наявності вищезначених дефектів зразок для випробування не використовується.



а – зразок з формою, б – кінцева форма з алюмінію,  
в – силіконова форма

Рисунок 1.60 – Зовнішній вигляд зразка та його розміри для випробування методом NSCT (розміри наведені в мм), [102]

Для випробування зразків автори роботи [102] використовували універсальний реометр динамічного зсуву (рис. 1.61). Зразок закріплюється зверху до рухомої навантажувальної рами, а знизу до нерухомої рами. На верхній навантажувальній рамі закріплюються LVDT-датчики, які відстежують положення верхнього кінця зразка та утримують зразок на одному рівні при зміні його положення за рахунок скорочення зі зниженням температури. Під час зниження температури за допомогою датчиків реометру відбувається відстеження зміни напруження від осьового розтягування. Коли зразок розтріскується відбувається різка зміна осевої сили, що й фіксується системою.

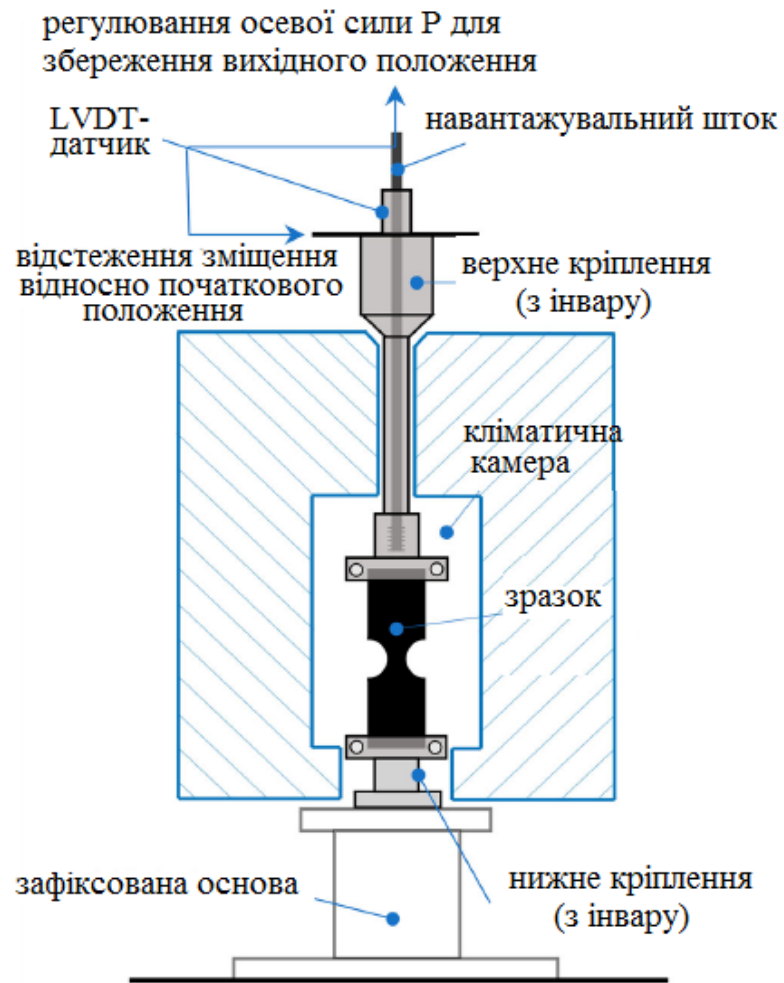


Рисунок 1.61 – Зовнішній вигляд реометру з встановленим зразком, [102]

За даними розробників метод має високу збіжність та відтворюваність отримуваних результатів (3,5 – 5 %), що є значно меншим, ніж в методі ABCD.

Ще одним з напрямків оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів є методи, основані на акустичній емісії [103 – 104]. Оскільки ці методи переважно використовуються для випробування асфальтобетону, вони більш детально розглянуті в 2 розділі. Стосовно випробувань бітумних в'язучих методом акустичної емісії то автори роботи [8] відносять до основної переваги можливість під час випробування безпосередньо визначати температуру крихкості, при цьому відсутня потреба в будь-яких додаткових розрахунках. Випробування, основані на акустичній емісії дозволяють оцінювати низькотемпературні властивості як бітумів, так і модифікованих бітумних в'язучих. Отримувані результати характеризуються високою збіжністю та відтворюваністю. Суттєвим недоліком методів, основаних на акустичній емісії є значна кількість в'язучого, потрібного для випробування, що в свою чергу унеможливорює або значно ускладнює використання цих методів для визначення температур крихкості в'язучих екстрагованих з покриття та відновлених.

Всі вищенаведені методи, не зважаючи на їх перспективність, на даний час не отримали широкого поширення і знаходяться на стадії доробки чи стандартизації.

### **1.3.6 Вітчизняні методи оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів**

У вітчизняній дорожній галузі першими нормованими методами оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів були методи визначення penetрації за температури 0 °С (навантажування в 100 гр прикладалось впродовж 60 с) та розтяжності за температурою 0 °С. Початок нормування цих показників відноситься до 1952 р., коли введено в дію ГОСТ 1544 «Бітуми нафтові дорожні», розробленого групою науковців на чолі з А.І. Лисихіною. Вважалось, що чим більші значення цих показників, тим більша пластичність бітуму за температури 0 °С та тим більш низькою є температура крихкості в'язучого, а деякі науковці навіть вважали, що penetрація за 0 °С є більш інформативним показником низькотемпературних властивостей бітумів, ніж температура крихкості, визначена за методом Фраасу.

Нормування безпосередньо температури крихкості дорожніх бітумів, визначеного за методом Фраасу, розпочато в 1966 р. з введенням в дію стандарту ГОСТ 11954 «Бітуми нафтові дорожні в'язкі, поліпшені», в якому вперше у вітчизняній практиці була здійснена спроба регламентувати властивості бітумів з оптимальною дисперсною структурою.

Саме в 1966 р. була сформована вітчизняна нормативна система оцінювання якості низькотемпературних властивостей нафтових дорожніх бітумів, яка складалась з трьох показників: температури крихкості за Фраасом, пенетрацією за температури 0 °С та розтяжністю за температури 0 °С. Встановлені в ГОСТ 11954-66 значення вищенаведених показників збереглись майже без змін в подальших редакціях вітчизняних стандартів, що регламентували технічні умови на дорожні бітуми (рис. 1.62 – 1.64) [105].

В 70 – 80-их роках минулого століття в БашНІІП (Башкирському науково-дослідному інституті нафтової промисловості) та СоюздорНДІ було розроблено ряд приладів та методів оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів.

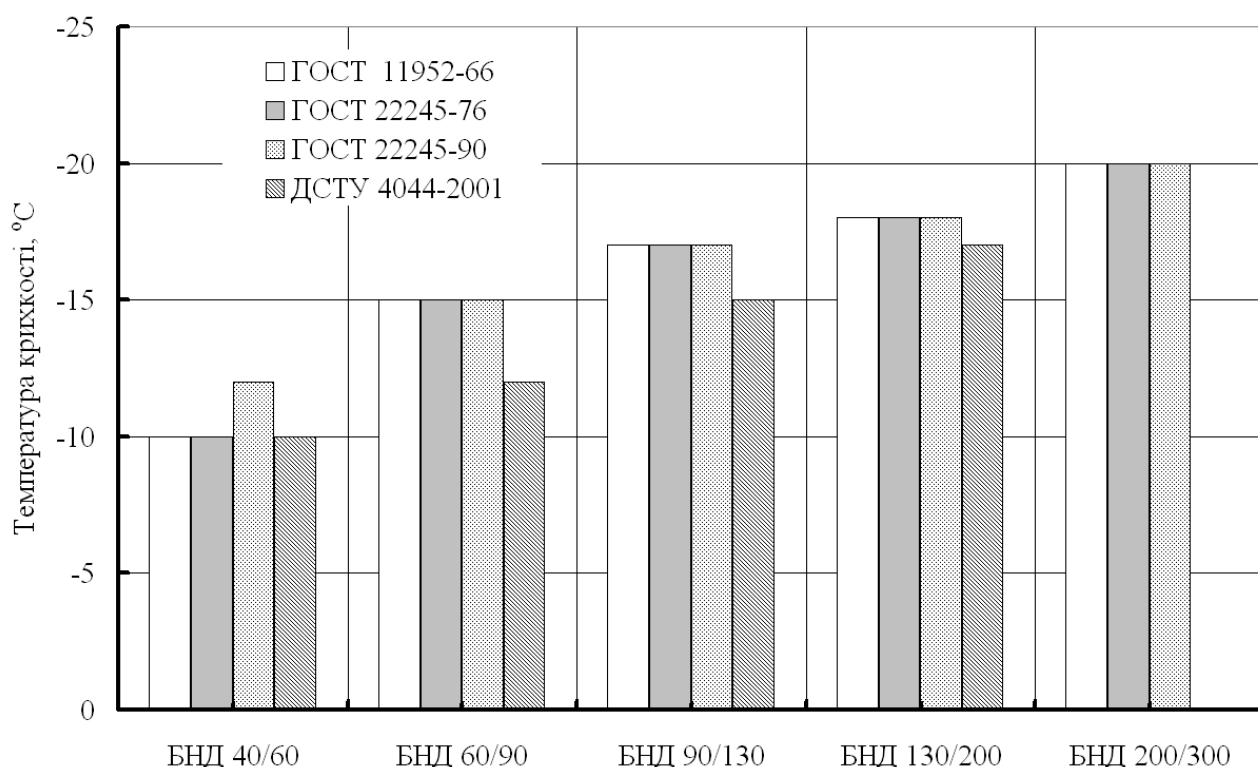


Рисунок 1.62 – Нормування значень температури крихкості за методом Фраасу у вітчизняних стандартах на дорожні в'язкі бітуми

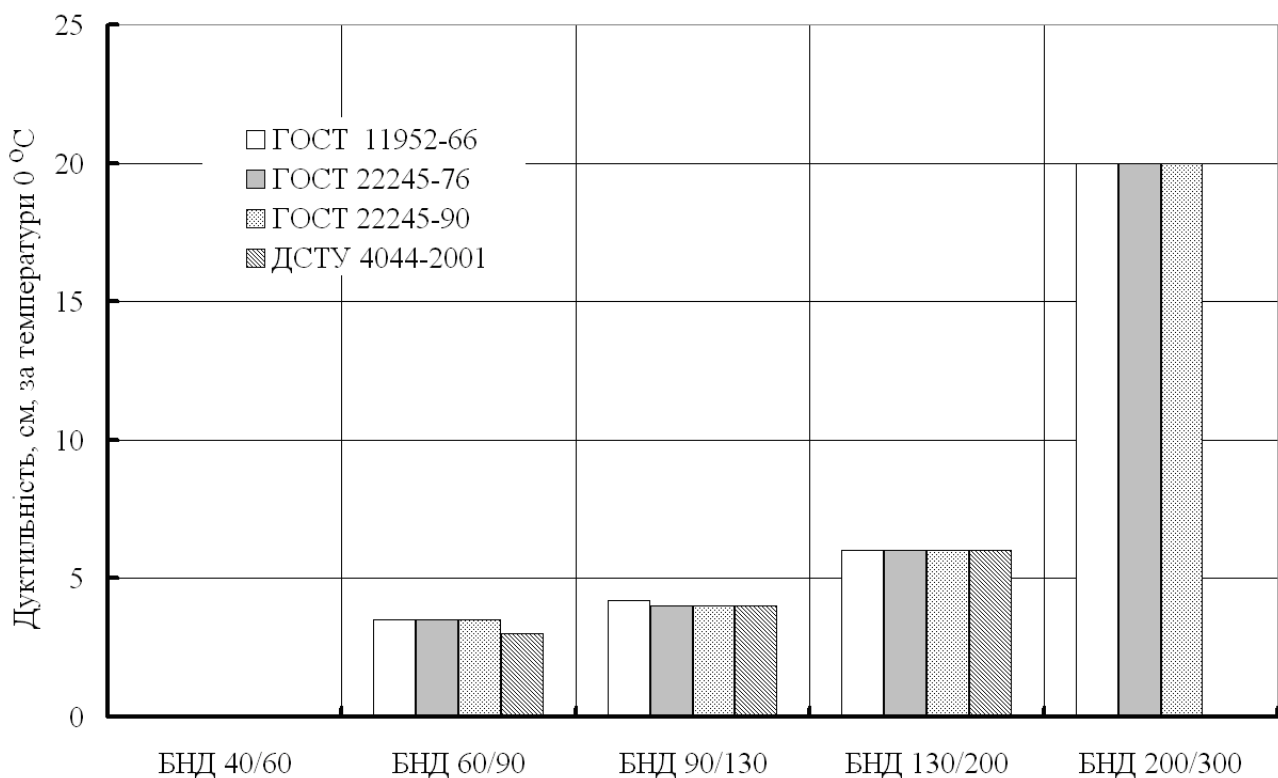


Рисунок 1.63 – Нормування значень дуктильності, визначених за температури 0 °С у вітчизняних стандартах на дорожні в'язкі бітуми

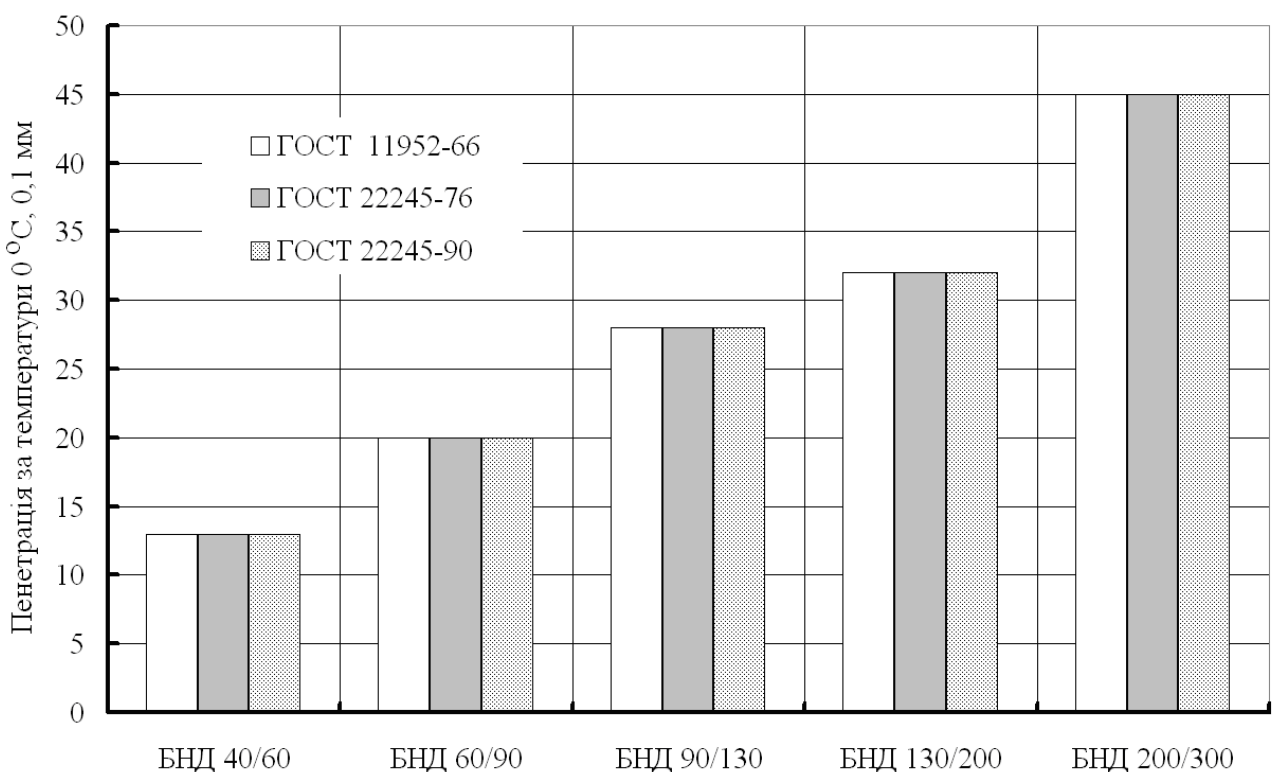
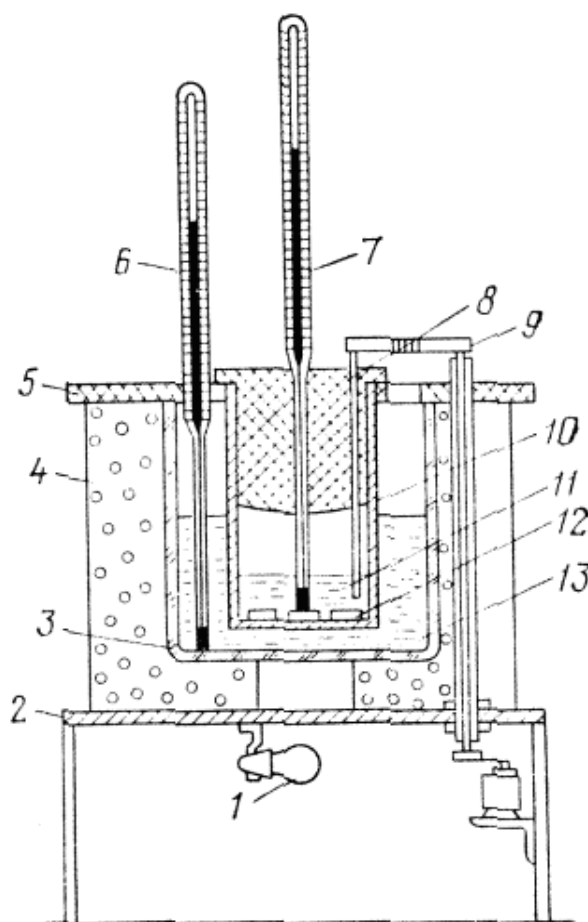


Рисунок 1.64 – Нормування значень глибини проникності голки, визначеної за температури 0 °С у вітчизняних стандартах на дорожні в'язкі бітуми

Одним з розроблених був метод визначення температури розтріскування бітуму від дії температурних напружень (рис. 1.65). В цьому методі використана ідея І. Маркуссона, заснована на відшаруванні в'язучого від поверхні термометра при охолодженні. Визначення температури розтріскування в запропонованому методі здійснювалася за рахунок різниці коефіцієнтів лінійного розширення бітуму та скляної підкладки. За температуру розтріскування приймалася температура, за якої в бітумному зразку діаметром 37 мм та товщиною 0,5 мм, нанесеному на скляну пластину й охолоджуваному в термостаті з постійною швидкістю, з'являється тріщина. Під час випробування для забезпечення рівномірного охолодження зразків використовувалася інертна по відношенню бітуму рідина (наприклад, гліцерин, етиловий спирт або суміш етиленгліколю та води).



1 – освітлення, 2 – стіл, 3 – посуд, 4 – теплоізоляція, 5, 8 – кришки, 6, 7 – термометри, 9 – мішалка, 11, 13 – термостатуюча та охолоджуюча рідини, 10 – стакан, 12 – пластинка з бітумом

Рисунок 1.65 – Прилад для визначення залежності температури розтріскування бітуму від температурних напружень, [6]

Значення температури розтріскування бітуму, визначені за методом БашНДІ НП, завжди нижче температури склування, визначеної дилатометричним способом, на 3 – 9 °С. В силу об'єктивності фізичної сутності, відносної простоти проведення випробування і його малої тривалості (від 20 хв до 40 хв), а також меншого розкиду результатів (в 3 – 5 разів менше, ніж у випадку крихкості бітуму, визначеному за методом Фрааса) за даними Печеного Б.Г., цей метод був рекомендований для застосування у виробничих умовах. Однак він так і не був впроваджений у виробництво, тому що для цього було потрібно переглянути існуючі стандарти та забезпечити лабораторії охолоджуючими пристроями.

Під час розробки методу БашНДІНП було здійснено співставлення результатів визначення отриманих температур крихкості зі значеннями температури крихкості за методом Фраасу. На основі отриманих даних встановлено існування лінійної залежності між цими температурами, при цьому кут нахилу цієї залежності суттєво залежить від нафти, з якої виготовлено бітум. Для бітумів, отриманих шляхом окислення в кубі чи колоні, або шляхом вакуумної концентрації, ця залежність описується рівнянням:

$$T_p = \frac{1}{K}(T_{кр} + 21) - 45, \quad (1.24)$$

де  $T_p$  – температура розтріскування за методом БашНДІНП, °С;

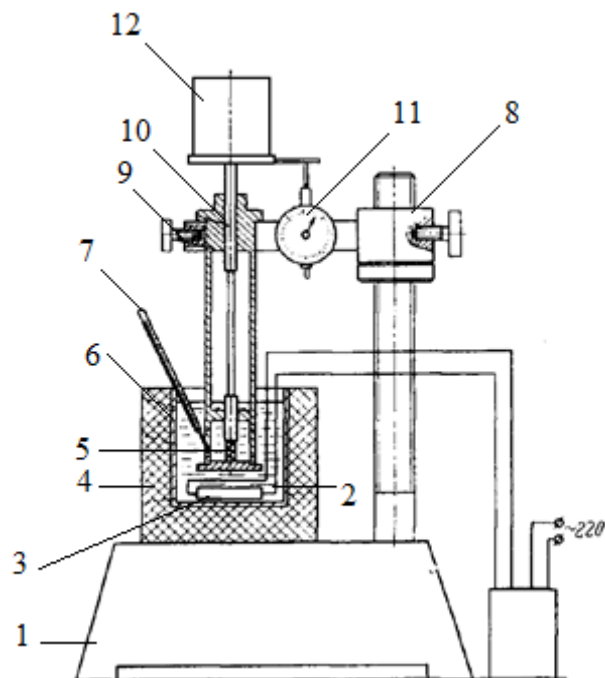
$T_{кр}$  – температура крихкості за методом по Фраасу, °С;

$K$  – коефіцієнт, що залежить від нафти, з якої виготовляється бітум.

В Казанському інженерно-будівельному інституті була створена установка для випробування бітумів в інтервалі температур від мінус 65 °С до + 50 °С (рис. 1.66), принцип дії якої було побудовано на методі термомеханічних кривих В.А. Каргіна.

Для випробування використовувалися зразки-циліндри діаметром 10 мм та висотою 15 мм. Під час випробування колонку з розташованим на ній зразком занурювали в стакан зі спиртом та додаючи тверду вуглекислоту знижали температуру до мінус 65 °С. Індикатор виставляли на нульове положення та прикладали навантаження, яке могло бути як статичним, так і динамічним з інтервалом прикладання

навантаження в 5 с. Навантаження може варіюватися в межах 0,15 – 4 кг. Підвищуючи за допомогою електронагрівача температуру зі швидкістю 1 °С/хв, вимірювали деформацію зразка. За отриманими даними будували залежність деформації від температури.



1 – універсальна стойка, 2 – розчин спирту з вуглекислотою, 3 – нагрівач, 4 – сорочка з пінопласту, 5 – зразок, 6 – фарфоровий стакан, 7 – термометр, 8 – рухомий кронштейн, 9 – направляюча колонка, 10 – плунжер з підставкою для вантажу, 11 – індикатор часового типу, 12 – вантаж

Рисунок 1.66 – Установа для термомеханічних випробувань бітуму

За температуру крижкості (морозостійкості) приймалася температура, за якої зразок починав деформуватися, а кут нахилу кривої деформації до температурної осі вважався за показник температурної чутливості бітуму.

Нажаль всі запропоновані вітчизняні методи оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів не були впроваджені у широке використання в лабораторіях дорожній галузі. Практична відсутність в дорожніх лабораторіях приладів для оцінювання низькотемпературних властивостей в'язучих призвела до того, що ці показники майже ніколи не визначались на практиці та не враховувались при оцінці якості бітумів та прогнозуванні їх впливу на властивості асфальтобетонів.

## 2 МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОНІВ

Низькотемпературні властивості асфальтобетонів визначаються головним чином властивостями бітумних в'язучих, що входять до їх складу [106]. При цьому гарантованої кореляції між низькотемпературними властивостями бітумних в'язучих та асфальтобетонів й досі не встановлено. Однією з причин цього може бути те, що властивості вихідних в'язучих та в'язучих у складі асфальтобетону значно відрізняються і на ступінь такої зміни суттєво впливають різноманітні фактори, які повною мірою не можуть бути враховані під час проектування асфальтобетонних шарів (дотримання технологічних режимів приготування асфальтобетонних сумішей та влаштування асфальтобетонного покриття; тип, гранулометричний склад та характер поверхні кам'яних матеріалів; пористість асфальтобетону; зміна властивостей бітумних в'язучих, що входять до складу асфальтобетону та, відповідно, самого асфальтобетонного покриття з часом експлуатації; кліматичні та транспортні особливості експлуатації асфальтобетонного покриття та інше). Іншою причиною є сукупність кліматичних і транспортних напружень, що діють на асфальтобетонне покриття, врахування яких в даний час є не вирішеною задачею. Тим не менше вплив деяких з цих факторів на властивості асфальтобетону може бути змодельоване в лабораторних умовах. Виходячи з цього прогнозування низькотемпературних властивостей асфальтобетонних покриттів, ґрунтоване на експериментальному встановленні або розрахунку температури розтріскування асфальтобетонних зразків є більш перспективним та точним, ніж на основі визначення температур крихкості бітумних в'язучих.

Основними причинами низькотемпературного розтріскування асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг може бути вплив екстремально низьких температур (так зване термічне розтріскування) або тривалий вплив помірних низьких температур та навантаження від автомобільного транспорту (так звана термічна втомленість) [107]. В обох випадках в основі механізму низькотемпературного розтріскування асфальтобетону лежать розтягуючі напруження, що виникають в матеріалі при зниженні його температури. Максимальні розтягуючі напруження виникають у верхньому шарі асфальтобетонного пок-

риття, оскільки його температура є найнижчою, та в подовжньому напрямку, оскільки в цьому напрямку покриття має більше обмежень.

Під час зниження температури асфальтобетонного покриття в ньому зростають розтягуючі напруження, темп зростання яких залежить від швидкості зниження температури в покритті. У випадку коли термічне напруження становиться рівним або перевищує межу міцності асфальтобетону на розтяг, на поверхні асфальтобетонного шару виникає тріщина, яка в подальшому поширюється вниз по глибині шару (рис. 2.1). В залежності від того наскільки термічне напруження перевищує межу міцності на розтяг, тріщина може або під впливом екстремальної температури одночасно поширитися по всій глибині шару асфальтобетону або поширюватися по глибині за рахунок дії додаткових термічних циклів [107].

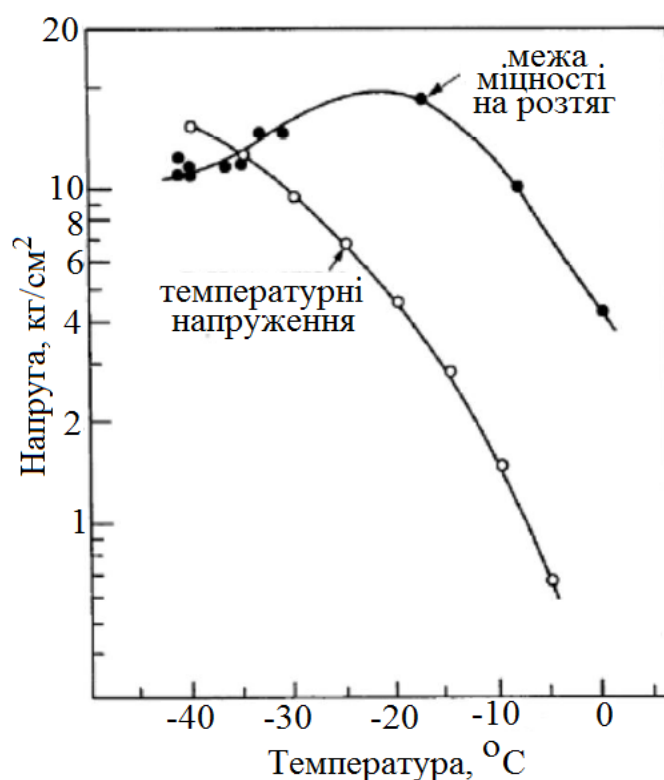


Рисунок 2.1 – Визначення температури розтріскування асфальтобетону, [107]

В даний час широко розповсюдженими є два підходи до визначення температури розтріскування асфальтобетону: перший – оснований на положеннях механіки суцільних середовищ (рис. 2.2, а) та другий – оснований на положеннях механіки руйнування (рис. 2.2, б) [108].

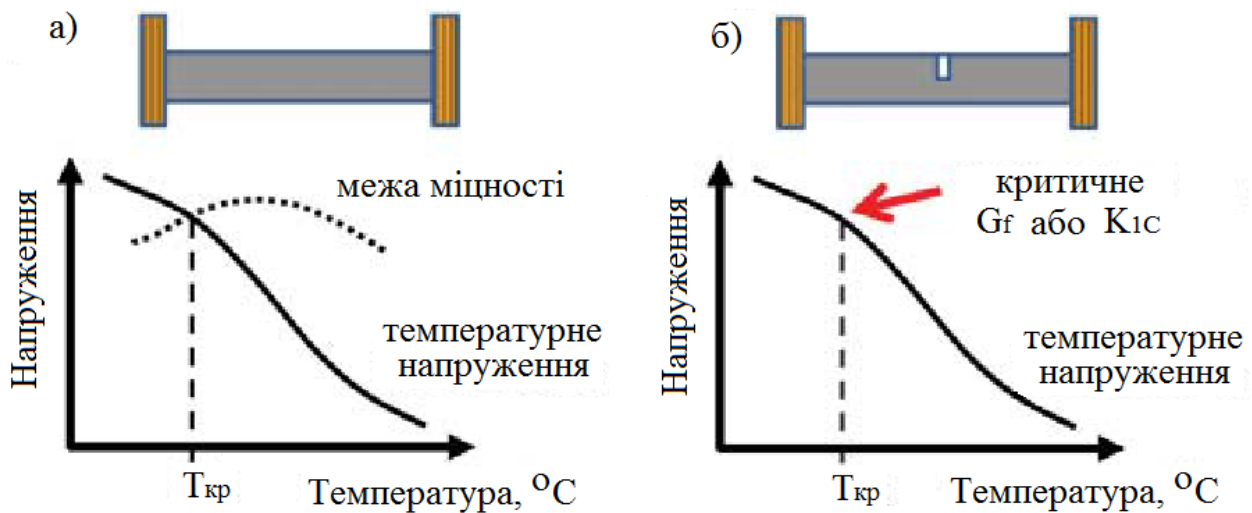


Рисунок 2.2 – Підходи, засновані на принципах механіки суцільного середовища (а) та механіки руйнування (б) для визначення температури розтріскування асфальтобетону, [108]

Принципова різниця в цих підходах полягає в наявності попередньо ініційованого розрізу на тілі асфальтобетонного зразка при використанні методів, основаних на положеннях механіки руйнування. Визначення температури розтріскування за допомогою обох підходів потребує оцінки термічних напружень як функції часу або температури та може бути здійснено методом кінцевих елементів. Для точної оцінки термічних напружень необхідним є знання модуля релаксації асфальтобетону та коефіцієнту температурного розширення. Після встановлення (розрахунку) термічних напружень є можливим визначити (розрахувати) температуру розтріскування асфальтобетону, використовуючи експериментально визначенні значення межі міцності на розтяг (якщо використовуються положення механіки суцільних середовищ) або енергії руйнування чи в'язкості руйнування (якщо використовуються положення механіки руйнування).

Виходячи з вищенаведеного, існуючи на даний час методи визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів можуть бути розподілені на такі, що основані на [109]:

- положеннях механіки суцільних середовищ;
- положеннях механіки руйнування;
- акустичній емісії.

## 2.1 Методи визначення низькотемпературного розтріскування асфальтобетону, основані на положеннях механіки суцільних середовищ

В основі методів цієї групи лежить ідея згідно якої руйнування асфальтобетонних зразків відбувається за рахунок термічних напружень, що викликані певною температурою, яка й приймається за температуру розтріскування (рис. 2.3). Випробування здійснюються на суцільних асфальтобетонних зразках, без ініціювання тріщини.

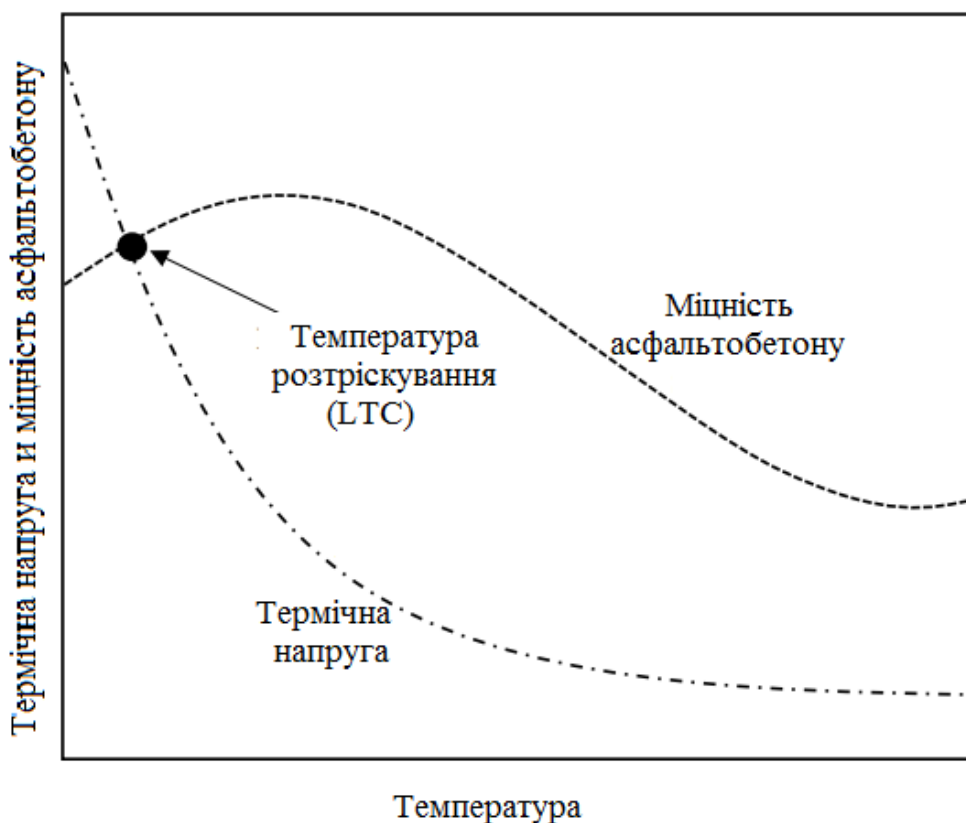


Рисунок 2.3 – Модель розтріскування асфальтобетону за рахунок термічних напружень, [111]

Методи цієї групи можуть бути розподілені на ті, в яких безпосередньо визначається температура розтріскування та ті, в яких низькотемпературні властивості оцінюються опосередковано, наприклад за значеннями міцності, визначеними за певних температур.

До методів, що дозволяють безпосередньо визначати температури розтріскування відносяться:

– метод випробування на граничне низькотемпературне напруження (Termal Stress Restrained Specimen Test – TSRST);

– метод випробування реометром на вигін балки (Bending Beam Rheometer test – BBR);

– аналізатор термічного розтріскування асфальтобетону (Asphalt Thermal Cracking Analyser – ATCA).

Загальною характеристикою та в той же час перевагою цих методів є те, що вони дозволяють в тій чи іншій мірі імітувати вплив низьких температур повітря на асфальтобетонне покриття в дорозі та безпосередньо визначати температури розтріскування. Це в свою чергу призводить до того, що в методах застосовується складне та кошторисне виробниче обладнання, що може бути віднесено до недоліків цих методів.

Більш поширеними є випробування, в яких низькотемпературні властивості асфальтобетону визначаються опосередковано. Одним з таких є метод випробування на непрямий розтяг.

### **2.1.1 Метод випробування на непрямий розтяг**

Метод випробування на непрямий розтяг (Indirect tensile test – IDT) було вперше запропоновано ще в 50-х роках минулого століття для оцінки міцності цементного бетону. Наприкінці минулого століття під час виконання в США Програми стратегічних досліджень автомобільних доріг (SHRP), Buttlar G.W. та Roque R. адаптували це випробування для оцінювання схильності асфальтобетонів до розтріскування за низьких температур, розробивши метод, що отримав назву Superpave IDT. Згідно з запропонованою методикою стало можливим визначати за різних температур податливість при повзучості асфальтобетонних зразків, а також їх жорсткість та міцність на розтяг [111, 112]. З того часу вихідна методика, обладнання, що використовувалися для випробування та методи аналізу зазнали суттєвих модифікацій та покращень, що значно позначилось на точності та надійності отримуваних результатів випробувань.

В основі методики прогнозування низькотемпературного розтріскування асфальтобетону Superpave IDT лежать визначення податливості при повзучості та міцності на розтяг за низьких температур. Вертикальне стискаюче навантаження на зразок прикладається вздовж його верхньої кромки по діаметру циліндричного зразка, створюючи зону рівномірної розтягуючої напруги вздовж горизонтальної осі (рис. 2.4) [113; 114].

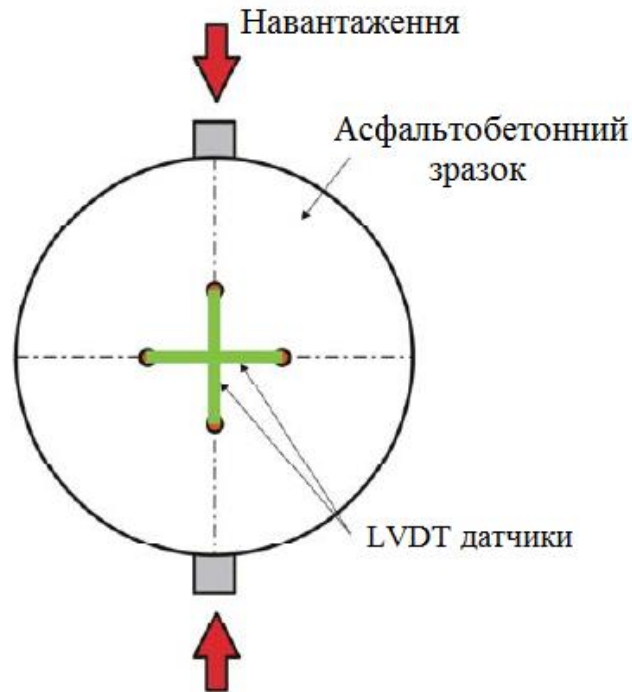


Рисунок 2.4 – Схема прикладання навантаження при випробуванні методом IDT, [113]

Для випробування приймаються циліндричні асфальтобетонні зразки діаметром 150 мм та товщиною 38 ... 50 мм, що можуть бути виготовлені в лабораторії шляхом ущільнення асфальтобетонної суміші за допомогою гіратора або відібрані з дорожнього покриття у вигляді кернів. Зразок для випробування розміщується в навантажувальній рамі, яка в свою чергу розташовується в кліматичній камері (рис. 2.5). Для вимірювання горизонтальних та вертикальних деформацій під час випробування використовуються датчики LVDT (диференційні трансформатори для вимірювання лінійних переміщень), що кріпляться за допомогою епоксидного клею на зразок на етапі його підготовки до випробування [112].

В початковій методиці випробування здійснювалось за трьох температур: 0 °С, мінус 10 °С та мінус 20 °С незалежно від того, яке бітумне в'язуче використовувалось для приготування асфальтобетону [40]. В подальшому були введені градації температур випробування в залежності від марки бітумного в'язучого, що використовується. Зараз випробування здійснюється за трьох температур, що знаходяться в діапазоні від мінус 30 °С до 10 °С (вибір температур залежить від марки бітумного в'язучого, що входить до складу асфальтобетону – для в'язучого марки PG XX-34 приймаються температури мінус 30 °С, мінус 20 °С та мінус 10 °С; для в'язучого марки PG XX-28 та

PG XX-22 – відповідно мінус 20 °С, мінус 10 °С та 0 °С; для марки PG XX-16 та вище – приймаються температури мінус 10 °С, 0 °С та 10 °С). Зразки перед випробуванням витримуються за температури випробування впродовж  $3 \pm 1$  год.

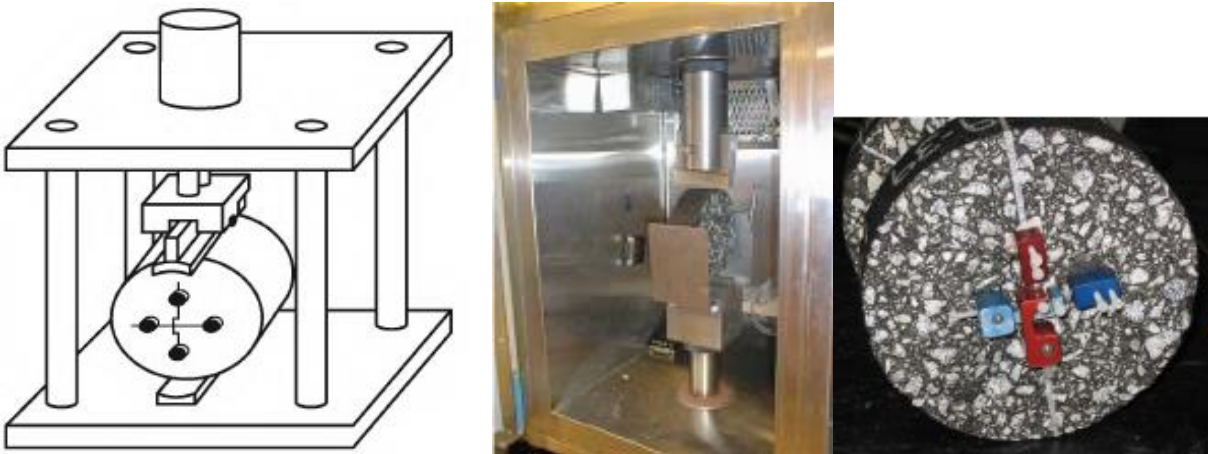


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд навантажувальної рами, зразка в кліматичній камері та зразка з LVDT-датчиками [115]

При випробуванні на повзучість у відповідності з запропонованими розробниками методики умовами [112], зразок повинен піддаватися дії температур та статичних навантажень, що забезпечують його знаходження в лінійно-пружній або лінійно-в'язкопружній зоні. Авторами методу встановлено, що зазвичай асфальтобетонний зразок демонструє лінійну поведінку при часі випробування тривалістю до 1000 с за умови низького навантаження повзучості. Виходячи з цього в діючій в даний час стандартизованій методиці прийнято, що час навантаження становить  $100 \pm 2$  с або  $1000 \pm 20$  с, при цьому горизонтальна деформація зразка під дією статичного навантаження не повинна перевищувати 0,00125 – 0,0190 мм.

Під час випробування на міцність на розтяг на зразок прикладається вертикальне стискаюче навантаження зі швидкістю 12,5 м/хв до його руйнування. Міцність на розтяг розраховується за експериментально отриманим значенням максимального навантаження на зразок.

Дані про податливість повзучості та жорсткості, отримані під час проведення випробування, перераховуються на модуль релаксації за допомогою перетворення Лапласа, після чого модуль релаксації використовується для визначення температурних напружень асфальтобетону, за якими є можливим розрахувати критичну температуру розтріскування.

Метод Superpave IDT є стандартизованим в американській [116, 117] та європейській [119] системах оцінювання якості асфальтобетону та широко використовується під час виконання робіт з проектування асфальтобетонних покриттів [115].

Згідно з даними порівняльного аналізу різноманітних методів визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів [107, 119], метод IDT є чутливим до кількості повітряних пор, типу заповнювачів, вмісту бітумного в'язучого, типу в'язучого та до зміни властивостей в'язучих за рахунок старіння.

До переваг методу IDT в оцінюванні низькотемпературних властивостей асфальтобетону може бути віднесено [109]: відносну простоту підготовки асфальтобетонного зразку (можуть застосовуватися лабораторно виготовлені зразка чи відібрані з покриття у вигляді керна); здатність імітувати напружений стан від діє колеса автомобіля на асфальтобетонне покриття; прийнятна збіжність та відтворюваність отримуваних результатів; висока кореляція ( $R^2 = 0,84$ ) лабораторно встановлюваних температур крихкості асфальтобетонних зразків з температурами розтріскування асфальтобетонного дорожнього покриття [107, 112]; можливість використання поширеного контрольновимірювального обладнання (метод IDT широко використовується для оцінки міцності асфальтобетонних зразків за експлуатаційних температур та для оцінювання їх водостійкості); легкість в аналізі отриманих даних, що здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного комплексу.

До недоліків методу можна віднести [109]: відносно тривалий час випробувань; обмеженість в наявності спеціалізованих комплексів обладнання, призначених для проведення всього комплексу випробування, що мають вартість порядку 100 000 \$ (однак випробування може бути виконано за допомогою широко поширених в дорожніх лабораторіях гідравлічних випробувальних машин та кліматичних камер); значна вартість екстензометрів, що використовуються у випробуванні; необхідність в високому професійному рівню персоналу, що проводить випробування, особливо під час калібрування обладнання та проведення випробування по визначенню повзучості. Все це призводить до того, що метод IDT не може використовуватися в повсякденному контролі якості асфальтобетону, що й підтверджується даними, наведеними в [113].

Основними недоліками методу Superpave IDT є те, що, по-перше,

температура розтріскування не визначається експериментально, а розраховується, а по-друге, температура розтріскування асфальтобетонних зразків розраховується шляхом застосування моделі термічного розтріскування (TCModel), яка в даний час використовується в США під час проектування автомобільних доріг. За рахунок припущень та спрощень, прийнятих в цій моделі, розраховані значення температур розтріскування асфальтобетону можуть відрізнятися від температур розтріскування, що встановлені безпосередньо на дорозі або визначені за методом TSRST [120]. Підтвердженням цього є експериментальні дані випробування асфальтобетонних кернів, відібраних на дорозі, згідно яких результати міцності зразків, визначених за методом Superpave IDT є більш низькими, ніж після випробування методом TSRST [113].

Певні складнощі у випробуванні за методом Superpave IDT спонукали науковців до пошуку методів випробування асфальтобетонних зразків, результати яких можуть бути використані замість міцності на розтяг, встановленої за методом IDT. Так, наприклад, для спрощення визначення температури розтріскування асфальтобетону за методом Superpave IDT може бути використана встановлена в роботі [121] лінійна залежність з високою кореляцією між максимальним напруженням за методом Superpave IDT та міцністю на розтяг, визначеною методом напівкруглого згину SCB (з ініційованим розрізом) (рис. 2.6).

В роботі [122] встановлено, що результати визначення термічних напружень під час випробування на податливість при повзучості за методом Superpave IDT є близькими до відповідних значень, отриманих під час випробування асфальтобетонних зразків методом BBR (Bending Beam Rheometer). Виходячи з цього температури розтріскування асфальтобетону, розраховані за допомогою моделі термічного розтріскування (TCModel) є майже однаковими (різниця становить 1 – 2 °C) (рис. 2.7). Враховуючи, що обладнання для проведення випробувань методом BBR є широко поширеним в дорожній галузі багатьох країн світу, а час випробування є значно меншим, результати, що отримуються під час випробування на податливість при повзучості можуть бути використані в якості альтернативи результатам, отриманим в методі Superpave IDT.

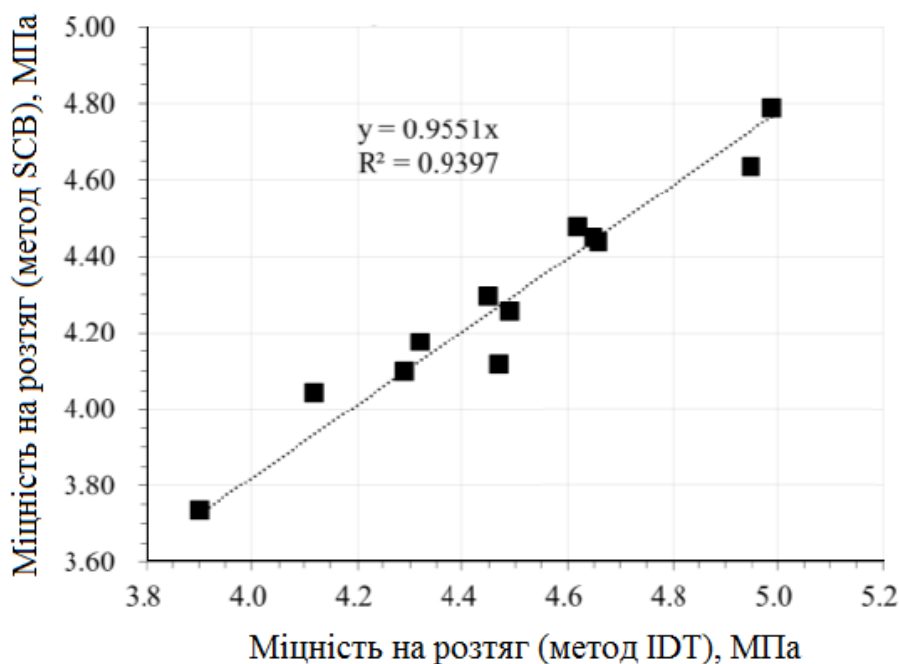


Рисунок 2.6 – Залежність між значеннями міцності на розтяг, визначеними за методами Superpave IDT та SCB, [121]

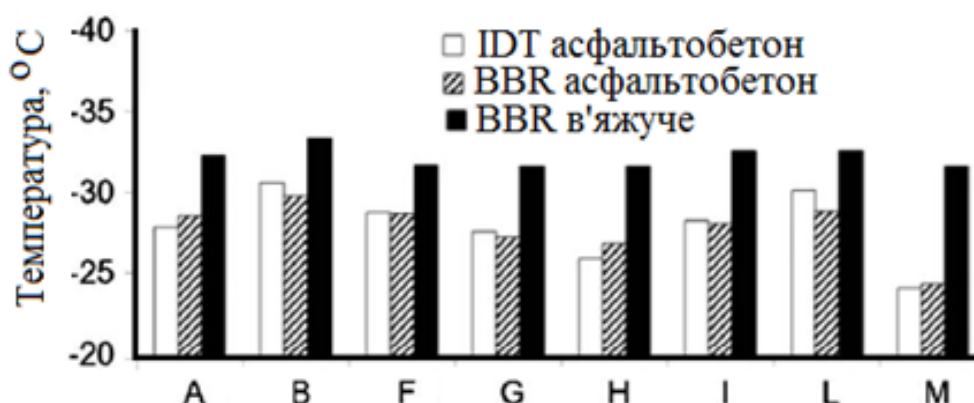


Рисунок 2.7 – Порівняльне дослідження температури розтріскування асфальтобетонних зразків, розрахованих на основі даних податливості при повзучості, визначених методами Superpave IDT і BBR, та температурою розтріскування бітумного в'язучого, визначеною методом BBR, [122]

Подібні дні приведені й в роботах [123 – 124], в яких здійснено співставлення результатів визначення кривих повзучості 20 асфальтобетонів різних типів та виготовлених на різних бітумних в'язучих (модифікованих і немодифікованих), отриманих згідно випробувань за методами Superpave IDT і BBR. Автори дійшли висновку, що використання даних повзучості, визначених в методі BBR, дозволяє отримувати температури розтріскування, розраховані в моделі TCMModel,

аналогічні тим, що й на основі даних повзучості, отриманих в методі Superpave IDT.

До близьких висновків дійшли й автори роботи [115], які на основі експериментально отриманих залежностей встановили, що характеристики податливості повзучості асфальтобетонів, визначені методами Superpave IDT та BBR є порівнюваними.

### **2.1.2 Випробування асфальтобетонів за допомогою балочного реометру**

Випробування за допомогою балочного реометру (Bending Beam Rheometer або Bending Beam Creep test), вже більше 30 років використовується в різних країнах світу для оцінювання властивостей бітумних в'язучих. Доступність обладнання, його прийнятна вартість, досконало апробована методика проведення випробування, а також висока збіжність і відтворюваність отримуваних результатів спонукали дослідників звернути увагу на можливість використання цього методу BBR оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів [126]. Дослідниками Коннектикутського університету в США, на основі результатів масштабного дослідження, доведено можливість визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетону методом BBR [123 – 124, 15].

Виготовлення зразків для випробування за методом BBR здійснювалось шляхом розрізання асфальтобетонного зразка, ущільненого гіратором, на частини розміром  $127 \times 12,7 \times 6,35$  мм (рис. 2.8) [126, 123].

На відміну від випробування зразків з бітумного в'язучого, асфальтобетонні зразки характеризуються меншою деформативністю, тому в загальноприйнятій методиці BBR були внесені наступні зміни: максимальне навантаження збільшено до 7159 мН; час прикладання навантаження подовжено до 1000 с; навантаження, що прикладалось на зразок визначалось температурою випробування та типом і гранулометриєю асфальтобетону і розподілялось на попереднє навантаження, яке відповідало прогину зразка в 30 мкм і основне навантаження, яке відповідало прогину в 300 мкм, що становить 5 % від товщини асфальтобетонного зразка.

На основі результатів експериментальних досліджень встановлено, що отримані методом BBR дані повзучості, дозволяють розра-

ховувати в моделі TCSModel температури розтріскування асфальтобетону відповідні тим, що розраховуються на основі даних повзучості, отриманих методом Superpave IDT (рис. 2.9).

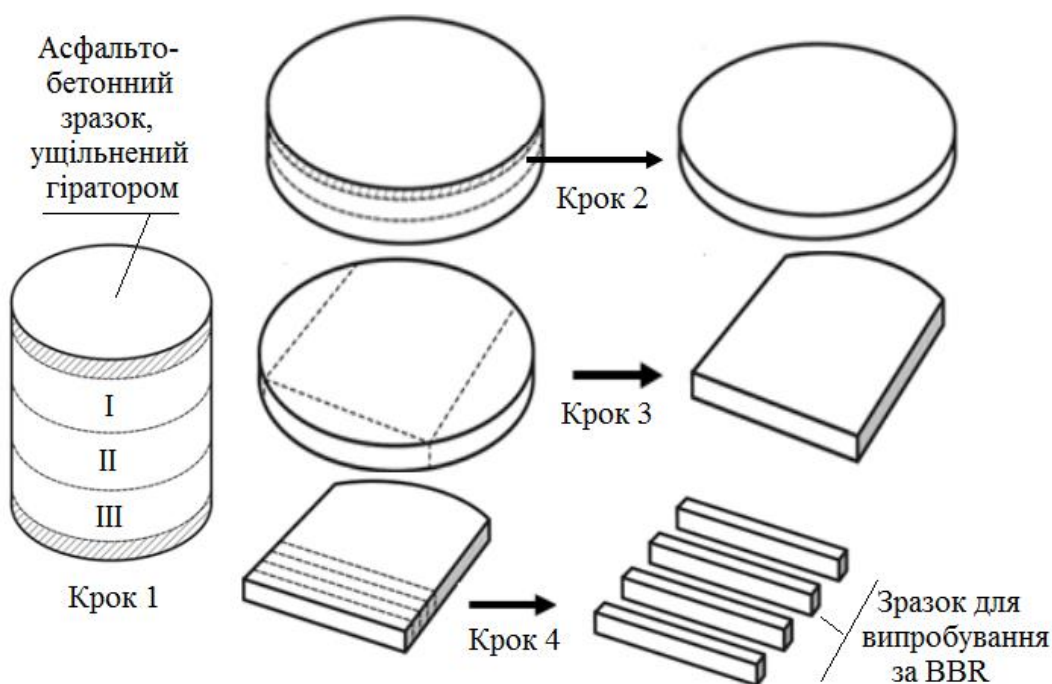


Рисунок 2.8 – Підготовка асфальтобетонних зразків для випробування методом BBR, [125 – 126]

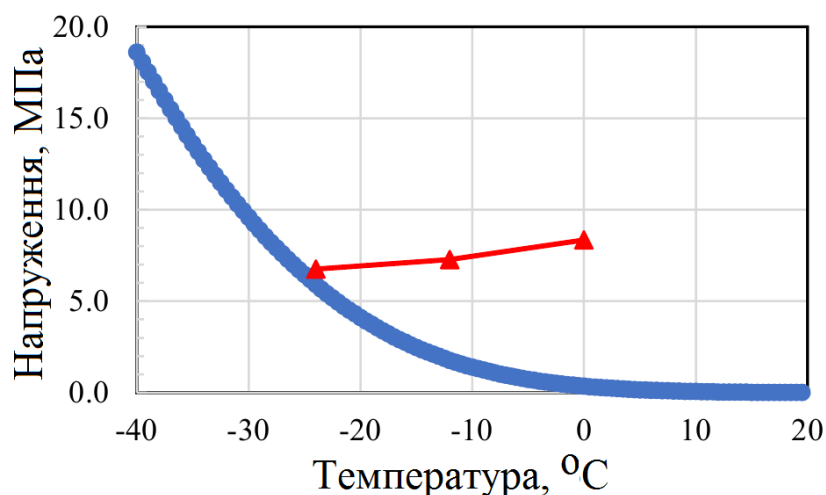


Рисунок 2.9 – Розрахунок критичної температури розтріскування асфальтобетону на основі даних, визначених методом BBR, [127]

Отримані результати лягли в основу розробки проекту стандарту AASHTO «Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Bending Beam Rheometer (BBR)».

Основним аргументом проти використання BBR для оцінювання

асфальтобетонів були замалі розміри зразків, які не перевищують максимальний розмір зерен кам'яного матеріалу, що входить до складу асфальтобетону. Однак дані випробувань зразків різного розміру (рис. 2.10), наведені в [125] ілюструють відсутність суттєвого впливу розміру зразка на отримувані результати, навіть в тому випадку коли максимальний розмір зерна кам'яного матеріалу в асфальтобетоні перевищує розмір зразка-балки [126], а результати випробувань асфальтобетонних зразків методом ВВР, наведені в [128], свідчать про те, що вплив розміру зерен кам'яного матеріалу на низькотемпературні властивості асфальтобетону є незначним. Незважаючи на різницю в розмірах зерен кам'яних матеріалах, які є присутніми в зразках-балках, виготовлених з одного асфальтобетонного зразка, відтворюваність результатів повзучості не перевищує 4 – 13 % [Velasquez R., Zofka A.,].



Рисунок 2.10 – Зразки різного розміру, що використовувалися для випробування методом ВВР, [125, 126]

В 2016 р. в університеті штату Юта (США) виконані подальші дослідження, направлені на вдосконалення методики визначення низькотемпературних характеристик асфальтобетону методом ВВР [130]. Для випробування Р. Ромега використовував асфальтобетонні зразки розміром 12,7 мм × 6,35 мм × 127 мм, що випилюються з лабораторно виготовлених зразків (з одного зразка, ущільненого за допомогою гіратору, можливо отримати 20 зразків-балок) чи з кернів, відібраних на дорозі (рис. 2.11).

Перед випробуванням, яке триває близько 8 хв, асфальтобетонні зразки термостатувалися впродовж 60 год. Випробування здійснювалось або за трьох температур (+ 16 °С, + 10 °С, + 4 °С) у випадку необхідності побудови температурної кривої залежності модулю повзучості, або за однієї температури (+ 10 °С), якщо потреби в отриманні такої залежності не було. На асфальтобетонний зразок під час випробу-

вання прикладається навантаження в 450 гр ( $4500 \pm 50$  мН) та вимірюється прогин балки впродовж 240 сек (рис. 2.11). За допомогою програмного комплексу відбувається розрахунок модулю повзучості та  $m$ -значення через 60 сек дії навантаження.

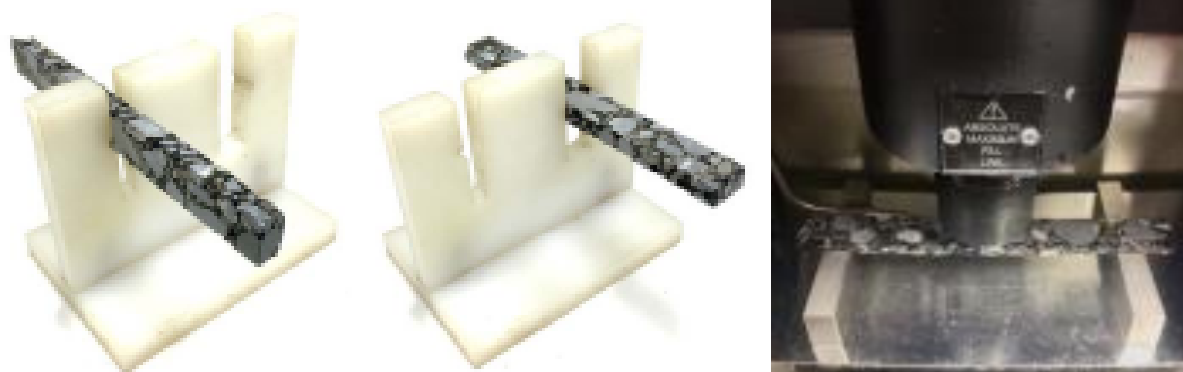


Рисунок 2.11 – Асфальтобетонний зразок та його випробування методом BBR, [130]

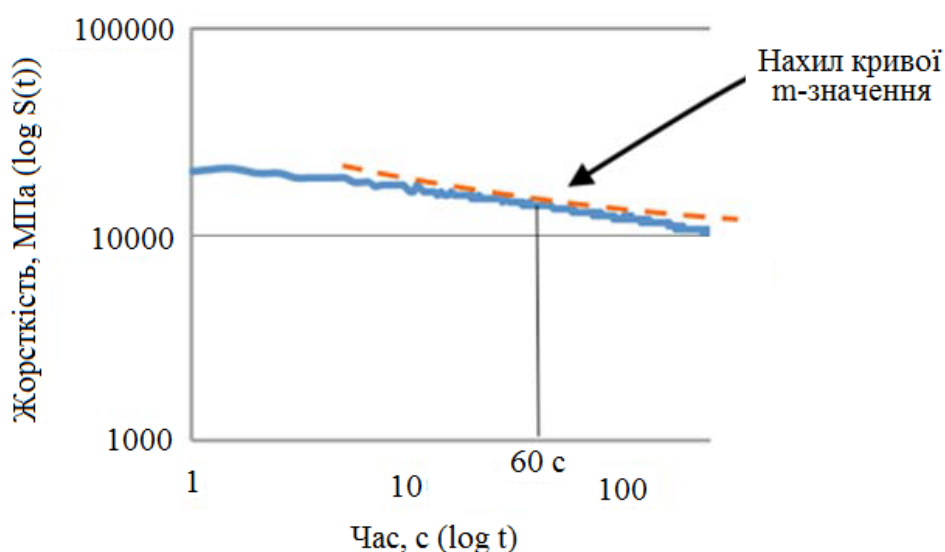


Рисунок 2.11 – Типовий вигляд залежності жорсткості від часу навантаження, [130]

На основі отриманих даних Р. Ромега [130] підтверджено раніше отримані висновки, щодо можливості використання методу BBR для визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів. На основі співставлення значень податливості при повзучості для одного

й того ж асфальтобетону, отримані методами BBR та IDT, встановлено, що ці значення хоч і не являються ідентичними, але є співставними один з одним. Крім цього на основі результатів міжлабораторних випробувань встановлено відтворюваність показника модуля повзучості, що не перевищує 10 %, в той час, як відтворюваність  $m$ -значення є більшим за 20 %. Автор робить висновок, що за рахунок того, що випробування асфальтобетонних зразків-балок методом BBR виконуються за відомою методикою на надійному і комерційно доступному обладнанні, займає малий час та не вимагає використання додаткового спеціалізованого обладнання, є «ідеальним тестом для оцінки низькотемпературних властивостей асфальтобетонів» [130].

Враховуючи однаковий принцип випробування бітумних в'язучих методом BBR та асфальтобетонів методом Bending Beam Creep test логічним є існування тісних кореляцій між показниками випробувань (жорсткістю та  $m$ -значенням), що й підтверджується результатами, наведеними в роботі [131] (коефіцієнт детермінації  $R^2 > 0,99$ ). Відповідні дані представлені на рис. 2.12.

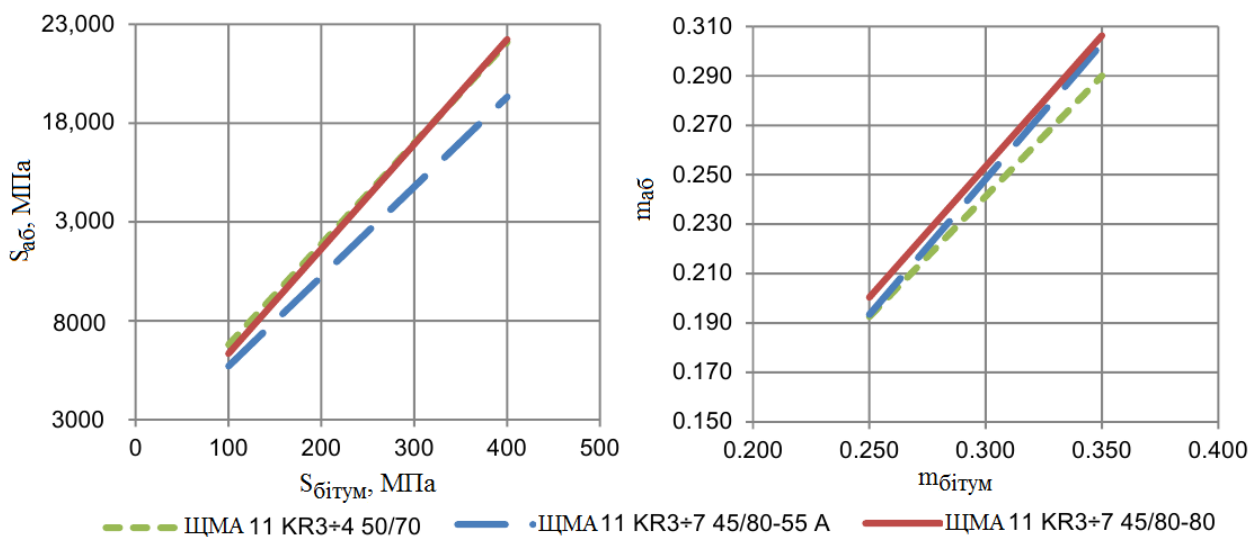


Рисунок 2.12 – Залежності між жорсткістю та  $m$ -значеннями, визначеними для бітумів та асфальтобетонів, виготовлених на цих в'язучих, роботі [131]

### 2.1.3 Випробування на граничне низькотемпературне напруження

В 60-х роках минулого століття дослідники Monismith C.L., Secor G.A., Secor K.E. запропонували метод визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонних зразків, оснований на встановленні температурних напружень та деформацій

асфальтобетону в контрольованих лабораторних умовах [131]. На початку 90-х років минулого століття в університеті штату Орегон (США) в рамках виконання Програми стратегічних досліджень у галузі автомобільних доріг (SHRP) цей метод було доопрацьовано, в результаті чого було розроблено Tensile (thermal) stress restrained specimen test (TSRST), призначенням якого стало визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів за схемою одновісного розтягування [132].

Одна з можливих конструкцій приладу для проведення випробувань TSRST наведена на рис. 2.13 [133 – 134], а зовнішній вигляд приладу наведено на рис. 2.14. Випробування асфальтобетонних зразків за методом TSRST виконується у термокамері, що здатна забезпечувати зміну температури повітря з заданою швидкістю (за звичай приймається 10 °С/год, починаючи з досягнення температури + 20 °С).

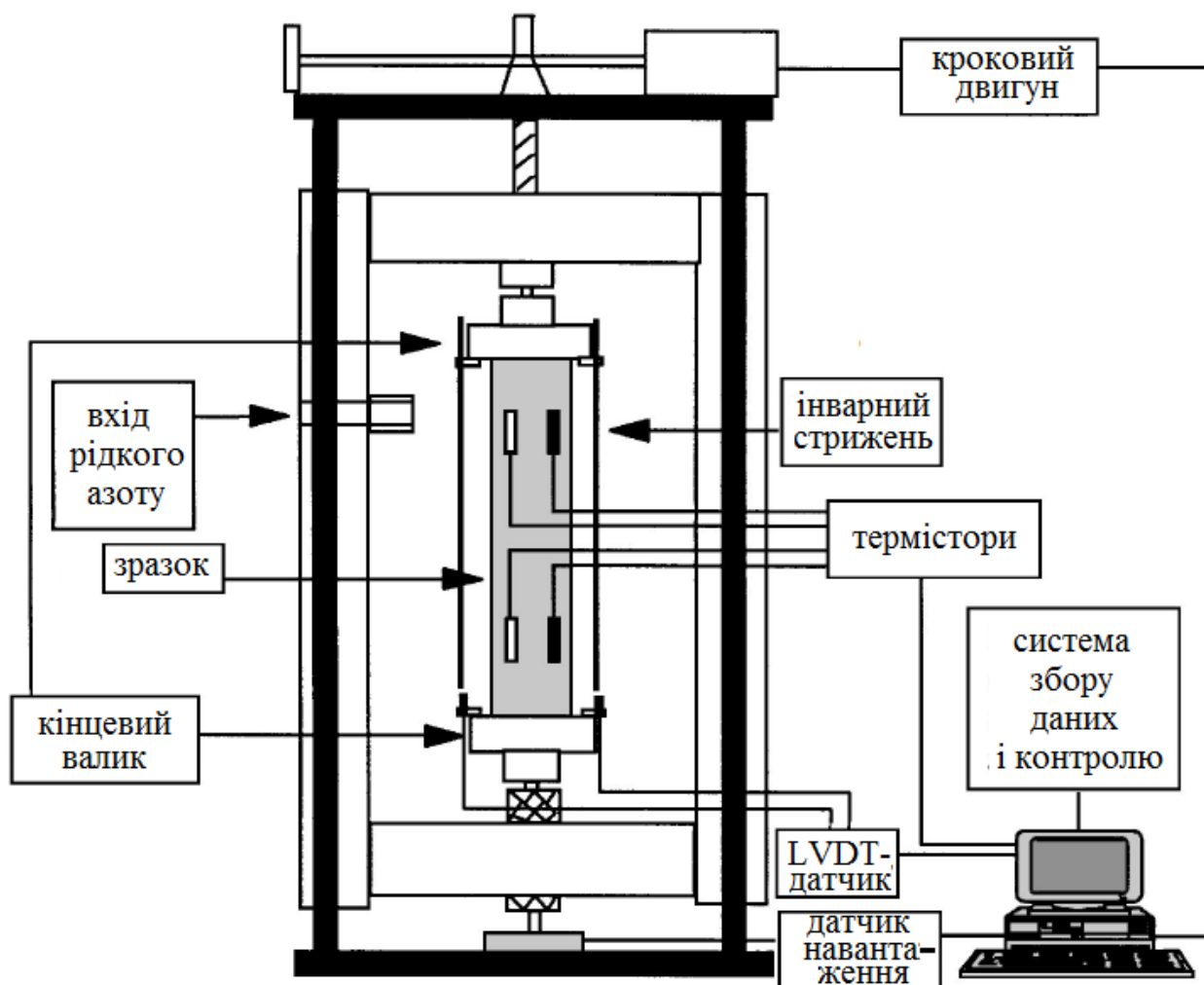


Рисунок 2.13 – Схема вимірювальної системи методу TSRST, [133]



Рисунок 2.14 – Зовнішній вигляд установки TSRST, [134]

Для проведення випробувань приймаються призматичні асфальтобетонні зразки з квадратним перерізом (з розмірами сторін 40, 50 або 60 мм в залежності від максимального розміру кам'яного матеріалу в складі асфальтобетону) або циліндричні асфальтобетонні зразки (діаметром 50 або 60 мм) [135]. Довжина зразків в незалежності від форми перерізу повинна біти не меншою 160 мм.

Згідно методики випробування, вертикально виставлений у термокамері асфальтобетонний зразок приклеюють за допомогою епоксидного клею торцями до верхньої та нижньої плити приладу та утримують його на фіксованій довжині (зменшення довжини зразка за рахунок впливу низьких температур контролюється за допомогою LVDT-датчика, який приводить в дію гвинтовий домкрат, що розтягує зразок до початкової довжини), в той час як температуру повітря в камері знижують із заданою постійною швидкістю, що в свою чергу призводить до накопичення термічних напружень в зразку та його руйнування. Під час випробування фіксують температуру та розтягуюче навантаження, на основі яких будують графік розвитку термічного напруження у часі (рис. 2.15).

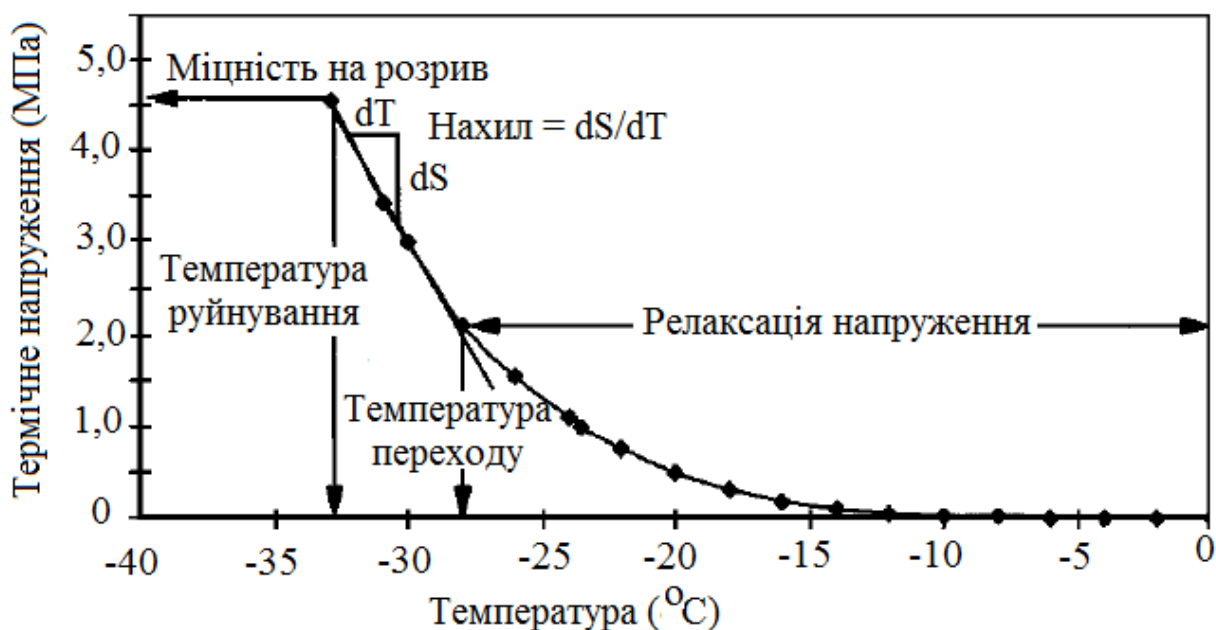


Рисунок 2.15 – Типова крива випробування асфальтобетонного зразка за TSRST, [133, 136]

На даний час метод є широко розповсюдженим в дорожніх галузях різних країн світу та стандартизованим як в американській (AASHTO TP 10 [137]), так і в європейській системах (EN 12697-46 [138]) оцінювання якості асфальтобетону. Метод є також стандартизованим в Україні (ДСТУ EN 12697-46:2018), але через високу вартість обладнання широкого використання ще не набув.

Комплекс обладнання, що використовується в методі TSRST, дозволяє крім визначення температури розтріскування встановлювати ще ряд показників:

- міцність на розрив при одновісному розтягу за заданою температурою (метод отримав назву UTST) – здійснюється шляхом розтягу прийнятого для випробування температури розтріскування зразка зі швидкістю 1 мм/хв за рядом температур і має гарну кореляцію зі значеннями міцності визначеними за різними методами (0,82 з даними, отриманими методом ВВТ, 0,94 – методом SCB) [139];

- максимальний непрямий запас міцності на розтяг за заданої температури (визначається як різниця між кривими напруження, встановленими за методами TSRST та UTST) (рис. 2.16);

- час релаксації при випробуванні на релаксацію методом RT;
- крива повзучості при випробуванні на повзучість за розтяг (метод ТСТ).

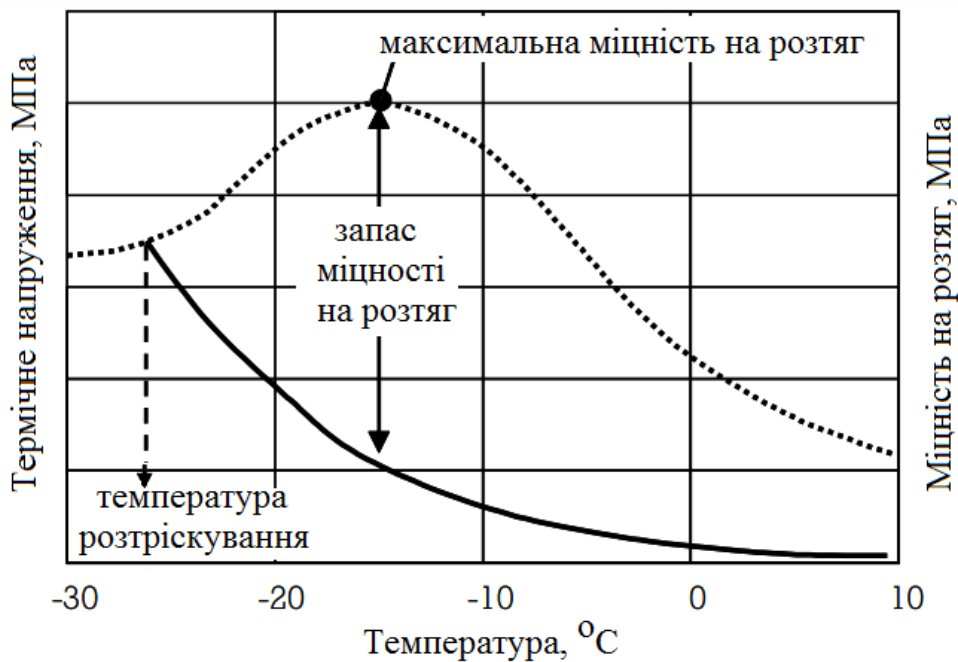


Рисунок 2.16 – Визначення запасу міцності на розтяг, [140, 141]

Під час розробки методики визначення температури розтріскування за TSRST [132] була здійснена оцінка чутливості отримуваних результатів від ряду параметрів: розмір зразка; характеристики кам'яних матеріалів; швидкість охолодження зразка, а також встановлено збіжність результатів.

На час апробації методу TSRST коефіцієнт повторюваності (95 % довірчий інтервал) при визначенні температури розтріскування становив менше 40 – 50 %. За рахунок вдосконалення обладнання, що використовується зараз, та методики підготовки зразків і проведення випробування, точність отримуваних результатів на даний час є значно вищою [142]. В діючих стандартах на метод TSRST значення збіжності та відтворюваності не нормуються, а приводяться лише як довідкові. Так, згідно EN 12697-46 [138], рекомендовано вважати результати достовірними, якщо різниця між значеннями температури розтріскування, визначеними на трьох зразках, не перевищує 2 °C.

Значний вплив на результати визначення низькотемпературних характеристик асфальтобетонів, визначених за методом TSRST, надають розміри асфальтобетонного зразка, а саме відношення його сторін (довжина/ширина). За даними [132, 142] встановлено, що чим нижче співвідношення сторін (тобто чим більш довший зразок), тим нижче температура розтріскування, так, наприклад, при змінні співвідношення довжина/ширина з 5,0 до 5,3 середні значення температури розтріскування збільшуються в середньому на 1,5 °C. Крім цього метод

є чутливим й до форми зразків – зразки циліндричної форми характеризуються дещо більш низькою температуро чутливості, ніж зразки призматичної форми [113].

Суттєво на низькотемпературні значення впливають характеристики кам'яного матеріалу. При збільшенні шорсткості поверхні зерен кам'яних матеріалів та їх рубчастості температури розтріскування на 3 – 4 °С є нижчими. Це ж підтверджується й даними, наведеними в [143] – при збільшенні максимального розміру зерен кам'яного матеріалу в щебенево-мастиковому асфальтобетоні (при максимальному розміру зерен 5 мм температура розтріскування становить мінус 29,2 °С, при 10 мм – мінус 23,8 °С, а при 13 мм – мінус 20,4 °С). В той же час в роботі [144] наведені дані визначення температури розтріскування асфальтобетонів, виготовлених на діабазових, вапнякових та гранітних заповнювачах, які свідчать про те, що тип заповнювача не впливає суттєво на низькотемпературні характеристики асфальтобетону (різниця знаходиться в межах 1 – 3 °С (табл. 2.1). Крім заповнювача на результати методу впливають й кількість повітряних пор в асфальтобетоні та кількість бітумного в'язучого [113].

Таблиця 2.1 – Вплив типу кам'яного матеріалу на низькотемпературні властивості асфальтобетону, визначені методом TSRST, [144]

В'язуче, що використане для приготування асфальтобетону	Температура розтріскування асфальтобетону, °С, виготовленому на		
	граніт	діабаз	вапняк
Бітум, модифікований етиленстирен інтерполімером	-34	-33	-36
Бітум, модифікований полімером SBS	-34	-30	-32
Окислений бітум	-29	-27	-30

Основний вплив на низькотемпературні властивості асфальтобетону надають властивості бітумного в'язучого, що входить до складу асфальтобетону. Тому значна кількість досліджень була направлена на встановлення залежностей між характеристиками в'язучого (його складом, різноманітними показниками якості) та значеннями температури розтріскування асфальтобетону за методом TSRST.

Значення температури розтріскування асфальтобетонів, визначені за методом TSRST мають високу кореляцію з груповим складом

бітумів, на основі яких виготовлено асфальтобетон. Так, згідно результатів досліджень 59 зразків, наведених в [133] та представлених в табл. 2.2, найвищі значення лінійної кореляції спостерігаються між значеннями температури розтріскування асфальтобетону та суми асфальтенів і смол в бітумі.

Таблиця 2.2 – Значення лінійної кореляції між складом бітумів та температурою розтріскування, визначеною за TSRST, [133]

Складові бітуму	Значення коефіцієнтів лінійної кореляції для асфальтобетонів	
	щільних, щебенево-мастикових	пористих
Ароматичні вуглеводні	0,71	0,80
Смоли	0,82	0,89
Асфальтени	0,79	0,83
Асфальтени + смоли	0,86	0,90
Асфальтени × смоли / ароматичні вуглеводні	0,82	0,89

Одними з перших досліджень, що були направлені на встановлення залежності температури розтріскування асфальтобетону за TSRST та стандартними характеристиками бітуму виконані під час апробації методу [132, 142]. Так, наприклад, в роботі [132] встановлено, що при зменшенні penetрації з  $76 \times 0,1$  мм до  $53 \times 0,1$  мм температура розтріскування асфальтобетону підвищується майже на  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ , а при зменшенні penetрації з  $154 \times 0,1$  мм до  $70 \times 0,1$  мм – майже на  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Значно впливає на низькотемпературні характеристики й зістарення асфальтобетонних зразків [132, 142]. Згідно [132] після витримання асфальтобетонних зразків впродовж 4 діб за температурою  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $135 \text{ }^\circ\text{C}$  спостерігається значне підвищення температури розтріскування зразків (наприклад, для не зістареного асфальтобетону на бітумі з penetрацією  $154 \times 0,1$  мм температура розтріскування становила мінус  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ , після витримання зразка за температури  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  температура розтріскування підвищилась до мінус  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , а після витримання за  $135 \text{ }^\circ\text{C}$  піднялась до мінус  $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Таким чином, метод TSRST може використовуватися для прогнозування зміни низькотемпературних властивостей асфальтобетонних покриттів з часом їх експлуатації.

Взаємозв'язок між властивостями бітумів та температурою розтріскування асфальтобетону, визначеної методом TSRST, розглянуто в

роботах [133, 136] на прикладі бітумів, виготовлених в різних країнах за різною технологією (Венесуела, Саудівська Аравія, Мексика та Росія) та різних типів асфальтобетонів (пористий, щільний та щебенево-мастиковий). В табл. 2.3 представлені дані, що ілюструють вплив складу та властивостей бітумів на температуру розтріскування асфальтобетонів різних типів, які були зістарені.

Таблиця 2.3– Залежність температури розтріскування асфальтобетону за методом TSRST від характеристик бітуму та впливу на нього старіння (витримання за температури 85 °С) [133, 136]

Показники якості			Значення для бітумів, виготовлених в різних країнах				
			Венесуела		Саудівська Аравія	Мексика	Росія
Пенетрація за 25 °С, 0,1 мм			86	181	160	164	187
Температура розм'якшеності, °С			46	38	40	40	42
Індекс пенетрації			-0,93	-1,40	-1,00	-0,90	0,49
Динамічна в'язкість за 60 °С, Па×с			185	66	59	73	32
Кінематична в'язкість за 135 °С, мм <sup>2</sup> /с			356	208	222	260	159
Температура розтріскування	щільний асфальтобетон	вихідний	-30	-32	-31	-30	-36
		витриманий 25 діб	-26	-28	-26	-25	-35
		витриманий 100 діб	-22	-24	-23	-22	-26
	пористий асфальтобетон	вихідний	-25	-30	-28	-29	-35
		витриманий 25 діб	-19	-24	-25	-26	-29
		витриманий 100 діб	-8	-10	-15	-20	-12
	щебенево-мастиковий асфальтобетон	вихідний	-29	-31	-29	-32	-35
		витриманий 25 діб	-27	-28	-27	-28	-34
		витриманий 100 діб	-22	-23	-24	-26	-24

У відповідності з наведеним в табл. 2.3 метод TSRST є чутливим до особливостей бітумних в'язучих (пенетрація, структурно-реологічний тип, технологія виготовлення) та типів характеристик асфальтобетону (зокрема, його пористості). Згідно з даними табл. 2.3 зразки з асфальтобетонів розглянутих типів, виготовлені на бітумі, структу-

рно-реологічний тип якого наближується до типу «гель», мають найнижчі значення температури розтріскування за методом TSRST, але швидкість зміни температури розтріскування з часом старіння асфальтобетону на цьому бітумі є найвищою, тобто зі збільшенням часу експлуатації покриття, влаштованого з такого асфальтобетону є ймовірність більш швидкого руйнування, особливо це стосується пористих асфальтобетонів.

В роботі [145] стверджується, що за рахунок того, що під час випробування у поперечному перерізі зразка середнє напруження рівномірно розподіляється, температура низькотемпературного руйнування асфальтобетонного зразка, визначена за методом TSRST має високу кореляцію з низькотемпературними характеристиками бітумного в'язучого, що входить до складу асфальтобетонного зразка.

В [136] наведені дані, що підтверджують існування кореляційного зв'язку різного рівня між значеннями стандартних та реологічних характеристик бітуму та температурою розтріскування, визначену методом TSRST. Найбільший взаємозв'язок спостерігається для реологічних показників в'язучих – незалежно від типу асфальтобетону та характеристик бітумних в'язучих коефіцієнт кореляції між температурою розтріскування та комплексним модулем жорсткості знаходиться в межах 0,84 ... 0,88, а зв'язок між температурою розтріскування асфальтобетону та кутом фазового зсуву бітуму знаходиться на рівні 0,79. Найнижчий зв'язок між температурою розтріскування асфальтобетону за методом TSRST та стандартними показниками якості бітумів (пенетрація, температура розм'якшеності, кінематична в'язкість за температури 135 °C), який знаходиться в межах 0,65 ... 0,73. Подібні дані наведені й в роботі [146] – коефіцієнт кореляції між температурою розтріскування та пенетрацією бітумів, в тому числі й модифікованих, становить 0,702.

Автори роботи [29] встановили кореляційні залежності між стандартними показниками якості 5 не модифікованих та модифікованих полімерами бітумів (пенетрація, температури розм'якшеності і крихкості за Фраасом) та температурою розтріскування асфальтобетону за TSRST. Згідно отриманих даних встановлено, що для прийнятих бітумів коефіцієнти лінійної кореляції становлять: з пенетрацією – 0,78, з температурою розм'якшеності за KiK – 0,67, температурою крихкості за Фраасом – 0,72. Недоліком встановлених залежностей, є те що вони

отримані для занадто малої вибірки в'язучих, що мають обмежену поширеність в дорожній галузі (так, наприклад, пенетрація одного з бітумів становила  $18 \times 0,1$  мм, а температура розм'якшеності одного з модифікованих в'язучих досягала  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Також залежності температури розтріскування асфальтобетону за методом TSRST та низькотемпературними характеристиками бітумів розглянуті в ряді наступних робіт:

- в роботах [147] встановлена лінійна кореляція між температурою розтріскування за TSRST та температурою крихкості за Фраасом з коефіцієнтом кореляції 0,5, а також з температурою, визначеною методом BBR з кореляцією  $> 0,80$ ;

- згідно даних [148] доведено існування кореляції з температурою крихкості за Фраасом (коефіцієнт кореляції 0,5) та температурою розтріскування, визначеною методом BBR (коефіцієнт кореляції 0,99);

- в [29] наведені дані, що підтверджують залежність з температурою крихкості за Фраасом з коефіцієнтом кореляції 0,72, та температурою, визначеною методом BBR з кореляцією 0,94;

- в [149] з температурою крихкості за Фраасом з коефіцієнтом кореляції 0,86;

- в [22] – температурою крихкості за Фраасом з коефіцієнтом кореляції 0,97.

У відповідності з даними, приведеними в [93], на кореляційні залежності між температурою розтріскування асфальтобетону за TSRST та температурами розтріскування бітумів, визначених різними методами, суттєво впливає старіння в'язучого (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Вплив старіння на кореляційні залежності між температурами розтріскування асфальтобетонів, визначених методом TSRST, та температурами розтріскування бітумів, визначених різними методами, [93]

Бітум	Коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) залежності температури розтріскування асфальтобетону за TSRST та бітумів, визначених методами			
	Фраасу	BBR <sub>s</sub>	BBR <sub>m</sub>	ABCD
до старіння	0,491	0,7982	0,5685	0,6695
після старіння RTFOT + PAV	0,5809	0,8616	0,2846	

Згідно експериментальних даних, наведених в [59] на величину коефіцієнту кореляції між температурою крихкості бітуму за методом Фраасу та температуру розтріскування за TSRST впливає наявність модифікаторів в складі в'язучого (рис. 2.17).

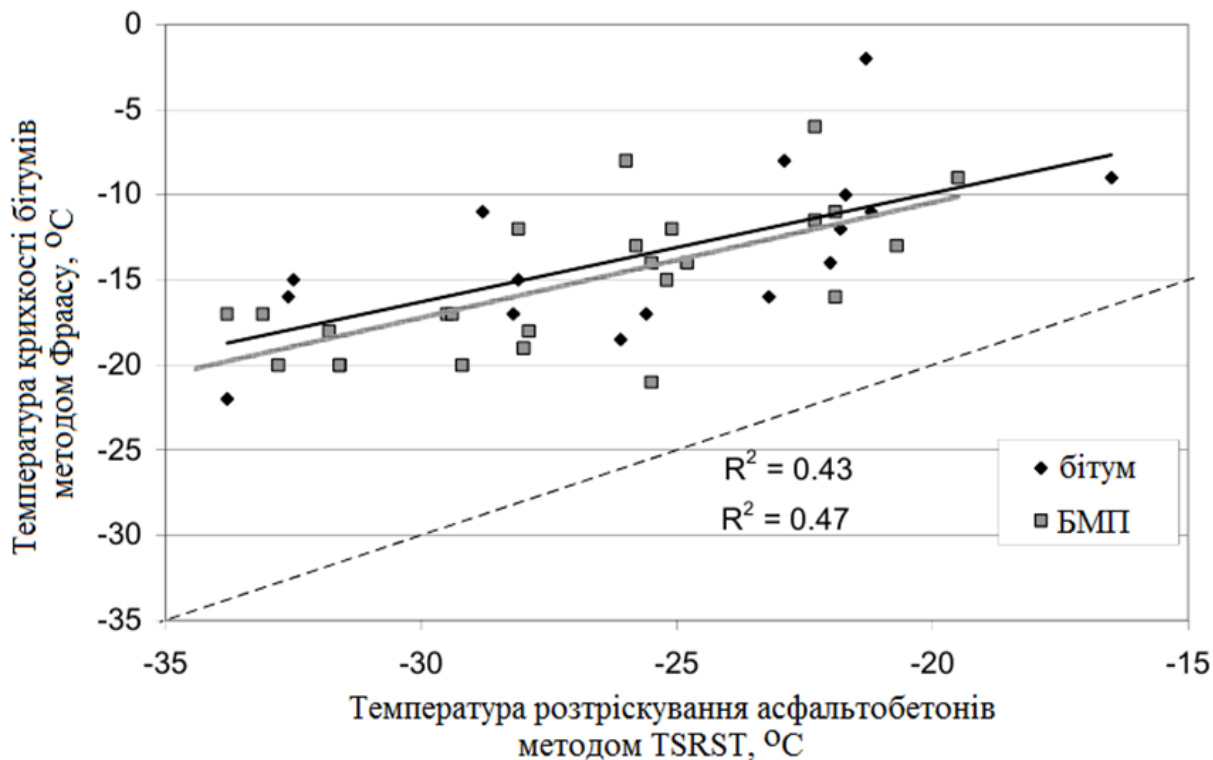


Рисунок 2.17 – Залежність між температурою крихкості бітуму за методом Фраасу та температурою розтріскування асфальтобетону за TSRST, [59]

Нелінійна залежність між пенетрацією бітумних в'язучих та температурою розтріскування асфальтобетонів, виготовлених на цих в'язучих, визначених методом TSRSR наведена на рис. 2.18 [59]. Хоча автори не приводять значення коефіцієнтів кореляції, візуально для бітумів, модифікованих полімером, вони є більш високими.

Результати встановлення взаємозв'язку температури розтріскування асфальтобетону за методом TSRST та температурою крихкості бітуму, визначену за методом BBR наведено й в роботі [150]. Дослідження було здійснено на 45 асфальтобетонах різного типу та гранулометрії, виготовлених на бітумах різних марок (від PG 58-28 до PG 88-28) та бітумних в'язучих, модифікованих різноманітними добавками. Випробування температури розтріскування асфальтобетону виконувалось на циліндричних зразках розміром 60 мм × 250 мм.

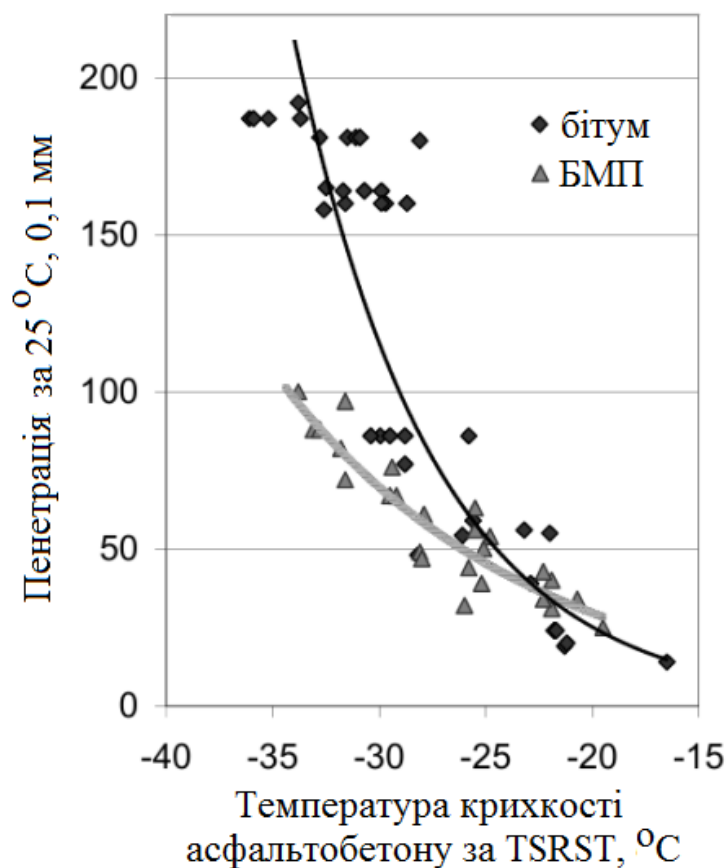
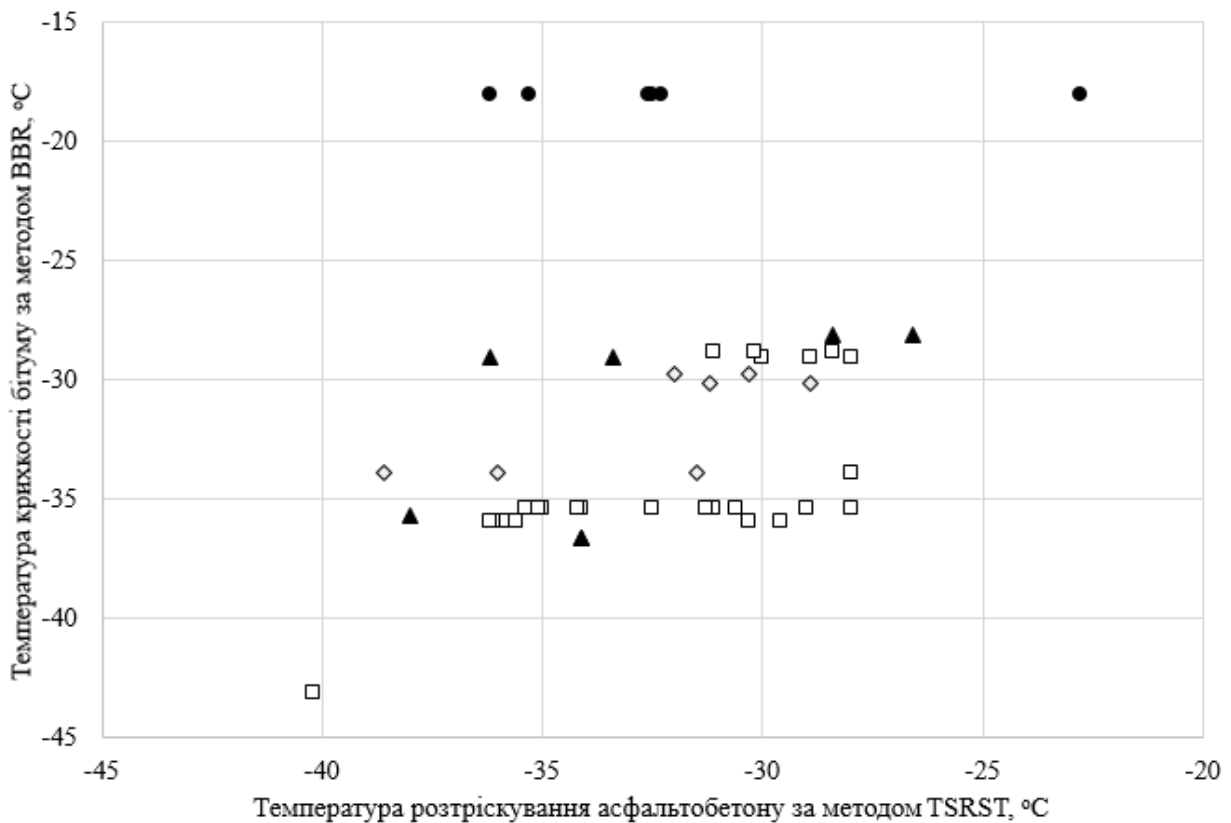


Рисунок 2.18 – Залежність між пенетрацією бітумних в’язучих, визначеною за 25 °С та температурою розтріскування асфальтобетонів методом TSRST, [59]

У відповідності з отриманими даними (рис. 2.19) для асфальтобетонів, виготовлених на немодифікованих бітумах існує висока кореляція між даними температури крихкості бітуму за BBR та температурою розтріскування за TSRST. Підвищення різниці між низькотемпературними характеристиками бітуму та асфальтобетону спостерігаються при використанні в якості в’язучих, бітумів, модифікованих полімерами (різниця між значеннями досягає 7,4 °С) та у випадку додавання до складу асфальтобетонної суміші старого асфальтобетону (RAP) – в цьому випадку різниця між значеннями низькотемпературних характеристик досягає 18,2 °С, а в середньому складає 14 °С. Тим не менше автори [150] вважають, що визначення температур крихкості бітуму за методом BBR може використовуватися для прогнозування температур розтріскування асфальтобетонів.



□ – асфальтобетон на не модифікованому бітумі, ▲ – асфальтобетон на бітумі, модифікованому полімером, ● – асфальтобетон з додаванням старого асфальтобетону (RAP), ◇ - асфальтобетон з дрібнозернистими наповнювачами (підвищена кількість мінерального порошку, скляний порошок, фібра, тощо)

Рисунок 2.19 – Взаємозв’язок температур крихкості бітуму за BBR та температури розтріскування асфальтобетону за TSRST, [150]

Деяко менша різниця між температурами крихкості модифікованих бітумів за показником BBR та температурою розтріскування асфальтобетонів за TSRST отримана в дослідженні [151]. Незважаючи на те, що автори використовували бітумні в’язучі, модифіковані різними полімерами, що вводились у вихідний бітум в різній концентрації (полімери Kraton та Calprene в кількості 4,0 % та 6,0 %, Elvaloy – 1,4 % та 1,8 %, Butonal – 3,0 % та 3,8 %), середня різниця між температурою крихкості та температурою розтріскування становила 1,2 °C (максимальна різниця лише для одного в’язучого складала 5,9 °C). При цьому температура крихкості бітуму для всіх в’язучих є нижчою, ніж температура розтріскування асфальтобетону, що свідчить про доцільність оцінювання низькотемпературних властивостей саме за показниками асфальтобетону (рис. 2.20).

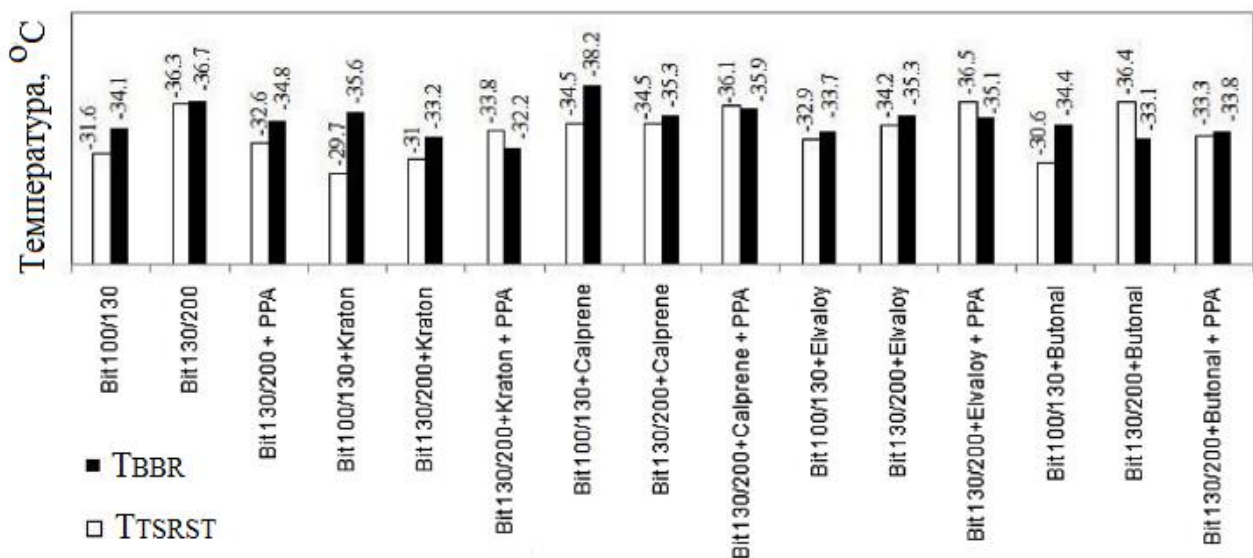


Рисунок 2.20 – Залежність між температурою крихкості бітумного в'язучого методом BBR та температурою розтріскування асфальтобетону методом TSRST, [151]

У відповідності з результатами дослідження, наведеними в [152], температура розтріскування асфальтобетонів методом TSRST має доволі високу лінійну кореляцію з температурами крихкості бітумів, визначених методом BBR та DTT (відповідно 0,86 та 0,86) та дуже низьку кореляцію з відповідними температурами крихкості бітумів, модифікованих полімерами (відповідно 0,63 та 0,12). За висновком авторів цього дослідження одним з ймовірних причин такої низької кореляції для бітумів, модифікованих полімерами може бути занадто мала кількість вибірки БМП, для якої встановлювались відповідні залежності (рис. 2.21).

В протиріч'я вищенаведеному в роботі [153] представлені дані, згідно з якими температура розтріскування за TSRST має відносно низьку кореляцію з характеристиками бітумних в'язучих, прийнятих в системі Superpave – з показником жорсткості  $S(t) = 0,672$ , з показником деформації відказу за методом DTT – 0,0004, з мінімальною температурою, за якою відбувається нормування зон PG – 0,617.

В роботі [154] наведені результати зіставлення температур розтріскування, визначені за методами Фраасу (на бітумі, що було екстраговано з асфальтобетонних зразків), TSRST та SCB (швидкість деформування 5 мм/хв за температури 0 °C). Випробування були виконані на 36 асфальтобетонах різних типів (щільні, пористі та щебенево-мастикові), виготовлених на різних бітумних в'язучих (бітуми марок

5070 і 70/100 та бітуми, модифіковані полімером марки 48/80-55).

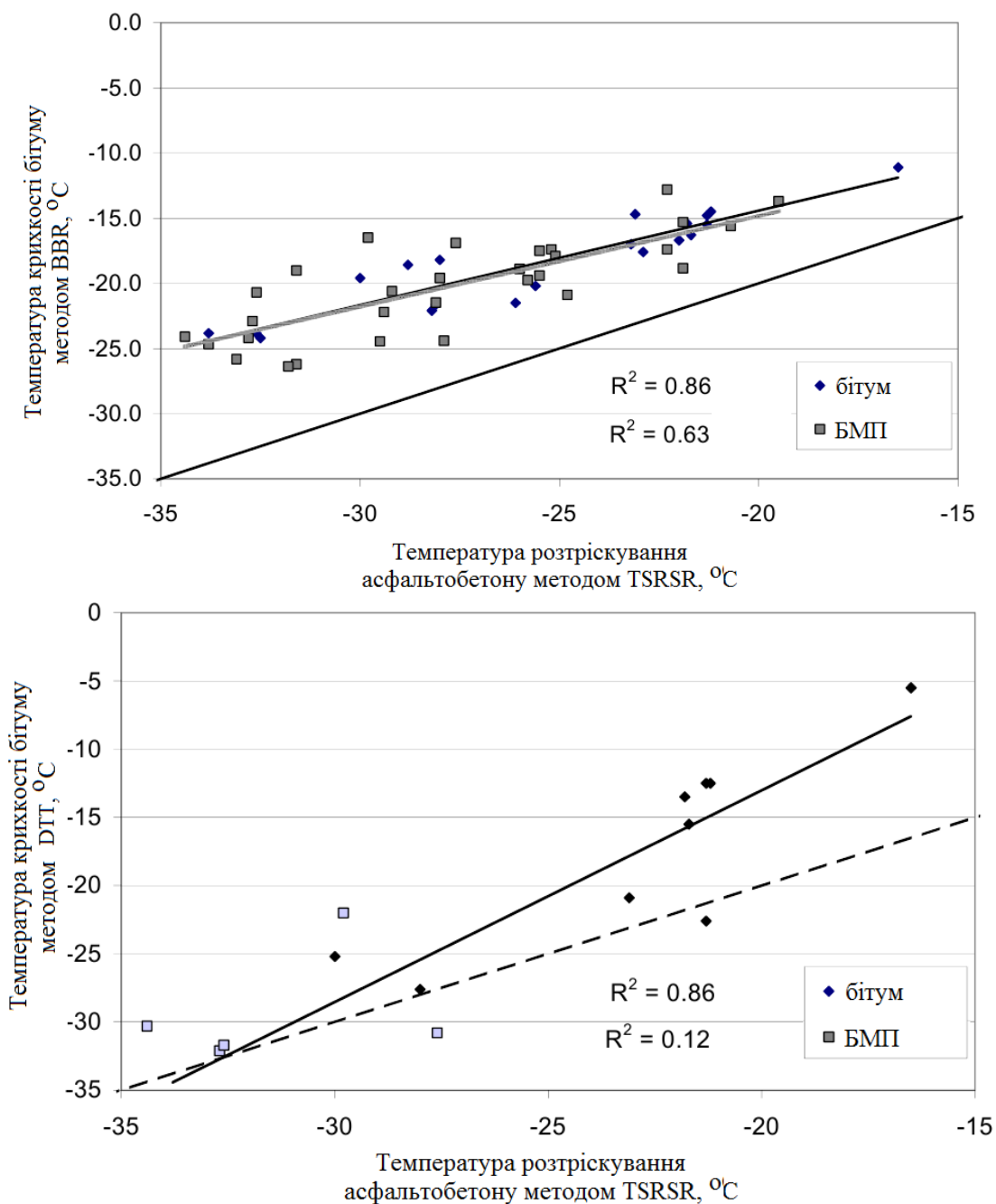


Рисунок 2.21 – Залежність між температурою крихкості бітумів, визначених методом BBR та DTT та температурою розтріскування за TSRST, [59, 152]

Щодо визначення температури крихкості за методом Фраасу, то автори [154] стверджують, що кореляція цього показника з температурою розтріскування за методом TSRST є низькою, хоча й простежується залежність згідно з якою чим нижче значення температури крихкості за Фраасом, тим нижче значення температури розтріскування

за TSRST. Виходячи з цього автори пропонують видалити показник температури крихкості за Фраасом з нормативних.

Однак, на основі аналізу, наведених в роботі [154] даних, можна прослідити існування певного взаємозв'язку між температурою крихкості бітумів, визначену за методом Фраасу та температурою розтріскування за методом TSRST, яка полягає в тому, що чим більш в'язким є бітум, що застосовується для приготування асфальтобетону та чим менше найбільший розмір зерен кам'яного матеріалу в асфальтобетоні, тим нижче різниця в значеннях низькотемпературних показників, визначених за методами Фраасу та TSRST. Підтвердженням цього є дані, наведені в табл. 2.5. Враховуючи, що автори роботи [154] визначали температуру крихкості не вихідних бітумів, що застосовувалися для приготування асфальтобетонних сумішей, а температуру крихкості відновлених з асфальтобетонних зразків бітумів, можна припустити, що у випадку порівняння температури розтріскування за TSRST з температурою крихкості вихідних бітумів, наведені в табл. 2.5 різниці будуть меншими.

Таблиця 2.5 – Аналіз даних, наведених в роботі [154]

Тип асфальтобетону	Марка бітумного в'язучого	Різниця між температурою крихкості за Фраасом та температурою розтріскування за TSRST, °C
АС-11	50/70	5,1 ± 2,2
	70/100	8,8 ± 1,1
	45/80-55	8,2 ± 2,7
АС-16	50/70	6,5 ± 3,4
	70/100	6,5 ± 5,7
	45/80-55	15,1
АС-22	50/70	10,2 ± 1,5
	70/100	13,4
АС-32	50/70	9,2 ± 3,3
	70/100	11,6 ± 3,6
SMA-11	70/100	10,4
	45/80-55	6,4 ± 1,1

Температура розтріскування за методом TSRST має гарну кореляцію (0,77 – 0,81) зі значеннями міцності на розтяг при згині, визначеними за Bending beam test [143].

Під час апробації методу TSRST [132, 142] крім встановлення впливу різноманітних факторів значну увагу було приділено визначенню кореляційних залежностей температури розтріскування асфальтобетонних зразків зі стандартними показниками якості бітуму, що можуть бути описані рівняннями. На основі отриманих даних та виконаних досліджень, автори [132] дійшли до наступних висновків:

- відсутня лінійна залежність між температурою розтріскування асфальтобетону за методом TSRST та penetрацією бітуму, визначеною за температури 25 °С;

- відсутня залежність між значеннями температури розтріскування асфальтобетону та характеристиками температурної чутливості бітуму (індексом penetрації та penetраційно-в'язкісним числом PVN);

- встановлено кореляцію значень температури розтріскування з коефіцієнтом в'язкості (відношення в'язкості за 60 °С зістареного бітуму за методом TFOT до в'язкості вихідного бітуму) – рівняння має вигляд:

$$T_{розтр} = -4,198 - 7,73 \cdot \eta_{rat}, \quad (2.1)$$

де  $T_{розтр}$  – температура розтріскування за методом TSRST, °С,  
 $\eta_{rat}$  – коефіцієнт в'язкості бітуму за температури 60 °С;

- на основі лінійного регресійного аналізу встановлена регресійна модель, що пов'язує температуру розтріскування асфальтобетону з penetрацією за 25 °С та динамічною в'язкістю за 60 °С бітуму (коефіцієнти детермінації знаходяться в межах 0,94 – 0,97) – рівняння має вигляд:

$$T_{розтр} = -1,666 - 0,165 \cdot P_{25} - 0,0036 \cdot \eta_{60}, \quad (2.2)$$

де  $P_{25}$  – глибина проникності голки за температури 25 °С, 0,1 мм,  
 $\eta_{60}$  – динамічна в'язкість за температури 60 °С.

- на основі лінійного регресійного аналізу встановлена регресійна модель, яка пов'язує температуру розтріскування асфальтобетону з penetрацією за 25 °С та температурою розм'якшеності за методом КіК бітуму (коефіцієнт детермінації становить 0,85).

$$T_{розтр} = 55,751 - 0,204 \cdot P_{25} - 1,312 \cdot T_p, \quad (2.3)$$

де  $P_{25}$  – глибина проникності голки за температури 25 °С, 0,1 мм,  
 $T_p$  – температура розм'якшеності за методом КіК, °С.

Ще одна комплексна залежність між температурою розтріскування асфальтобетону за методом TSRST та рядом показників бітуму встановлена в роботі [149]:

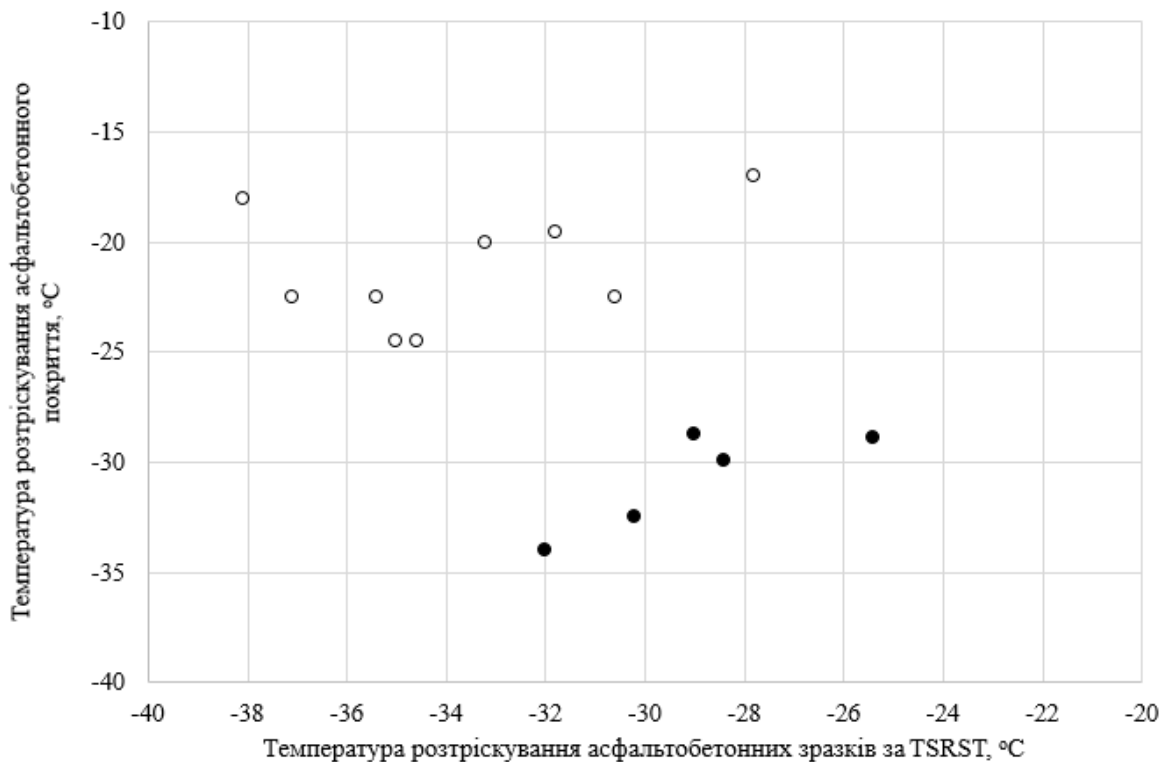
$$T_{розтр} = 0,31 \cdot T_{кр} + 0,315 \cdot LST + 0,284 \cdot LmT - 0,545 \cdot B - 4,7, \quad (2.4)$$

де  $T_{кр}$  – температура крихкості бітуму за методом Фраасу, °С,  
 $LST$  – температура за якої за методом BBR  $S = 300$  МПа, °С,  
 $LmT$  – температура за якої методом BBR значення  $m = 0,3$ , °С,  
 $B$  – вміст бітуму за вагою в асфальтобетоні, %

Коефіцієнт регресії за вищенаведеним рівнянням становить 0,94.

За більш ніж тридцять років використання методу TSRST для оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів були здійснені масштабні натурні співставлення експлуатаційного стану асфальтобетонних покриттів з результатами лабораторних визначень температур розтріскування. Так, в [155] представлені результати таких співставлень, виконаних на дорогах в ряді північних штатів США (Аляска, Пенсильванія) та дорогах ряду общин в північній частині Фінляндії. У відповідності з отриманими даними (рис. 2.22) автори встановили, що існує висока кореляція між отриманими даними. Різниця в наведених на рис. 2.22 значеннях температур розтріскування, визначених в різних країнах пояснюється тим, що в лабораторіях США температуру розтріскування за методом TSRST визначали при швидкості зниження температури зразка у випробувальній камері в 1 °С/год, а в лабораторіях Фінляндії – 2 °С/год.

Основною відмінністю методу TSRST від інших, що використовуються для оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, є те, що в цьому методі руйнування зразка відбувається за рахунок виключно термічних напружень, в той час, як в переважній більшості інших методів зразки руйнуються під дією механічних напружень.



● – дороги США, ○ – дороги Фінляндії

Рисунок 2.22 – Порівняння температури розтріскування асфальтобетонних зразків за TSRST з температурою розтріскування асфальтобетонного покриття, [155]

Крім прогнозування низькотемпературного розтріскування асфальтобетону за методом TSRST, є можливим спрогнозувати й відстань між температурними тріщинами на поверхні асфальтобетонного покриття. Такий прогноз може бути реалізовано за допомогою детерміністичної та імовірнісної моделі, представлених в [156], вихідними даними для яких є ряд параметрів, що враховують умови експлуатації дорожнього покриття (термін служби покриття, товщина асфальтобетонного шару, щільність асфальтобетону, переважаюча температура повітря у зимові місяці).

Метод TSRST має значні переваги до яких відноситься [107, 109,]: висока кореляція лабораторно визначеної температури розтріскування асфальтобетону з температурою розтріскування асфальтобетонного дорожнього покриття; одночасна зміна температури та навантаження; висока збіжність та відтворюваність отримуваних результатів; прийнятний час випробування, який становить порядку 3 – 5 годин; можливість використовувати асфальтобетонні зразки різної форми (циліндричні чи призматичні).

Поряд з очевидними перевагами методу TSRST він має й значні недоліки, до яких відносяться [107, 109]:

- висока вартість обладнання (близько 100000 \$) та комплектуючих, що суттєво позначається на поширеності даного методу в дорожніх лабораторіях;

- необхідність в довгому та тривалому навчанні роботі на доволі складному обладнанні, що потребує високою кваліфікації персоналу;

- прийнята у випробуванні швидкість зниження температури, яка становить 10 °С/год, що не відповідає зниженню температури в дорожньому покритті, яка зазвичай становить 1 – 2 °С/год (більш низька швидкість зниження температури в методі випробування призвела б до суттєвого збільшення часу випробування);

- в [157] наведені дані, згідно з якими є певна різниця в значеннях температури розтріскування асфальтобетонних зразків, виготовлених в лабораторії з асфальтобетонної плити, ущільненої секторним пресом та зразків, виготовлених з кернів (останні характеризуються більш низькою температурою розтріскування);

- руйнування зразка відбувається під дією виключно термічних напружень і не враховується вплив навантаження від руху автомобільного транспорту, крім цього метод не дозволяє оцінювати розвиток тріщини з часом [158];

- надто висока ретельність в підготовці зразка до випробування (мінімальне відхилення осі зразка від вертикальності, викликане похибками його центрування або неоднорідністю складу по об'єму зразка, призводить до нерівномірного розподілу напружень в середині зразка, що в свою чергу дає похибки у визначенні межі міцності на розтяг, сприяє вигину зразку та навіть його руйнування під час випробування) [159];

- концентрація напружень біля торців асфальтобетонного зразка та рандомне місце руйнування зразка.

Крім цього й досі не встановлені вимоги до відтворюваності результатів тесту та існують не вирішені питання щодо впливу різноманітних факторів на отримувані значення. Наприклад в роботі [160] наведено інформацію про проведення випробувань за методом TSRST в приладах, виготовлених в 2003 та 2013 р.р. Незважаючи на те, що прилади повністю відповідали вимогам як американських, так і європейських стандартів, результати визначення температури розтріскування в приладі 2003 р. були стабільно нижчі на 3 °С. Після ретельного

дослідження встановлено, що причина була в ненормованій швидкості повітряного потоку всередині камери, за рахунок чого зміна температури в обсягу зразка в приладі 2003 р. була повільніша, що й привело до більш низьких значень температури розтріскування.

Метод TSRST є стандартизованим в США та країнах Європи, а значення випробування температури розтріскування є нормованими в ряді країн світу (табл. 2.6) [154].

Таблиця 2.6 – Нормування значень температури розтріскування за методом, [154, 162]

Країна	Норми температури розтріскування, °C	
	для шарів покриття	для шарів основи
Австрія	не вище -30 °C ...-25 °C	не вище -25 °C ...-20 °C
Німеччина	не вище - 20 °C	не вище – 25 °C
Латвія	не вище – 25 °C	не вище – 22,5 °C

#### **2.1.4 Визначення низькотемпературних характеристик за допомогою аналізатору термічного розтріскування асфальтобетону**

На основі широкого застосування впродовж тривалого часу для оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетону методом TSRST встановлено його недоліки та особливості, вдосконалення яких сприяло підвищенню точності прогнозування низькотемпературної поведінки асфальтобетону. Враховуючи це в університеті Вісконсину в Медісоні (США) було розроблено прилад, що отримав назву «аналізатор термічного розтріскування асфальтобетону» (Asphalt thermal cracking analyser – ATCA), та запропоновано методику, яка представляє собою вдосконалення методу TSRST [162].

Відмінною особливістю методу ATCA від TSRST є те, що одночасно випробуються два асфальтобетонні зразки-балки, один з яких є жорстко зафіксованим, як в методі TSRST, а другий не зафіксованим (рис. 2.23). Зафіксована балка закріплюється за допомогою металевих пластин, які приклеюються до її торців та кріпляться до набору напрямних стрижнів, що забезпечує паралельність розташування балок одна відносно одної. Зразки-балки розташовуються на спеціально сконструйованій опорній платформі з роликками, які запобігають тертю балок з поверхнею опорної форми та підтримують середню частину балки від прогинання.

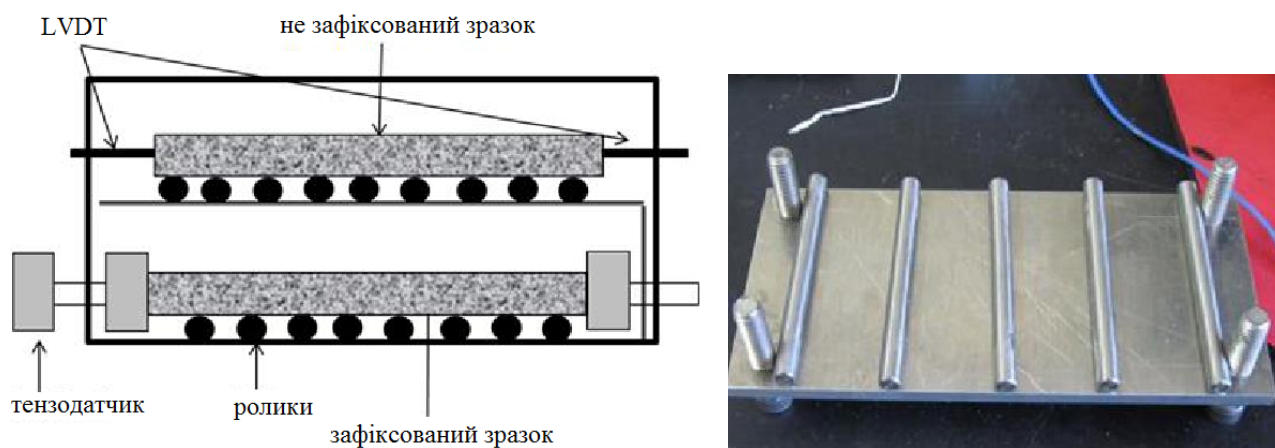


Рисунок 2.23 – Принципова схема розміщення зразків-балок в методі АТСА та фото регульованої по висоті опорної платформи балки з роликами, [162, 163]

Зразки-балки виготовляються з одного асфальтобетонного зразка-циліндра довжиною 17 см, ущільненого гіратором. Схема виготовлення зразків-балок наведена на рис. 2.24. Готові до випробування зразки-балки мають форму призматичного брусу з розмірами перерізу  $5 \times 5$  см та довжиною 30 см.

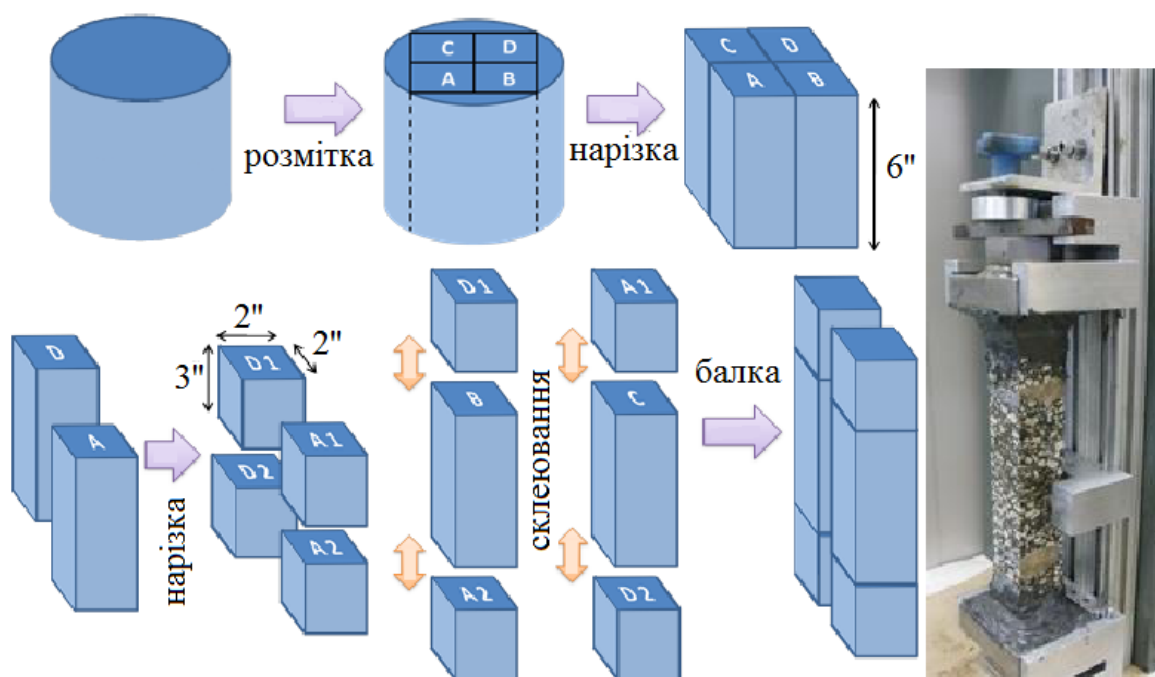


Рисунок 2.24 – Виготовлення зразків-балок для випробування за АТСА, [162, 163]

Зафіксований зразок-балка використовується для вимірювання збільшення термічної напруги зразка при його охолодженні і встанов-

лення тих же параметрів, що й при випробуванні методом TSRST (температура руйнування, руйнівне напруження), в той час як не за зафіксований зразок використовується для вимірювання зміни довжини зразка зі зміною температури, що в свою чергу є вихідними даними для розрахунку температури склування та коефіцієнтів температурного розширення/звуження вище та нижче температури склування. Вимірювання зміни довжини та напруги в балках, що виготовлені з одного вихідного зразка, та одночасно піддаються однаковому термічному впливу, дозволяє комплексно оцінювати низькотемпературні характеристики асфальтобетону (встановлювати зміну термічного напруження та деформації).

За допомогою методу АТСА є можливим проводити випробування релаксації термічного напруження, для чого температура в термокамері знижується з контрольованою швидкістю від 0,1 °С/хв до 1 °С/хв до заданого значення з подальшим підтриманням впродовж 2 – 10 год та одночасним вимірюванням накопичень напружень в зафіксованому зразку та деформацій в не зафіксованому зразку. На основі отриманих результатів будуються криві термічного напруження в залежності від температури та часу випробування, на основі яких в подальшому здійснюється розрахунок модуля релаксації асфальтобетону [162, 164].

На основі даних, отриманих в [163] встановлено, що за рахунок врахування експериментально отриманих значень коефіцієнтів температурного розширення/звуження та температури склування асфальтобетону є можливим враховувати тенденцію накопичення термічних напружень в зразку, за рахунок чого розраховані на основі експериментально встановлених характеристик значення температури розтріскування асфальтобетону суттєво відрізняються від температур розтріскування, розрахованих за допомогою моделі термічного розтріскування TCSModel (різниця досягає 25 %).

Ще одним випробуванням, що може бути виконано в методі АТСА є оцінка термічної втоми асфальтобетону під дією температурних циклів охолодження-нагріву, що дозволяє враховувати це при розрахунку низькотемпературних характеристик [162, 165, 166].

Все це робить метод АТСА перспективним для прогнозування низькотемпературних характеристик асфальтобетону та передбачення його температур розтріскування.

До недоліків методу може бути віднесено те, що він є новим і

використовується лише в лабораторіях науково-дослідницьких центрів США, а також те, що на даний час ще не здійснено виробничу перевірку отримуваних результатів [109].

На даний час ведуться роботи по виробничій перевірці методу АТСА та його подальшого вдосконалення. Одним з напрямком такого вдосконалення є випробування зразків з ініційованою тріщиною, що дозволяє оцінювати швидкість виділення енергії деформації, необхідної для більш повної оцінки опору термічного розтріскування асфальтобетону та прогнозування поширення тріщини [167].

## **2.2 Методи визначення низькотемпературного розтріскування асфальтобетону, основанийі на положень механіки руйнування твердого тіла**

Розтріскування асфальтобетонного дорожнього покриття (термічне, втомне, відбивне та інші види) відбувається під дією кліматичних та механічних напружень, викликаних впливом низьких температур та навантаженнями від руху автомобільного транспорту, при цьому значний вплив на температуру розтріскування надає наявність дефектів (тріщин) в тілі асфальтобетонного покриття. Для врахування напружень, що викликають утворення тріщини та подальше руйнування асфальтобетонних покриттів, в даний час широко використовується теорія руйнування твердих тіл [168]. В методах визначення низькотемпературного розтріскування асфальтобетону, основанийі на положеннях механіки руйнування твердого тіла, вивчаються закономірності зародження та поширення тріщини.

Виходячи з того, що одним з основних припущень теорії руйнування є припущення, що матеріали від самого початку мають дефекти, для випробування використовуються асфальтобетонні зразки різної форми, в яких перед випробуванням ініціюється тріщина шляхом створення надрізу певної форми, нахилу та довжини. Під час прикладання навантаження на сторону зразка, що є протилежна стороні з надрізом, за рахунок розтягуючих напружень на кінці надрізу виникає тріщина.

Згідно положень механіки руйнування твердого тіла розкриття тріщини та, відповідно, руйнування твердого тіла, може бути розподілено на три основні типи (рис. 2.25):

- тип I – тріщина відриву (або нормального розриву) – точки по-

верхні тріщини зміщуються у напрямку, перпендикулярному до поверхні тріщини, а її краї віддаляються одна від одної;

- тип II – тріщина поперечного зсуву (або зсув у площині) – точки поверхні тріщини зміщуються поперек передньої кромки тріщини, тобто відбувається зсувне навантаження в плоскості, при якому спостерігається прослизання однієї поверхні тріщини щодо іншої,

- тип III – тріщина поздовжнього зсуву (або зсув поза площиною) – точки поверхні тріщини зміщуються вздовж передньої кромки тріщини.

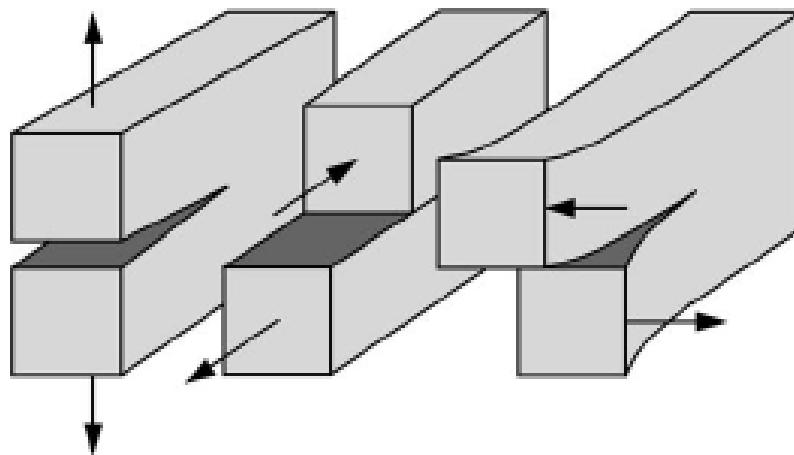


Рисунок 2.25 – Типи режимів руйнування твердого тіла, [168]

Низькотемпературне розтріскування асфальтобетону, що викликане лише термічними напруженнями, відноситься до I типу. У цьому випадку вважається, що руйнування асфальтобетону по існуючому дефекту відбувається коли термічне напруження перевищує міцність асфальтобетону. В дійсності на асфальтобетонне покриття діє сукупність різноманітних факторів, в тому числі й транспортне навантаження, в результаті чого розтріскування відбувається за змішаним типом (I/II, I/III, II/III або навіть I/II/III) (рис. 2.26) [169].

Зважаючи на це на даний час існують різноманітні методи визначення низькотемпературного розтріскування асфальтобетону, в яких розглядаються різні типи режимів руйнування (зазвичай розтягнення-зсув), хоча в переважній більшості розглядається головним чином лише I тип руйнування [170].

До найбільш розповсюджених методів випробування асфальтобетонів цієї групи відносяться:

- випробування балки з одностороннім надрізом (SE(B)),
- випробування на напівкруглий згин (SCB),
- випробування на розтягнення на компактних зразках-дисках (DC(T)),
- випробування Fenix,
- випробування на пристрої для розтріскування асфальтобетону (ACCD).

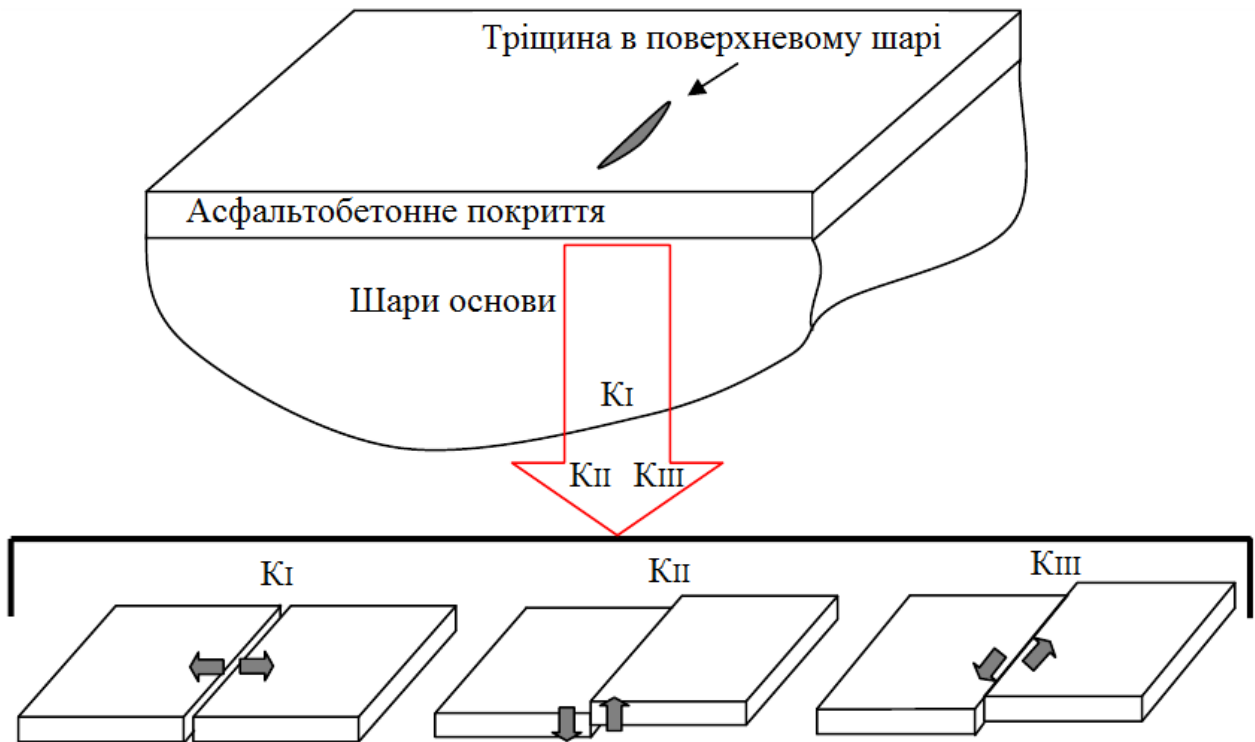


Рисунок 2.26 – Різні типи руйнування асфальтобетонного покриття, [169]

Головними параметрами, які встановлюються під час випробування за будь яким методом, оснований на положеннях механіки руйнування твердого тіла, є в'язкість руйнування ( $K_c$ ) та енергія руйнування ( $G_f$ ) [171].

В'язкість руйнування це показник, який характеризує локальний напружений стан, що призводить до поширення тріщини та виникає при максимальному навантаженні під час випробування. Під час випробування за I типом в'язкість руйнування визначається зазвичай за формулою [171]:

$$K_{IC} = \frac{P \cdot L}{b \cdot W^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (2.5)$$

де  $P$  – навантаження, що прикладається на зразок,  
 $L$  – довжина зразка між опорами,  
 $b$  – ширина зразка,  
 $W$  – висота зразка,  
 $a$  – вихідна довжина тріщини.

Енергія руйнування ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ), показник, що характеризує енергію, необхідну для утворення нової поверхні руйнування, визначається за формулою [172, 173]:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}}, \quad (2.6)$$

$W_f$  – робота руйнування, Дж, що визначається як площа під залежністю навантаження-зміщення (рис. 2.27),

$A_{lig}$  – площа зони руйнування зразка, що визначається множенням довжини тріщини на товщину зразка,  $\text{мм}^2$ .

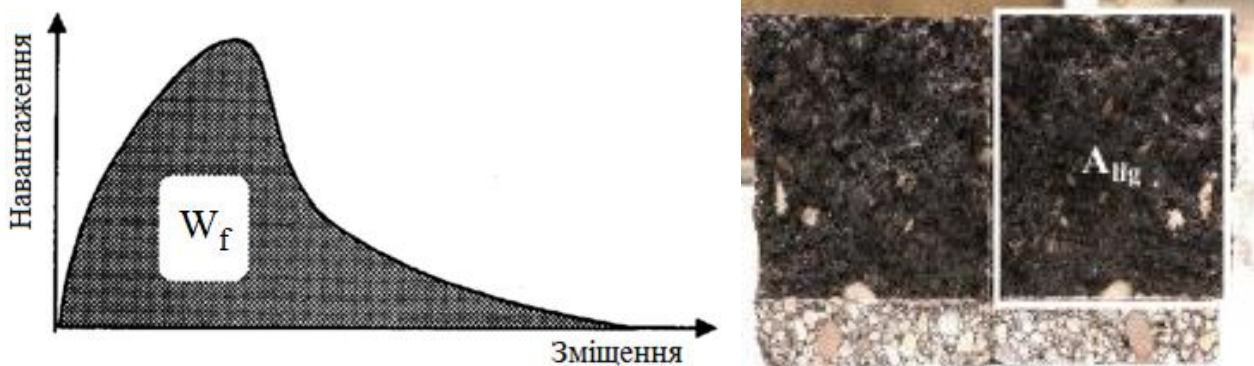


Рисунок 2.27 – Визначення енергії руйнування, [174, 175]

Енергія руйнування є функцією як міцності матеріалу, так і його пластичності. Зі зниженням температури енергія руйнування асфальтобетону знижується, а найбільше (пікове) навантаження руйнування збільшується. Зі зменшенням швидкості прикладання навантаження пікове навантаження зменшується, а енергія руйнування зростає [158]. При порівнянні асфальтобетонів за показником енергії руйнування більш стійким до розтріскування є асфальтобетон, що характеризується більш високим значенням енергії руйнування.

В [73] наведені дані, які свідчать про недостатність показника

енергії руйнування для диференціації асфальтобетонів та запропоновано новий показник – індекс гнучкості, який визначається за формулою:

$$FI = A \cdot \frac{G_f}{abs(m)}, \quad (2.7)$$

де  $A = 0,01$  – калібрувальний коефіцієнт,  
 $G_f$  – енергія руйнування,  
 $abs(m)$  – абсолютні значення нахилу в точці перегину після пікового навантаження.

Температура розтріскування асфальтобетону розраховується на основі експериментально отриманих або розрахованих показників (коефіцієнт інтенсивності напруження, жорсткість, зміщення гирла тріщини (CMOD – crack mouth opening displacement), зміщення розкриття вершини тріщини (CTOD – crack tip opening displacement), зміщення вершини тріщини при ковзанні (CTSD – crack tip sliding displacement) та інші) за методикою, прийнятою в тій чи іншій моделі низькотемпературного розтріскування [176]. В даний час поширеною є модель когезійної зони (cohesive zone model – CZM), за допомогою якої є можливим реалізувати більш реалістичний підхід до моделювання поширення тріщин в асфальтобетонних покриттях [113].

Визначення параметрів CMOD, CTOD та CTSD здійснюється шляхом розміщення датчиків (екстензометрів) на асфальтобетонному зразку в різному положенні навколо тріщини (рис. 2.28).

В методах, оснований на положеннях механіки руйнування твердого тіла, розглядаються процеси розвитку тріщин зі зміною температури та часу (їх зародження, динаміка розвитку, руйнування зразка). Тому для оцінки цих процесів випробування, зазвичай, проводяться в режимі, що дозволяє контролювати зміщення гирла тріщини, тобто зусилля, що прикладаються до зразку, регулюються у відповідності зі швидкістю розкриття гирла тріщини. Такий режим випробування дозволяє отримати дані для розрахунку енергії руйнування та спрогнозувати термічне розтріскування асфальтобетонного зразку.

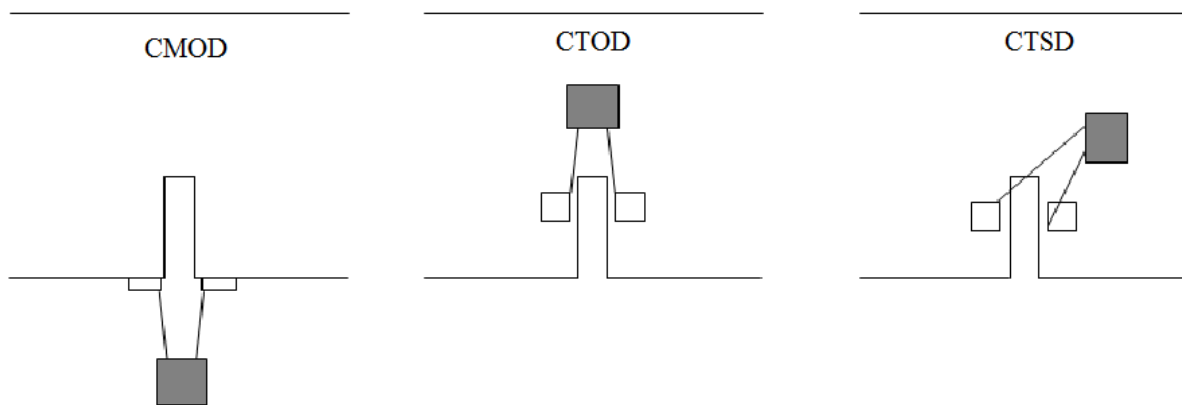


Рисунок 2.28 – Розміщення датчиків для визначення характеристик розкриття тріщини на асфальтобетонному зразку, за [177]

На даний час методи випробування асфальтобетону, основані на положеннях механіки руйнування твердого тіла, є найбільш сучасними та інформативними. Крім того, що вони дозволяють визначати ряд фундаментальних показників, є можливим оцінити вплив на поведінку асфальтобетону комплексу різноманітних факторів (температура, зовнішнє навантаження, наявність внутрішніх дефектів та інше). Оснащення цих методів сучасними комп'ютеризованими системами дозволяє з високою точністю оцінювати напружений стан і деформування асфальтобетонних зразків та оброблювати отримувані результати. На жаль, цим методам притаманні й загальні недоліки, до яких відноситься: суттєва вартість обладнання та датчиків; значна трудомісткість в підготовці зразків до випробування та складність їх форми; тривалість всього циклу випробування, який разом з підготовкою зразків може розтягуватися на декілька днів; вплив на отримувані результати розміру зразка та форми і розміру тріщини, тому для підвищення точності випробування необхідно пильну увагу приділяти цим факторам. Однією з головних вад цих методів є те, що попереднє виготовлення тріщини у вигляді зробленого надрізу ініціює проходження тріщини саме по зерну кам'яного матеріалу, що в багатьох випадках не відповідає дійсності та призводить до хибності отримуваних результатів [178]. Також до недоліків може бути віднесено те, що отримувані результати значною мірою залежать від режиму навантаження (зазвичай приймається в якості домінуючого виду руйнування I типу (розтяг)).

### 2.2.1 Метод випробування балки з одностороннім надрізом

Метод випробування балки з одностороннім надрізом (Single-Edge-Notched Beam (SE(B)) test) є найбільш поширеним для визначення таких характеристик руйнування асфальтобетонного зразка, як межа міцності (критичне напруження), критичне розкриття тріщини та енергія руйнування, що в свою чергу є необхідними даними для моделі когезійної зони (cohesive zone model), яка прийнята в США для опису поведінки руйнування асфальтобетону [109]. Метод SE(B) може використовуватися для моделювання руйнування асфальтобетонних зразків як в I режимі (нормальний термічний розрив), так і в змішаному режимі (I/II) [177, 179].

З 60-х років минулого століття метод SE(B) використовується для дослідження руйнування цементобетонних зразків. Починаючи з 70-х років деякі науковці здійснювали спроби адаптувати методіку SE(B) для випробування асфальтобетону, однак широке використання цього методу саме для випробування асфальтобетонних зразків було розпочате після фундаментальної роботи американських науковців, виконаної в 2005 р. в університеті Іллінойсу в Урбана-Шампейн [180]. У відповідності з запропонованою методикою для випробування приймається асфальтобетонний зразок-балка, що має наступні розміри: довжина – 375 мм, ширина – 75 мм, висота – 100 мм. По середині нижньої грані зразка виконується надріз глибиною 19 мм та шириною близько 4 мм (рис. 2.29).

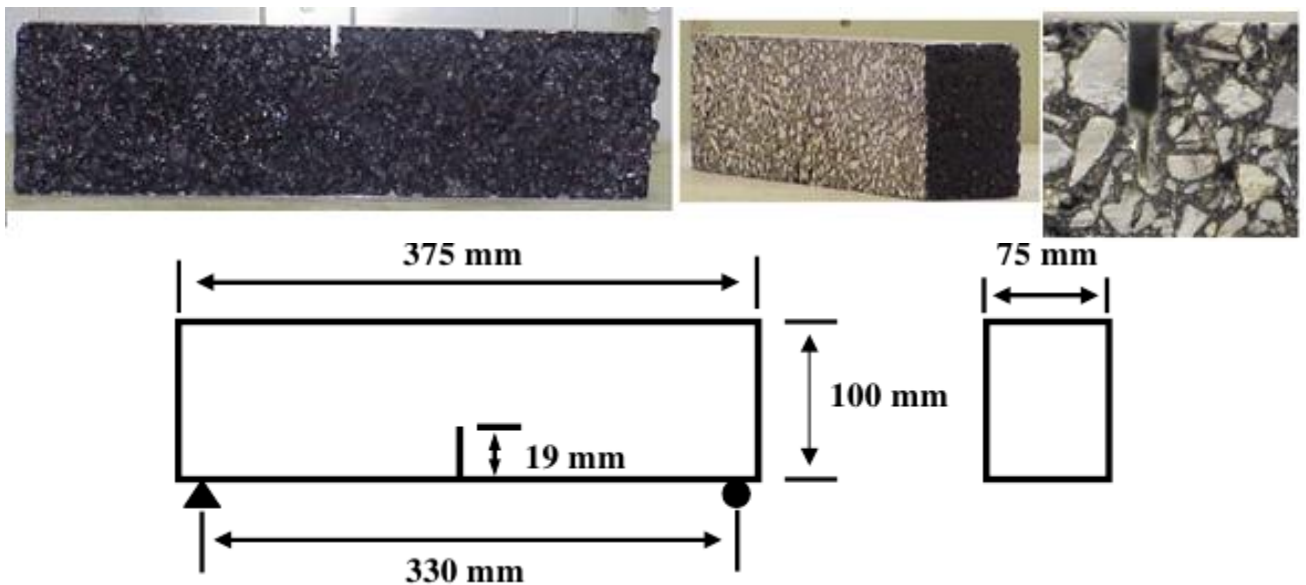


Рисунок 2.29 – Зовнішній вигляд зразка для випробування за методом SE(B) та його розміри, [180, 181]

Навантажування зразка-балки здійснюється в трьох точках за допомогою спеціальної конструкції (рис. 2.30). Зразок-балка розміщується на двох металевих роликах довжиною 100 мм та діаметром 25,4 мм кожний, що розташовуються на відстані в 330 мм один від одного. Ролики не зафіксовані та можуть переміщатися під час випробування, що запобігає тертя між балкою та роликом. Навантаження на верх зразка-балки передається через металевий навантажувач, що має на кінці закруглення радіусом в 12,7 мм.



Рисунок 2.30 – Зовнішній вигляд зразка для випробування за методом SE(B) та обладнання для випробування, [177]

На тілі зразка-балки розташовуються датчики LVDT, що дозволяють фіксувати тріщину, а також прикладене навантаження та переміщення лінії навантаження. Зразки перед випробуванням термостабують за температурою випробування впродовж 3 год.

Під час розробки методу SE(B) розробниками була прийнята швидкість прикладання навантаження 0,7 мм/хв, а також встановлено, що найбільш прийнятними є температури випробування 0 °С, мінус 10 °С та мінус 20 °С. За даними розробників [Wagoner M.P.] запропонований ними метод характеризується високою збіжністю отримуваних результатів (найбільше відхилення від середнього значення не перевищувало 25 %) та є досить чутливим до гранулометричного складу асфальтобетону (рис. 2.31).

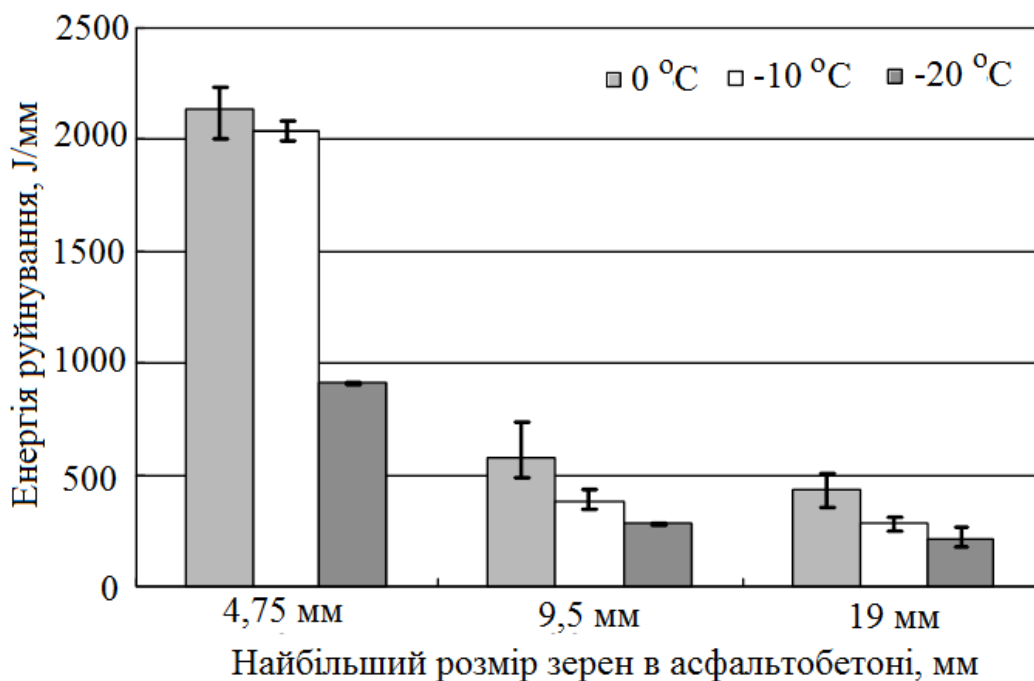


Рисунок 2.31 – Залежність енергії руйнування асфальтобетонного зразка, визначеної методом SE(B), від максимального розміру зерен кам'яних матеріалів в зразку, [180]

Згідно з [109, 173, 180] метод випробування SE(B) має як переваги, так і недоліки. До переваг методу відносяться: задовільна збіжність та відтворюваність отримуваних результатів; можливість проведення випробувань в режимі I та змішаному режимі (I / II), для чого здійснюється зміщення попереднього надрізу відносно вертикальної лінії [175]; проста форма асфальтобетонного зразка, що випробується; висока площа поверхні руйнування; можливість оцінювати вплив різноманітних факторів (розмір зразка, крупність заповнювача в асфальтобетоні та інше).

Недоліками метода є: відносно складна процедура підготовки зразка; неможливість проведення випробувань на кернах, відібраних безпосередньо з асфальтобетонного покриття; відсутність в даний час стандартизованої процедури проведення випробування, через що різні дослідники застосовують різноманітні розміри зразків та надрізів, а також режим випробування, що в свою чергу ускладнює порівняння отримуваних різними науковцями результатів. Так, наприклад, в [180] наведені дані, згідно яких для випробування різними дослідниками використовувалися зразки з розмірами від  $25 \times 25 \times 305$  мм до  $75 \times 100 \times 406$  мм, а температури випробування варіювалися від  $34$  °C до мінус  $25$  °C.

### 2.2.2 Метод випробування на напівкруглий згин

Метод випробування на напівкруглий згин (Semi-Circular Bending (SCB) test) запропонував в 1984 г. К.Р. Chong для випробування гірських порід [182], а вже наприкінці минулого століття цей метод було адаптовано для випробування асфальтобетонних зразків [109, 183]. У відповідності з запропонованою в [183] методикою, зразок для випробування може бути виготовлено з лабораторно ущільненого асфальтобетонного зразка-циліндру або з керну, відібраного з дорожнього покриття за схемою, наведеною на рис. 2.32.

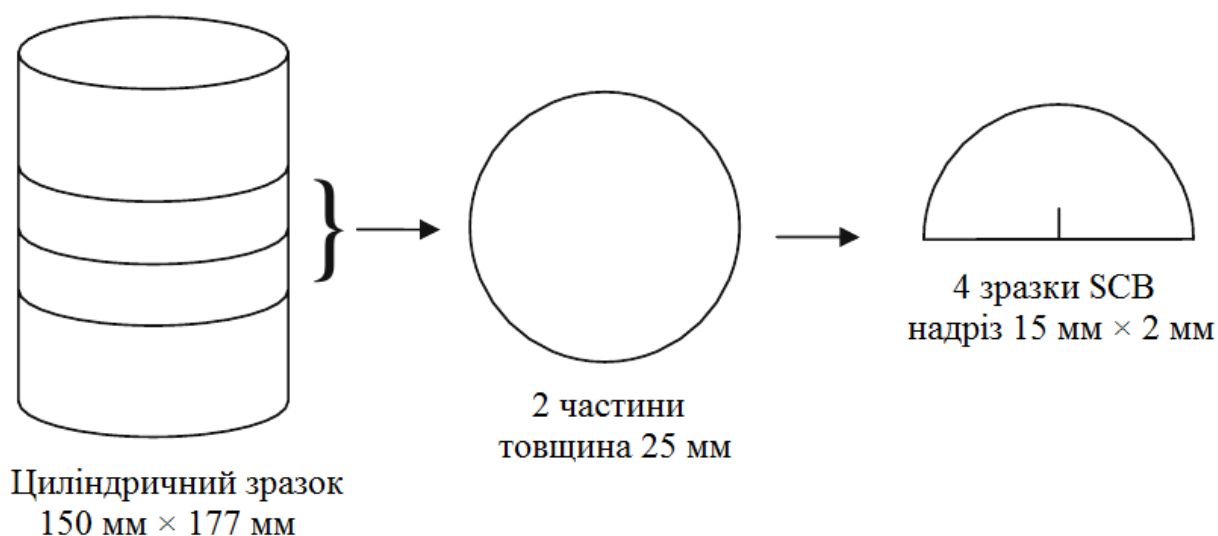


Рисунок 2.32 – Схема підготовки асфальтобетонних зразків для випробування за методом SCB, [158]

Випробування здійснюється в кліматичній камері за схемою, наведеною на рис. 2.33 [175, 184]. Перед початком випробування здійснюється термостатування зразка за температурою випробування впродовж 2 год. Навантаження на зразок прикладається зі швидкістю 0,0005 мм/с. Для підтримання стабільності випробування в післяпиковий період тесту на зразок перед випробуванням кріпиться екстензометр LLD.

В даний час метод SCB має широке поширення для оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, що пояснюється його значними перевагами, які визначаються формою та розмірами, прийнятих у випробуванні зразків. До переваг методу може бути віднесено [73, 107, 175, 183, 184]: легкість виготовлення зразків; можливість випробування як лабораторно виготовлених зразків, так і зразків, виготовлених з відібраних на дорозі кернів; значна кількість зразків

для випробування, що можуть бути отримані з одного зразка чи керну; за рахунок зміни відстані між опорами та куту нахилу надрізу зразки можуть випробуватися за I, II та змішаними типами; при прикладанні навантаження напруження виникає в нижній частині зразка, що призводить до поширення тріщин по всьому зразку; менша вартість обладнання порівняно з іншими методами ( $\approx 52000$  \$ за даними [107]); висока кореляція низькотемпературних показників, визначених за методом SCB та отриманих на тестовій кільцевій трасі Міністерства транспорту штату Міннесота в США (MnRoad).

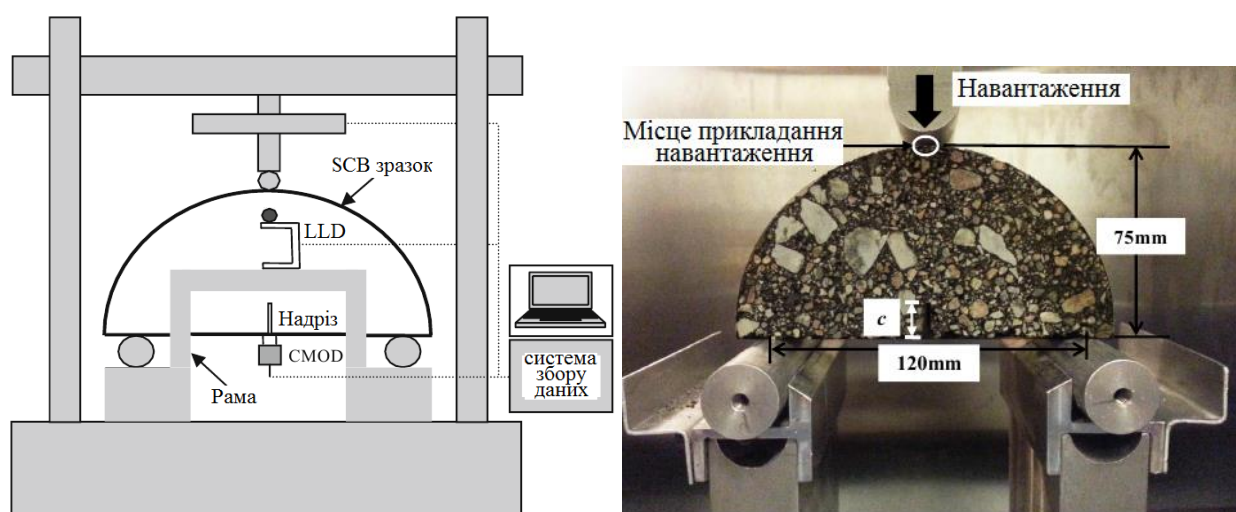


Рисунок 2.33 – Схема випробування асфальтобетону за методом SCB [158, 175]

Поряд з перевагами метод SCB має й ряд недоліків до яких може бути віднесено наступне [109, 173]: через виникнення арочного ефекту, що супроводжується високим стискаючим напруженням біля тріщини, виникає складний напружений стан зразка, що позначається на лінії поширення тріщини та точності отримуваних результатів; коротка довжина тріщини, що також знижує точність випробування; висока вартість обладнання, необхідного для проведення випробування.

За час використання методу було досконало вивчено вплив різноманітних факторів на отримуваних показники якості, за рахунок чого можна досягти високих значень збіжності та відтворюваності отримуваних показників [185].

Перші випробування, направлені на оцінку впливу розмірів зразка, були здійснені ще під час адаптації цього методу під випробування асфальтобетону. В [183, 184] наведені дані, згідно яких на значення результатів випробування мінімальний вплив надає товщина

зразка (при зміні товщини з 75 мм до 25 мм значення коефіцієнту інтенсивності напруженості змінюється не більше ніж на 10 – 15 %). В подальшому подібні результати були отримані й в роботі [186], у відповідності з якими пікове навантаження суттєво зростає зі збільшенням товщини зразка (майже в 2,8 рази при збільшенні товщини в 2 рази), але енергія руйнування зростає лише на 15 – 20 % (рис. 2.34), при цьому зі збільшенням товщини зразка спостерігається зниження коефіцієнту варіації. На основі наведених даних, автори [186] зробили висновок, що найбільш прийнятною є товщина зразка в 50 мм, оскільки це забезпечує достатньо низькі значення коефіцієнту варіації та задовольняю вимогу, згідно якої товщина зразка повинна бути щонайменше в 4 рази більшою ніж максимальний розмір заповнювача (в дослідженні використано асфальтобетонні зразки з максимальним розміром щебеню в 12,5 мм).

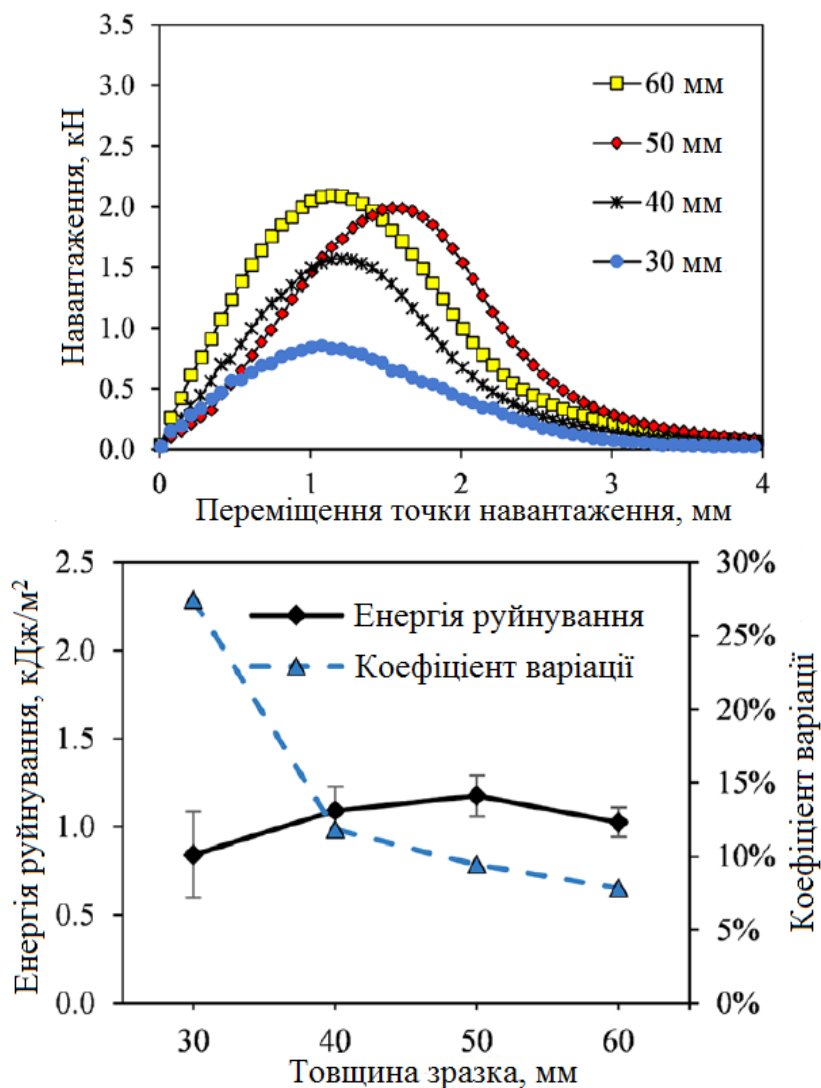


Рисунок 2.34 – Вплив товщини зразка на енергію руйнування, [186]

В роботі [188] виконано дослідження впливу розмірів асфальтобетонних зразків (діаметром 76,4 мм, 101 мм, 147 мм та 296 мм) на характер їх руйнування за низькою температурою (рис. 2.35). Зразки всіх діаметрів були додатково розділені ще й на групи з різною довжиною надрізу (без надріз та з співвідношеннями довжина надрізу / радіус зразка, що дорівнювали 0,05 та 0,2).



Рисунок 2.35 – Зовнішній вигляд асфальтобетонних зразків, що приймалися для визначення впливу розміру зразка на характер руйнування методом SCB, [187]

Згідно з отриманими даними найбільша міцність спостерігалась для зразків з найменшими розмірами, а при збільшенні розміру (діаметру) зразка міцність поступово знижувалась. Також міцність знижується при збільшенні довжини надрізу. Авторами [187] встановлено, що зі збільшенням розміру зразка спостерігається зміна поведінки руйнування зразків від пластичної до відносно крихкої. Поясненням цього є, за думкою авторів, вплив розмірного ефекту.

В роботі [183] встановлено, що зміна діаметру зразка зі 100 мм до 220 мм призводить до зміни коефіцієнту інтенсивності напруженості в 1,4 – 2,1 разу, при цьому найбільш інтенсивна зміна спостерігається при збільшенні температури випробування (особливо за високих позитивних температур).

В [158] наведені дані щодо впливу довжини попереднього надрізу (5 мм, 15 мм та 30 мм) на значення показників випробування, згідно яких чим коротшим є надріз, тим більші значення енергії руйнування асфальтобетону та значення міцності, але зі зниженням температури випробування ця різниця нівелюється і за низькою від'ємною

температурою довжина надрізу вже майже не впливає на значення енергії руйнування. Це ж підтверджується й даними, наведеними на рис. 2.36 та в [175, 186], в яких підтверджується й зниження коефіцієнту варіації зі збільшенням довжини зразка до певного розміру. Виходячи з цього запропоновано використовувати надрізи на зразках довжиною 15 мм, оскільки це дозволить отримувати результати, що характеризуються високою повторюваністю, за рахунок відносно великої площі зони руйнування зразка ( $A_{lig}$ ).

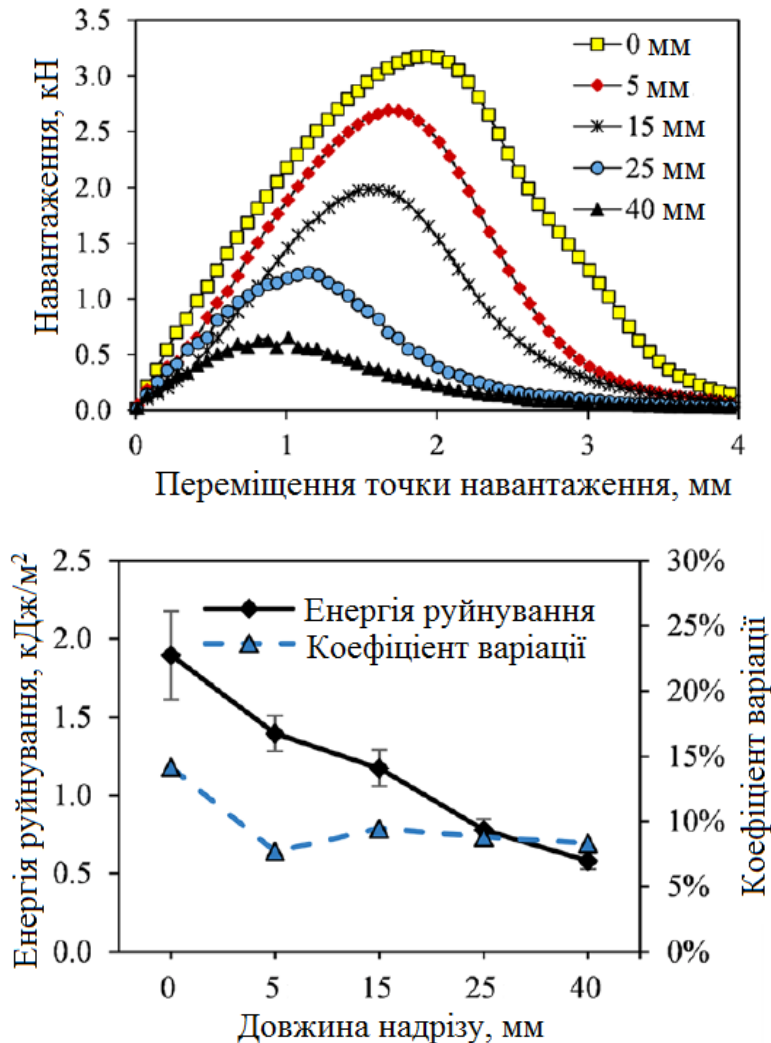


Рисунок 2.36 – Вплив довжини надрізу на енергію руйнування при випробуванні асфальтобетонних зразків методом SCB, [158, 186]

Вплив швидкості навантаження на зразок було досліджено різними науковцями [158, 183, 186, 188, 189]. В роботі [183] встановлено, що швидкість прикладання навантаження є фактором, що надає най-

більший вплив на показники асфальтобетону при випробуванні методом SCB (при зміні швидкості навантаження в 10 раз значення коефіцієнту інтенсивності напруженості змінюється в 3 – 6 раз). Згідно даних, наведених в [158] встановлено, що зі збільшенням швидкості навантаження енергія руйнування збільшується, але ця зміна є тим більша, чим вища температура випробування (за температури випробування мінус 6 °С зміна швидкості навантаження майже в 30 раз призводить до зміни енергії руйнування майже в 2 рази, а за температури мінус 30 °С за тієї ж зміні швидкості навантаження енергія руйнування зменшилась лише в 1,05 рази).

Подібні дані отримані й в роботі [186], де вплив швидкості навантаження на енергію руйнування оцінювався за однієї температури в 21 °С (рис. 2.37). При цьому встановлено, що з підвищенням швидкості навантаження зростає й коефіцієнт варіації.

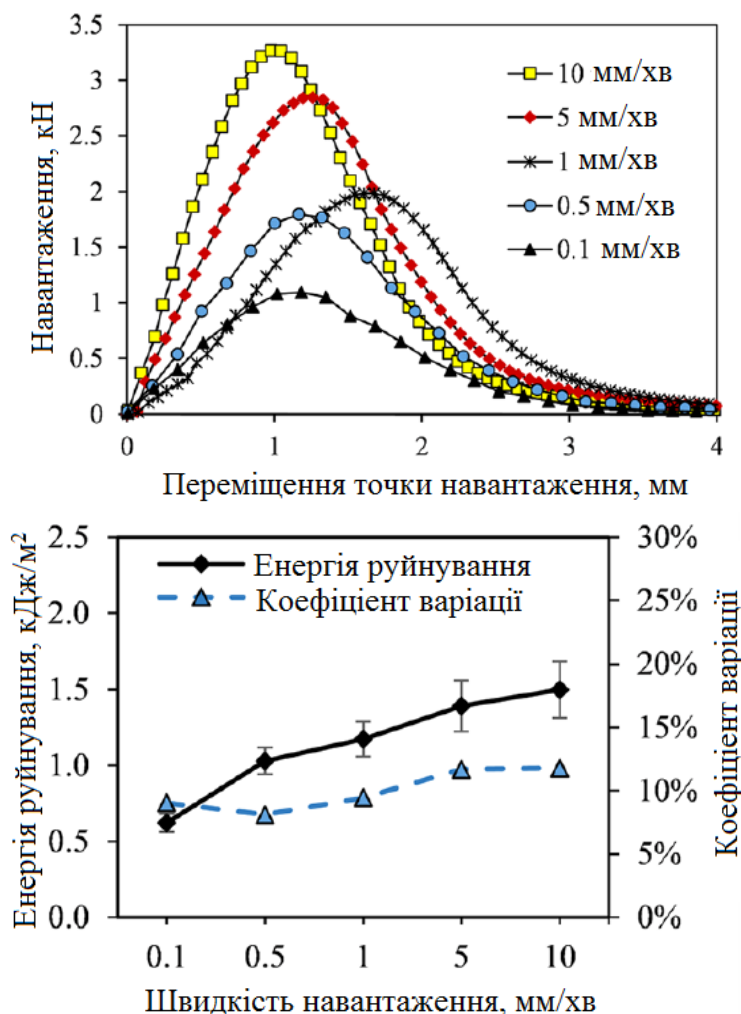


Рисунок 2.37 – Вплив швидкості навантаження на енергію руйнування, [158,186]

Ще однією особливістю методу SCB, що суттєво позначається на значеннях енергії руйнування асфальтобетону є конструктивні особливості опорних пристроїв випробувального приладу, [175]. Різноманітні виробники оснащують лабораторні прилади для випробування асфальтобетонів за методом SCB опорними пристроями різної конструкції (рис. 2.38), деякі з яких значно впливають на отримувані результати. Наведену на рис. 2.38 різницю в значеннях випробування автори [175] пояснюють можливим тертям роликів по опорі.

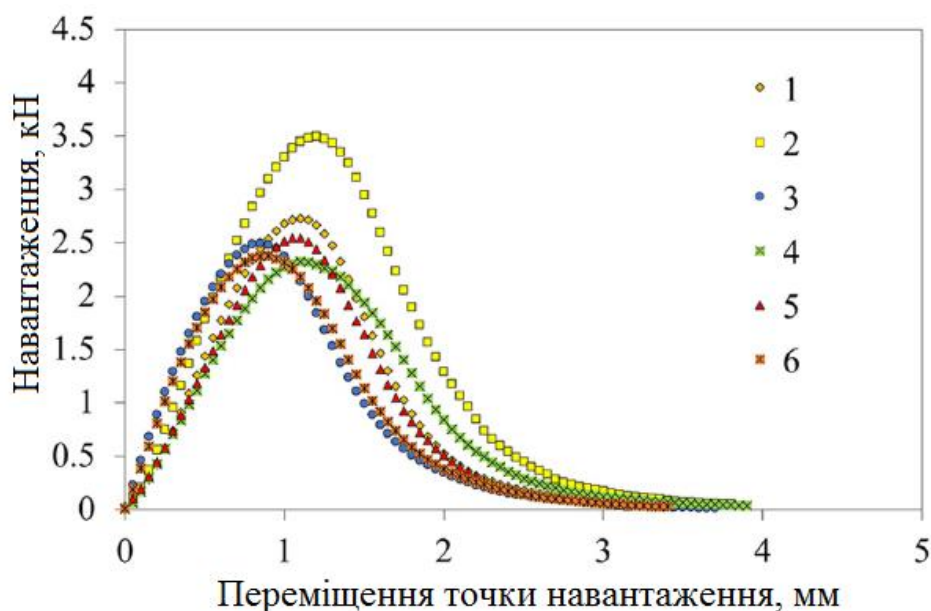
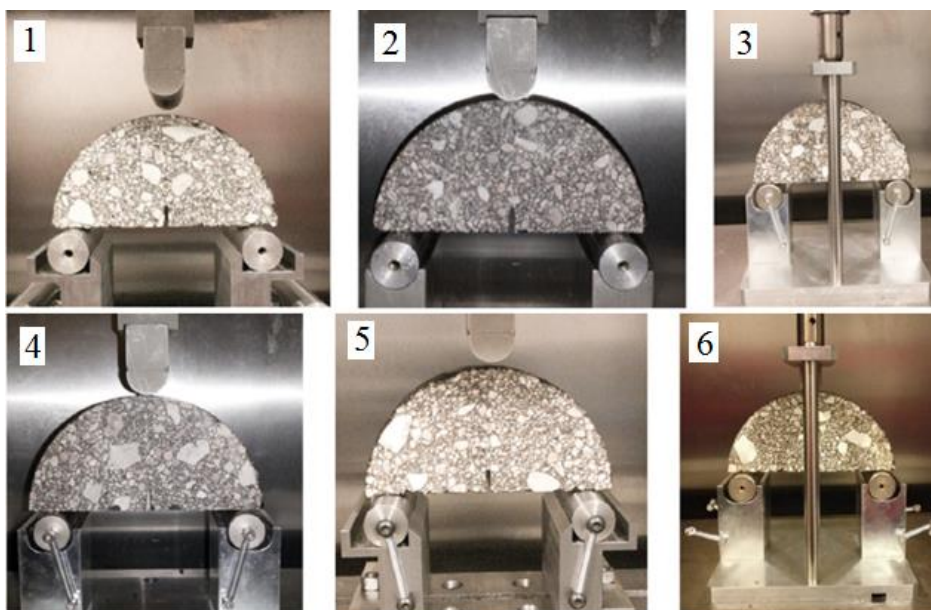


Рисунок 2.38 – Зовнішній вигляд опорних пристроїв, що застосовуються в приладах під час випробування асфальтобетону методом SCB та їх вплив на отримувані результати, [175]

Резюмуючи вплив різноманітних факторів на достовірність отримуваних результатів при випробуванні асфальтобетонних зразків методом SCB авторами роботи [175] запропоновано використовувати наступні параметри: товщина зразка – 40 ... 50 мм, довжина надрізу – 5 ... 15 мм, швидкість навантаження – 1 ... 5 мм/хв, потрібна кількість зразків для отримання результатів з 95 % рівнем достовірності – 5 ... 6. При використанні цих параметрів коефіцієнт варіації отримуваних даних не буде перевищувати 15 %.

На даний час метод випробування SCB стандартизовано як у американській (AASHTO TP 105 [190]), так і європейській (EN 12697-44 [191]) системах оцінки якості асфальтобетону. Обидва стандарти регламентують методику встановлення параметрів, які дозволяють оцінити опір руйнуванню асфальтобетону за низьких температур (в'язкість руйнування та міцність на розтяг). Значною відмінністю стандартів є різні умови проведення випробування:

- згідно AASHTO TP 105 для випробування приймаються зразки діаметром  $150 \pm 9$  мм завтовшки 25 мм, що мають надріз довжиною 15 мм та шириною 1,5 мм, а згідно EN 12697-44 – діаметром  $150 \pm 1$  мм завтовшки 50 мм, що мають надріз довжиною 10 мм та шириною 0,35 мм;

- згідно AASHTO TP 105 випробування здійснюються за двома температурами – перша на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  вище, ніж нижня температура марки за PG, а друга на  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  нижче, ніж нижня температура марки за PG; згідно EN 12697-44 випробування може здійснюватися за будь-якою температурою, але рекомендованою є температура в  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

- у відповідності з EN 12697-44 на зразок прикладається навантаження достатнє для отримання швидкості деформування зразка  $5 \pm 0,2$  мм/хв, а згідно умов AASHTO TP 105 швидкість навантаження становить 0,03 мм/хв (0,0005 мм/с).

Таким чином, результати випробування асфальтобетону методом SCB за методиками, наведеними в AASHTO TP 105 та EN 12697-44 можуть відрізнятися.

Порівняно з іншими методами випробувань асфальтобетонів, отримувані за методом SCB результати є близькими до результатів випробувань за методами Single Edge Notched Beam (SENB) та Edge Notched Disk Bend (ENDB), про що свідчать дані, наведені в [192]. Крім цього, згідно даних, наведених в [183, 193] значення міцності на

розтяг, визначені методами SCB та ITS є порівнянними. У відповідності з [173] випробування методом SCB є найбільш практичним за рахунок простоти підготовки зразків та чутливості до різних факторів, що визначають якість асфальтобетону.

В якості критерію низькотемпературного розтріскування асфальтобетону, який випробується методом SCB за температурою, що на 10 °C вище нижньої температури за PG, прийнято мінімальне значення енергії руйнування, що становить 350 Дж/м<sup>2</sup> [109, 113]. При випробуванні зістарених асфальтобетонів мінімальне значення енергії руйнування збільшується до 400 Дж/м<sup>2</sup>. Додатково, за рахунок високої кореляції значень в'язкості руйнування з кількістю розтріскувань асфальтобетонного покриття на дорозі, запропоновано використовувати в якості граничного значення для тріщиностійкості асфальтобетонного покриття мінімальне значення в'язкості руйнування в 800 kPa·m<sup>0.5</sup>.

В роботі [154] авторами встановлено кореляцію між значеннями температури розтріскування за методом TSRST та результатами випробувань за методом SCB, яка є помірною, при цьому у випадку співставлення окремо результатів визначених для одних й тих же типів асфальтобетонів, виготовлених на одній й тій же марці бітуму спостерігається більш тісна залежність між даними. Так, наприклад, для асфальтобетонів на бітумі 70/100 коефіцієнт кореляції становить 0,55, а для бетонів на бітумі, модифікованому полімером марки 45/80-55 коефіцієнт кореляції досягає 0,5. Подібні значення коефіцієнту детермінації (0,53) між температурою розтріскування за методом TSRST та результатами випробувань за методом SCB отримані й в роботі [Zaumanis M.].

На основі отриманих залежностей автори [154] запропонували використовувати метод SCB для попередньої оцінки необхідності визначення температури розтріскування за методом TSRST, оскільки останній є доволі трудомістким та тривалим в часі. У випадку, якщо значення енергії руйнування, отримані за методом SCB є меншим ніж 24 Н/мм<sup>3/2</sup> є необхідним визначати температуру розтріскування за TSRST, оскільки асфальтобетон може характеризуватися низькою температуростійкістю. В іншому випадку визначення температури розтріскування за TSRST є недоцільним, оскільки отримане значення буде більш низьким, ніж нормовані в країнах Європи низькотемпературні межі. До такого ж висновку прийшли й автори роботи [194].

### 2.2.3 Метод випробування на розтяг на компактних зразках-дисках

Метод випробування на розтяг на компактних зразках-дисках (Disk-shaped Compact Tension Test – DC(T)) було запропоновано групою науковців з Університету Іллінойсу в Урбана-Шампейн на початку 2000-х років [109, 195], при цьому в якості вихідного було прийнято подібний метод, що застосовувався для випробування металевих зразків. Метою розробки було покращення точності визначення параметрів руйнування зразка, зокрема енергії руйнування, порівняно з існуючими на той час методами SE(B) та SCB. Для досягнення мети розробки було запропоновано використовувати зразки певної форми та розмірів, що сприяло подовженню площі руйнування та попереджало руйнування зразка в отворах для стрижнів через яких прикладається розтягувальне навантаження.

У відповідності з методикою випробування DC(T), яка в 2013 р. була стандартизована в США (ASTM D7313 [196]) використовуються асфальтобетонні зразки, форма та розміри яких наведені на рис. 2.39. Зразки можуть бути виготовлені як з ущільнених в лабораторних умовах за допомогою гіратору зразків діаметром та висотою 150 мм, так і з кернів, відібраних безпосередньо на дорозі.

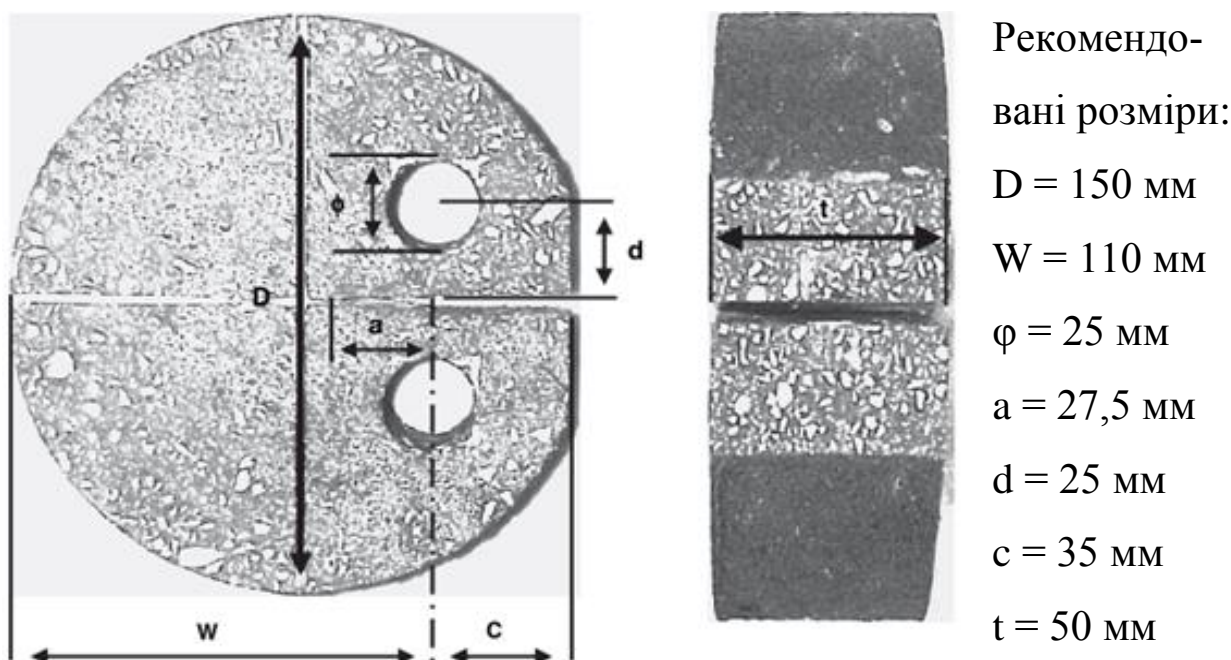


Рисунок 2.39 – Форма та розмір асфальтобетонного зразка для випробування за методом DC(T), [197]

Схема підготовки зразків для випробування за методом DC(T) наведена на рис. 2.40 [198].

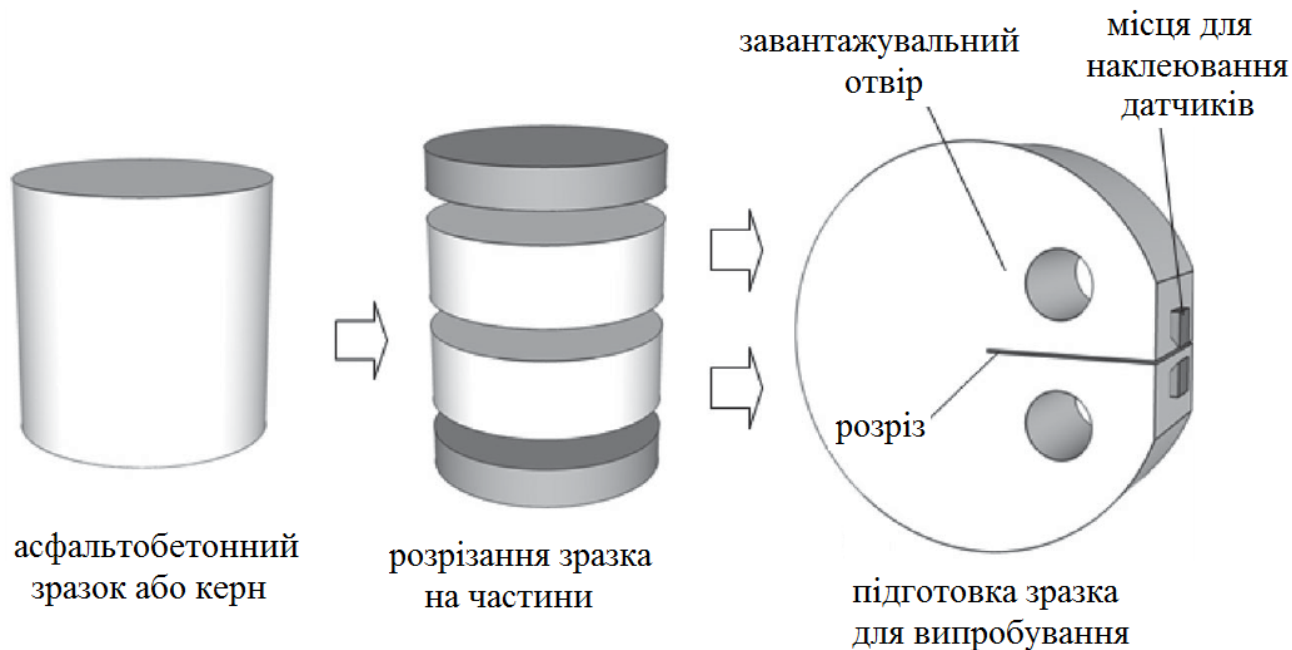


Рисунок 2.40 – Схема підготовки асфальтобетонних зразків для випробування за методом DC(T), [198]

Підготовлені асфальтобетонні зразки перед випробуванням витримують в кліматичній камері впродовж 2 .. 16 год за температурою випробування, що за звичай, приймається на 10 °С вищою за нижчу температуру районування бітуму, що входить до складу асфальтобетону, за системою PG. Після закінчення термостатування зразок швидко переносять в навантажувальний пристрій (рис. 2.41), закріплюють та піддають попередньому навантаженні в 0,2 кН. Випробування зразка здійснюють шляхом прикладання розтягувального навантаження з постійною швидкістю 1 мм/хв (постійною швидкістю розкриття гирла тріщини в 0,017 мм/с) до тих пір, поки рівень навантаження не зменшиться до 100 Н. На основі отриманих даних будують графіки залежності зміщення гирла тріщини (CMOD) від часу прикладання навантаження та залежності зміщення гирла тріщини від навантаження.

У відповідності з даними розробників [195, 197], метод дозволяє встановити перехід від квазікрихкого (заскленого) до крихкого та пластичного руйнування шляхом випробувань за декількох низьких температур, при цьому за низьких температур спостерігається розтріскування кам'яних матеріалів, а з підвищенням температури розтріску-

вання руйнування відбувається по межі контакту в'язучого з поверхнею кам'яного матеріалу.

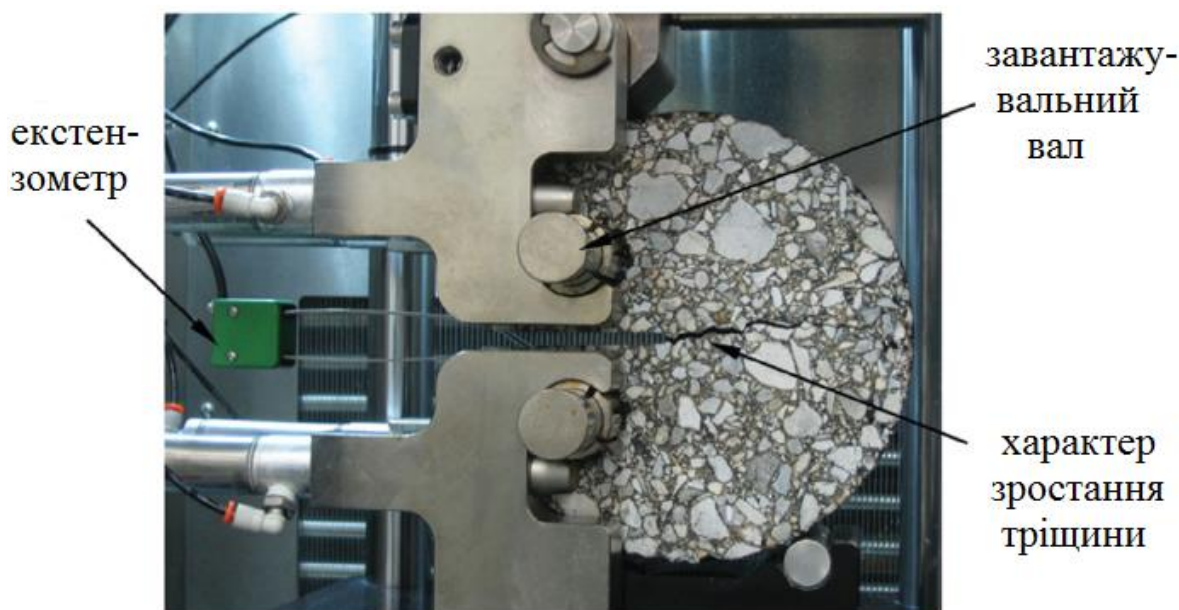


Рисунок 2.41 – Зовнішній вигляд навантажувального пристрою з асфальтобетонним зразком під час випробування за DC(T), [198]

Згідно з результатами дослідження, наведеними в [199], метод DC(T) є чутливим до таких факторів, як: температура випробування; тип кам'яних матеріалів, що використовуються в якості заповнювача асфальтобетону; кількість бітуму; пористість асфальтобетону. При цьому з підвищенням температури чутливість до перелічених факторів збільшується, а зі зменшенням температури ці фактори практично не впливають на отримувані результати. Крім цього метод є чутливим до наявності в складі асфальтобетону регенованого асфальтобетону, додавання якого призводить до зниження показника енергія руйнування [200].

До переваг методу DC(T) можна віднести [107, 109, 175, 201]:

- зразки для випробування можуть бути виготовлені як з лабораторно виготовлених асфальтобетонних зразків, так і з відібраних на дорозі кернів;

- за рахунок прийнятої форми та розмірів зразка досягається максимальна площа розтріскування порівняно з іншими методами випробування, що сприяє підвищенню збіжності та відтворюваності результатів;

- рівномірність розподілення напружень, що знижує ймовірність

концентрації напружень та підвищує точність визначення параметрів руйнування;

- прийнятна збіжність та відтворюваність результатів (коефіцієнти варіації результатів випробування знаходяться в залежності від температури випробування в межах 4 ... 17 % - чим нижче температура випробування, тим вище точність);

- висока кореляція низькотемпературних показників, визначених за методом DC(T) та отриманих на тестовій кільцевій трасі Міністерства транспорту штату Міннесота в США (MnRoad).

Недоліками метода є:

- можливість концентрації напружень в завантажувальних отворах, що призводить до утворення тріщини та передчасного руйнування зразка;

- можливість відхилення тріщини від вертикальної лінії, що може певним чином позначатися на точності та збіжності отримуваних результатів;

- значна трудомісткість у підготовці зразків до випробування та тривалий час випробування (орієнтовний час повного циклу випробування за методом DC(T), починаючи з виготовлення зразків та закінчуючи обробкою отриманих даних, становить 4 – 5 робочих днів [202]);

- значна вартість обладнання ( $\approx 49000$  \$) та датчиків, що використовуються в методі [107];

- певна складність у виготовленні зразка, що позначається на його цілісності;

Результати випробування асфальтобетонів за методом DC(T) подібно з випробуванням за методом SCB залежать від геометричних розмірів зразків (товщини зразка, довжини надрізу та інше) [195, 197, 203]. У відповідності з отриманими в роботі [195] даними значення енергії руйнування, отримані при випробуванні методом DC(T), є дещо вищими, ніж відповідні значення, отримані методом SE(B). Також значення енергії руйнування, отримані в методі DC(T), є дещо вищими ніж відповідні значення, отримані методом SCB [201].

В роботі [204] наведені результати проектування складу асфальтобетону для влаштування покриття ряду автомобільних доріг в штаті Міннесота (США). Під час проектування враховувалися результати визначення низькотемпературного розтріскування, отримані методом DC(T), при цьому в якості критерія розтріскування асфальтобетону

було прийнято значення енергії руйнування в  $400 \text{ Дж/м}^2$ . Спостереження впродовж 9 місяців за влаштованими дорожніми покриттями підтвердило доцільність та можливість застосування методу DC(T) на етапах проектування асфальтобетонних сумішей.

До подібних висновків прийшли й автори роботи [113]. На основі співставлення результатів лабораторних випробувань асфальтобетонів за методом DC(T) та спостереженням за розтріскуванням асфальтобетонних покриттів на автомобільних дорогах, розташованих в різних кліматичних та транспортних умовах, запропоновано нормування значень енергії руйнування:

- $350 \dots 400 \text{ Дж/м}^2$  – мінімальні значення енергії руйнування для об'єктів, що характеризуються низькою або помірною низькотемпературною тріщиностійкістю (фактично це є межою між поганою та прийнятною стійкістю до низькотемпературного розтріскування);

- $400 \text{ Дж/м}^2$  – мінімальне значення енергії руйнування для об'єктів, що характеризуються задовільною низькотемпературною тріщиностійкістю;

- $600 \text{ Дж/м}^2$  – мінімальне значення енергії руйнування для об'єктів, що характеризуються значною низькотемпературною тріщиностійкістю.

В подальшому в цю класифікацію було внесені зміни, які враховували зміну властивостей асфальтобетонів та рахунок довготривалого старіння:

- більше  $690 \text{ Дж/м}^2$  – для інтенсивного автомобільного руху, характерного для автомагістралів національного значення, для яких кількість ESAL (проїздів еквівалентного навантаження на одну вісь) перевищує 30 млн;

- більше  $460 \text{ Дж/м}^2$  – для автомобільного руху середньої інтенсивності, характерної для міських та обласних автомагістралей, для яких ESAL знаходиться в межах  $10 \dots 30$  млн;

- більше  $400 \text{ Дж/м}^2$  – для автомобільного руху низької інтенсивності, характерної для місцевих та сільських доріг, для яких ESAL є меншим 10 млн.

#### **2.2.4 Випробування асфальтобетонів за методом Fenix**

На відміну від інших методів визначення низькотемпературного розтріскування асфальтобетонів, що розроблені науковцями США, Fe-

пих test було розроблено в лабораторії дорожніх досліджень Технічного університету Каталонії, розташованому в Барселоні (Іспанія) [205, 206]. Метод отримав назву на честь дослідницького проекту FENIX (Стратегічне дослідження безпечніших і більш стійких доріг).

Fenix test є відносно новим, оскільки його було розроблено лише в 2010 р., тому випробування асфальтобетонів, не зважаючи на те, що автори позиціонують його як метод, що поєднує в собі переваги методів DC(T) та SCB, на даний час не набуло достатнього поширення.

Для випробування приймається половина асфальтобетонного зразка товщиною 63,5 мм та діаметром 101,6 мм, виготовленого в лабораторних умовах шляхом ущільнення методом Маршалла або гіратором. У центрі торця зразка здійснюється виріз глибиною 6 мм, до якого за допомогою тиксотропного клею (зазвичай, епоксидним) кріпляться дві сталеві пластини (рис. 2.42).

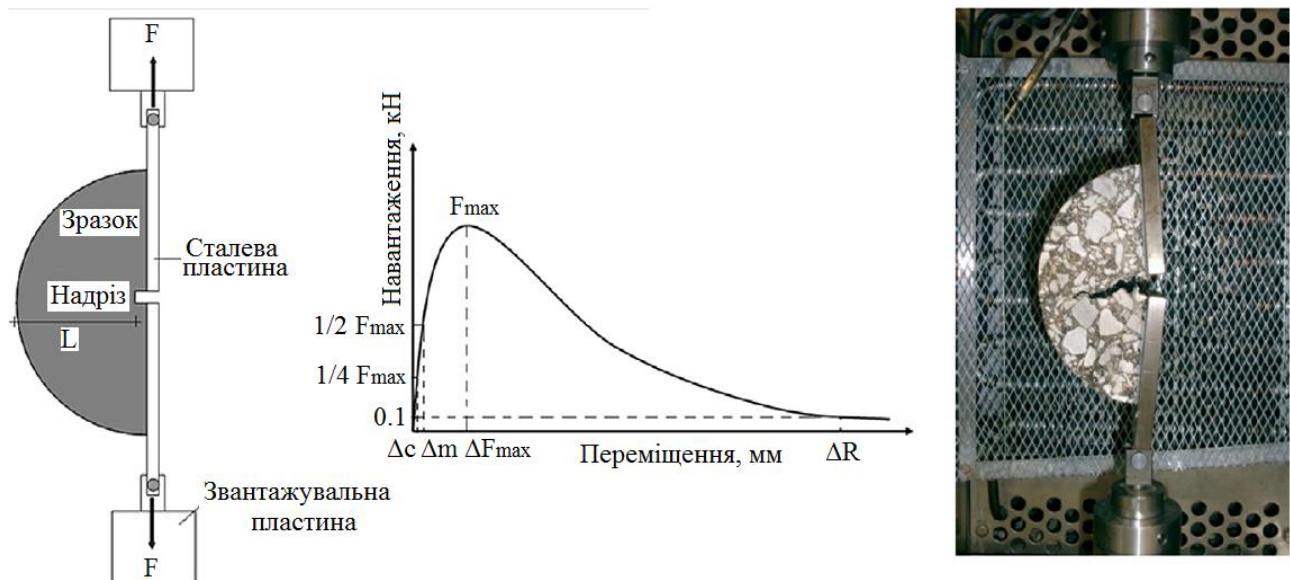


Рисунок 2.42 – Схема випробування, зовнішній вигляд та показники, що використовуються для розрахунку під час випробування за методом Fenix, [207]

Процедура випробування за методом Fenix полягає у прикладанні до асфальтобетонного зразка за допомогою сталевих пластин розтягуючого напруження з постійною швидкістю в 1 мм/хв. Під час випробування реєструють прикладене навантаження та зміщення точки навантаження, на основі яких будують відповідний графік (рис. 2.42).

На відміну від інших методів, що базуються на принципах теорії

руйнування твердих тіл, в методі Fenix на основі отриманих результатів розраховується енергія, що розсіюється під час процесу розтріскування, яка в свою чергу є сумою всіх енергій, що вивільнюються під час деформації зразка та його розтріскування.

Розсіяна енергія,  $G_D$  (Дж/м<sup>2</sup>), розраховується за формулою [207]:

$$G_D = \frac{W_D}{h \cdot l}, \quad (2.8)$$

де  $W_D$  – розсіяна робота, кН·мм,

$h$  – товщина зразка, м,

$l$  – початкова довжина, м.

Розсіяна робота визначається на основі залежності навантаження-переміщення, що отримується в процесі випробування зразка:

$$W_D = \int_0^{\Delta R} F \cdot du, \quad (2.9)$$

де  $F$  – навантаження, кН,

$u$  – переміщення точки навантаження, мм

$\Delta R$  – переміщення при  $F = 0,1$  кН

Індекс жорсткості на розрив ( $IRT$ , кН/мм) визначається за формулою [205, 208, 211]:

$$IRT = \frac{\frac{1}{2} \cdot F_{\max}}{\Delta m}, \quad 212. \quad (2.10)$$

де  $F$  – навантаження, кН,

$F_{\max}$  – найбільше (пікове) навантаження, кН

$\Delta m$  – переміщення перед піковим навантаженням при  $1/2 F_{\max}$ , мм.

або за вдосконаленою формулою:

$$IRT = \frac{0,5 \cdot F_{\max} - 0,25 \cdot F_{\max}}{d_{0,5F_{\max}} - d_{0,25F_{\max}}}, \quad (2.11)$$

У відповідності з даними, наведеними в [209], значення енергії руйнування, отримані під час випробування асфальтобетонів за методами SCB та Fenix є порівнянними, але значення коефіцієнту варіації для результатів, отриманих після випробуванням за методом Fenix є значно меншими (від 8 % до 15 %). Крім цього за допомогою методу Fenix є можливим більш коректне випробування за температур, що є вищими + 5 °C.

У відповідності з результатами досліджень, представленими в [107, 109] до переваг методу Fenix може бути віднесено те, що для його виконання не потребується спеціальне обладнання, а може бути використана універсальне гідравлічне обладнання, що застосовується й для інших випробувань асфальтобетонних зразків. Крім цього до переваг відноситься досить широкий інтервал температур (від – 25 °C до + 20 °C) в якому можуть здійснюватися випробування.

До недоліків методу можливо віднести те, що, оскільки він ще не отримав широкого поширення, на даний час є малий обсяг накопичених даних, а також відсутність співставлення лабораторно отриманих даних з результатами спостереження за станом асфальтобетонного покриття на дорозі. Ще одним недоліком, як виявилось під час тестування методу є чутливість результатів випробувань до кількості бітумного в'язучого, що входить до складі асфальтобетону (зі збільшенням кількості в'язучого зростає кількість енергії, що розсіюється).

Іспанські дослідники крім визначення низькотемпературних характеристик асфальтобетонів використовують метод Fenix й для оцінювання адгезійної здатності бітумних в'язучих з кам'яними матеріалами, а також для оцінювання впливу старіння в'язучих на властивості асфальтобетонів. З цією метою метод було дещо модифіковано в плані підготовки зразків, а саме: для оцінювання зчеплюваності зразки витримуються у воді за температури 60 °C впродовж 24 год; для оцінювання впливу старіння зразки перед випробуванням витримуються в сушильній шафі за температури 80 °C впродовж 2 та 8 діб. Оцінювання зчеплюваності ті впливу старіння здійснювалось шляхом порівняння результатів Fenix тесту (індекс жорсткості), отриманих на вихідних зразках та зразках, що витримувалися за підвищеною температурою у воді чи на повітрі.

В роботі [210] на основі отриманих експериментальних даних встановлено наявність ряду полілінійних залежностей між показни-

ками, визначеними після випробуванням за методом Fenix та характеристиками бітумного в'язучого і асфальтобетону ( $T$  – температурою випробування;  $BG$  - пенетрацією за температури  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  в'язучого, що застосовувався для виготовлення асфальтобетону;  $F$  – кількістю дрібної фракції (з розміром менше  $4\text{ мм}$ ) у складі асфальтобетону;  $NMAS$  – номінальним максимальним розміром зерен кам'яних матеріалів), що характеризуються різними значеннями коефіцієнту детермінації ( $R^2$ ):

- між значенням індексу жорсткості ( $IRT$ ):

$$IRT = 19,69 - 0,531 \cdot T - 0,137 \cdot BG + 0,049 \cdot F, \quad (R^2 = 0,897) \quad (2.12)$$

$$IRT = 15,939 - 0,441 \cdot T + 0,177 \cdot NMAS - 0,094 \cdot BG, \quad (R^2 = 0,888) \quad (2.13)$$

- між значенням індексу в'язкості ( $TI$ ):

$$TI = -468,297 + 22,828 \cdot BG + 18,829 \cdot T - 9,457 \cdot F, \quad (R^2 = 0,614) \quad (2.14)$$

- між значенням  $50\%$  післяпікового навантаження ( $d_{0,5PostF_{max}}$ ), яке характеризує пластичність суміші:

$$d_{0,5PostF_{max}} = -0,369 + 0,060 \cdot T + 0,033 \cdot BG - 0,015 \cdot F, \quad (R^2 = 0,854) \quad (2.15)$$

$$d_{0,5PostF_{max}} = -0,363 + 0,047 \cdot T + 0,023 \cdot BG - 0,008 \cdot NMAS, \quad (R^2 = 0,941) \quad (2.16)$$

- між енергією руйнування ( $G_F$ ):

$$G_F = 58,855 + 16,743 \cdot BG - 5,89 \cdot T - 4,931 \cdot F, \quad (R^2 = 0,854) \quad (2.17)$$

Вищенаведені залежності, не зважаючи на те, що отримані на відносно невеликій вибірці експериментальних даних, які не охоплюють всіх типів асфальтобетонних сумішей, виготовлених на бітумних в'язучих, модифікованих різноманітними добавками, відкривають проектувальникам та виробничникам широку можливість попередньої оцінки низькотемпературної тріщиностійкості асфальтобетону [212].

### 2.2.5 Випробування за методом Texas Overlay Test

Texas overlay test (Техаський тест накладення) було розроблено наприкінці 70-х років минулого століття в Техаському транспортному університеті (США) [114, 214], а на початку 2000-х років його було адаптовано до сучасних вимог та підготовлено до стандартизації. На даний час метод є стандартизованим в США в штатах Техас (TEX-248-F «Overlay Test») та Мінесота (NJDOT B-10 «Overlay test for Determining Crack Resistance of HMA») [214; 215], а також використовується ще в 5 штатах (Нью-Джерсі, Алабама, Оклахома, Массачусетс, Невада).

Метод було розроблено з метою моделювання розтріскування асфальтобетонного покриття за рахунок відкриття / закриття тріщин або швів в нижче розташованих шарах. Принцип дії приладу наведені на рис. 2.43, а зовнішній вигляд зразка з приладом дано на рис. 2.44.

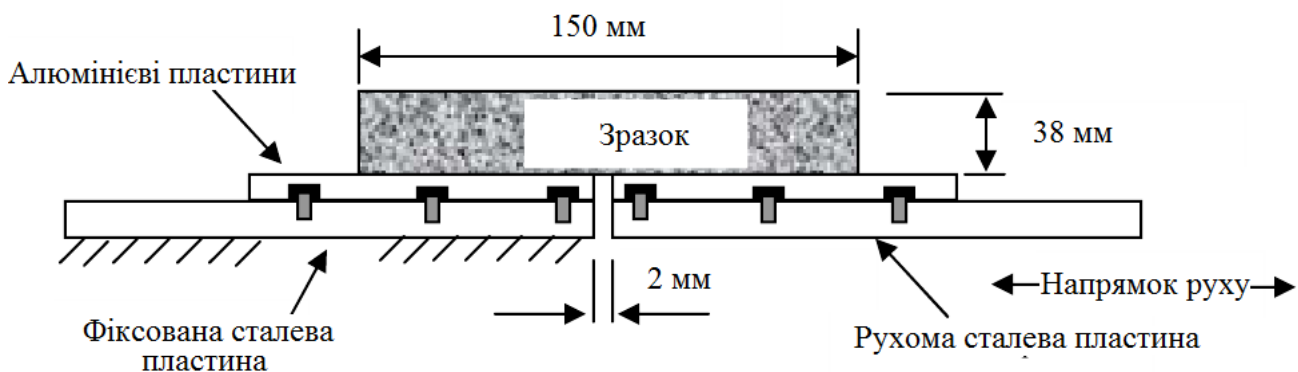


Рисунок 2.43 – Схема випробування за Texas overlay test, [214]



Рисунок 2.44 – Зовнішній вигляд зразка та приладу для випробування за Texas overlay test, [114]

В стандартизованому методі використовуються асфальтобетонні зразки довжиною 150 мм, шириною 75 мм та висотою від 38 мм до 50 мм, які можуть бути виготовлені, як з лабораторно ущільнених за допомогою гіратору (до кількості пор в 7 %) асфальтобетонних зразків, так і з керну, відібраного на дорозі. Виготовлений зразок (рис. 2.45) приклеюють за допомогою епоксидної смоли до алюмінієвих пластин та витримують впродовж певного періоду під навантаженням, після чого здійснюють термостатування зразка за температурою випробування та безпосередньо його випробування.

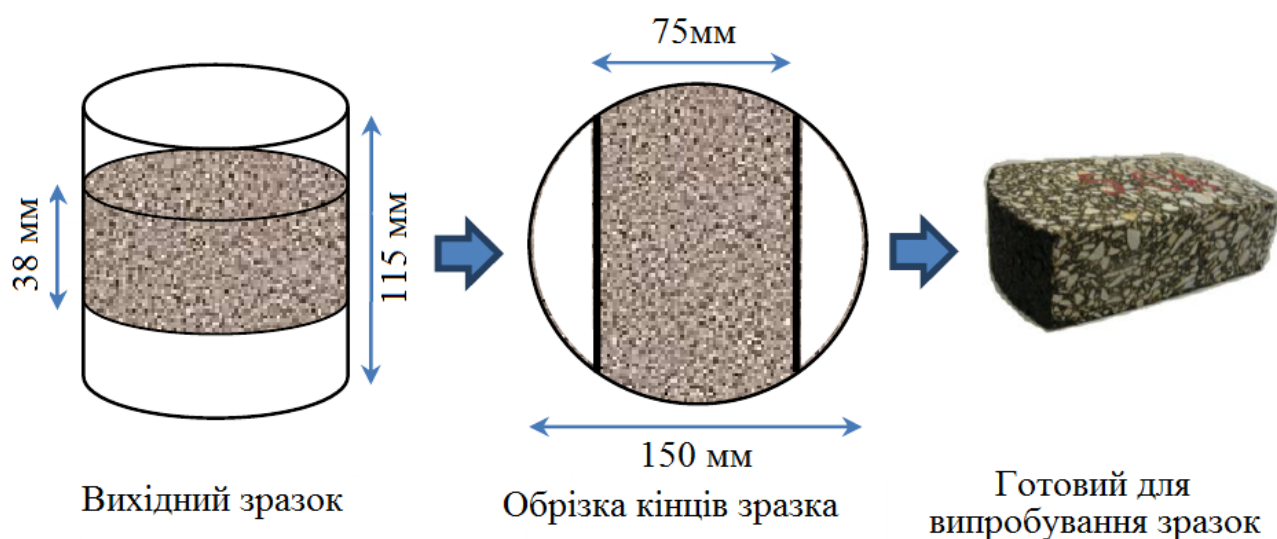


Рисунок 2.45 – Схема вирізання зразка для випробування за Texas overlay test, [215]

Випробування асфальтобетонного зразка здійснюється шляхом прикладання до рухомої сталевий пластини, на якій розташовано зразок, повторюваних розтягуючих циклічних навантажень трикутної форми з постійним максимальним зміщенням цієї пластини відносно іншої (нерухомої) на 0,062 мм зі швидкістю одного циклу в 10 сек (5 сек – навантаження, 5 сек – розвантаження) (рис. 2.46). Випробування здійснюють до тих пір, поки навантаження не знизиться на 93 % від пікового навантаження в першому циклі.

Під час випробування автоматично реєструються такі показники, як: навантаження, що прикладається; відкриття тріщини; час; кількість циклів навантаження та температуру випробування [215]. Крім цього, є можливість визначення параметрів, що використовуються для кількісного оцінювання розтріскування I типу асфальтобетону, поді-

бну тих, що визначаються у методах SE(B), SCB, DC(T). Для визначення таких показників як міцність на розтяг, енергія руйнування, модуль жорсткості та характеристики пластичності асфальтобетону, навантаження прикладається не циклічно, а монотонно зі швидкістю 0,125 дм/хв (0,318 см/хв) за температури 25 °С.

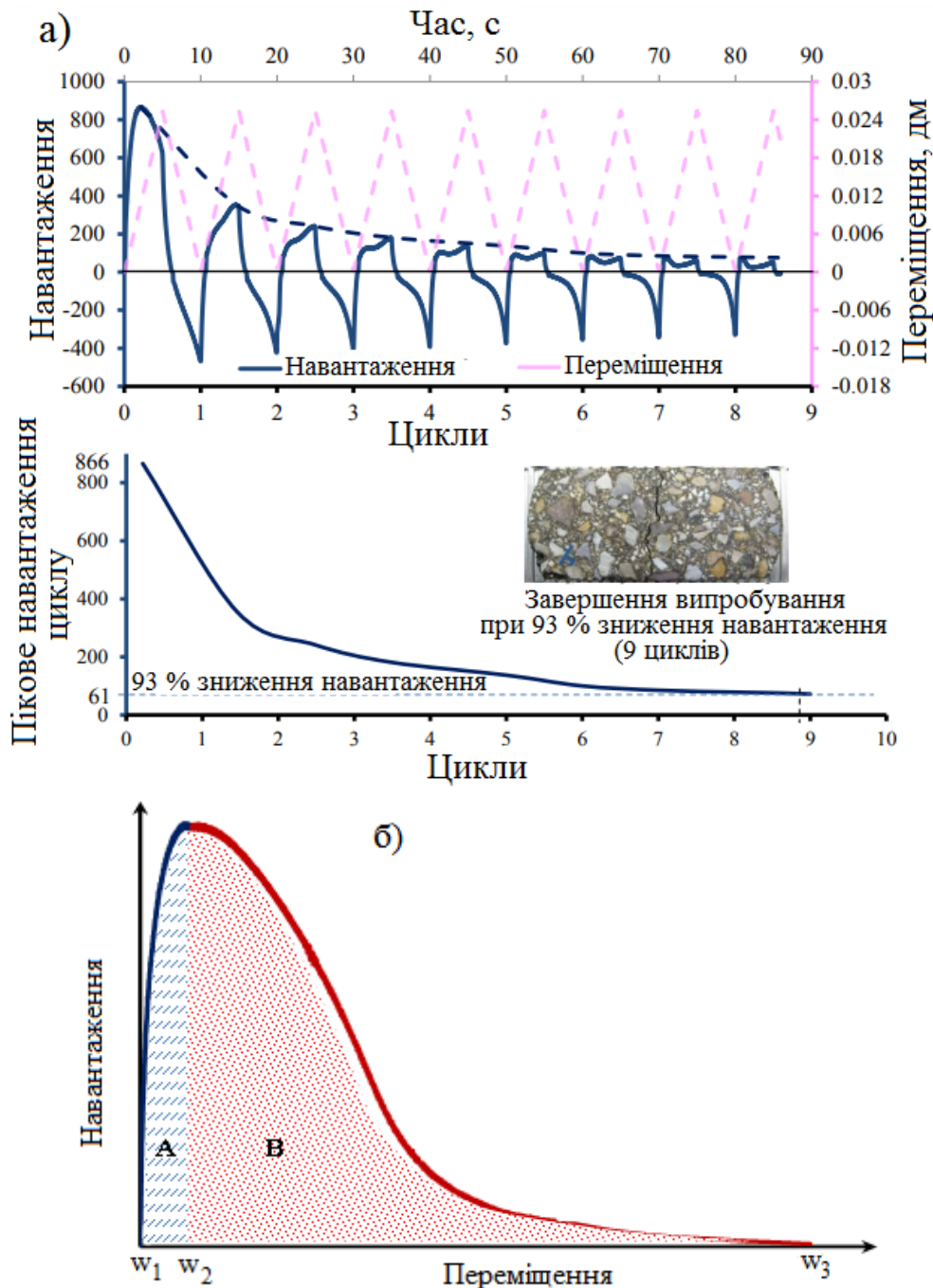


Рисунок 2.46 – Типовий вигляд результатів випробування асфальтобетонного зразка за Texas overlay test (а – визначення опору відбитих тріщин, б – визначення розтріскування на основі положень механіки руйнування твердого тіла), [114, 215]

До переваг методу можна віднести [107, 119, 216]:

- відносна простота у підготовці випробувальних зразків, які можуть бути виготовлені як з лабораторно ущільнених зразків, так і в кернів, відібраних на дорозі.

- простоту у отриманні та інтерпретуванні експериментальних даних;

- високу кореляцію з відбиваючим розтріскуванням асфальтобетонних покриттів, що підтверджено дослідницькими програмами, виконаними в ряді штатів США (Техас, Каліфорнія, Нью-Джерсі)), а також з даними, отриманими на випробувальному треку NCAT (США);

- відносно низьку вартість випробувального комплексу (порядку 50000 \$);

- може використовуватися для оцінювання впливу товщини проміжного шару на строк роботи асфальтобетонного покриття;

- повністю комп'ютеризоване управління процесом випробування та оцінювання отриманих результатів.

До недоліків методу можливо віднести відносно низьку точність випробування, яка за даними [107, 215] знаходиться в межах 30 – 50 %, що згідно даних [217] більшою мірою є наслідком похибок під час підготовки зразка та проведення випробувань. Також до недоліків може бути віднесено те, що існує можливість руйнування клеєвого шару під час випробування високов'язких асфальтобетонів, яке призводить до отримання некоректних результатів випробування. Ще одним недоліком, який в принципі є характерним для всіх методів, оснований на принципах механіки руйнування твердих тіл, є тривалий час підготовки зразків та проведення випробування, який для Texas overlay test складає 3 – 4 робочі дні [202].

На основі випробування 200 асфальтобетонних зразків, виготовлених з асфальтобетонних сумішей різного гранулометричного складу та на різних бітумних в'язучих, запропоновано в якості критерія асфальтобетону за показником опору розтріскування за рахунок дії відбитих тріщин, приймати мінімальну кількість циклів випробування 300 (або 750 для дорожніх одягів, що мають укріплені шари основи) [216]. Крім цього, в [217] в якості критерію оцінювання тріщиностійкості асфальтобетону, що визначається на основі результатів Texas overlay test запропоновано використовувати швидкість розвитку тріщини, яка повинна бути меншою ніж 0,5. В якості швидкості розвитку тріщини використовується степеневий коефіцієнт в рівнянні  $y = a^{-B}$ , де

у – навантаження, а – кількість циклів випробування.

Також в [217] запропоновано на основі комбінації таких характеристик, як швидкість розвитку тріщини та енергія руйнування класифікувати асфальтобетонні суміші на:

- стійкі до розтріскування – високі значення енергії руйнування та низька швидкість розвитку тріщини;
- помірна стійкість до розтріскування – високі значення енергії руйнування та висока швидкість розвитку тріщини;
- схильні до розтріскування – низькі значення енергії руйнування та висока швидкість розвитку тріщини.

Перспективність методу підтверджується поширенням в дорожніх організаціях в США для проектуванням складу асфальтобетонних сумішей і оцінки експлуатаційного стану покриття [214; 218] та значною кількістю наукових робіт, що виконуються дослідниками в різних лабораторіях, направлених на вдосконалення, як методики, так і конструктивних особливостей методу (наприклад, шляхом розміщення на поверхні асфальтобетонного зразка LVDT-датчиків, тензорезисторів та інше, які є здатними фіксувати додаткові зміни в стані зразка) [217, 219 – 220].

### **2.2.6 Випробування методом Dog-Bone Direct Tension Test**

Ще одним відносно новим випробуванням низькотемпературних властивостей асфальтобетонів є метод випробування на прямий розтяг зразків у формі кістки собаки (Dog-Bone Direct Tension Test (DBDT)), що було запропоновано на початку 2000-х років науковцями університету Флориди (м. Гейнсвілл, штат Флоріда, США) [221 – 223].

Метою створення DBDT була розробка методу на прямий розтяг асфальтобетонних зразків різної товщини, що мають різноманітний гранулометричний склад, та який позбавлений недоліків, притаманних поширеному методу Superpave IDT (наявність концентрації напружень біля кінців зразка; зміщення площині руйнування відносно вертикальної осі; низька повторюваність отримуваних результатів та інше) [221]. Завдяки прийнятій формі асфальтобетонного зразка (рис. 2.47) розробникам вдалось уникнути ряд недоліків методу Superpave IDT: концентрація напружень біля кінців зразка є менш критичною; концентрація напружень на центральній осі зразка, за рахунок чого площа руйнування є відомою апріорі; геометрія зразка забезпечує досить великий поперечний переріз для випробувань без шкоди

для його цілісності.

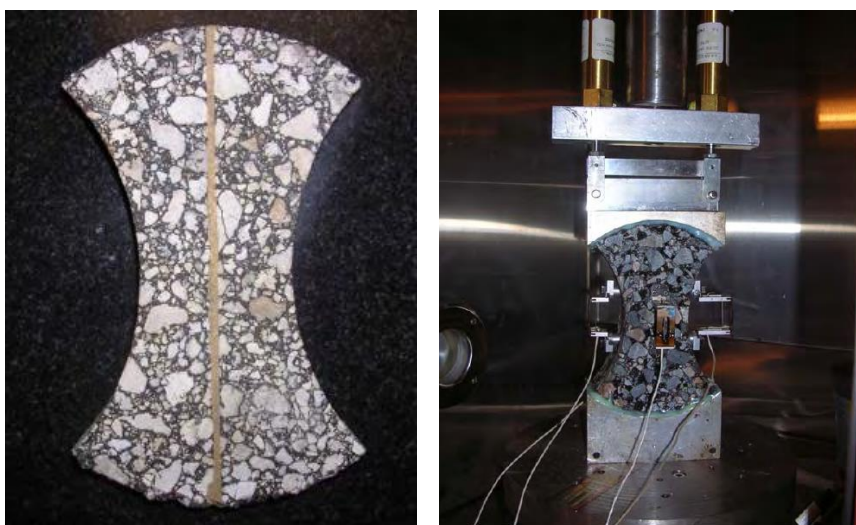


Рисунок 2.47 – Зовнішній вигляд зразка та установки для випробування за DBDT, [223]

Вибір форми зразка для випробування здійснено за допомогою аналізу методом кінцевих елементів.

Комплекс обладнання для проведення випробувань за методом DBDT включає в себе: двоциліндровий компенсатор навантажень на розтяг; виготовлені з алюмінію головки для завантажування зразка; 4 тензометричні датчики та комплекти їх кріплень до зразка; сервогідравлічна силова рама, що керується програмно з персонального комп'ютера; кліматична камера. Система вирівнювання навантажень, що складається з двох взаємодіючих гідравлічних циліндрів, сконструйована таким чином, щоб мінімізувати ексцентричне навантаження на зразок та його передчасне руйнування біля навантажувальних головок.

DBDT дозволяє визначати міцність на розтяг (шляхом розтягу з постійною швидкістю в 50,8 мм), модуль пружності, податливість повзучості (шляхом прикладення статичного навантаження впродовж 1000 с), деформацію під час руйнування, енергію руйнування [222].

В [222, 223] наведені експериментальні дані щодо порівняння результатів випробування асфальтобетонних зразків, визначених методами Superpave IDT та DBDT, згідно яких встановлені лінійні залежності між:

- міцністю на розтяг (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,766$ ), при

цьому за рахунок різниці в швидкостях деформування, значення міцності, визначені в DBDT є вищими, ніж після випробування методом Superpave IDT;

- деформації під час руйнування ( $R^2 = 0,974$ ), які після визначення методом DBDT є меншими, ніж при випробуванні методом Superpave IDT, що також пояснюється різницями в швидкостях деформування;

- рівною енергією руйнування, що підтверджує фундаментальність цього показника, який не залежить від напруженого стану, умов навантаження та геометрії разків.

Значними недоліками методу DBDT є складність форми асфальтобетонного зразка та висока трудомісткість під час підготовки зразків до випробування.

### **2.2.7 Випробування за допомогою приладу для розтріскування асфальтобетону**

Метод випробування за допомогою приладу для розтріскування асфальтобетону (Asphalt Concrete Cracking Device – ACCD)) розроблено в якості більш простої альтернативи методу TSRST [109, 224 – 225]. Даний метод є певним аналогом методу ABCD, що використовується для оцінювання низькотемпературних властивостей в'язучих.

В якості основного обладнання методу ACCD використовується кільце з інвару, що має зовнішній діаметр 60,5 мм, внутрішній діаметр 22,6 мм та висоту 64 мм, до внутрішньої частини якого кріпляться дво-вісний тензOMETричний датчик та датчик температури (рис. 2.48). Принцип випробування асфальтобетону методом ACCD є подібним до випробування бітумних в'язучих методом ABCD – під час зниження температури за рахунок значної різниці в коефіцієнтах теплового розширення асфальтобетону та інварового кільця під дією розтягуючих напружень спостерігається зменшення об'єму асфальтобетонного зразка та його розтріскування при досягненні температури, за якої міцність на розтяг асфальтобетону стає меншою, ніж внутрішні температурні напруження в тілі зразка.

Виготовлення асфальтобетонних зразків для випробування здійснюється шляхом ущільнення в лабораторних умовах (ущільнення пресуванням за 3 підходи, в кожному з яких на асфальтобетонну суміш прикладається впродовж 15 сек тиск в 445 кН з наступним знят-

тям навантаження) асфальтобетонної суміші в пристосуванні для виготовлення зразків, що збирається згідно з послідовністю, наведеною на рис. 2.49. Є можливим використання ущільненого за допомогою гіратора стандартного асфальтобетонного зразка діаметром 150 мм та висотою 100 мм, який розпилюється на дві рівні частини та в кожній з них по центру висвердлюють отвір діаметром 60 мм [224].

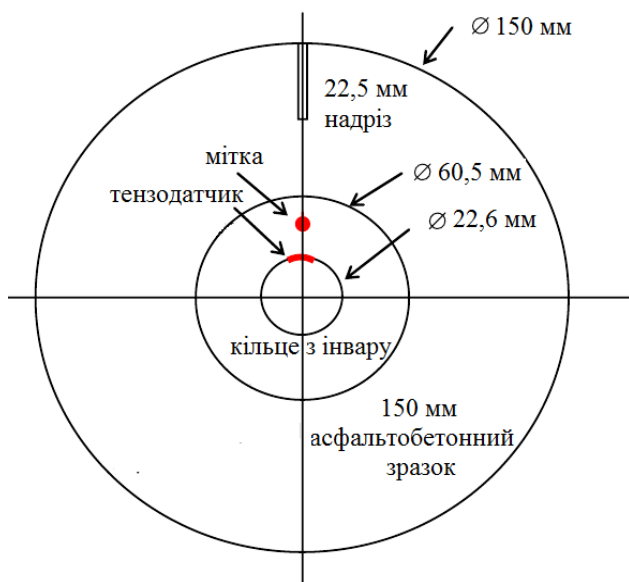


Рисунок 2.48 – Зовнішній та схематичний вигляд зразка з кільцем з інвару, що використовується у випробуванні методом ACCD, [224]

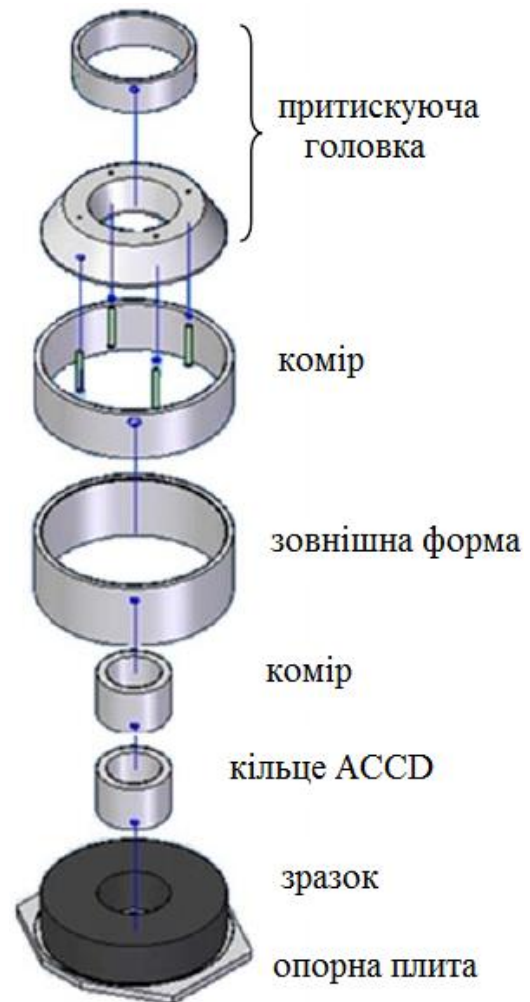


Рисунок 2.49 – Пристосування для виготовлення зразків, що випробуються методом ACCD, [226]

Випробування зразка розпочинається через 2 год після його виготовлення. Зразок розміщується в кліматичній камері з початковою температурою 5 °С. Після витримання в камері впродовж 1 год зразок виймається та за допомогою циркуляційної пили на ньому здійснюється надріз встановленого розміру (зазвичай довжиною 22,5 мм).

Після подальшого витримування асфальтобетонного зразка з інваровим кільцем та підключеними датчиками в кліматичній камері впродовж 1 год за температури 0 °С розпочинається зниження температури зі швидкістю 10 °С/год до того моменту, доки вимірювальна система не зафіксує розтріскування зразка в місті надрізу.

На основі отриманих даних будується температурна залежність деформацій зразка, за яким графічно встановлюється температура низькотемпературного розтріскування асфальтобетону (рис. 2.50).

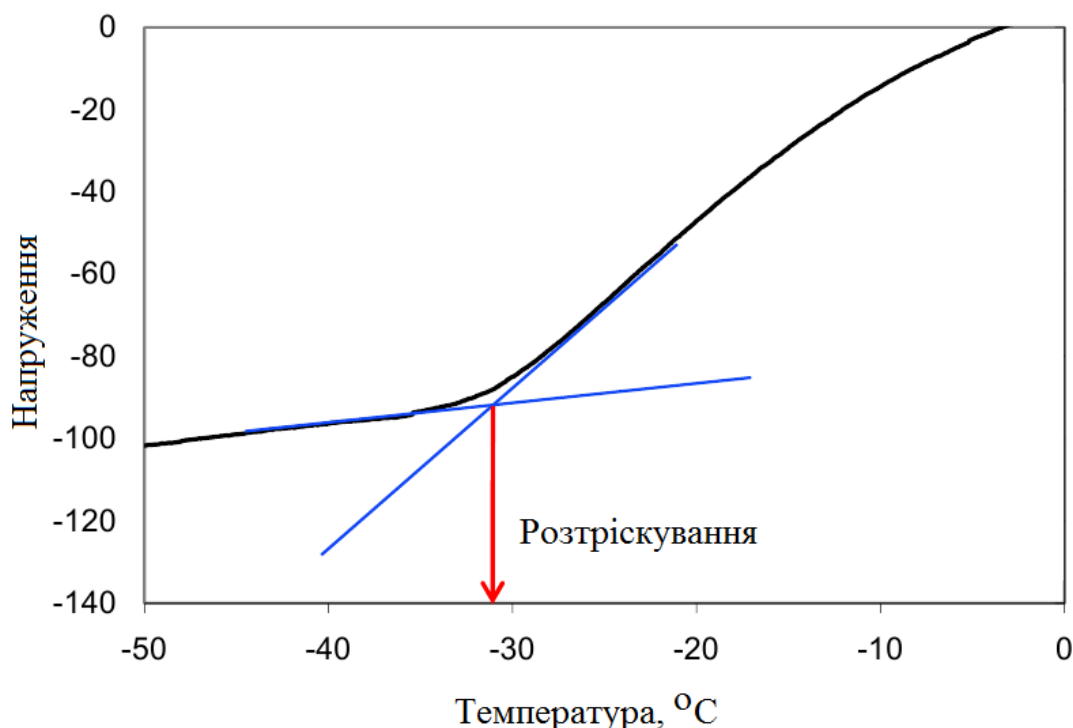


Рисунок 2.50 – Типова температурна залежність деформацій зразка під час випробування методом ACCD, [226]

У відповідності з [109, 226] до недоліків методу ACCD можливо віднести: відносну складність виготовлення зразків для випробування, відсутність достатнього досвіду використання цього методу та об'ємного дослідження, направлено на встановлення відповідності результатів, отриманих на лабораторно ущільнених зразках та зразках з асфальтобетонного покриття; відсутність стандартизованого методу. Методу ACCD притаманні й переваги: можливість випробування як лабораторно ущільнених зразків, так і зразків, виготовлених з відібраних на дорозі кернів; прийнятна збіжність та відтворюваність результатів випробувань; прийнятна тривалість випробування; можливість

одночасного випробування 4-х та більше зразків. Головними перевагами ACCD є гарна кореляція з результатами визначення температур розтріскування асфальтобетонів, визначених різними методами. Так, наприклад, в [226] наведені результати згідно яких, встановлено, що існує лінійна кореляція між:

- значеннями температури розтріскування асфальтобетону, визначеними методами ACCD та TSRST (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,86$ );

- значеннями температури розтріскування асфальтобетону, визначеними методом ACCD та температури крихкості бітуму, визначеного методом BBR (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,92$ );

- значеннями температури розтріскування асфальтобетону, визначеними методом ACCD та температури крихкості бітуму, визначеного методом ABCD (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,97$ ).

### **2.2.8 Тенденції в розробках сучасних методів оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, оснований на теорії руйнування твердих тіл**

Незважаючи на те, що на даний час існує значна кількість методів визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, пошук нових принципів та розробка нових методів постійно продовжується.

Так, наприклад, в Університеті Кентуккі (м. Лексингтон, США) в 2014 р. було представлено випробування на руйнування з непрямим кільцевим розтягненням (Indirect ring tension (IRT) fracture test). Метою розробки було створення простого у користуванні та ефективного методу, який би дозволяв отримувати результати з високою відтворюваністю за допомогою існуючого у випробувальних лабораторіях обладнання [227]. Схема випробування та послідовність підготовки асфальтобетонних зразків наведені на рис. 2.51.

Зразки, що використовуються для випробування за методом ITR, виготовляються зі стандартних асфальтобетонних зразків діаметром 150 мм, що виготовляються шляхом ущільнення суміші за допомогою гіратору до остаточної пористості в 7 % або з кернів, або відібраних на дорозі у вигляді кернів. В середині зразка висвердлюється отвір діаметром 13 мм, на стінках якого роблять два діаметрально розташованих надрізу шириною 1,0 ... 1,2 мм та довжиною 8 мм.

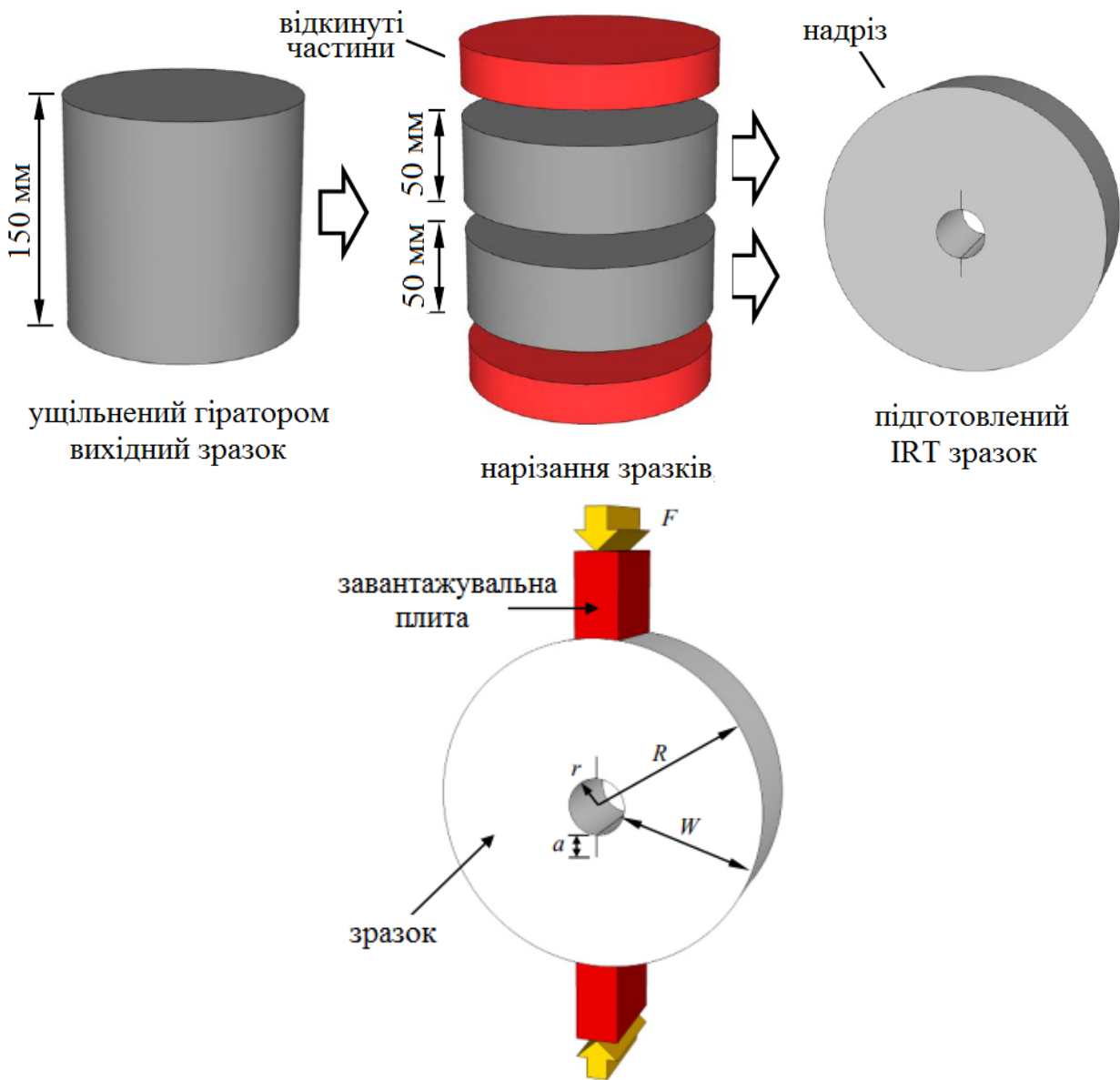


Рисунок 2.51 – Схеми підготовки асфальтобетонних зразків та випробування їх за методом ITR, [227]

Випробування зразків здійснюється у кліматичній камері за допомогою поширеного в дорожніх лабораторіях випробувального пресу шляхом стиску зразка з постійною швидкістю в 1 мм/хв до його повного руйнування (рис. 2.52). Автори методики пропонують здійснювати випробування за трьох низьких температур (наприклад, мінус 2 °С, мінус 12 °С та мінус 22 °С).

Під час випробування фіксуються з інтервалом в 0,05 с дані про прикладене навантаження та переміщення точки навантаження, що дозволяє після випробування визначити характеристики руйнування зразка (в'язкість та енергію руйнування). Типова крива навантаження-

переміщення, отримана під час випробування асфальтобетонного зразка методом ITR, наведена на рис. 2.53.



Рисунок 2.52 – Зовнішній вигляд асфальтобетонного зразка, підготовленого до випробування та зруйнованого, [227]

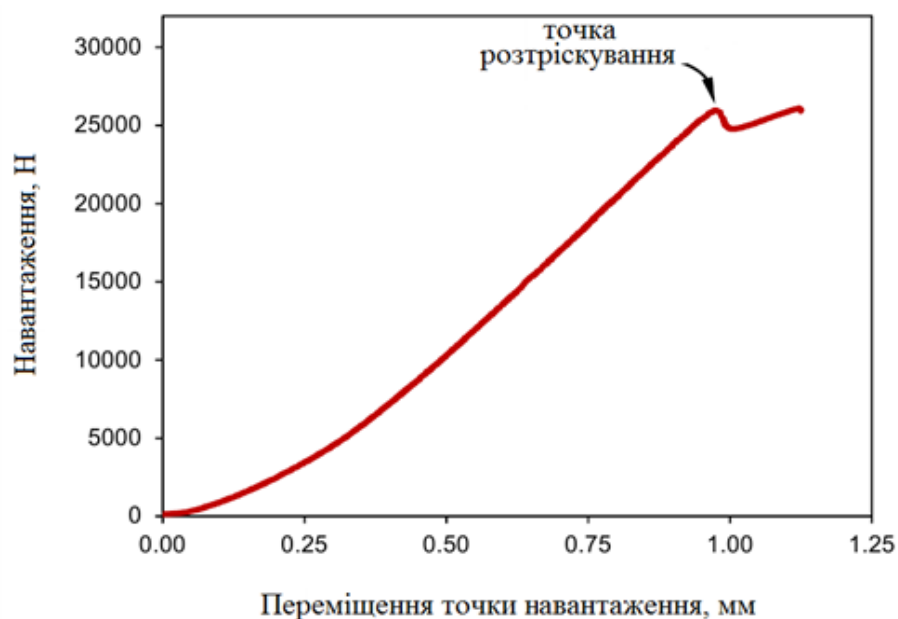


Рисунок 2.53 – Типова крива під час випробування зразків методом ITR, [227]

В [227] наведені дані співставлення результатів випробування асфальтобетонних зразків методами DC(T) та ITR свідчать про більшу чутливість методу ITR до пористості асфальтобетону та зміну його властивостей в наслідок старіння бітумного в'язучого, а також про більш високу відтворюваність результатів.

До переваг методу його автори [227] відносять: простоту у виготовленні зразків; можливість випробування як лабораторно виготовлених зразків, так і кернів, відібраних на дорозі; відсутність необхідності використання спеціалізованого обладнання для випробування; можливість встановлення чіткого переходу від пластичного до крихкого стану зразка; наочна картина розвитку тріщини в зразку та руйнування виключно I типу; відносно велика зона розвитку тріщини; більш висока відтворюваність результатів, ніж у інших відповідних методів випробування.

На даний час метод проходить виробничу перевірку та планується його пробне впровадження в дорожні лабораторії штатів США.

В Арізонському державному університеті (м. Темпе, США) розроблено метод випробування асфальтобетонного зразка у вигляді диску з надрізом (C\* Fracture Test – CFT) [228]. На основі попередньо виконаного аналізу існуючих методів визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, автори встановили, що найбільш перспективними є методи DC(T), SCB та IDT, оскільки вони характеризувались найбільш прийнятною відтворюваністю отримуваних результатів випробувань, та для подальшого вдосконалення було прийнято метод IDT.

На рис. 2.54 наведено зовнішній вигляд зразка для випробування методом CFT, [Stempihar J.,]. Для випробування приймається асфальтобетонний зразок діаметром 150 мм та товщиною 50 мм, який вирізають з ущільненого в лабораторії за допомогою гіратору зразка діаметром 150 мм та висотою 170 мм. В зразку робиться виріз під прямим кутом глибиною 25 мм у вершині якого додатково виконується надріз глибиною 3 мм та шириною 1,6 мм. Також можуть використовуватися зразки діаметром 100 мм (в цьому випадку глибина вирізу становить 19 мм). Випробування здійснюється шляхом прикладання навантаження за допомогою гідравлічного пресу на зразок, що розташовано в кліматичній камері, при цьому приймаються швидкості переміщення точки навантаження в 0,15 мм/хв та 0,3 мм/хв. Зазвичай випробування виконують за трьох температур: 21°C, 10 °C та 4,4 °C.

За даними розробників цього методу [228] він є життєздатним лабораторним випробуванням, яке може використовуватися для опису поширення тріщин в асфальтобетоні.

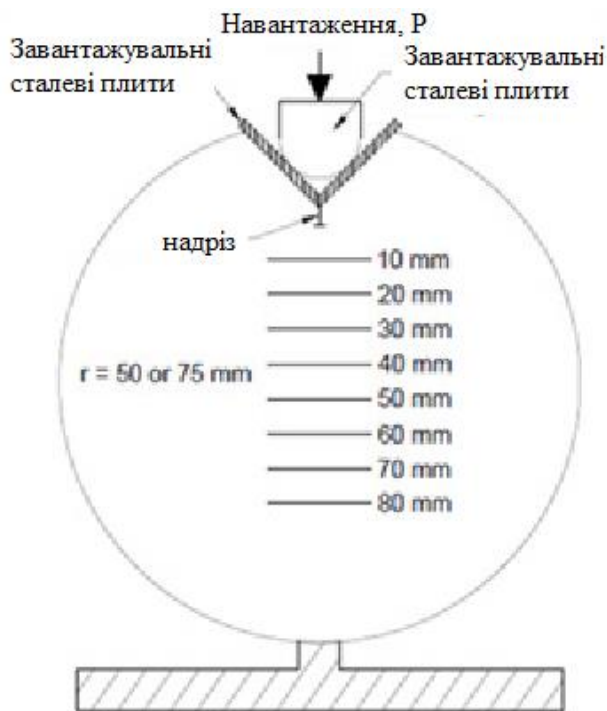


Рисунок 2.54 – Зовнішній вигляд та схематичне зображення зразка для випробування методом CFT, [228]

В роботі [107] представлені основні вимоги, яким повинен відповідати ідеальний тест на визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів:

- простота форми зразка – відсутність необхідності додаткових операцій з висвердлювання, надрізання, склеювання та інше під час виготовлення зразків;
- практичність – метод повинен характеризуватися мінімальною підготовкою до випробування;
- ефективність – час проведення безпосередньо випробування не повинен перевищувати 1 хв;
- доступність та низька вартість обладнання для проведення випробування – вартість не повинна перевищувати 10000 \$;
- висока точність методу – коефіцієнт детермінації не повинен перевищувати 25 %;
- чутливість методу до складу асфальтобетону та його компонентів;
- висока кореляція з результатами розтріскування асфальтобетону на дорозі.

Виходячи з цих критеріїв було розроблено метод, що отримав назву (IDEAL-CT – ідеальний тест на розтріскування асфальтобетону

при непрямому розтягу). Метод розроблено на основі принципів механіки руйнування твердого тіла та призначено для повсякденного проектування складу асфальтобетонних сумішей та контролю якості [114, 229, 230].

В методі IDEAL-СТ циліндричні зразки, виготовлені в лабораторії шляхом ущільнення гіратором до пористості 7 % або з керну, відібраного на дорозі, діаметром 150 мм та висотою 62 мм (можуть використовуватися зразки іншого розміру, наприклад діаметром 100 мм або 150 мм та товщиною 38 мм, 50, 62, 75 мм або інше) випробуються за температури 25 °С на непрямий розтяг зі швидкістю прикладання навантаження 50 мм/хв. На рис. 2.55 – 2.56 представлено зовнішній вигляд зразка та типову залежність, що будують за результатами випробування.

Процедура випробування є стандартизованою в США та наведена в ASTM D8225-19: «Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature».

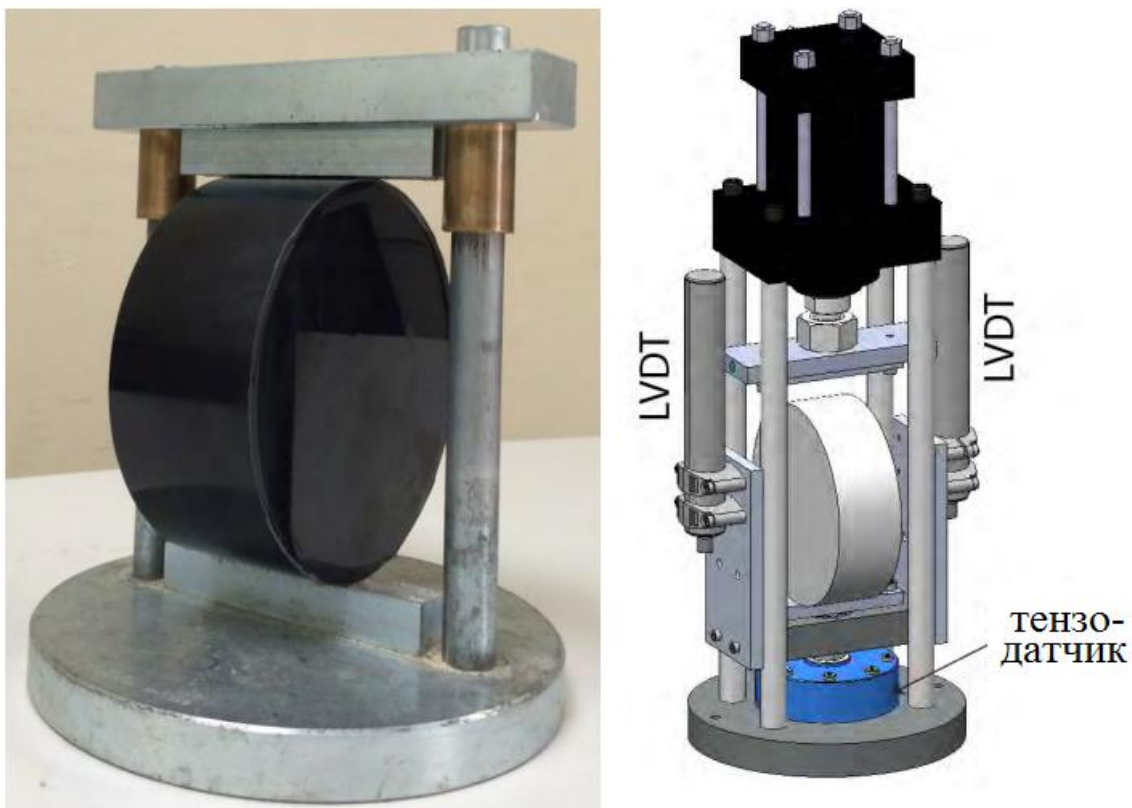


Рисунок 2.55 – Зовнішній вигляд зразка та пристрою для випробування методом IDEAL-СТ, [114, 202]

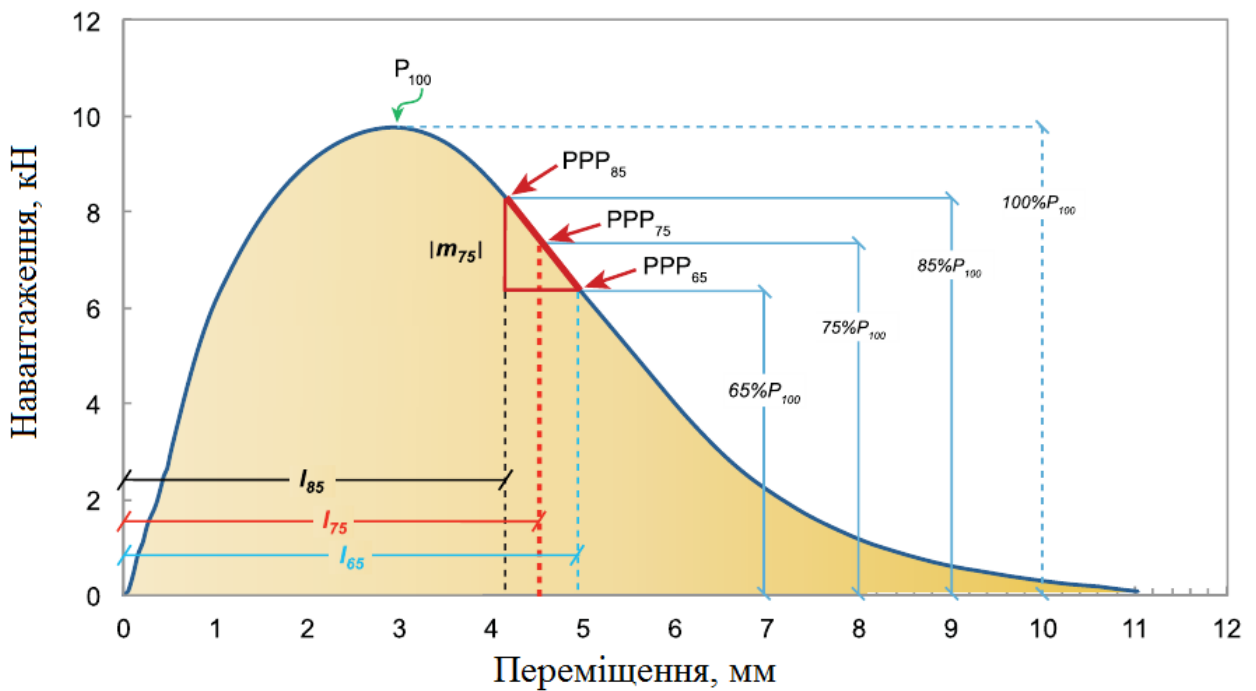
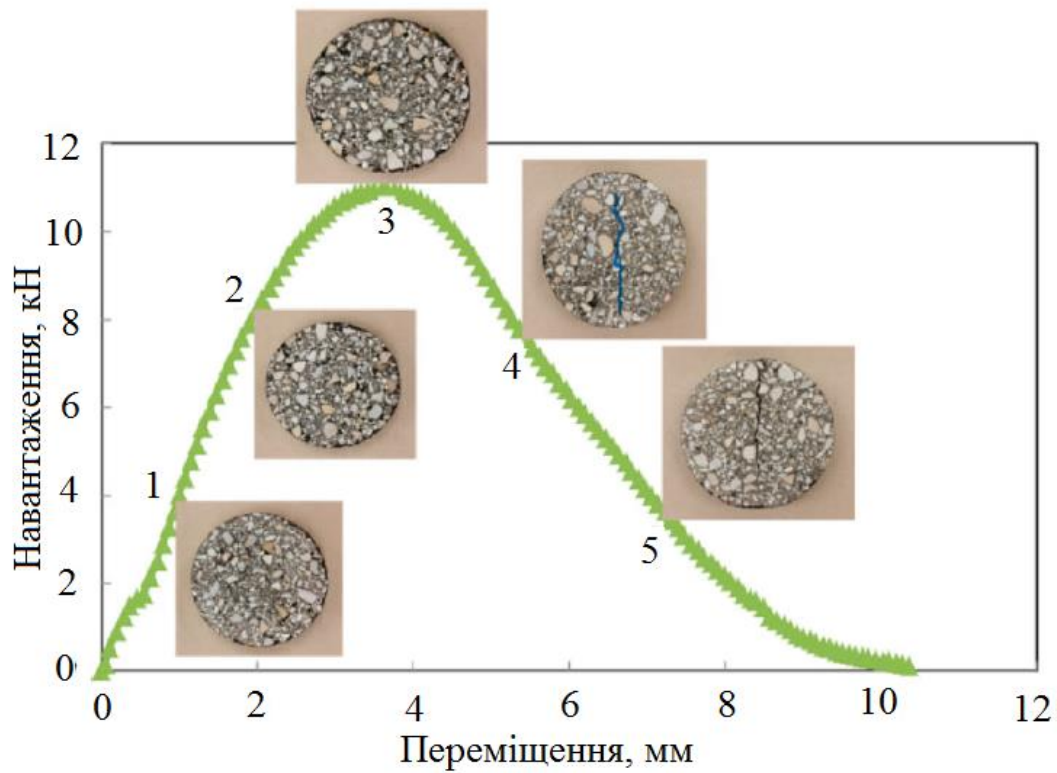


Рисунок 2.56 – Типовий результат випробування асфальтобетону методом IDEAL-СТ, [229]

Розробники методу запропонували й новий показник, що характеризує розтріскування асфальтобетону – індекс випробування на розтріскування (СТ), що визначається за наступною формулою:

$$CT\ Index = \frac{t}{62} \cdot \frac{G_f}{|m_{75}|} \cdot \left( \frac{l_{75}}{D} \right), \quad (2.18)$$

де  $t$  – товщина або висота зразка;

$G_f$  – енергія руйнування,

$m_{75}$  – абсолютне значення нахилу кривої залежності навантаження від переміщення в точці де навантаження в постпіковий період знижується до 75 % пікового навантаження;

$l_{75}$  – переміщення в точці, коли навантаження в постпіковий період знижується до 75 % пікового навантаження;

$D$  – діаметр зразка.

Більш високі значення індексу СТ свідчать про більш високу стійкість асфальтобетону до розтріскування.

Виконані під час розробки методу IDEAL-СТ випробування дозволили розробникам встановити високу чутливість методу до особливостей асфальтобетону (типу бітумного в'язучого, вмісту в'язучого, зміні властивостей асфальтобетону за рахунок старіння в'язучого, пористості та наявності в складі асфальтобетону, що повторно використовується) [229, 230].

На основі експериментальних даних встановлені точності отримуваних результатів – коефіцієнт детермінації не перевищує 25 % (максимальне значення становило 23,5 %). На основі співставлення результатів випробування асфальтобетону методом IDEAL-СТ з результатами розтріскування асфальтобетону на дорозі та на тестовій кільцевій трасі Міністерства транспорту штату Міннесота в США (MnRoad) встановлено високу лінійну кореляцію з тріщиностійкістю асфальтобетонних покриттів та визначено мінімальне значення показника СТ = 80, згідно якого можна розділяти асфальтобетони на ті, що мають гарну тріщиностійкість та погану.

Таким чином, за даними розробників методу IDEAL-СТ [114, 229 – 230] він повністю відповідає усім критеріям, яким повинен задовольняти ідеальний тест на визначення низькотемпературного розтріскування асфальтобетонів. Розробники також вважають, що більш ефективним для проектування асфальтобетонних сумішей та контролю якості асфальтобетонів використовувати спільно методи IDEAL-СТ та DC(T), результати яких добре корелюють між собою.

В роботі [202] наведені основні фактори, які повинні враховуватися під час розробки нових методів визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, а також за якими може здійснюватися оцінка доцільності використання цих методів у випробувальних лабораторіях:

- кореляція з характеристиками, отриманим на дорозі – автори виділяють цей фактор як основний для прийняття рішення, щодо доцільності застосування методу;

- чутливість методу до різноманітних факторів (склад та тип асфальтобетонної суміші; кількість в'язучого та його тип; наявність повторно використовуваного асфальтобетону, тощо), що дозволяє використовувати метод для проектування складу асфальтобетонної суміші та оцінювання експлуатаційних характеристик;

- збіжність та відтворюваність результатів – мінімальні значення цього показника дозволяють мінімізувати кількість зразків, необхідних для проведення випробування та відповідно зменшити час випробування (прийнятним є значення відтворюваності, що не перевищує 25 %);

- загальний час на підготовку зразків та проведення випробування – мінімізація цього показника опосередковано свідчить про складність методу випробування (чим менший час, тим більш простим у користуванні є метод);

- вартість випробувального обладнання – нажаль, через складність випробувального обладнання і підвищення автоматизації реєстрації отримуваних результатів з їх подальшою обробкою, вартість обладнання суттєво зростає;

- можливість використання отримуваних результатів для розрахунку за допомогою прийнятих моделі випробування асфальтобетонних зразків.

У відповідності з проведеними порівняльними дослідженнями існуючих на даний час методів визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів [202], найбільш повно відповідає вищенаведеним параметрам лише метод SCB.

### **2.3 Випробування на основі акустичної емісії**

Широко розповсюджені в даний час методи визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, оснований на положен-

нях механіки суцільних середовищ та механіки руйнування мають суттєві недоліки, основними з яких є необхідність використання спеціалізованого обладнання, що має значну вартість та тривалий час випробування, який разом з часом на підготовку зразка може розтягуватися на декілька діб.

Для запобігання цих недоліків рядом науковців ще в 70-х роках минулого століття було запропоновано використовувати методи акустичної емісії для визначення зародження та поширення тріщин в асфальтобетонних зразках під час їх механічних випробувань, наприклад під час випробування методом IDT або SCB [231 – 233]. Це були не самостійні методи, а доповнення до руйнівних методів випробування асфальтобетонних зразків. Натомість в університеті Іллінойсу в Урбана-Шампейн (США) під час виконання досліджень в рамках Національної програми спільних досліджень автомобільних доріг (NCHRP), було розроблено неруйнівний метод на основі акустичної емісії (АЕ) [232].

Принцип дії цього методу оснований на тому, що під час зниження температури в асфальтобетонному зразку спостерігається зростання внутрішнього напруження, а під час розтріскування спостерігається вивільнення енергії у вигляді перехідних механічних пружних хвиль, які можуть бути зареєстровані за допомогою чутливих акустичних датчиків, що розміщені на поверхні зразка, та які перетворюють механічну енергію в напруження.

Метод випробування на основі акустичної емісії дозволяє виявити, локалізувати, ідентифікувати та надати іншу інформацію, що описує фізичну природу дефектів по мірі їх виникнення в напруженому об'єкті, тобто метод дозволяє отримати інформацію щодо зародження внутрішнього дефекту та його поширенню зі збільшенням навантаження [232].

Процедура розробки методу визначення температури розтріскування асфальтобетонних зразків складалась з трьох етапів. На першому етапі здійснені роботи по визначенню температури розтріскування бітумних зразків (таких, що використовуються для випробування бітумів методом ВВР), розміщених на бітумній підкладці, за допомогою пристрою, схема якого наведена на рис. 2.57.

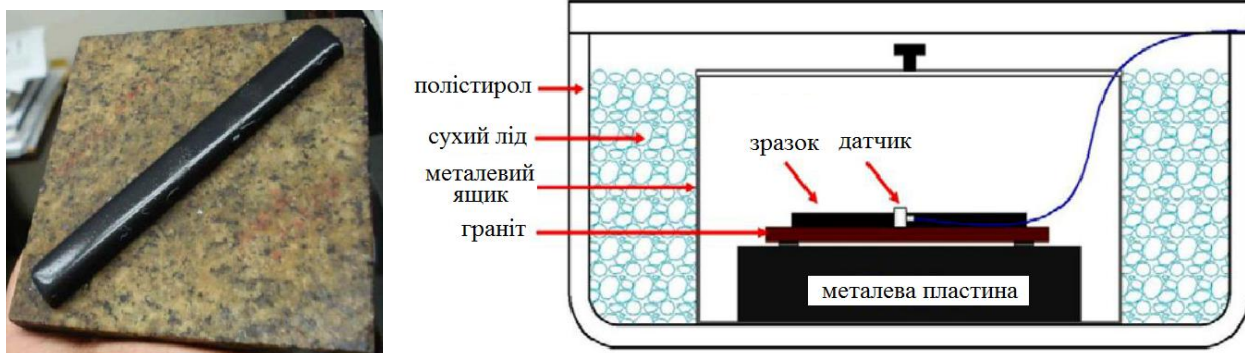


Рисунок 2.57 – Зовнішній вигляд бітумного зразка та схема приладу для визначення температури розтріскування бітуму методом акустичної емісії, [232]

Для опису процесу розтріскування матеріалів авторами роботи [232] запропоновано два терміни:

- температура окрихчування ( $T_{emb}$  - embrittlement temperature) – температура, що відповідає події з першим піковим рівнем енергії (або це температура, що відповідає першій крупній акустичній події) – за даними авторів [232] ця температура є фундаментальним показником, що не залежить від розміру та форми зразка;

- температурою максимального виділення акустичної енергії ( $T_{max}$ ), яка є пов'язаною з масштабними термічно індукованими тріщинами.

На основі отриманих експериментальних даних було встановлено, що значення температури  $T_{emb}$  практично співпадають ( $R^2 = 0,85$ ) зі значеннями критичної температури розтріскування бітумів, визначеною за результатами випробування в'язучих методом ВВР або ДТТ (різниця знаходиться в межах  $\pm 1$  °C) [234].

На другому етапі виконувалось дослідження зі застосуванням методу акустичної емісії неущільненої асфальтобетонної суміші (рис. 2.58). На основі отриманих даних встановлено, що температури розтріскування, визначені на неущільненій асфальтобетонній суміші методом акустичної емісії є нижчими (на 5 – 7 °C), ніж температури розтріскування бітумів, визначених за методом ВВР.

На третьому етапі здійснювалось визначення температури розтріскування зразків ущільненого асфальтобетону, виготовлених в лабораторії шляхом ущільнення за допомогою гіратора, або, виготовлених з кернів, відібраних на дорозі. Для випробування приймалися зразки,

виготовлені шляхом розрізання навпіл зразків діаметром 150 мм та висотою 50 мм [233].



Рисунок 2.58 – Схема визначення температури розтріскування неуці- льненої асфальтобетонної суміші методом акустичної емісії, [232]

Схема випробувального обладнання та асфальтобетонного зразка наведена на рис. 2.59 [232]. На основі отриманих даних встановлено, що швидкість зразка в діапазоні 0,2 ... 1 °С/хв не впливає на отримувані значення температур  $T_{emb}$  та практично не впливає на значення температури  $T_{max}$  (різниця знаходиться в межах 1 °С). При цьому температури окрихчування ущільнених асфальтобетонних зразків є вищими, ніж температури окрихчування неуцільнених сумішей та бітумних в'язучих.

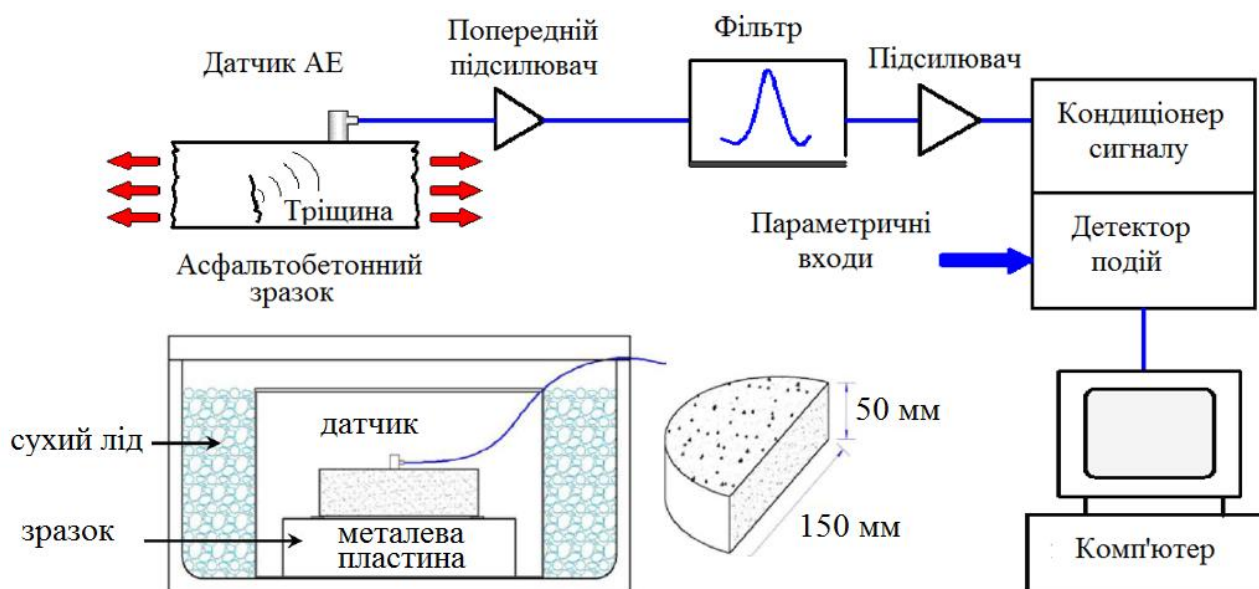


Рисунок 2.59 – Схематичне зображення установки для акустично-емісійних випробувань, [232, 235.]

Із застосуванням методу акустичної емісії були виконані дослідження низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, виготовлених на різних бітумних в'язучих, в результаті яких встановлено, що метод є чутливим до наявності модифікаторів, зокрема полімерів, в складі бітумів, а також до зістарюванням в'язучих [236, 237].

В роботі [238] наведені результати розробки математичної моделі випробування асфальтобетонних зразків методом акустичної емісії, яка дозволяє визначати точні координати тріщини в тілі зразка.

На даний час методи акустичної емісії не набули ще широкого використання, незважаючи на те, що вони мають вагомні переваги [109]: неруйнівний контроль матеріалу; малий час на проведення всього циклу випробування; відносно низька вартість обладнання; вміст повітряних пор не впливає на отримувані результати; висока збіжність та відтворюваність результатів. До недоліків методу може бути віднесена висока чутливість до сторонніх шумів, які можуть призводити до похибок, а також чутливість до зміни властивостей асфальтобетонів за рахунок старіння бітумних в'язучих.

#### **2.4 Вітчизняні методи оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів**

У вітчизняній дорожній галузі не існувало та не існує на даний час жодного вітчизняного стандартного методу визначення низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, який би дозволяв безпосередньо визначати температури розтріскування. Починаючи з прийняття в 1959 р. державного стандарту ГОСТ 9129-59 «Асфальтобетонні суміші (гарячі) дорожні та асфальтобетон. Методи випробувань» оцінювання низькотемпературних властивостей асфальтобетонів здійснюється шляхом порівняння значень міцності асфальтобетонних зразків-циліндрів на стиск (в останні роки змінено на стиск по твірній, тобто непрямий розтяг) за температури 0 °С з нормованими межами, наведеними в діючих нормативних документах. Ці нормовані межі, що були встановлені ще в 50-х роках минулого століття, залишаються й досі практично без змін, не зважаючи на те, що за минулий час кардинально змінилися як параметри дорожнього руху (зросли інтенсивність руху автомобільного транспорту, навантаження на вісь автомобіля та швидкість дорожнього руху), так і матеріали, зокрема бітуми та бітумні в'язучі, що використовуються для приготування асфальтобетонних сумішей (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Порівняння нормованих вимог міцності асфальтобетону на стиск за 0 °С

Нормативний документ		Межа міцності на стиск за 0 °С, МПа	Межа міцності на стиск по твірній за 0 °С (50 мм/хв), МПа
ГОСТ 9129-59	Асфальтобетонні суміші (гарячі) дорожні та асфальтобетон. Методи випробувань	≤ 12,0	-
ГОСТ 9129-67		≤ 12,0	-
ГОСТ 9129-76		≤ 12,0	-
ГОСТ 9129-84		≤ 11,0	-
ГОСТ 9129-97		≤ 11,0	-
ДСТУ Б В.2.7-113:2003	Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови	≤ 10,0 – 13,0*	-
ДСТУ Б.В.2-7-113:2011		≤ 11,0 – 13,0*	-
прДСТУ «Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон. Технічні умови. Частина 1. Гарячі асфальтобетонні суміші»		≤ 12,0 – 14,0*	-
ДСТУ 8959:2019 «Асфальтобетонні суміші та асфальтобетон дорожні на основі бітумів, модифікованих полімерами. Технічні умови»		-	≤ 2,0 – 6,5 *
ДСТУ Б В.2.7-127:2015 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастикові. Технічні умови»		-	≤ 3,0 – 7,5 *

Примітка: \* - нормування в залежності від кліматичного району та марки асфальтобетону.

За час використання показника міцності на стиск асфальтобетону за температури 0 °С вітчизняними науковцями були встановлені певні залежності між цим показником та характеристиками бітумів і асфальтобетонів [239]. Так, наприклад, в Слепая Б.М. (рис. 2.60) наводила дані, які ілюструють наявність лінійної кореляції між міцністю асфальтобетону на стиск за температури 0 °С та умовною температурою склування асфальтобетону, яка визначається як точка перегину залежності модуля пружності асфальтобетону від температури випробування.

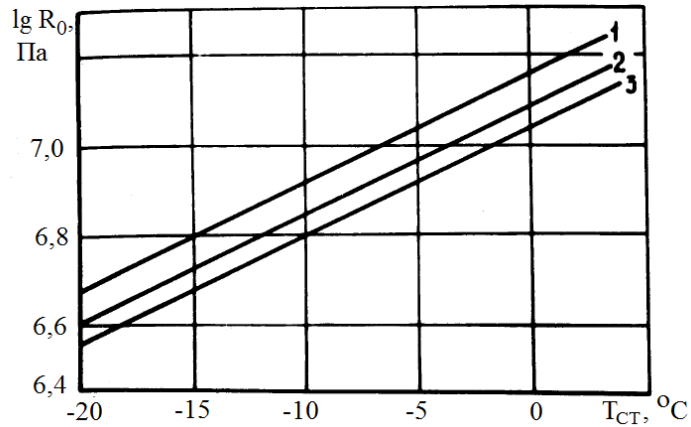


Рисунок 2.60 – Кореляційна залежність між міцністю на стиск асфальтобетонів за температури 0 °С та умовною температурою склування асфальтобетону, у відповідності з даними Сліпої Б.М.

В той же час цей показник заслужено піддавався критиці вітчизняними науковцями, оскільки: міцність на стиск за температури 0 °С відображає лише міцнісні характеристики асфальтобетону, а не деформативні, що є важливим для оцінювання низькотемпературних характеристик; показник характеризує міцність асфальтобетону на стиск, в той час, як руйнування асфальтобетону за низьких температур відбувається під дією розтягуючих напружень, тобто спостерігається невідповідність умов випробування та роботи асфальтобетону в покритті; показник не враховує реологічні властивості бітумного в'язучого та асфальтобетону. Таким чином, показник міцності на стиск за температури 0 °С не може і не повинен використовуватися для оцінювання низькотемпературних характеристик асфальтобетону, оскільки не відображає умови його роботи в покритті та особливості його складу.

Незважаючи на вищенаведене, показник міцності на стиск асфальтобетону за температури 0 °С залишається й досі в номенклатурі показників, що нормуються національними стандартами (табл. 2.7).

Крім міцності на стиск за температури 0 °С в 1959 р. в перелік показників асфальтобетонів, що повинні були характеризувати стійкість асфальтобетону до дії низьких температур було введено показник теплостійкості, який визначався як відношення міцностей на стиск асфальтобетонних зразків, визначених за температур 20 °С та 50 °С ( $R_{20}/R_{50}$ ). Розробниками стандарту ГОСТ 9129-59 передбачалось, що при дотриманні встановлених норм ( $R_{20}/R_{50} \leq 2,5 \dots 4,0$  в залежності від

типу асфальтобетону та кліматичного району його використання), асфальтобетонне покриття буде витримувати низькі температури без руйнування.

Михайлов В.В. [239] отримав експериментальні дані, на основі яких було встановлення існування прямої залежності між інтервалом пластичності бітумного в'язучого та коефіцієнтом теплостійкості асфальтобетону, який визначається як відношення між міцностями на стиск за різних температур ( $R_0/R_{50}$ ,  $R_{20}/R_{50}$ ,  $R_0/R_{20}$ ). Чим більше інтервал пластичності в'язучого, тим менше коефіцієнт теплостійкості асфальтобетону (рис. 2.61), тобто тим більш стійким буде асфальтобетон за підвищених та низьких температур. В.В. Михайлов довів, що чим вище температура розм'якшеності та нижче температура крихкості в'язучого, тим менше асфальтобетон, виготовлений на цьому в'язучому, буде змінювати свої властивості зі зміною температури.

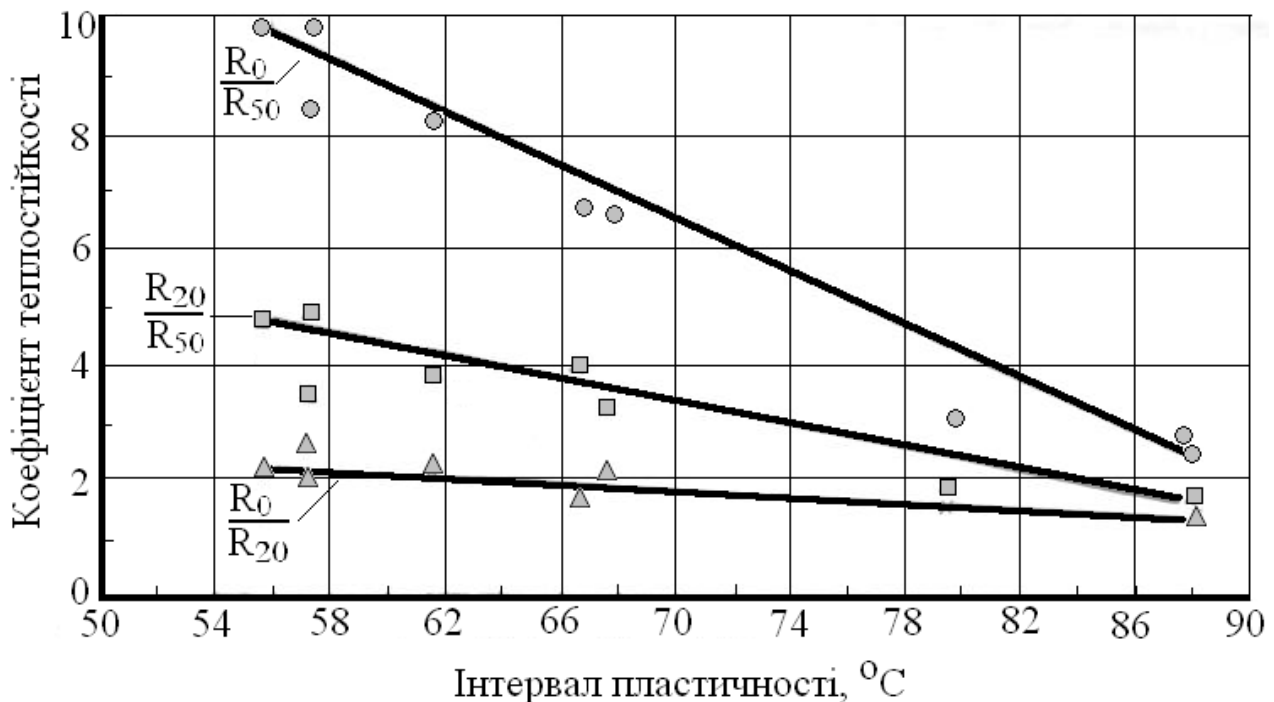


Рисунок 2.61 – Залежність теплостійкості піщаного асфальтобетону від інтервалу пластичності, заданими Михайлова В.В. [239]

Тим не менше коефіцієнт теплостійкості характеризує лише зміну міцності асфальтобетону в діапазоні температур від 20 °C до 50 °C та зовсім не відображає деформаційну стійкість асфальтобетону і не може використовуватися для оцінювання його низькотемператур-

них властивостей. Підтвердженням цього можуть бути дані порівняльної оцінки коефіцієнтів теплостійкості і значень міцності асфальтобетону на стиск за 0 °С зі станом асфальтобетонного покриття, отримані Богуславським А.М. [239], які ілюструють, що за одних і тих же значень цих показників, асфальтобетонне покриття може як експлуатуватися без розтріскування, так і мати значне розтріскування (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Виробнича перевірка показників низькотемпературного розтріскування асфальтобетонів, виконана Богуславським А.М. [239]

Строк служби покриття, років	Стан покриття	Міцність на стиск за			R <sub>20</sub> /R <sub>50</sub>
		+ 50 °С	+ 20 °С	0 °С	
10	без тріщин	10	23	57	2,3
10	тріщини	11	24	59	2,2
13	гарне	5	20	56	4,0
13	тріщини	10	42	75	4,2
19	гарне	25	57	88	2,2
19	тріщини	28	60	95	2,2

Ще одним стандартним показником, що було запроваджено останнім часом в номенклатуру показників якості асфальтобетону та за яким пропонується оцінювати низькотемпературну характеристику є міцність на непрямий розтяг (стиск по твірній) за температури 0 °С.

У вітчизняній дорожній практиці визначення міцності на розтяг до нормування цього показника здійснювалось головним чином в дослідницьких цілях. Так, наприклад, Гордеев С.О. [239] пропонував оцінювати низькотемпературну тріщиностійкість асфальтобетонів за значеннями показника міцності на розтяг, визначену за температур 0 °С та мінус 15 °С, а також за значенням прогину зразка-балки, що навантажувалася зі швидкістю 3 мм/хв.

Гезенцевей Л.Б. наводив дані щодо визначення міцності на розтяг за температури 0 °С та відносного подовження за цієї температури асфальтобетонних зразків (піщаний асфальтобетон однакової гранулометрії) у формі вісімок (зразки були ущільнені в спеціальній формі, що має форму вісімки під тиском 30 МПа, випробування здійснювалось на універсальному гідравлічному пресі при швидкості ходу пор-

шня 0,5 мм/хв) [239]. Отримані дані (рис. 2.62) характеризуються високою кореляцією з пенетрацією бітумів, що входили до складу асфальтобетону.

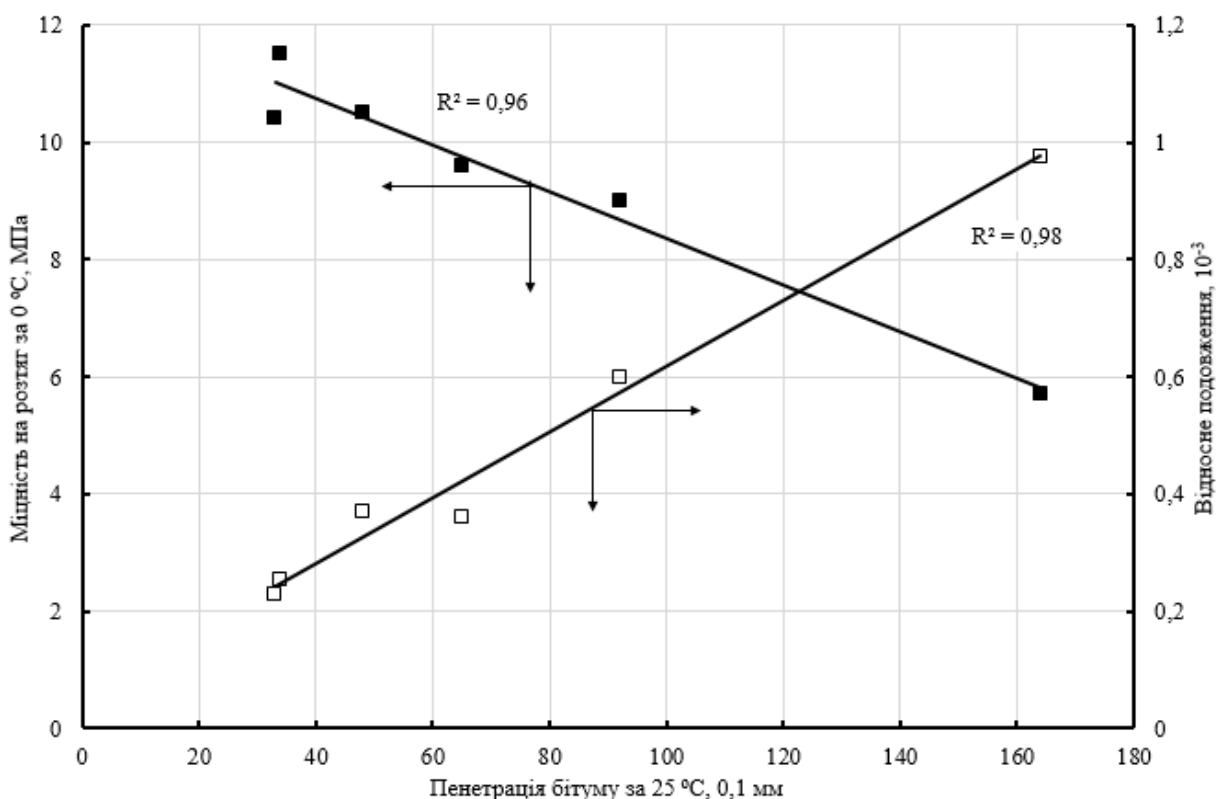


Рисунок 2.62 – Залежність міцності на розтяг за 0 °С та відносного подовження асфальтобетонних зразків від пенетрації бітуму, за даними Гезенцевя Л.Б. [239]

Також в Гезенцевей Л.Б. та Горелишев М.В. [239] на основі експериментальних даних підтверджували взаємозв'язок між деформативністю асфальтобетону (відносним подовженням асфальтобетону, що визначалась шляхом випробування на розтяг на гідравлічному пресі зі швидкістю 0,5 мм/хв) за температури 0 °С та в'язкістю і розтяжністю бітуму за температури 0 °С.

Ю.Е. Нікольским запропоновано показник умовної температури крихкості асфальтобетону, який відповідає температурі максимального значення міцності на розтяг, що визначається графічно за температурною залежністю міцності (рис. 2.63). Недоліком цього методу є необхідність здійснювати декілька випробувань на міцність асфальтобетону за різних температур, що суттєво збільшує обсяг випробувань та час їх проведення.

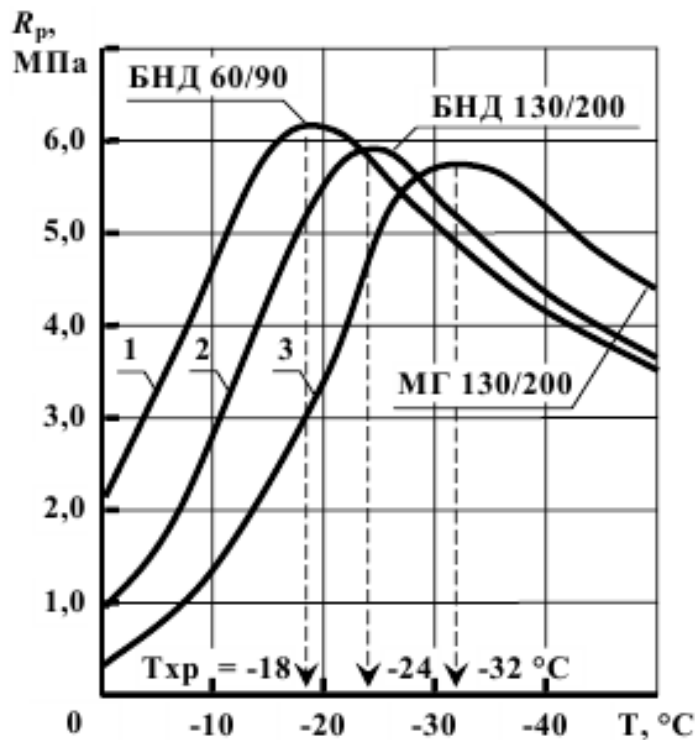


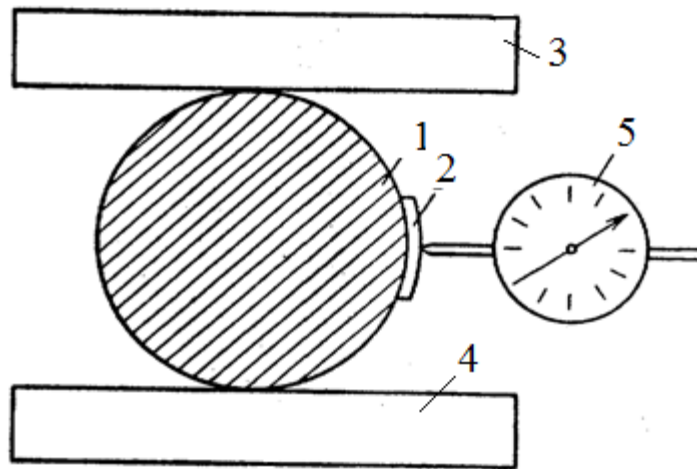
Рисунок 2.63 – Визначення умовної температури крихкості асфальтобетону, за даними Нікольського Ю.Е. та Золотарьова В.О.

Починаючи з 50-х років минулого століття у вітчизняній дорожній галузі було запропоновано певну кількість різних методів, що дозволяли певною мірою характеризувати низькотемпературні властивості асфальтобетонів, але широкого розповсюдження у виробничих лабораторіях ці методи не отримали, оскільки призначались головним чином для дослідницьких цілей.

У 80-х роках минулого століття Губач Л.С. та Пономарьова С.Г. запатентували прилад та метод визначення температури крихкості асфальтобетонів (рис. 2.64) [239]. Для визначення крихкості асфальтобетону запропоновано використовувати стандартні асфальтобетонні зразки-циліндри, які після термостатування за температури випробування розміщують між плитами випробувального пресу та випробують на непрямий розтяг (стиск по твірній) з постійною швидкістю 3 мм/хв. Під час прикладання навантаження на зразок за допомогою силівимірника преса реєструють швидкість зростання напруження у поздовжньому діаметральному перерізі зразка ( $\sigma$ ), а за допомогою вимірника деформації реєструють швидкість зростання деформації ( $\epsilon$ ).

Тріщиностійкість асфальтобетону автори методу пропонували оцінювати за показником нерелаксаційного модуля деформації за формулою:

$$R = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (2.19)$$



1 – циліндричний зразок, 2 – підкладка з щільного паперу,  
3 – 4 – опорні плити пресу, 5 – вимірювач деформації

Рисунок 2.64 – Схема приладу для визначення крихкості асфальтобетону за методом, який запропонував Губач Л.С., [239]

На основі результатів випробувань, виконаних за різних температур, будують залежність «напруження – час» (рис 2.65), а за температуру крихкості приймають температуру, за якої криволінійна залежність перетворюється на прямолінійну.

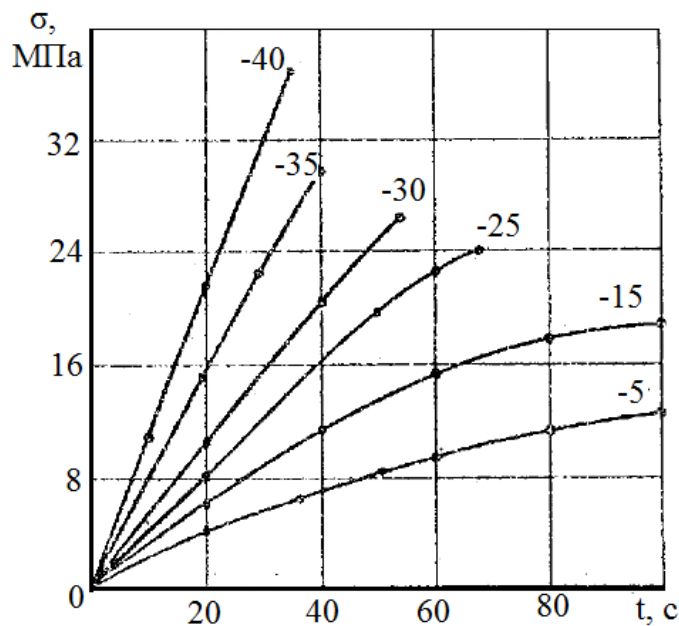
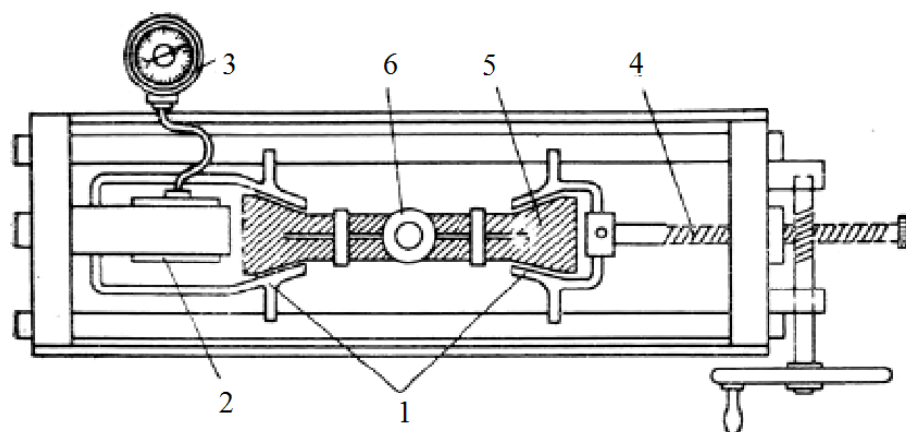


Рисунок 2.65 – Залежність напруження від часу, за методом, що запропонував Губач Л.С. [239]

Для випробування асфальтобетонних зразків на розтяг в широкому температурному діапазоні було розроблено ряд приладів, конструкція одного з яких наведена на рис. 2.65. На приладах було можливим виконувати випробування за різною швидкістю деформування та на основі отримуваних результатів оцінювати деформативні властивості асфальтобетону (швидкість пластичної деформації, відносне подовження при розтягу, релаксація напружень).



1 – захвати, 2 – динамометр, 3 – манометр, 4 – гвинт із черв'ячною шестернею, 5 – зразок, 6 – індикатор

Рисунок 2.65 – Зовнішній вигляд приладу, що запропонував Волков М.І. для випробування асфальтобетонних зразків на розтяг

На початку 50-х років минулого століття в МАДІ (Горелишев М.В. та Пантелеев Ф.М.) було розроблено прилад для визначення повзучості асфальтобетонних зразків в широкому температурному діапазоні (від + 50 °С до мінус 20 °С) [239]. Основним принципом приладу було розтягування зразка за допомогою навантаження вантажного маятника (рис. 2.66). Асфальтобетонний зразок, форма якого наведена на рис. 2.66, мав подовжену шийку розміром 3,5 × 3,5 × 7,0 см та поширення на кінцях форми для розміщення в захватах пристрою.

Згідно даних Горелишева М.В. та Пантелеева Ф.М. [239] розтягувальний пристрій можливо було використовувати для встановлення коефіцієнту Пуассону асфальтобетону та ряду залежностей: подовження, як функції навантаження під час розтягу з примусовим навантаженням та деформуванням; подовження як функція часу (повзучість); напруження, як функція часи при релаксації зразка.

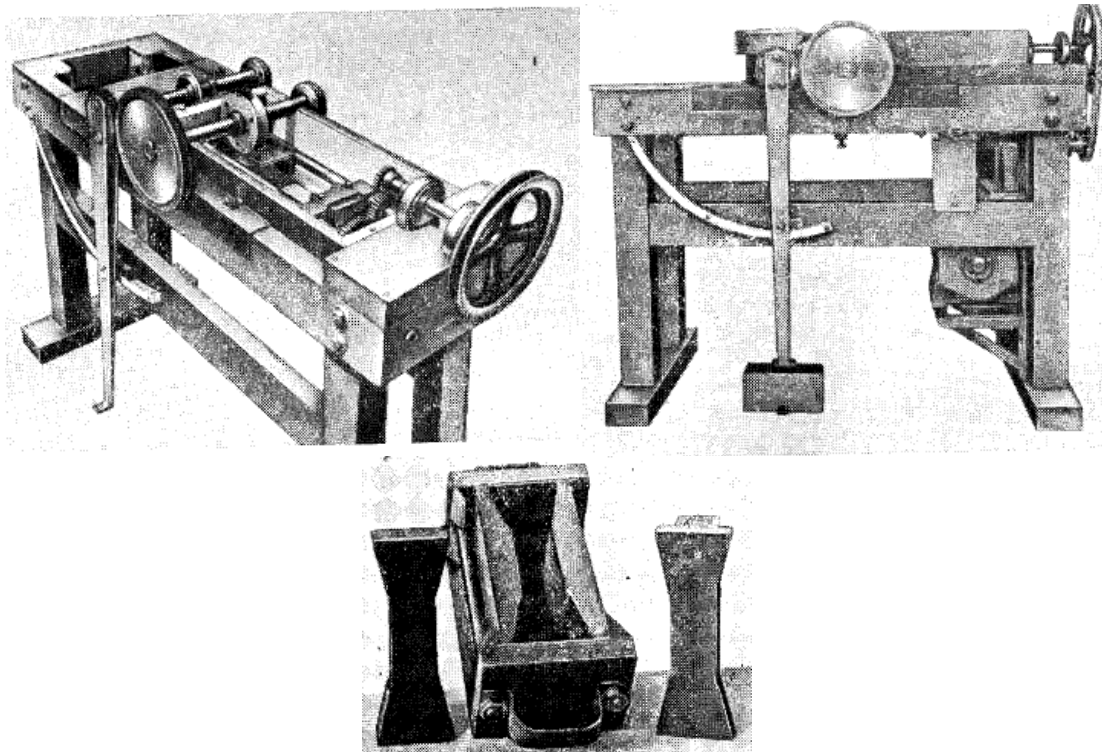


Рисунок 2.66 – Зовнішній вигляд розтягувального пристрою для визначення повзучості асфальтобетону та асфальтобетонного зразка, що розробили Горелишев М.В. та Пантелеев Ф.М. [239]

Розробники приладу запропонували методику визначення параметрів морозостійкості асфальтобетону, у відповідності з якою під час випробування на розтяг визначалась залежність подовження зразка та його міцність від температури випробування та в'язкості бітуму. На основі експериментальних даних та спостереження за виробничими ділянками асфальтобетонного покриття встановлено, що критерієм морозостійкості асфальтобетону може бути значення деформативності в  $2,5 \times 10^{-3}$  за температури випробування мінус  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Автори приладу та методу [239] пропонували стандартизувати для початку випробування на розтяг асфальтобетонних зразків з визначенням їх деформативної здатності та провести масштабну перевірку у виробничих лабораторіях розробленого методу та приладу, з подальшим встановленням параметрів морозостійкості асфальтобетонів на основі результатів визначення повзучості асфальтобетону.

Наприкінці 50-х років минулого століття на кафедрі дорожньо-будівельних матеріалів Харківського автомобільно-дорожнього інституту було сконструйовано установку для визначення температурних деформацій асфальтобетону при різній швидкості охолодження (для

визначення коефіцієнту температурної деформації). Для випробування використовувалися асфальтобетонні зразки у вигляді подовженої вісімки довжиною 25 см з наклеєними тензодатчиками. За рахунок запропонованої конструкції приладу вдалось забезпечити охолодження асфальтобетонних зразків зі швидкістю від 0,5 °С/год до 4 °С/год з похибкою  $\pm 0,2$  °С/год. Конструкція приладу дозволяла випробувати як не зафіксовані, так і зафіксовані асфальтобетонні зразки. На основі експериментально отриманих даних автори встановили залежність між зростанням температурної деформації асфальтобетону та швидкістю його охолодження, а також встановили значення рівновісної швидкості охолодження, за якої температурна деформація на викликає критичних напружень в асфальтобетоні та, відповідно, його руйнування.

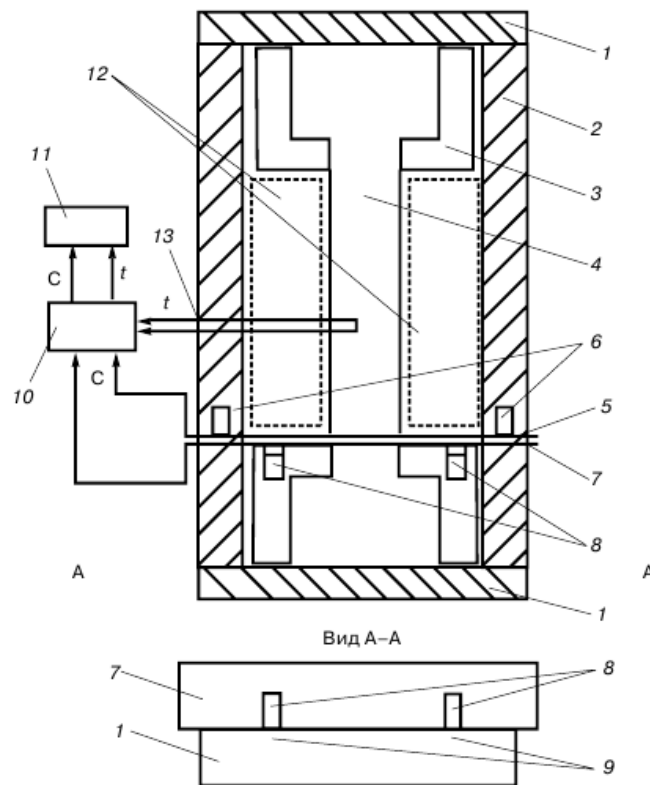
Проф. М.М. Івановим було запропоновано в якості критерія тріщиностійкості асфальтобетону використовувати значення відносного подовження – якщо при швидкості деформування зразка на розтяг  $5 \times 10^{-6}$  мм/хв за температури 0 °С відносне подовження більше 0,004 – 0,008, а за температури мінус 20 °С більше 0,001 – 0,002 асфальтобетон можна вважати стійким до низькотемпературного розтріскування.

В 80-х років минулого століття в БашНІІП Печеним Б.Г. та Курбатовим В.Л. було розроблено прилад УОНДА-1420 (рис. 2.67) [239], за допомогою якого було можливо випробувати асфальтобетонні зразки наступними схемами: визначати температурні напруження та температуру розтріскування асфальтобетону під час охолодження зацмеленого по кінцях зразка; визначати міцність на розтяг та деформацію при механічному одновісному розтягуванні.

За допомогою даної установки є можливим визначати ряд важливих характеристик асфальтобетону (температурні напруження, деформації зразка, температуру розтріскування). Однак, навіть самі розробники визнавали, що установка є складною як за конструкцією, так і в експлуатації (потребує значної кількості рідкого азоту, що використовується для охолодження зразків), та допускає певні похибки під час випробування зразків, за рахунок не повного відображення напруженого стану зразків [239]. Виходячи з цього розробниками було сконструйовано більш простий прилад, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 2.68.



1 – поперечні пластини, 2 – бокові пластини, 3 – захвати,  
 4 – асфальтобетонний зразок, 5 – тензодатчик, 6 – термопара,  
 7 – вимірювач температури, 8 – тензоіндикатор  
 Рисунок 2.67 – Зовнішній вигляд приладу УОНДА-1420, [239]



1 – поперечні пластини, 2 – бокові пластини, 3 – захвати, 4, 5, 7 –  
 пластини конденсатору, 6, 8 – кріплення конденсатору, 9 – болти,  
 10 – аналого-цифровий перетворювач, 11 – вузол візуалізації та збері-  
 гання даних, 12 – бокові прокладки, 13 – термопара

Рисунок 2.68 – Зовнішній вигляд приладу Печеного Б.Г. та  
 Курбатова В.Л. для визначення тріщиностійкості асфальтобетону

Прилад складається з форми для зразка, в якій й здійснюється його формування, автоматичної системи реєстрації напружень з використанням тензодатчиків та термопар. Випробування здійснюється шляхом охолодження з певною швидкістю установки з асфальтобетонним зразком, які розташовуються в камері низькотемпературного холодильника. Під час охолодження здійснюється фіксування внутрішніх напружень зразка за допомогою тензодатчиків, наклеєних на бокові пластини приладу. За отриманими результатами можливо побудувати залежність напруження від часу випробування, за яким встановлюється температура розтріскування.

Головною перевагою цього приладу є те, що асфальтобетонний зразок виготовляється безпосередньо в приладі, що запобігає зміні напруженого стану зразка.

Незважаючи на певні недоліки приладу УОНДА-1420, він використовується в дослідницьких цілях й в даний час. Наприклад, Галдіною В.Д. [239] наведені результати експериментальних досліджень, на основі яких встановлено існування функціональних залежностей між властивостями бітумів (температурою розм'якшеності ( $T_p^b$ ), температурою крихкості за Фраасом ( $T_{кр}^b$ ), індексу пенетрації (ІП)) та температурою розтріскування асфальтобетонів ( $T_{розт}^{ab}$ ), визначених на приладі УОНДА-1420. Наприклад, для бітумів, виготовлених із західноказахстанської нафти, ці залежності мають вигляд:

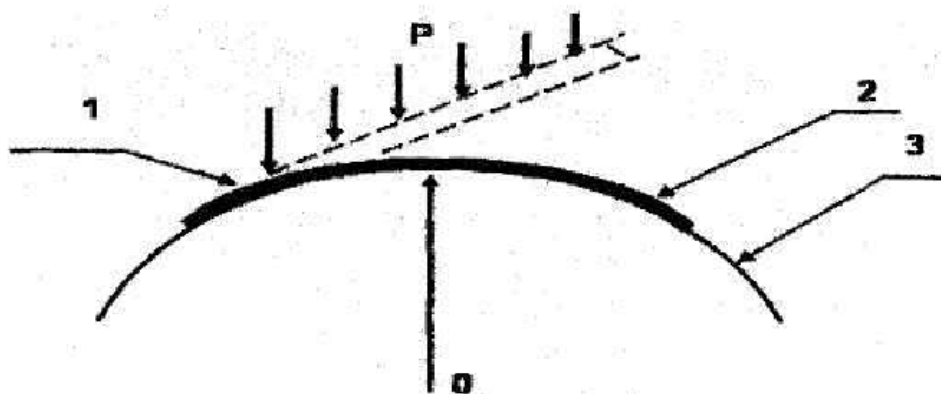
$$T_{розт}^{ab} = 1,129 \cdot T_p^b + 16,242, \quad (2.20)$$

$$T_{розт}^{ab} = 0,9076 \cdot T_{кр}^b + 11,25, \quad (2.21)$$

$$T_{розт}^{ab} = -5,625 \cdot ІП - 31,031, \quad (2.22)$$

В 2000-х роках Л.М. Гохманом було запропоновано метод визначення температури крихкості асфальтобетонів та полімерасфальтобетонів [239]. Оскільки основною складовою асфальтобетону, що визначає його тріщиностійкість, є бітум, а найбільша питома поверхня у мінерального порошку, автором запропоновано виконувати випробування на зразках з асфальтов'язучої речовини, виготовленої з бітуму та фракції 0,63 ... 1,25 мм мінерального порошку. Випробування здій-

снювалось на зразках, виготовлених в стандартній циліндричній формі діаметром 71,4 мм. З ущільненого стандартним навантаженням асфальтобетонного диску діаметром 71,4 мм та висотою 4 мм, відокремлювали бокові грані таким чином, щоб отримати зразок прямокутної форми розміром  $50 \times 50 \times 4$  мм, який додатково розділяється на 2 частини розміром  $50 \times 25 \times 4$  мм. Випробування здійснюють на шістьох зразках, які розміщують в морозильній камері на 30 хв за температури випробування. Випробування розпочинають з температури  $0^\circ\text{C}$ . Після термостатування за температури випробування зразок згинають на спеціальному шаблоні впродовж 2 с, форма якого наведена на рис. 2.69. Шаблон сконструйовано таким чином, що прогин зразка становить 0,62 мм, що відповідає прогину під колесом автомобіля дорожнього одягу з еквівалентним модулем деформації в 230 МПа.



1 – відмітка на шаблоні для розташування зразка, 2 – зразок, 3 – металевий шаблон, P – навантаження на зразок, O – центр шаблону з внутрішнім радіусом 50 см

Рисунок 2.69 – Шаблон для згинання зразків для випробування методом, що запропонував Л.М.Гохман [239]

При відсутності тріщини на плитці, її випрямляють та знову розміщують в морозильній камері для подальшого випробування. Після кожного випробування температуру знижують на  $5^\circ\text{C}$  та повторюють випробування до тих пір, доки хоча би на одній з плиток з'явиться тріщина. Температура, за якої зразок-плитка розтріскується приймається за температуру крихкості ( $T_{кр}$  – температуру, за якої на покритті може з'явитися тріщина), а вища на  $5^\circ\text{C}$  температура вважається температурою тріщиностійкості ( $T_{тр}$ ). На основі експериментальних даних Гохманом Л.М. було встановлено наявність лінійної залежності:

- між температурою тріщиностійкості асфальтобетону ( $T_{TP}$ ) та температурою крихкості бітумного в'язучого, визначену методом Фраасу ( $T_{кр}^{\phi}$ ), з коефіцієнтом парної кореляції в 0,91:

$$T_{TP} = 0,986 \cdot T_{кр}^{\phi} + 0,3552, \quad (2.23)$$

- між температурою крихкості асфальтобетонних зразків з асфальтов'язучого ( $T_{KP}$ ) та температурою крихкості бітумного в'язучого, визначену методом Фраасу ( $T_{кр}^{\phi}$ ), з коефіцієнтом парної кореляції в 0,99:

$$T_{KP} = 1,1224 \cdot T_{кр}^{\phi} + 0,8584. \quad (2.24)$$

Гохманом Л.М. встановлено критерій тріщиностійкості асфальтобетону, згідно з яким, експериментально визначена температура тріщиностійкості асфальтобетону, не повинна бути вищою температури повітря найбільш холодної доби району експлуатації дорожнього покриття.

Після перевірки запропонованої методики на різних бітумних в'язучих Гохманом Л.М, та Давидовою А.Р. було розроблено «Метод визначення тріщиностійкості полімерасфальтобетонів за від'ємних температур», який було введено в дію в 2007 р.

Значним недоліком методу є візуальність визначення тріщин на поверхні зразків та проведення випробувань за різних температур на одних і тих же зразків, що може приводити до накопичення втомних ефектів, що буде позначатися на точності отримуваних результатів.

Вищеописані прилади та методи свідчать про те, що вітчизняні науковці вже впродовж тривалого часу займаються дослідженням низькотемпературних властивостей асфальтобетонів, але на відміну від досвіду країн Західної Європи та США, вітчизняні методи не мають широкого використання у випробувальних лабораторіях та використовуються виключно для наукових цілей.

### 3 РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ БІТУМНИХ В'ЯЖУЧИХ

В деяких випадках (наприклад, для експрес-оцінювання якості бітумних в'язучих або у випадку неможливості проведення всього комплексу випробувань) для встановлення низькотемпературних властивостей в'язучих можуть бути використані розрахункові методи. Особливо це було актуально для вітчизняної дорожньої галузі, оскільки давало можливість робітникам лабораторій оцінювати низькотемпературні властивості бітумів за рахунок використання лише поширеного лабораторного обладнання (пенетрометр, прилад для визначення температури розм'якшеності за методом Кільця та Кулі) у випадку відсутності приладів Фраасу.

В переважній більшості розрахункових методів визначення температури крихкості здійснюється за рахунок використання співвідношень між експериментально отриманих значень penetрації бітумів та температурою крихкості. Джерело встановлення таких співвідношень відноситься до першої половини минулого століття.

В 1933 р. американські науковці Saal R.N.J. та Koens J. [240] на основі експериментальних досліджень двох нафтових бітумів встановили залежність між penetрацією ( $\Pi$ ) та в'язкістю ( $\eta$ ):

$$\eta = \frac{5,13 \cdot 10^9}{\Pi^{1,93}} \quad (3.1)$$

В 50-х роках минулого століття в результаті робіт з дослідження температур крихкості бітумів та дьогтю канадські дослідники Rigden P.J. і Lee A.R. [241] визначили, що температура крихкості за Фраасом є еквів'язкою температурою, а в'язкість за цієї температури дорівнює  $4 \times 10^9$  пуаз. Використовуючи ці дані, а також формулу Саала (форм. 3.1), була визначена penetрація за температури крихкості:

$$\Pi = \frac{1}{1,93} \sqrt[1,93]{\frac{5,13 \cdot 10^9}{4 \cdot 10^9}} = 1,14 \times 0,1 \text{ мм} \quad (3.2)$$

В подальшому це значення було округлено до  $1,25 \times 0,1$  мм (в країнах Європи) [242] або  $1,2 \times 0,1$  мм (в США, Китаї).

На початку 70-х років минулого століття W. Heuckelom [243] розробив номограму BTDC (Bitumen Test Data Chart) (рис. 3.1), яка зв'язала стандартні показники якості бітумів (пенетрацію за температури 25 °С, температуру крихкості за Фраасом, температуру розм'якшеності за методом Кільці і Кулі та значення динамічної в'язкості за температур 60 °С і 135 °С) та стало основою для розподілення бітумів на три типи (S – дистиляційні бітуми різного походження з обмеженим вмістом парафінів, B – окислені бітуми та W – бітуми, що в своєму складі мають значну кількість парафінів).

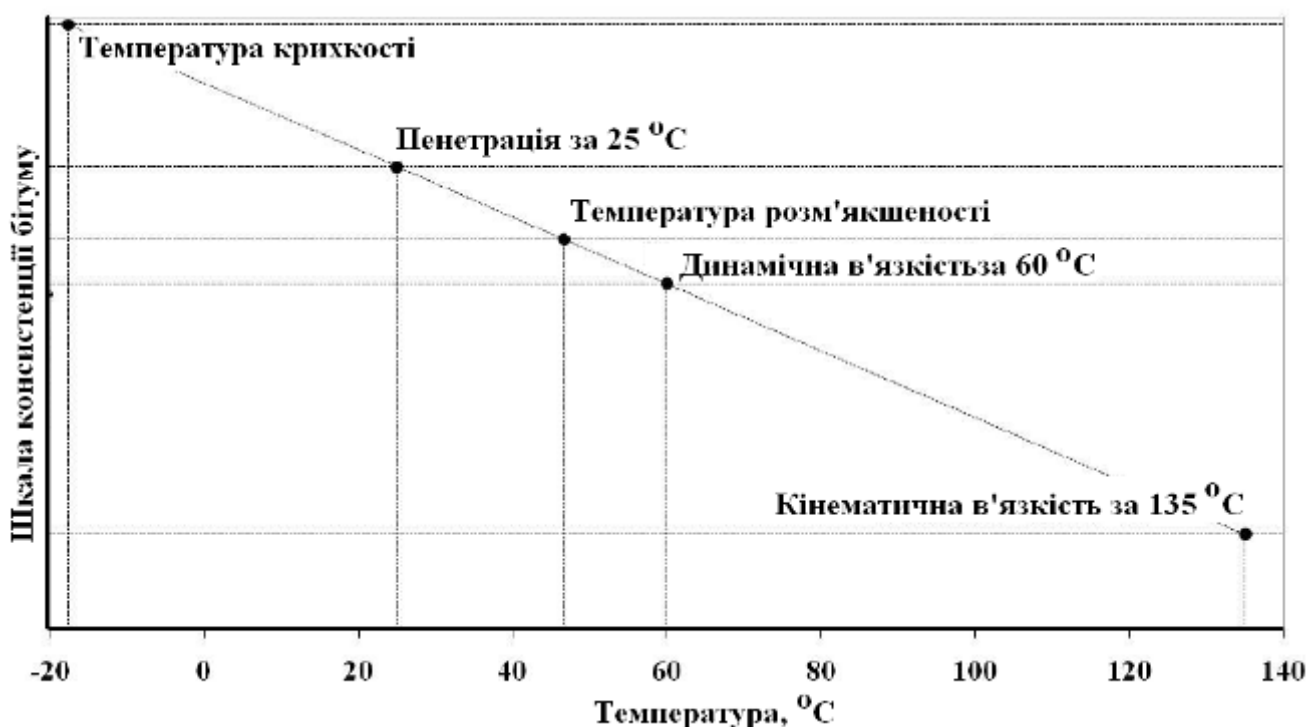


Рисунок 3.1 – Номограма W. Heuckelom, за [244]

В основу номограми BTDC було покладено залежність прийнятих стандартних показників якості бітумів від температури, зокрема використано розраховані за формулою Сааля (форм. 3.1) значення пенетрації за температурою розм'якшеності ( $800 \times 0,1$  мм) та температурою крихкості ( $1,25 \times 0,1$  мм).

За допомогою номограми BTDC є можливість за визначеними експериментально певними стандартними показниками якості бітумів (наприклад, пенетрацією за 25 °С та температурою розм'якшеності, за якою пенетрація дистиляційних бітумів в більшості випадків є близькою до  $800 \times 0,1$  мм) визначати інші стандартні показники (напри-

клад, температуру крихкості або динамічну в'язкість за 60 °С) та призначати технологічні температури нагріву бітумів для приготування асфальтобетонних сумішей та їх ущільнення.

Під час розробки номограми, W. Neuckelom [243] звертав увагу на те, що для бітумів класу В, тобто окислених бітумів, значення температури крихкості за Фраасом не відповідає penetрації 1,25 мм (рис. 3.2). В подальшому було встановлено, що номограма VTDC не може в повній мірі використовуватися для оцінювання модифікованих полімерами бітумів, особливо у випадку значної кількості полімеру, оскільки для цих в'язучих не дотримуються залежності між в'язкістю, penetрацією та температурою розм'якшеності (рис. 3.3) [245].

Згідно літературних даних, наприклад [246], відповідність температур крихкості за Фраасом та температури за якої penetрація дорівнює  $1,2 \times 0,1$  мм ( $T_{1,2}$ ) не підтверджується навіть для дистиляційних бітумів. Так згідно даних, наведених в табл. 3.1, різниця між цими температурами в середньому складає 2,5 °С, але для деяких бітумів сягає 6 – 7 °С, що навіть більше ніж нормовані значення збіжності та відтворюваності для температури крихкості за Фраасом.

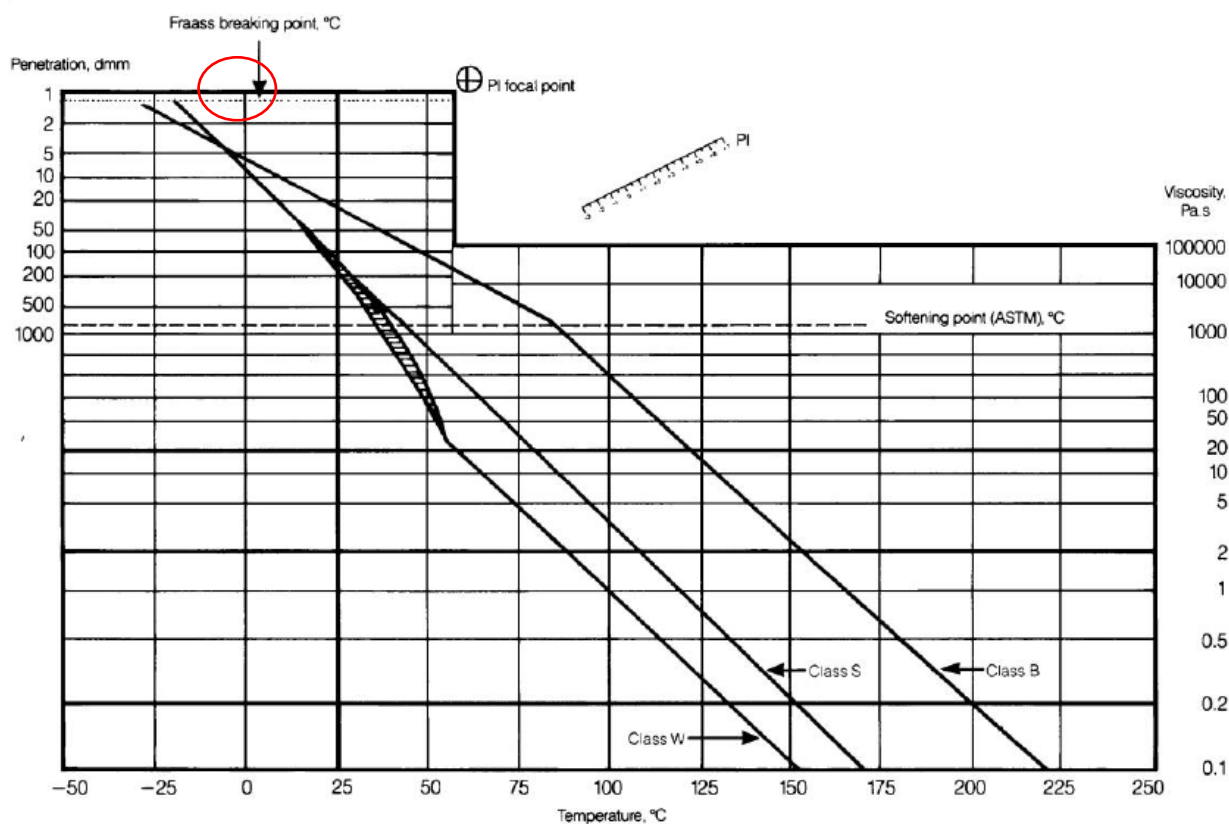


Рисунок 3.2 – Класифікація бітумів за номограмою VTDC, [243]

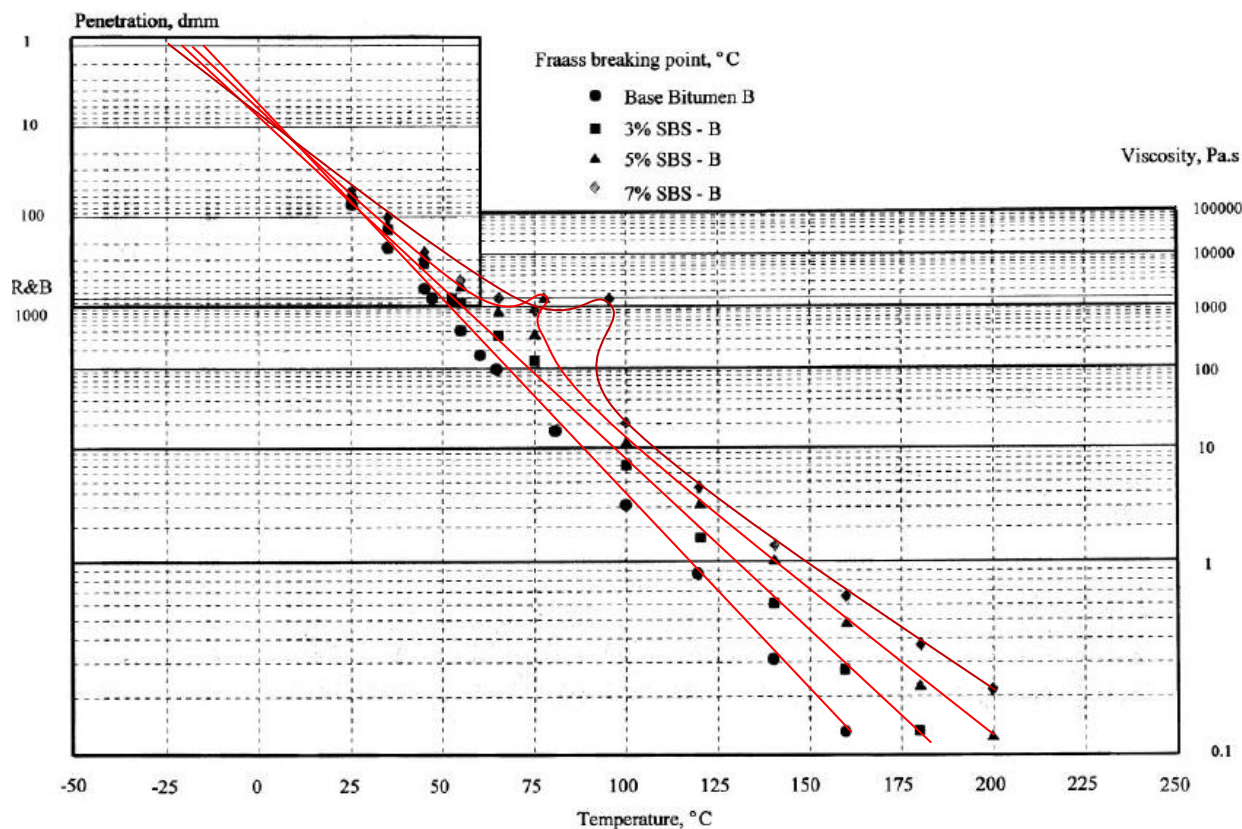


Рисунок 3.3 – Оцінювання властивостей бітумів, модифікованих різною кількістю полімеру, за номограмою VTDC [245]

Таблиця 3.1 – Значення температур крижкості та  $T_{1,2}$ , згідно [246]

Бітум	Виробник	Температури, °C		
		крижкості за Фраасом, $T_{кр}$	температури $T_{1,2}$	$\Delta T = T_{кр} - T_{1,2}$
AC-5	Venezuela	-15,4	-16,7	1,3
AC-20		-14,0	-9,9	-4,1
AC-5	USA	-17,7	-11,1	-6,6
AC-20		-5,7	-6,1	0,3
85/100		-10,7	-9,2	-1,5
AR-4000		-4,5	-4,3	-0,2
AC-20		-15,2	-8,6	-6,7
AR-4000	Canada	-13,4	-20,9	7,5
200/300		-21,0	-21,4	0,4
150/200		-17,9	-13,7	-4,2
AC-8		-12,2	-6,1	-6,2
AC-8		-16,0	-19,2	3,2

Показник  $T_{1,2}$  широко використовується в Китайській народній республіці для оцінювання низькотемпературних властивостей бітумів, зокрема, модифікованих різноманітними добавками бітумних в'язучих, а також для визначення їх діапазону пластичності [247 – 250]. Метод визначення температури  $T_{1,2}$  є стандартизованим та наводиться в JTG E20–2011 (Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixture for Highway Engineering – Стандарти методи випробування бітуму та бітумних сумішей для дорожнього будівництва) – метод Т 0604. У відповідності з цим методом є можливим визначити еквівалентну температуру розм'якшеності ( $T_{800}$  – температуру, за якої penetрація дорівнює  $800 \times 0,1$  мм), що використовується для оцінювання високотемпературної стійкості бітуму та еквівалентну температуру крихкості ( $T_{1,2}$  – температуру, за якої penetрація дорівнює  $1,2 \times 0,1$  мм), що застосовується для оцінювання низькотемпературної тріщиностійкості в'язучих. Визначення цих температур здійснюється шляхом визначення penetрації бітумного в'язучого стандартним методом (навантаження 100 г, час занурення голки – 5 с) за трьох температур: 15 °С, 25 °С та 30 °С (або 5 °С). За необхідності може бути визначена penetрація за інших температур, які на 10 °С або 20 °С відрізняються від вказаних.

На основі отриманих значень penetрації розраховується індекс температурної чутливості (термостабільності) бітуму. Для цього необхідно побудувати залежність логарифма penetрації від температури та визначити лінійну регресію для отриманої залежності у вигляді:

$$\lg P = K + A_{\lg Pen} \cdot T, \quad (3.3)$$

де  $T$  – температура випробування,  
 $K$  – постійний коефіцієнт регресії,  
 $A_{\lg Pen}$  – температурний індекс penetрації.

Для розрахунку достовірних значень температур  $T_{800}$  та  $T_{1,2}$  коефіцієнт кореляції побудованої залежності повинен бути не нижче 0,997. В іншому випадку випробування вважається недійсним.

Індекс температурної чутливості бітумів розраховується за формулою:

$$PI = \frac{20 - 500 \cdot A_{lg Pen}}{1 + 50 \cdot A_{lg Pen}} \quad (3.4)$$

Еквівалентна температура розм'якшеності визначається за формулою:

$$T_{800} = \frac{\lg 800 - K}{A_{lg Pen}} = \frac{2,9031 - K}{A_{lg Pen}} \quad (3.5)$$

Еквівалентна температура крихкості визначається за формулою:

$$T_{1,2} = \frac{\lg 1,2 - K}{A_{lg Pen}} = \frac{0,0792 - K}{A_{lg Pen}} \quad (3.6)$$

Діапазон температур пластичності визначається за формулою:

$$\Delta T = T_{800} - T_{1,2} = \frac{2,8239}{A_{lg Pen}} \quad (3.7)$$

В графічному вигляді визначення вищенаведених параметрів здійснюється згідно рис. 3.4.

В [251] згідно експериментальних даних встановлено існування кореляційної залежності з коефіцієнтом детермінації від 0,76 до 0,93 між температурою  $T_{1,2}$  та жорсткістю і  $m$ -показником, визначеним за методом ВВР у вигляді рівнянь:

$$S = a \cdot T_{1,2} + \beta \quad (3.8)$$

$$m = a' \cdot T_{1,2} + \beta' \quad (3.9)$$

де,  $a$ ,  $a'$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$  – коефіцієнти, що залежать від в'язучого та температури випробування.

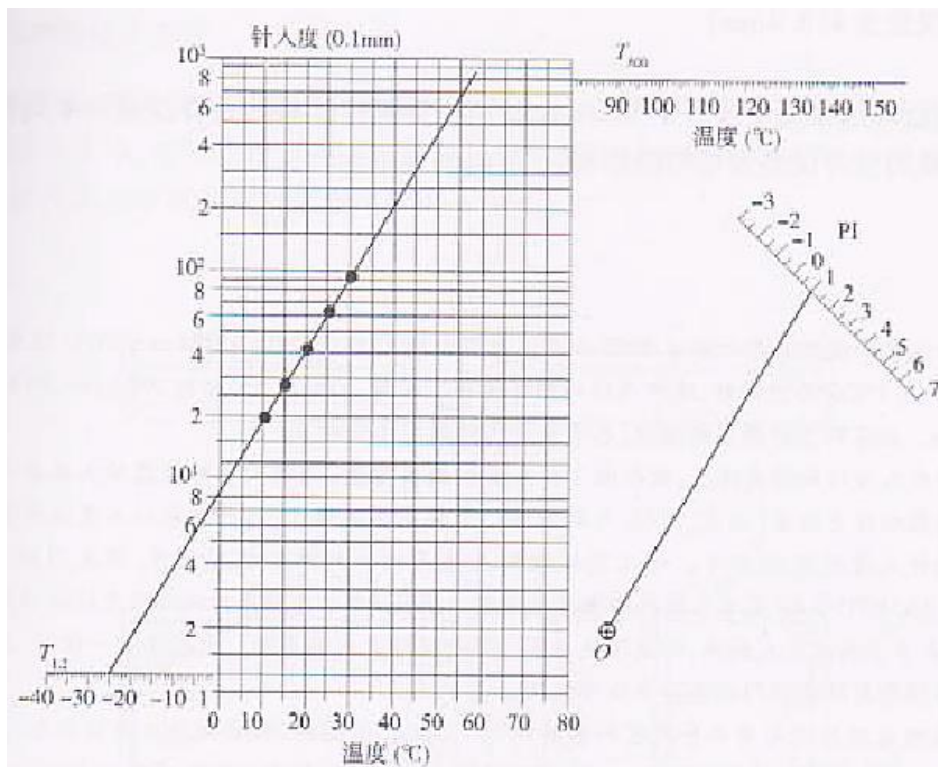


Рисунок 3.4 – Визначення параметрів температурної чутливості бітумів, згідно JTG E20–2011

Перевірка можливості визначення температури крижкості графо-експериментальним методом, подібним методу, прийнятому в КНР здійснено на бітумних в'язучих, що використовуються в дорожній галузі України (на бітумах, та бітумних в'язучих, модифікованих полімерами і комплексами добавок). Для кожного в'язучого здійснювалось визначення пенетрації за температур  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$  та  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а потім з використанням методу найменших квадратів встановлювалось рівняння лінійної залежності, за якої визначалась температура, що відповідала пенетрації  $1,25 \times 0,1\text{ мм}$ . Співставлення експериментально визначених за методом Фраасу та отриманих графо-експериментальним методом значень температур крижкості бітумів та бітумних в'язучих, наведені на рис. 3.5 – 3.7. Середня різниця між значеннями температури крижкості (визначеними та розрахованими) для не модифікованих бітумів становить  $2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для бітумів, модифікованих полімерами –  $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а для бітумів, модифікованих комплексами добавок –  $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При цьому більшість розрахунково-визначених значень температури крижкості відрізняється від експериментально отриманих значень не більше ніж на  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (нормоване значення відтворюваності методу Фраасу).

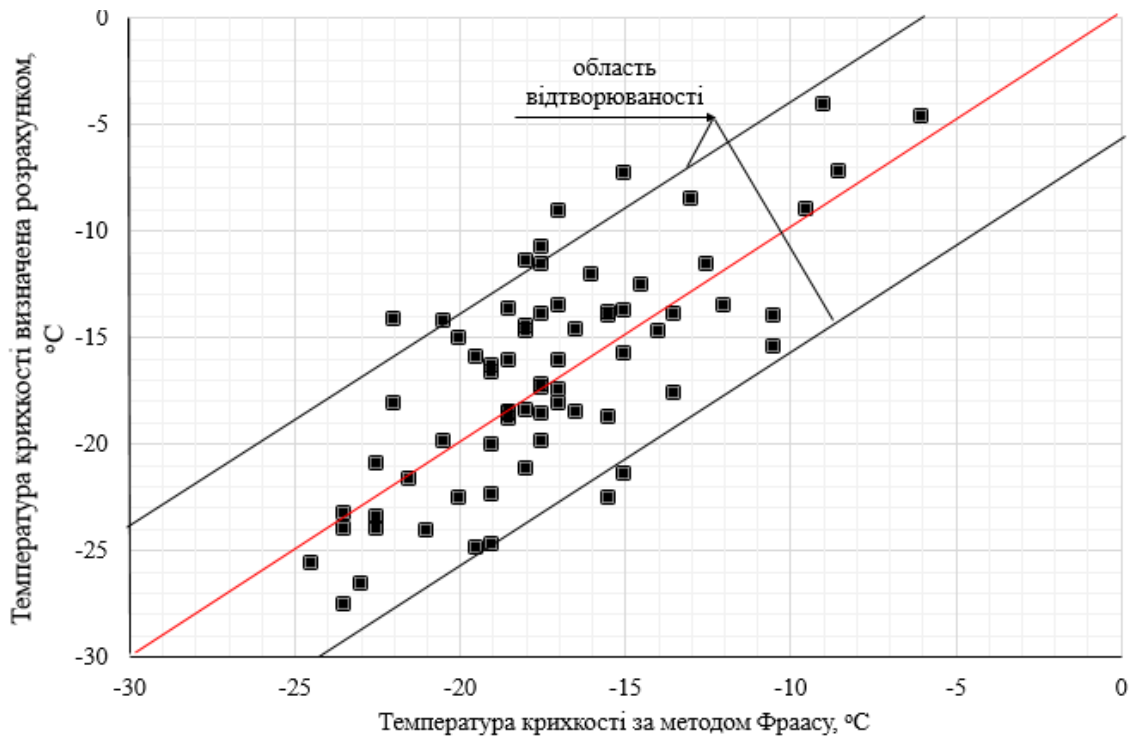


Рисунок 3.5 – Співставлення експериментально визначених за методом Фраасу та отриманих графо-експериментальним методом значень температур крихкості в'язких дорожніх бітумів

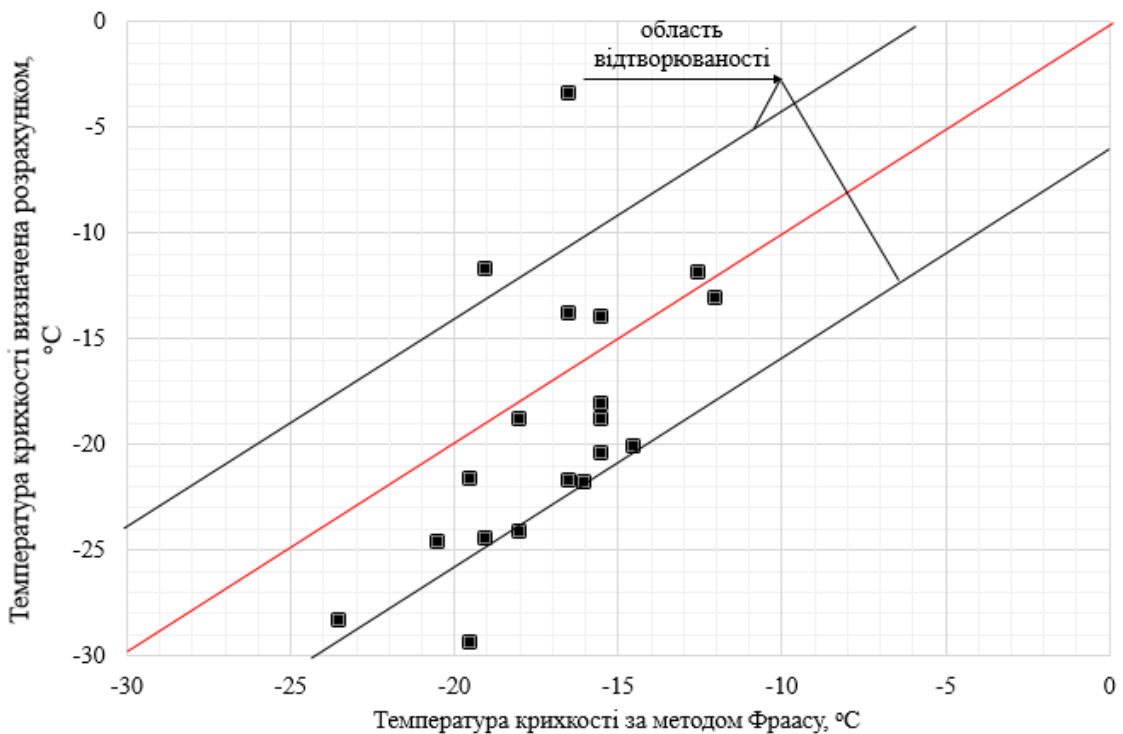


Рисунок 3.6 – Співставлення експериментально визначених за методом Фраасу та отриманих графо-експериментальним методом значень температур крихкості бітумів, модифікованих полімерами

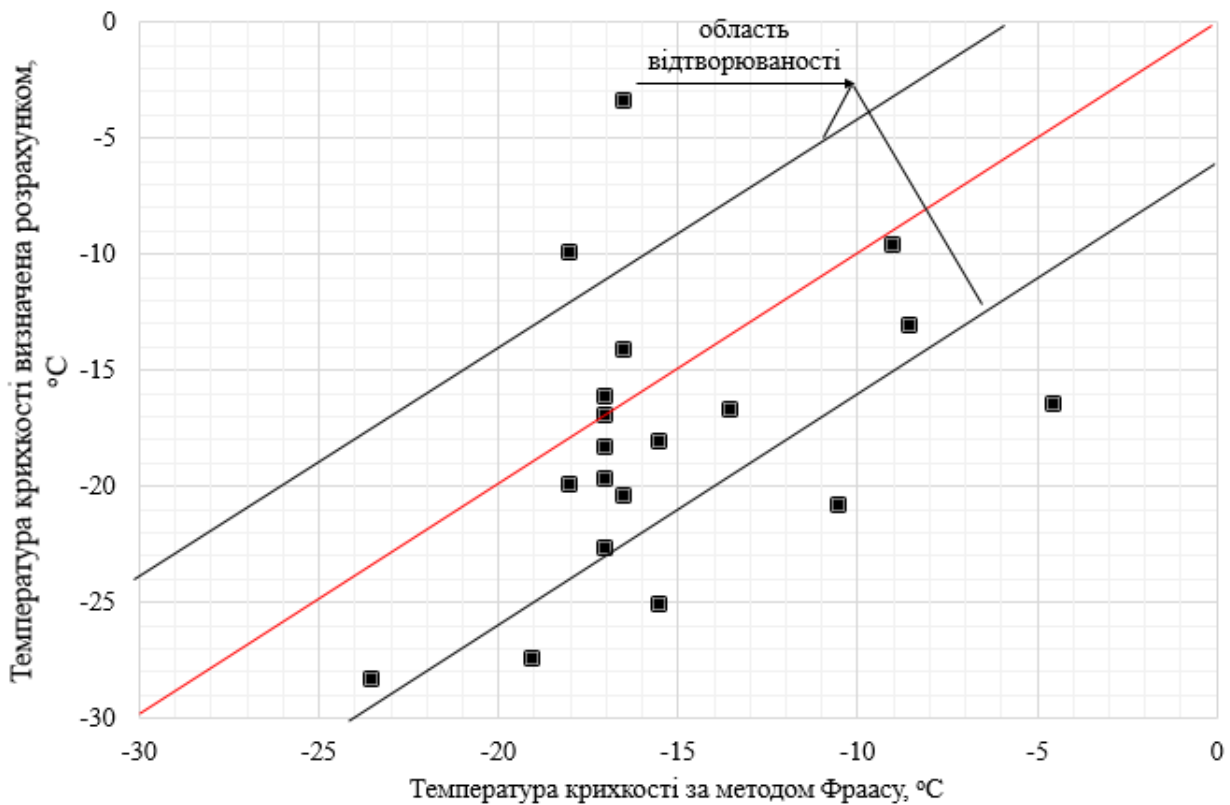
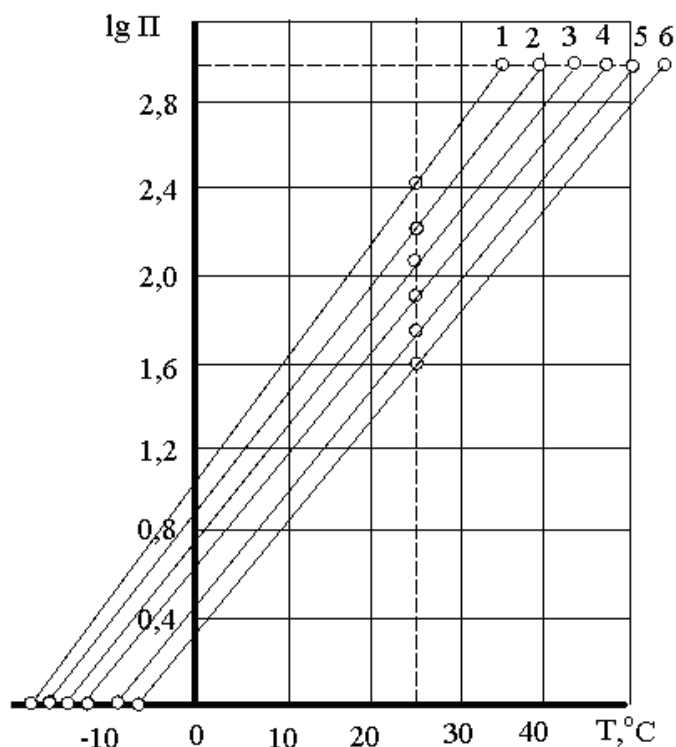


Рисунок 3.7 – Співставлення експериментально визначених за методом Фраасу та отриманих графо-експериментальним методом значень температур крихкості бітумів, модифікованих комплексами добавок

У вітчизняній дорожній галузі на початку 80-х років минулого століття Фроловим А.Ф. було запропоновано номограму, що була частково подібна до номограми VTDC. У відповідності з даними, наведеними А.Ф. Фроловим, значення глибини проникності голки за температури 25 °С та температури 0 °С, температури розм'якшеності та крихкості можуть бути знайдені за лінійною полулогарифмічною залежністю penetрації (рис. 3.8). Під час розробки номограми Фролов А.Ф. ввів ряд умов, а саме:

- температурі розм'якшеності відповідає значення penetрації  $1060 \times 0,1$  мм;
- температурі крихкості відповідає penetрація  $1 \times 0,1$  мм;
- додатково вводиться коефіцієнт, який для більшості бітумів дорівнює 4 та представляє собою відношення penetрації, визначеної за температури 0 °С та навантаженні 200 г впродовж 60 с до penetрації, визначеної за температури 0 °С і навантаженні 100 г впродовж 5 с.



- 1 – бітум з  $\Pi_{25} = 300 \times 0,1$  мм; 2 – бітум з  $\Pi_{25} = 200 \times 0,1$  мм;  
 3 – бітум з  $\Pi_{25} = 130 \times 0,1$  мм; 4 – бітум з  $\Pi_{25} = 90 \times 0,1$  мм;  
 5 – бітум з  $\Pi_{25} = 60 \times 0,1$  мм; 6 – бітум з  $\Pi_{25} = 40 \times 0,1$  мм

Рисунок 3.8 – Модифікована діаграма «lg Π – t», згідно з даними А.Ф.Фролова

Печений Б.Г. [252] розробив номограму (рис. 3.9), за допомогою якої було можливо визначити значення температури крихкості за Фрасом, за експериментально визначеним значенням penetрації за температури 25 °С та значенням низькотемпературного індексу penetрації ( $\Pi_H = \Pi_0/\Pi_{25}$ ), який представляв собою відношення penetрацій, визначених за температурами 0 °С та 25 °С.

Суттєвою перевагою запропонованої номограми було те, що за даними її розробника, вона могла бути використана для визначення температури крихкості бітумів різних структурно-реологічних типів, тобто могла бути використана для оцінювання як дистиляційних бітумів, так і бітумів, виготовлених окисленням.

Крім номограми було запропоновано й розрахунковий метод визначення температури крихкості:

$$T_{кр} = (a_0 - \Pi_H) \cdot \kappa_0 \quad (3.10)$$

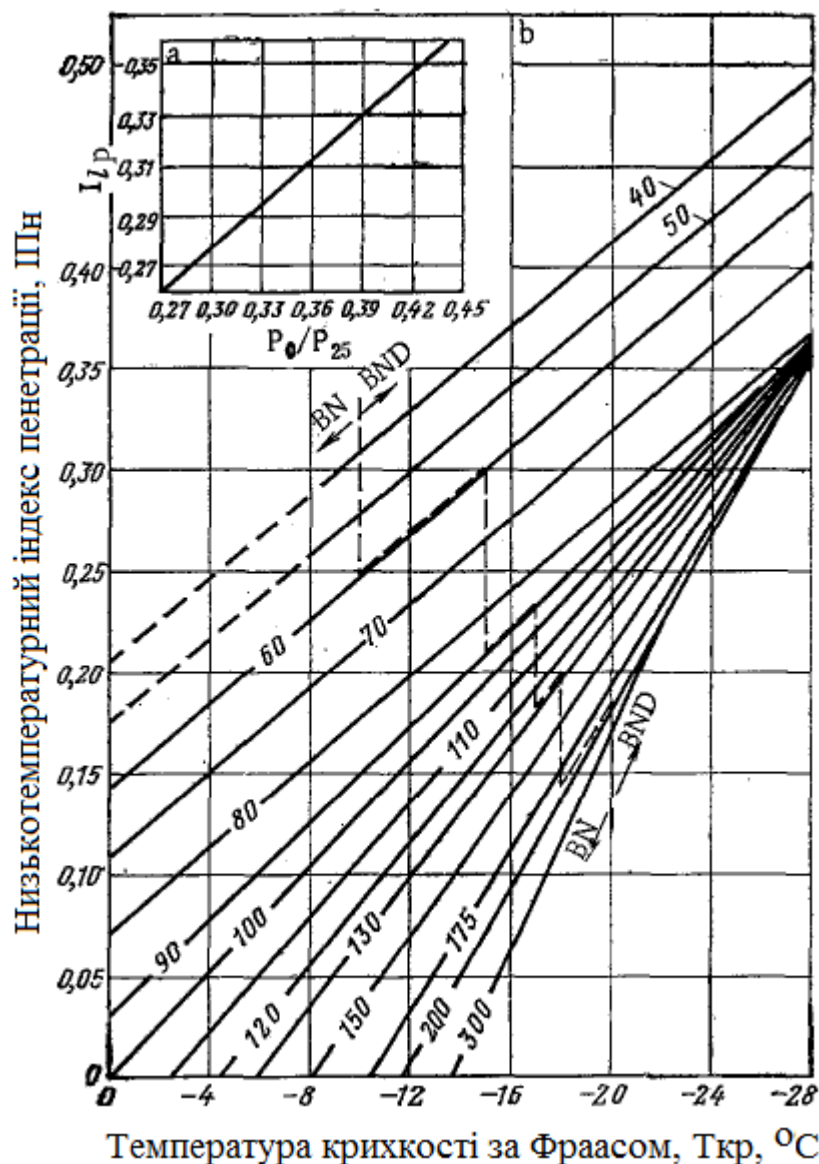


Рисунок 3.9 – Номограма для визначення температури крихкості за Фраасом, [252]

де  $a_0$  – значення низькотемпературного індексу пенетрації за  $T_{кр} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ , який визначається в залежності від значення пенетрації бітуму за  $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

- якщо  $P_{25} < 100 \times 0,1 \text{ мм}$ , то

$$a_0 = 0,35 - 0,0035 P_{25}. \quad (3.11)$$

- якщо  $P_{25} \geq 100 \times 0,1 \text{ мм}$ , то

$$a_0 = 0,706 \cdot 10^{-5} P_{25} - 0,462 \cdot 10^{-2} P_{25} + 0,39. \quad (3.12)$$

$k_0$  – величина, зворотна тангенсу куту нахилу кривої низькотемпературного індексу пенетрації до осі температур, що також залежить від пенетрації бітуму за температури 25 °С:

- якщо  $P_{25} \leq 75 \times 0,1$  мм, то  $k_0 = 97$ ,

- якщо  $P_{25} > 75 \times 0,1$  мм, то

$$k_0 = \frac{12,71 \cdot 10^4}{P_{25}^2} + \frac{40,14 \cdot 10^2}{P_{25}} + 22,91. \quad (3.13)$$

За даними [252] середньо квадратичне відхилення різниці між розрахованими за номограмою або вищенаведеними формулами та експериментально визначеними значеннями температури крихкості становить  $\pm 2,1$  °С. Номограма, наведена на рис. 3.9 була введена в якості додатку до державного стандарту ГОСТ 22245-76 «Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови».

Галдіною В.Д. на основі використання низькотемпературного індексу пенетрації встановлено залежності між цим показником та температурою розтріскування бітумів за методом Фраасу ( $T_{кр}$ ) і температурою розтріскування асфальтобетону ( $T_{розт}$ ), які залежать від сировини, з якої виготовлено бітум:

- для бітумів з західно-казахстанської нафти:

$$T_{кр} = -48,467 \cdot III_n - 25,692, \quad (3.14)$$

$$T_{розт} = -76,709 \cdot III_n - 12,605, \quad (3.15)$$

- для бітумів з західно-сибірської нафти:

$$T_{кр} = -43,655 \cdot III_n - 31,635, \quad (3.16)$$

$$T_{розт} = -54,388 \cdot III_n - 12,651. \quad (3.17)$$

В 70-х роках минулого століття в БПІ Вдовіченко С.Л. було запропоновано графо-аналітичний метод визначення температури крихкості бітумів, на основі якого в подальшому Ковалев Я.М. та Ремез

М.І. розробили без апаратурний метод визначення температури крихкості бітумів, в основу якого покладено показник теплочутливості та систему номограм, за допомогою яких графічно визначається температура крихкості.

Показник теплочутливості ( $K_T$ ) визначається як відношення різниць в'язкостей, визначених за температур проведення стандартних випробувань, до різниці зворотних температур в градусах Кельвіна:

$$K_T = \frac{lg\eta_{25} - lg\eta_{KIK}}{\frac{1}{298} - \frac{1}{\theta}} \quad (3.18)$$

де  $lg\eta_{25}$  – логарифм в'язкості за температури 25 °С,

$lg\eta_{KIK}$  – логарифм в'язкості за температури розм'якшеності методом Кільця і Кулі,

$\theta$  – температура розм'якшеності методом Кільця і Кулі, ° Кельвіна.

Для більшої зручності визначення показника теплочутливості може бути здійснено за значеннями стандартних показників (пенетрація за 25 °С та температура розм'якшеності) в залежності від марки бітуму графічно за номограмою (рис. 3.10). Безпосередньо визначення температури крихкості також здійснюється графічно за номограмою, використовуючи значення показника теплочутливості та температури розм'якшеності.

Ковалев Я.М. та Ремез М.І. на основі чисельних експериментальних даних встановили, що різниця між значеннями температури крихкості, визначеними за методом Фраасу та згідно запропонованої методики не перевищує 0,5 °С. Для експрес оцінювання температури крихкості бітумів, Ковалев Я.М. та Ремез М.І. визначили нормативні значення показника теплочутливості, які в залежності від марки бітуму знаходяться в межах  $0,81 - 0,85 \times 10^4$ . У випадку, якщо розраховане або визначене за номограмою значення показника теплочутливості не перевищує ці нормативні значення температура крихкості буде відповідати нормативним вимогам.

Пактер М.К. встановив кореляційні залежності між температурами крихкості, що визначені експериментально методом Фраасу та

згідно методики, яку розробили Ковалев Я.М. та Ремез М.І., та встановив, що для не модифікованих бітумів коефіцієнт детермінації складає 0,92, для органічних в'язучих, виготовлених з коксохімічної сировини коефіцієнт детермінації становить 0,95, а для бітумів, модифікованих полімерами типу СБС – 0,6.

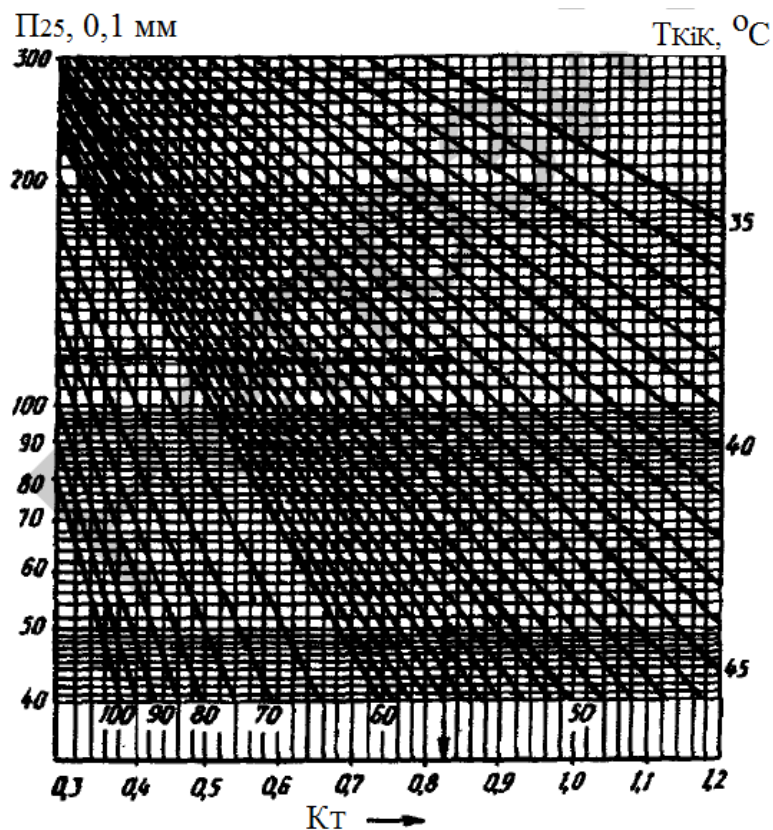


Рисунок 3.10 – Номограма для визначення показника термочутливості

Черняков А.В. та Богомолова О.В. на основі результатів кореляційного аналізу встановили залежності між температурою крихкості за методом Фраасу та стандартними показниками якості бітумів:

- між температурою крихкості ( $T_{кр}$ ) та логарифмами пенетрації за температур 25 °С ( $\ln\Pi_{25}$ ) та 0 °С ( $\ln\Pi_0$ ) і температурою розм'якшеності ( $T_p$ ) – з коефіцієнтом чисельної кореляції 0,81:

$$T_{кр} = 99,02 - 0,52 \cdot T_p - 10,59 \cdot \ln \Pi_{25} - 11,41 \cdot \ln \Pi_0, \quad (3.19)$$

- між температурою крихкості ( $T_{кр}$ ) та логарифмом пенетрації за температури 0 °С ( $\ln\Pi_0$ ) і температурою розм'якшеності ( $T_p$ ) – з коефіцієнтом чисельної кореляції 0,75:

$$T_{кр} = 66,37 - 0,32 \cdot T_p - 18,48 \cdot \ln P_0, \quad (3.20)$$

- між температурою крихкості ( $T_{кр}$ ) та логарифмом пенетрації за температури 25 °С ( $\ln P_{25}$ ) і температурою розм'якшеності ( $T_p$ ) – з коефіцієнтом чисельної кореляції 0,74:

$$T_{кр} = 89,89 - 0,55 \cdot T_p - 18,21 \cdot \ln P_{25}, \quad (3.21)$$

Р.Б. Гуном була запропонована формула для розрахунку температури крихкості бітумів, за відомими температурою розм'якшеності та з індексом пенетрації ( $III$ ).

$$T_{ХР} = T_p - 7 \cdot (10 - III). \quad (3.22)$$

На кафедрі ТДБМ ХНАДУ починаючи з 90-х років минулого століття було запропоновано декілька розрахункових методів визначення температури крихкості. Так, наприклад, в [253] запропоновано розрахункову формулу для встановлення температури крихкості за Фраасом використовуючи відомі значення стандартних показників бітумів – пенетрації за температури 25 °С ( $P_{25}$ ) та температурою розм'якшеності за методом Кільці і Кулі ( $T_p$ ):

$$T_{кр} = 119,2 - 45,7 \cdot \lg P_{25} - T_p. \quad (3.23)$$

В роботі [254] для розрахунку температури крихкості запропоновано графо-експериментальний метод, який передбачає: встановлення експериментальним шляхом значень пенетрації за температур + 5 °С, + 15 °С, + 25 °С та + 35 °С; побудову температурно-пенетраційної залежності та визначення за допомогою неї температури, що відповідає пенетрації  $31 \times 0,1$  мм ( $T_{31}$ ), а також температури, що відповідає пенетрації  $800 \times 0,1$  мм; розрахунок температури крихкості за ривнянням:

$$T_{кр} = 2 \cdot T_{31} - T_{800}. \quad (3.24)$$

Ще одна розрахункова формула визначення температури крихкості, оснований на графічно визначеній температурі, за якої penetрації дорівнює  $800 \times 0,1$  мм ( $T_{800}$ ) та значенню індексу penetрації, визначеній за цією температурою ( $III$ ), представлена в [255]:

$$T_{кр} = T_{800} - 7,12 \cdot III - 69,29. \quad (3.25)$$

В табл. 3.2 наведені результати перевірки коректності визначення розрахункових значень температури крихкості в'язучих за формулами 3.21 – 3.25. Перевірка здійснена окремо для не модифікованих бітумів, для бітумів, модифікованих полімерами та для бітумів, модифікованих комплексами добавок (зазвичай полімер та енергозберігаюча добавка). Крім того для вищенаведених бітумів оцінювалось вплив старіння за методом TFOT (аналог вітчизняного метода старіння, що нормувався згідно ГОСТ 18180), методом RTFOT та методом PAV (для обмеженої кількості в'язучих). Під час визначення температур крихкості розрахунковими методами в формулах використовувалися як значення температури розм'якшеності ( $T_r$ ), так і значення температури, що відповідає penetрації  $800 \times 0,1$  мм ( $T_{800}$ ).

Виходячи з наведених в табл. 3.2 даних не прийнятним є розрахунок температури крихкості за форм. 3.22, оскільки спостерігаються значні різниці між експериментально визначеними та розрахованими значеннями температури крихкості. Всі інші формули (форм. 3.21, 3.23 та 3.25) дозволяють з близькою похибкою, яка знаходиться в межах  $2,7$  °С –  $3,2$  °С, розраховувати температури крихкості за методом Фраасу, при цьому різниця в розрахункових значеннях температур крихкості, визначених з використанням значень температур розм'якшеності та температур  $T_{800}$  не перевищує в середньому  $1,0$  °С.

Зовсім інша ситуація спостерігається у випадку бітумів, модифікованих полімерами та комплексами добавок. При розрахунку температур крихкості за форм. 3.21, 3.23 та 3.25 з використанням значень  $T_r$  або індексу penetрації, визначеного за  $T_r$ , отримувані розрахункові значення температур крихкості в більшій мірі відрізняються від експериментально визначених температур крихкості, ніж у випадку використання для розрахунку значень температур  $T_{800}$  та індексу penetрації, визначеного за  $T_{800}$ .

Таблиця 3.2 – Співставлення визначених методом Фраасу ( $T_{кр}^{\Phi}$ ) та розрахованих значень температури крихкості ( $T_{кр}^P$ )

В'язуче	Старіння	Формула	Кількість об'єктів	Середні значення $T_{кр}^{\Phi} - T_{кр}^P, ^\circ C$		Максимальне значення $T_{кр}^{\Phi} - T_{кр}^P$	
				за $T_r$	за $T_{800}$	за $T_r$	за $T_{800}$
бітуми	по старіння	3.21	70	2,7	2,8	11,6	11,3
	після RTFOT		65	3,8	3,5	8,2	7,9
	після PAV		9	6,2	4,7	9,7	7,0
	по старіння	3.22	70	9,8	11,6	34,7	36,0
	після RTFOT		65	4,0	4,6	16,0	19,6
	після PAV		9	6,0	8,0	14,9	14,6
	по старіння	3.23	70	3,4	3,2	16,6	9,8
	після RTFOT		65	3,5	3,0	14,2	9,0
	після PAV		9	3,6	2,3	6,2	3,6
	по старіння	3.25	70		2,7		8,5
	після RTFOT		65		4,3		18,9
	після PAV		9		8,4		15,3
бітуми, модифіковані полі-мерами	по старіння	3.21	19	5,2	2,6	16,7	9,1
	після RTFOT		19	3,4	3,2	9,9	9,1
	після PAV		3	1,5	4,9	2,0	6,5
	по старіння	3.22	19	29,7	9,4	70,3	27,7
	після RTFOT		19	28,1	11,1	52,1	29,2
	після PAV		3	31,8	23,0	45,7	31,7
	по старіння	3.23	19	11,2	2,5	32,6	11,3
	після RTFOT		19	9,3	3,0	21,6	8,5
	після PAV		3	8,8	1,6	9,9	3,4
	по старіння	3.25	19		2,7		8,4
	після RTFOT		19		3,3		14,2
	після PAV		3		3,2		6,2
Бітуми, модифіковані комплексами добавок	по старіння	3.21	21	5,6	4,4	17,6	9,4
	після RTFOT		20	3,0	3,7	10,4	8,3
	після PAV		11	2,7	3,8	8,4	9,7
	по старіння	3.22	21	29,4	14,1	70,0	49,0
	після RTFOT		20	27,3	16,0	59,5	53,6
	після PAV		11	27,6	25,1	50,0	66,3
	по старіння	3.23	21	11,4	4,0	33,3	12,4
	після RTFOT		20	8,5	2,8	17,8	8,5
	після PAV		11	7,8	5,6	14,4	17,8
	по старіння	3.25	21		4,0		13,8
	після RTFOT		20		3,0		8,3
	після PAV		11		3,2		6,9

Таким чином, можна констатувати, що розрахункові методи можуть використовуватися для оцінювання температур крихкості за методом Фрааса, при цьому точність такого розрахунку залежить від наявності добавок-модифікаторів у складі бітумного в'язучого та, ймовірно, їх кількості. Головним призначенням розрахункових методів оцінювання температур крихкості бітумних в'язучих може бути:

- експрес-метод попереднього оцінювання температур крихкості бітумних в'язучих різного складу;

- визначення температури крихкості бітумних в'язучих, що виходить за межі температурного діапазону, прийнятого в методі Фрааса (нижче чим мінус 40 °С);

- визначення температури крихкості модифікованих бітумних в'язучих, що не може бути зареєстрована приладом Фрааса через особливості його конструкції;

- визначення температури, яка може бути прийнята за температуру початку згинання пластини з бітумним в'язучим за методом Фрааса, що дозволить скоротити час випробування, усунути вплив утомлюваності бітумних в'язучих під час визначення температури крихкості.

## ВИСНОВКИ

За минувші більше ніж 100 років використання нафтових дорожніх бітумів в промислових обсягах для приготування асфальтобетонних сумішей та влаштування дорожніх покриттів значно змінились умови експлуатації автомобільних доріг. Значне зростання інтенсивності та вантажнапруженості дорожнього руху спонукає фахівців дорожніх галузей різних країн світу до покращення властивостей вихідних матеріалів, зокрема бітумних в'язучих, та вдосконалення конструкцій дорожнього одягу. На даний час для приготування асфальтобетонних сумішей, з яких буде влаштовуватися покриття на автомобільних дорогах вищих категорій, використовуються виключно модифіковані бітумні в'язучі, до складу яких може входити декілька різноманітних модифікаторів. Це в свою чергу призводить до того, що методи, які застосовувалися для визначення якості бітумів на початку минулого століття не дозволяють в даний час коректно оцінювати властивості в'язучих і прогнозувати поведінку асфальтобетонів впродовж їх експлуатації в дорожньому покритті та через це потребують суттєвої зміни.

Представлені в роботі методи ілюструють як змінювались підходи до визначення низькотемпературних властивостей бітумних в'язучих та асфальтобетонів – від органолептичних методів оцінювання бітумів, що застосовувалися на початку минулого століття, до методів випробування асфальтобетонів, оснований на положеннях механіки суцільних середовищ та механіки руйнування твердих тіл, що набувають широкого поширення зараз. Не зважаючи на те, що сучасні методи оцінювання низькотемпературних властивостей дорожніх матеріалів оснований на використанні складного в експлуатації та кошторисного обладнання, для роботи на якому потрібні висококваліфіковані фахівці, отримувані результати лише орієнтовно можуть прогнозувати температури розтріскування асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг в реальних умовах їх експлуатації. На даний час роботи по вдосконаленню існуючих методів оцінювання низькотемпературних характеристик в'язучих та асфальтобетонів і розробці нових більш досконалих методів виконуються в провідних наукових центрах світу. На жаль, у вітчизняній дорожній галузі, питання визначення низькотемпературних характеристик в'язучих та асфальтобетонів знаходиться на дуже низькому рівні.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ksaibati K., Erickson R. Evaluation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavement Mixes. Technical report №. PB-99-111999/XAB; MPC-98-94B. Mountain-Plains Consortium. 1998. 99 p.
2. Welborn J.Y. State of the Art in Asphalt Pavement Specification, Report №. FHWA/RD-84/075, Federal Highway Administration, Office of Engineering and Highway Operations, Research and Development, Washington, DC, July 1984. 184 p.
3. Abraham H. *Asphalts and allied substances: their occurrence, modes of production, uses in the arts and methods of testing*. D. Van Nostrand Company, Incorporated. 1920. 1536 p.
4. Marcusson J. *Asphalte, ihre gewinnung, verwendung, zusammensetzung und untersuchung*. Leipzig. W. Engelmann. 1921. 98 p.
5. Reeve C.S., Yeager F.W. Machine for the determination of the pliability of prepared roofing and the breaking point of bitumen. *American: society for testing materials*. 1925. Vol. 25, part II, pp. 385-389.
6. Золотарьов В.О., Пиріг Я.І. *Методи визначення показників якості дорожніх бітумів: Навчальний посібник*. Харків: Видавництво ХНАДУ, 2012. 69 с.
7. Potter F.M., Golding W.E. The brittle point of bituminous road materials. *Journal of the Society of Chemical Industry*. 1934. Т. 53. №. 29. P. 628-629.
8. Gražulytė J., Vaitkus A. Analysis of methods and criteria for evaluation of bitumen performance at low temperatures. *Environmental Engineering. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference Vilnius Gediminas Technical University*. 2017. Т. 10. P. 1-8.
9. Read J., Whiteoak D. *The Shell Bitumen Handbook*. London, UK: Thomas Telford Publ., 2003. 460 p.
10. Пиріг Я.І. Фактори, що впливають на точність визначення температури крихкості бітумів за методом Фраасу. *Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference*, June 8-9, 2023. P. 324-325.
11. Eurobitume TF Data Collection. Position Paper on Test Methods used during the Data Collection. Brussels, Belgium, 2009. 37 p.

12. Eckmann B., Mazé M., Le Hir Y., Harders O., Gauthier G. Checking low temperature properties of polymer modified bitumen-is there a future for the Fraass breaking point?. In *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Eurasphalt and Eurobitume congress held Vienna, may 2004*. Vol. 2. P. 1195-1211.

13. Jones P.M. A brittle point test for low temperature studies of bitumens. *Proceedings of the seventh annual conference of Canadian association*, Vol. VII, November 1962, P. 15-24.

14. Jones P.M. Effect of weathering on increase in hardness of asphalts. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*. 1965. Т. 4. №. 1. P. 57-60.

15. ДСТУ EN 12593-2015 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення температури крижкості за методом Фрааса (EN 12593:2015, ІДТ). [Чинний з 2019-01-06]. Вид. офіц. Київ, ДП «УкрНДНЦ». 2019. 18 с.

16. Largeaud S., Faucon-Dumon S., Eckmann B., Hung Y., Lapalu L., Gauthier G. Low temperature and aging properties of polymer-modified binders. *6<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress*. 2016. P. 1-3.

17. Lee D. *Development of a durability test for asphalts*. Engineering Research Institute, Iowa State University, 1969. 257 p.

18. Pickles S. An improved brittle point test for tars. *Journal of Applied Chemistry*, 1959. 9(4), P. 219–223.

19. Moriyoshi A., Kawamura K. A new test method for measuring asphalt properties at low temperatures. *Journal of the Japan Petroleum Institute*. 1993. Т. 36. №. 2. P. 139-143.

20. Urquhart R. Development of a spray seal binder cracking test. 2017. №. AP-T326-17. 70 p.

21. Tredrea P. The development of an Australian specification for polymer modified binders. *World of Asphalt Pavements, International Conference, 1st, 2000, Sydney, New South Wales, Australia*. 2000. P. 1-38.

22. Stroup-Gardiner M., Newcomb D., Desombre R. Characterizing Properties of Asphalt Cement at Cold Temperatures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1996. 1545, P. 59–66.

23. Mangiafico S., Di Benedetto H., Sauzéat C., Olard F., Pouget S., Planque L. Effect of colloidal structure of bituminous binder blends on linear viscoelastic behaviour of mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Materials & Design*, 2016. 111, P. 126–139.

24. Lu X., Soenen H., Redelius P. Impact of bitumen wax on asphalt

performance-low temperature cracking. In *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Eurasphalt and Eurobitume congress held Vienna, may 2004*. Vol. 2. P. 1351-1363.

25. Van Poel C.D. A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *Journal of Applied Chemistry*, 2007. 4(5), P. 221–236.

26. Saal R.N.J. Mechanical testing of asphaltic bitumen. Paper presented at the Fourth World Petroleum Congress, Rome, Section VI/A, 1955. P. 1–17.

27. Rigden P.J., Lee A.R. The Brittle fracture of tars and bitumens. *Journal of Applied Chemistry*, 1953. Vol. 3, P. 62-70.

28. Migliori F., Daligault A. Etude du comportement a basse temperature des bitumes routiers-application du bending beam rheometer. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussees*. 1996. №. 202. P. 11-24.

29. Olard F., Di Benedetto H., Eckmann B., Vaniscote J. C. Failure behavior of bituminous binders and mixes at low temperatures. In *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Eurasphalt and Eurobitume congress held Vienna, may 2004*. Vol. 2. P. 1305-1316.

30. Gokhman L.M., Gurarii E.M., Davydova A.R. Correlation of the Pitch Quality and its Feedstock Structure. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2008. № 6. P. 35-41.

31. Judycki J., Jaskula P. Interrelation between properties of bitumen and asphalt concrete containing that bitumen. In *Proceedings of the 2<sup>rd</sup> Euroasphalt and Eurobitume congress held Barcellona, Spagna*. 2000. P. 1-8.

32. Pangarova D., Nikolov A. Study of the low temperature characteristics of binders and the asphalt mixtures produced with them. In *6<sup>th</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress*. Prague, Czech Republic. 2016. P.1-11.

33. Claxton M., Lesage J., Planque L., Green P. The use of binder rheological properties to predict the performance of asphalt mixes. In *Combined 18<sup>th</sup> ARRB transport research conference and transit New Zealand land transport symposium, 2-6 September 1996, Christchurch, New Zealand. Part 2*. 1996. P. 311-326.

34. Lill K., Khan A.N., Kontson K., Hesp S.A. Comparison of performance-based specification properties for asphalt binders sourced from around the world. *Construction and Building Materials*, 2020. 261, P. 1-8.

35. Claxton M.J., Green P.J. The classification of bitumens and polymer modified bitumens within the SHRP Performance Grading system. The

Asphalt Yearbook 1999. 18 p.

36. Porot L. et al. Complex bituminous binders, are current test methods suitable for? *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials: ISBM Lyon 2020 1*. Springer International Publishing, 2022. P. 37-43.

37. ASTM D6648-08(2016) Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. 15 p.

38. AASHTO T 313:2016 Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C. 2016. 22 p.

39. ДСТУ EN 14771:2019 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення жорсткості під час випробування на повзучість за згину з використанням балочного реометра (EN 14771:2012, IDT) [Чинний з 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ, ДП «УкрНДНЦ». 2019. 20 с.

40. Kennedy T.W. et al. *Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program*. Washington. 1994. 170 p.

41. Eldin M.S.N., Manke P.G. A preliminary study of the use of the stiffness concept in minimizing low temperature transverse cracking. Interim report III. 1976. №. FHWA-OK-77-72-03-3. 44 p.

42. Moon K.H., Falchetto A.C., Marasteanu M.O. Investigation of limiting criteria for low temperature cracking of asphalt mixture. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2013. 18(1), P. 172–181.

43. Iliuta S., Andriescu A., Hesp S.A., Tam K.K. Improved approach to low-temperature and fatigue fracture performance grading of asphalt cements. *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association*. 2004. Vol. 49. P. 123-158.

44. Marasteanu M. Role of Bending Beam Rheometer Parameters in Thermal Stress Calculations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2004. 1875, P. 9–13.

45. Li Y., Hesp S. A. M. Enhanced Acceptance Specification of Asphalt Binder to Drive Sustainability in the Paving Industry. *Materials*. 2021. T. 14. №. 22. P. 6828.

46. Stoffels S.M., Roque R., Farwana T. Evaluation and field validation of proposed strategic highway research program binder specification

for thermal cracking. *Transportation research record*. 1994. №. 1436. P. 1-10.

47. Sebaaly P.E., Lake A., Epps J. Evaluation of low-temperature properties of HMA mixtures. *Journal of Transportation Engineering*. 2002. T. 128. №. 6. P. 578-586.

48. Radziszewski P. et al. Low-temperature requirements for bitumen in central east European road construction. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2019. T. 14. №. 2. P. 249-270.

49. Sybilski D., Vanelstraete A., Part M.N. Recommendation of RILEM TC 182 -PEB on bending beam and rheometer measurements of bituminous binders. *Materials and Structures*. 2004. Vol. 37, October. P. 539-546.

50. Lee M.G., Chiu C.T., Chen K.C. Comparison of results of SHRP and conventional binder tests on paving asphalts. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2004. 2(3), P. 245-245.

51. Largeaud S., Brule B. Propriétés des liants bitumineux a basse temperature: relations entre les indicateurs. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Euroasphalt and Eurobitume congress held Barcelona, 2000*. Vol. 1. P. 410-415.

52. Turk M.R., Tusar M. Effect of ageing on the low temperature properties of bitumen. In *6<sup>th</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress*. Prague, Czech Republic. 2016. P. 1-8.

53. Eckmann B. et al. New bitumen performance indicators-A feasibility study. In *6<sup>th</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress*. Prague, Czech Republic. 2016. P.1-13.

54. Al-Jumaily, Hasan M. Adapting of Performance Grading System for Local Asphalt Cement. *Kufa Journal of Engineering*, vol. 2, no. 1, Mar. 2014, P. 1-16.

55. Kim Y.S. et al. Asphalt Binder Testing at Low Temperature: Three-Point Bending Beam Test in Dynamic Shear Rheometer. *Frontiers in Materials*. 2022. Vol. 9. P. 1-14.

56. Riccardi C., Cannone Falchetto A., Wang D., Wistuba M.P. Effect of cooling medium on low-temperature properties of asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 2017. 18(sup4), P. 234–255.

57. Hesp S.A.M., Subramani S. Another look at the bending beam rheometer for specification grading of asphalt cements. *Proceedings of 6<sup>th</sup> MAIREPAV Conference, Torino, Italy*. 2009. T. 2296. P. 1-11.

58. Stütz M., Woerner T., Wallner B. Optimization of BBR testing for low temperature behavior. In *4<sup>th</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress*. May

2008, Copenhagen, Denmark. 2008. P. 1-6.

59. Soenen H., Vanelstraete A. Performance indicators for low temperature cracking. *PRO 28: 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials (PTEBM'03)*. Vol. 28. RILEM Publications, 2003. P. 1-6.

60. Dongré R., D'Angelo J., McMahan S. Development of Superpave Direct Tension Test Device. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1997. 1586, P. 32–39.

61. Direct Tension Tester. URL: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/direct-tension-tester> (дата звернення 03.04.2023).

62. Anderson D.A., Dongre R. The SHRP direct tension specification test-its development and use. *ASTM Special Technical Publication*. 1995. T. 1241. P. 51-66.

63. Nicholls C. BitVal: Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests. FEHRL Report on Phase 1 of the BiTVal Project. 2006. 213 p.

64. Largeaud S. et al. The use of direct tension tests for the assessment of low temperature properties of bituminous binders. *Materials and Structures*, 2004. 37(5), 351–355.

65. Ho S., Zanzotto L. Sample Preparation for Direct Tension Testing: Improving Determination of Asphalt Binder Failure Stress and Test Repeatability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001. 1766, P. 15–23.

66. Ho S., Zanzotto L. Low-temperature properties of asphalt binders studied by the Direct Tension Test and the Superpave MP1a specification. In *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Eurasphalt and Eurobitume congress held Vienna, may 2004*. Vol. 2. P. 1386-1397.

67. Peterson J.C. et al. Binder Characterization and Evaluation, Volume 4: Test Methods. National Research Council. Washington, D. 1994. 197 p.

68. Sui C., Farrar M.J., Tuminello W.H., Turner T.F. New Technique for Measuring Low-Temperature Properties of Asphalt Binders with Small Amounts of Material. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010. 2179(1), P. 23–28.

69. Chappat M., Poirier J.E., Robert M., Durand G. Appreciation by rheological and tensile tests methods of the impact of ageing of polymer modified binders towards low temperature behaviour. *Proceedings of the*

2<sup>rd</sup> Eurasphalt and Eurobitume congress held Barcelona, 2000. Vol. 1. P. 1-7.

70. Dongré R., Bouldin M., Maurer D. Field Validation of New Superpave Low-Temperature Binder Specification Procedure: Performance Data from Pennsylvania Test Sections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2000. 1728, P. 60–67.

71. Durand G., Ballie M., Poirier J.-E., Robert M. Application of the new AASHTO MP1-A specification scheme to modified binders: low temperature performance of SBS. In *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Eurasphalt and Eurobitume congress held Vienna, may 2004*. Vol. 2. P. 1169-1179.

72. Zhai H., Salomon D. Evaluation of low temperature properties of asphalt crack sealants using the direct tension tester. Paper for 50<sup>th</sup> Annual conference, november 6-9, 2005, Victoria, BC. 225. 11 p.

73. Al-Qadi I.L. et al. Characterization of low temperature mechanical properties of crack sealants utilizing direct tension test. Research Report ICT-08-028. Illinois Center for Transportation. 2008. 71 p.

74. Sui C. et al. New low-temperature performance-grading method: Using 4-mm parallel plates on a dynamic shear rheometer. *Transportation research record*. 2011. T. 2207. №. 1. P. 43-48.

75. Farrar M. et al. Determining the low-temperature rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR). *Report 4FP*. 2015. T. 8. 71 p.

76. Schröter K., Hutcheson S.A., Shi X., Mandanici A., McKenna G.B. Dynamic shear modulus of glycerol: Corrections due to instrument compliance. *The Journal of Chemical Physics*, 2006. 125(21), 214507.

77. EN 14770:2012. Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR)

78. Santosh K., Kim Y. R. Investigation of DSR Test Methods to Determine Binder Low Temperature Properties. Nebraska Department of Transportation. 2019. 77 p.

79. Lu X., Uhlback P., Soenen H. Investigation of bitumen low temperature properties using a dynamic shear rheometer with 4 mm parallel plates. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. T. 10. №. 1. P. 15-22.

80. Wang D., Cannone Falchetto A., Alisov A., Schrader J., Riccardi C., Wistuba M.P. An Alternative Experimental Method for Measuring the Low Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder by Using 4mm

Parallel Plates on Dynamic Shear Rheometer. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2019. 2673(3), P. 427–438.

81. Büchner J., Wistuba M.P., Remmler T., Wang D. On low temperature binder testing using DSR 4 mm geometry. *Materials and Structures*, 2019. 52, P. 1-11.

82. Büchner J., Sigwarth T., Wistuba M.P. *Testing conditions for asphalt binder testing using dynamic shear rheometer with 4 mm diameter parallel plate geometry*. Braunschweig Pavement Engineering Centre (ISBS), Braunschweig. 2021. 10 p.

83. Büchner J., Wistuba M. Analysis of low temperature relaxation properties of asphalt binder and asphalt mastic using a dynamic shear rheometer. *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. CRC Press, 2022. P. 508-516.

84. Kim S.S. Direct Measurement of Asphalt Binder Thermal Cracking. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005. 17(6), P. 632–639.

85. Kim S.S. Development of an asphalt binder cracking device. Final Report for Highway IDEA Project 99. Washington, DC, 2007. 40 p.

86. Nikolaevsky V.E., Duzhiy P.A., Nebratenko D.Y. Evaluation of low-temperature properties of mixtures of bitumen and SBS polymers of various topologies by the ABCD method. *Vojnotehnički glasnik*. 2023. T. 71. №. 3. P. 711-721.

87. Zeiada W. et al. Review of the Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization. *Construction and Building Materials*. 2022. T. 319. P.1-33.

88. Jellema E., Scholten E., Vries S.D., Kim S.S., Kluttz B. Comparing cold performance results using fracture toughness test, asphalt binder cracking device, Fraass breaking point and bending beam rheometer. In *5<sup>th</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress*. 13-15<sup>th</sup> June 2012, Istanbul. 2012. P. 1-12.

89. Kim S.S. Asphalt binder cracking device to reduce low-temperature asphalt pavement cracking. Federal Highway Administration (US), №. FHWA-HIF-11-029. 2010. 48 p.

90. Kim S.S.<sup>2)</sup>, Wysong Z.D., Kovach J. Low-temperature thermal cracking of asphalt binder by asphalt binder cracking device. *Transportation research record*. 2006. T. 1962. №. 1. P. 28-35.

91. Kim S.S.<sup>3)</sup> The Asphalt Binder Cracking Device Test. *TR News*.

2013. T. 284. P. 51-53.

92. Liu J. et al. Low temperature cracking analysis of asphalt binders and mixtures. *Cold Regions Science and Technology*. 2017. T. 141. P. 78-85.

93. Delfosse F. et al. Impact of the bitumen quality on the asphalt mixes performances. In *6<sup>th</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress*. Prague, Czech Republic. 2016. P.1-14.

94. Farrar M.J., Kim S.S., Pauli T., Planche J.P. An advanced low temperature rheological and fracture test method for bitumen purchase specifications and pavement performance prediction: 4-mm DSR/ABCD. *8<sup>th</sup> RILEM international symposium on testing and characterization of sustainable and innovative bituminous materials*. Springer Netherlands, 2016. P. 25-36.

95. Hoare T.R., Hesp S.A. M. Low-temperature fracture testing of asphalt binders: regular and modified systems. *Transportation Research Record*. 2000. T. 1728. №. 1. P. 36-42.

96. Velasquez R., Tabatabaee H., Bahia H. Low temperature cracking characterization of asphalt binders by means of the single-edge notch bending (SENB) test. *Asphalt Paving Technology-Proceedings Association of Asphalt Technologists*. 2011. T. 80. P. 583-614.

97. Tabatabaee H. et al. Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements national pooled fund study–Phase II. January. University of Wisconsin-Madison. 2012. 23 p.

98. Lei Z., Bahia H., Yi-qiu T. Effect of bio-based and refined waste oil modifiers on low temperature performance of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 2015. 86, P. 95–100.

99. Bahia H. et al. The role of asphalt binder fracture properties in thermal cracking performance of mixtures and pavements. *CTAA Annual Conference Proceedings-Canadian Technical Asphalt Association*. 2012. T. 57. P. 1 - 17.

100. Hakimzadeh S. et al. Implementation of nondestructive testing and mechanical performance approaches to assess low temperature fracture properties of asphalt binders. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. T. 10. №. 3. P. 219-227.

101. Edwards M., Hesp S. Compact Tension Testing of Asphalt Binders at Low Temperatures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2006. № 1962, P. 36–43.

102. Luo H. et al. Notched specimen cracking test: A novel method to

directly measure low-temperature thermal stress of asphalt binder. *International Journal of Pavement Engineering*. 2022. P. 1-15.

103. Behnia B., Buttlar W.G., Reis H., Apeagye A.K. Determining the embrittlement temperature of asphalt binders using an acoustic emission approach. In *Structural Materials Technology 2010*. p. 318-325.

104. Apeageyi A.K., Buttlar W.G., Reis H. Assessment of low-temperature embrittlement of asphalt binders using an acoustic emission approach. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2009. 51(3), 129–136.

105. Пиріг Я.І. Встановлення кількісних співвідношень між технічними та технологічними властивостями дорожніх бітумів: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. ХНАДУ. Харків, 2013. 254 с.

106. Radovskiy B., Teltayev B. Viscoelastic properties of asphalts based on penetration and softening point. New York: Springer, 2018. 115 p.

107. Zhou F. et al. Experimental design for field validation of laboratory tests to assess cracking resistance of asphalt mixtures. NCHRP Project № 9-57. Texas A&M Transportation Institute. 2016. T. 9. 262 p.

108. Velasquez R., Bahia H. Critical factors affecting thermal cracking of asphalt pavements: towards a comprehensive specification. *Road Materials and Pavement Design*, 2013. 14(sup1), P. 187–200.

109. Gražulytė J., Vaitkus A., Andrejevas V., Gribulis G. Methods and criteria for evaluation of asphalt mixture resistance to low temperature cracking. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2017. 12(2), P. 135-144.

110. Ahmad T., Khawaja H. Review of low-temperature crack (LTC) developments in asphalt pavements. *International Journal of Multiphysics*. Vol. 12, № 2, P. 169-188.

111. Christensen D.W., Bonaquist R.F. *Evaluation of indirect tensile test (IDT) procedures for low-temperature performance of hot mix asphalt*. Transportation Research Board. 2004. Vol. 530. 61 p.

112. Buttlar W.G., Roque R. Development and evaluation of the strategic highway research program measurement and analysis system for indirect tensile testing at low temperatures. *Transportation Research Record*. 1994. №. 1454. 163-171 p.

113. Marasteanu M. et al. *Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements - A transportation pooled Fund Study*. Minnesota. Department of Civil Engineering University of Minnesota, 2007. 338 p.

114. Newcomb D.E., Arabali P., Al-Khayat H., Zhou F. *Test methods*

to quantify cracking resistance of asphalt binders and mixtures (No. MN 2021-02). Minnesota. Department of Transportation. 2021. 110 p.

115. Romero P., Ho C.H., VanFrank K. *Development of methods to control cold temperature and fatigue cracking for asphalt mixtures* (No. UT-10.08). Utah. Dept. of Transportation. Research Division. 2011. 116 p.

116. AASHTO T322 Standard Method of Test for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device. 2007. AASHTO. 18 c.

117. ASTM D 6931-17 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures. ASTM. 2017. 5 p.

118. EN 12697-23:2017 Bituminous mixtures - Test methods - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens. 12 p.

119. Zhou F. et al. Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures: An Experimental Design. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. 2016. August. P.1-25.

120. Kim S.S., Sargand S., Wargo A. *A simple test procedure for evaluating low temperature crack resistance of asphalt concrete* (No. FHWA/OH-2009/5). Ohio Research Institute for Transportation and the Environment. 2009. 122 p.

121. Falchetto A.C., Moon K.H., Wang D., Riccardi C., Wistuba M.P. Comparison of low-temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations. *Road Materials and Pavement Design*, 2018. 19(3), P. 591-604.

122. Moon K.H., Marasteanu M.O., Turos M. Comparison of thermal stresses calculated from asphalt binder and asphalt mixture creep tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013. T. 25. №. 8. P. 1059-1067.

123. Zofka A., Marasteanu M.O., Turos M. Determination of Asphalt Mixture Creep Compliance at Low Temperatures by Using Thin Beam Specimens. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008. 2057(1), P. 134–139.

124. Zofka A., Marasteanu M., Turos M. Investigation of Asphalt Mixture Creep Compliance at Low Temperatures. *Road Materials and Pavement Design*, 2008. 9(sup1), P. 269–285.

125. Marasteanu M., Velasquez R., Cannone Falchetto A., Zofka A. Development of a simple test to determine the low temperature creep compliance of asphalt mixtures. *IDEA program final report NCHRP*

133, Minneapolis, Minnesota. 2009. 60 p.

126. Marasteanu M., Cannone Falchetto A., Velasquez R., Le J.-L. On the representative volume element of asphalt concrete at low temperature. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2016. 20(3), P. 343–366.

127. Marasteanu M., Turos M., Ghosh D., Lorrany Matias de Oliveira J., Yan T. Investigation of Cracking Resistance of Asphalt Mixtures and Binders. Department of Civil, Environmental, and Geo-Engineering University of Minnesota. 2019. 107 p.

128. Ho C.-H., Romero, P. Using Asphalt Mixture Beams in the Bending Beam Rheometer. *Road Materials and Pavement Design*, 2011. 12(2), P. 293–314.

129. Velasquez R., Zofka A., Turos M., Marasteanu M.O. Bending beam rheometer testing of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 2011. 12(5), P. 461–474.

130. Romero P. *Using the bending beam rheometer for low temperature testing of asphalt mixtures*. Utah. Dept. of Transportation, 2016. 106 p.

131. Pszczola M. et al. Evaluation of asphalt mixture low-temperature performance in bending beam creep test. *Materials*. 2018. T. 11. №. 1. P. 1–21.

132. Jung D.H., Vinson T.S. Low-temperature cracking: Test selection. SHRP-A-400. National Research Council, Washington, D.C. 1994. 109 p.

133. Isacsson, U., Zeng, H. Relationships between bitumen chemistry and low temperature behaviour of asphalt. *Construction and Building Materials*. 1997. 11(2). P. 83–91.

134. Rahman F., Hossain M. Review and analysis of Hamburg Wheel Tracking device test data. Kansas State University Transportation Center. 2014. 88 p.

135. FunDBitS. Functional Durability-related Bitumen Specification. Identified correlations between bitumen and asphalt properties (Interim Report) / C. Nicholls and others: CEDR Transnational Road Research Programme. 2015. 416 p.

136. Isacsson U., Zeng H. Cracking of asphalt at low temperature as related to bitumen rheology. *Journal of materials science*. 1998. T. 33. №. 8. P. 2165-2170.

137. AASHTO TP 10 Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength. AASHTO. 1993. 13 p.

138. EN 12697-46:2012 Bituminous mixtures – Test methods for

hot mix asphalt – Part 46: Low temperature cracking and properties by uni-axial tension tests. 2012. 20 p.

139. Pszczola M., Szydłowski C. Influence of bitumen type and asphalt mixture composition on low-temperature strength properties according to various test methods. *Materials*. 2018. T. 11. №. 11. P. 1-16.

140. Spiegl M., Lackner R., Wistuba M., Blab R. *Risk assessment of low-temperature cracking of asphalt-An experimental study*. 11<sup>th</sup> International Conference on Fracture Mechanics, Turin (Italy), 2005. P. 1-6.

141. Blab R. Performance-based asphalt mix and pavement design. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2013. T. 2. №. 1. P. 21-38.

142. Jung D., Vinson T.S. Thermal stress restrained specimen test to evaluate low-temperature cracking of asphalt-aggregate mixtures. *Transportation research record*. 1993. P. 12-20.

143. Gu Y., Ding C., Shen J., Wang W. Low Temperature Crack Resistance of Stone Mastic Asphalt Affected by Its Nominal Maximum Size and Asphalt Binders. *Applied Sciences*, 2022. 12(15), 7444. P.1-10.

144. Stuart K., Youtcheff J.S. Understanding the performance of modified asphalt binders in mixtures: High-temperature characterization. US Department of Transportation. Federal Highway Administration, Research, Development, and Technology. Turner-Fairbank Highway Research Center, 2000. №. FHWA-RD-02-075. 22 p.

145. Largeaud S. et al. Low temperature and aging properties of polymer-modified binders. In *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress held Prague, Czech Republic, 1-3 June 2016*. P. 1-3.

146. Ponniah J.E., Cullen R.A., Hesp S.A. Fracture energy specifications for modified asphalts. *Preprints of Papers-American Chemical Society Division Fuel Chemistry*. 1996. T. 41. P. 1317-1321.

147. Lu X., Isacsson U., Ekblad J. Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures. *Materials and Structures*, 2003. 36(10), P. 652–656.

148. Des Croix P. Mechanical fatigue and thermal cracking tests to evaluate pavement performance and comparison with binder properties. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Eurasphalt and Eurobitume congress held Mienna, May 2004*. 2004. T. 1. P. 1398-1410.

149. Rys D., Jaczewski M., Pszczola M., Jaskula P., Bankowski W. Effect of bitumen characteristics obtained according to EN and Super-

pave specifications on asphalt mixture performance in low-temperature laboratory tests. *Construction and Building Materials*, 2020. 231, P.1-10.

150. Badeli S., Bilodeau F., Carter A., Perraton D. Comparison of Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) Results with Bending Beam Rheometer (BBR) Results to Evaluate the Thermal Cracking Properties of Bituminous Materials. ISAP 2018 Conference, Fortaleza, Brazil. 2018. P. 1-8.

151. Teltayev B.B., Rossi C.O., Izmailova G.G., Amirbayev E.D., Elshibayev A.O. Evaluating the effect of asphalt binder modification on the low-temperature cracking resistance of hot mix asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 2019. T. 11. P. 1-13.

152. Edwards Y., Tasdemir Y., Isacson U. Effects of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, 2006. 45(1), P. 31–41.

153. Ponniah J.E., Cullen R.A., Hesp S.A. Fracture energy specifications for modified asphalts. *Preprints of Papers-American Chemical Society Division Fuel Chemistry*. 1996. T. 41. P. 1317-1321.

154. Baumanis J., Riekstins A., Balodis A. Investigation of comparability of TSRST and SCB cracking tests for evaluation of low-temperature properties in asphalt mixtures and use in quality control. *Materials Science and Engineering*. 2021. T. 1202. №. 1. P. 1-6.

155. Zubeck H., Zeng H., Vinson T., Janoo V. Field Validation of Thermal Stress Restrained Specimen Test: Six Case Histories. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1996. 1545, P. 67–74.

156. Zubeck H.K., Vinson T.S. Prediction of low-temperature cracking of asphalt concrete mixtures with thermal stress restrained specimen test results. *Transportation Research Record*. 1996. T. 1545. №. 1. P. 50-58.

157. Grafmüller H.K., Plachkova-Dzhurova P., Hase M., Roos R., Wörner T. Additional knowledge of low temperature behaviour of asphalt characterized by maximum indirect tensile strength reserve. In *6th Euroasphalt & Eurobitume Congress*. Prague, Czech Republic. 2016. P. 1-10.

158. Li X.-J., Marasteanu M.O. Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete. *Experimental Mechanics*, 2009. 50(7), P. 867–876.

159. Velasquez R.A., Labuz J.F., Marasteanu M.O., Zofka, A.M. Revising thermal stresses in the TSRST for low-temperature cracking prediction. *Journal of materials in civil engineering*, 2009. 21(11), P. 680-687.

160. Steiner D., Hofko B. On the influence of basic thermodynamics on thermal cracking resistance of asphalt mixtures in cooling tests. *RILEM Technical Letters*. 2018. T. 3. P. 1-7.

161. Hofko B., Blab R. Performance-based Hot Mix Asphalt and Flexible Pavement Design-The European Perspective. In *Proc., Civil Engineering Conference in the Asian Region (CECAR7), Waikiki, Oahu, Hawaii*. 2016. P. 1-12.

162. Bahia H., Tabatabaee H., Velasquez R. Asphalt thermal cracking analyser (ATCA). 7<sup>th</sup> RILEM international conference on cracking in pavements. Springer, Dordrecht, 2012. P. 147-156.

163. Tabatabaee H., Velasquez R., Arshadi A., Bahia H. *Modeling of asphalt mixtures contraction and expansion due to thermal cycling. National pooled fund study - Phase II*. University of Wisconsin-Madison. 2012. 61 p.

164. Stimilli A., Virgili A., Canestrari F., Bahia H.U. Estimation of low-temperature performance of recycled asphalt mixtures through relaxation modulus analysis. *Cold Regions Science and Technology*, 2017. 133, P. 36–45.

165. Baglieri O., Dalmazzo D., Barazia M., Tabatabaee H.A., Bahia H.U. Influence of physical hardening on the low-temperature properties of bitumen and asphalt mixtures. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012. T. 53, P. 504-513.

166. Canestrari F., Stimilli A., Bahia H.U., Virgili A. Pseudo-variables method to calculate HMA relaxation modulus through low-temperature induced stress and strain. *Materials & Design*, 2015. 76, P. 141–149.

167. Mandal T., Bahia H. Measuring crack propagation resistance of asphalt mixtures using notched samples in the TSRST. *Proceedings of the 62th Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*, Halifax, NS, Canada. 2017. P. 12-15.

168. Anderson T.L. *Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications*, Third Edition, Taylor and Francis, CRC Press, 2005. 630 p.

169. Ameri M., Mansourian A., Heidary Khavas M., Aliha M.R.M., Ayatollahi M.R. Cracked asphalt pavement under traffic loading – A 3D finite element analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011. 78(8), P. 1817–1826.

170. Aliha M.R.M., Bahmani A., Akhondi S. A novel test specimen for investigating the mixed mode I+ III fracture toughness of hot mix as-

phalt composites—Experimental and theoretical study. *International Journal of Solids and Structures*. 2016. T. 90. P. 167-177.

171. Tabatabaee H.A., Velasquez R., Puchalski S., Bahia H.U. Development of the Single-Edge Notched Beam (SENB) Test. Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements National Pooled Fund Study – Phase II. University of Wisconsin-Madison. 2012. 28 p.

172. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. (1985). *Materials and Structures*, 18(4), 287–290.

173. Radeef H.R. et al. Determining Fracture Energy in Asphalt Mixture: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. T. 682. №. 1. P. 1-11.

174. Mobasher B., Mamlouk M.S., Lin H.-M. Evaluation of Crack Propagation Properties of Asphalt Mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, 1997. 123(5), 405–413.

175. Nsengiyumva G., Kim Y.R., You T. Development of a semicircular bend (SCB) test method for performance testing of Nebraska asphalt mixtures. University of Nebraska – Lincoln. Nebraska Department of Roads. 2015. 60 p.

176. Zhu Y., Dave E.V., Rahbar-Rastegar R., Daniel J.S., Zofka A. Comprehensive evaluation of low-temperature fracture indices for asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 2017. T. 18. №. 4. P. 467-490.

177. Artamendi I., Khalid H.A. A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt. *Road Materials and Pavement Design*. 2006. T. 7. №. 1. P. 163-180.

178. Li Y., Xuan W., Rahman A., Ding H., Yusupov B. Effects of Geometry and Loading Mode on the Stress State in Asphalt Mixture Cracking Tests. *Materials*, 2022. 15(4), 1559. P.1-13.

179. Braham A., Buttlar W., Ni F. Laboratory mixed-mode cracking of asphalt concrete using the single-edge notch beam. *Road Materials and Pavement Design*. 2010. T. 11. №. 4. P. 947-968.

180. Wagoner M.P., Buttlar W.G., Paulino G.H. Development of a single-edge notched beam test for asphalt concrete mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*. 2005. T. 33. №. 6. 452 p.

181. Kim H., Wagoner M.P., Buttlar W.G. Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single-edge notched beam test. *Materials and Structures*, 2008. 42(5), P. 677–689.

182. Chong K.P. Fracture mechanics investigation of oil shale to aid in understanding the explosive fragmentation process. Final technical report, January 1983-July 1984. Wyoming Univ., Laramie (USA). Dept. of Civil Engineering, 1984. №. DOE/LC/10961-1705. 40 p.

183. Molenaar J.M.M., Molenaar A.A.A. Fracture Toughness of Asphalt in the Semi-Circular Bend Test, in Proc. of the 2<sup>nd</sup> Euroasphalt and Eurobitume Congress, 20–22 September, 2000, Barcelona, Spain. P. 509–517.

184. Molenaar A.A.A., Scarpas A., Liu X., Erkens S.M.J.G. Semi-circular bending test; simple but useful? *Association of Asphalt Paving Technologists. Journal*. 2002. T. 71. P. 794-815.

185. Safazadeh F., Romero P., Mohammad Asib A.S., VanFrank K. Methods to evaluate intermediate temperature properties of asphalt mixtures by the semi-circular bending (SCB) test. *Road Materials and Pavement Design*. 2022. T. 23. №. 7. P. 1694-1706.

186. Nsengiyumva G., You T., Kim Y.-R. Experimental Statistical Investigation of Testing Variables of a Semicircular Bending (SCB) Fracture Test Repeatability for Bituminous Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 45, No. 5, 2016, P. 1691–1701.

187. Zegeye E., Le J.-L., Turos M., Marasteanu M. Investigation of size effect in asphalt mixture fracture testing at low temperature. *Road Materials and Pavement Design*, 2012. 13(sup1), 88–101.

188. Mélanie G., Somé S. C., Feeser A. Évaluation de la fissuration des enrobés bitumineux selon la norme NF EN 12697-44. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*. 2017. P. 1-10.

189. Im S., Kim Y. R., Ban H. Rate-and temperature-dependent fracture characteristics of asphaltic paving mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*. 2013. Vol. 41, No. 2. P. 257-268.

190. AASHTO TP 105 Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB). 2020. 14 p.

191. EN 12697-44:2010 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test

192. Yang D., Karimi H.R., Aliha M.R.M. Comparison of testing method effects on cracking resistance of asphalt concrete mixtures. *Applied Sciences*. 2021. T. 11. №. 11. P. 1-17.

193. Arabani M., Ferdowsi B. Evaluating the semi-circular bending test for HMA mixtures. *IJE Transactions A: Basics*. 2009. Vol. 22, No. 1.

P. 47-58.

194. Zaumanis M., Valters A. Comparison of two low-temperature cracking tests for use in performance-based asphalt mixture design. *International Journal of Pavement Engineering*. 2020. T. 21. №. 12. P. 1461-1469.

195. Wagoner M.P., Buttlar W.G., Paulino G.H. Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture. *Experimental Mechanics*. 2005. 45(3), P. 270–277.

196. ASTM D7313-13 Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry. 2013. 8 p.

197. Wagoner M., Buttlar W., Paulino G., Blankenship P. Investigation of the Fracture Resistance of Hot-Mix Asphalt Concrete Using a Disk-Shaped Compact Tension Test. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2005. 1929, P. 183–192.

198. Blankenship P.B., Zeinali A. Evaluation of the DC (T) test in discerning the variations in cracking properties of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. 2017. T. 18. №. 1. P. 426-449.

199. Braham A.F., Buttlar W.G., Marasteanu M.O. Effect of Binder Type, Aggregate, and Mixture Composition on Fracture Energy of Hot-Mix Asphalt in Cold Climates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007. 2001(1), P. 102–109.

200. Arnold J.W., Behnia B., McGovern M.E., Hill B., Buttlar W.G., Reis H. Quantitative evaluation of low-temperature performance of sustainable asphalt pavements containing recycled asphalt shingles (RAS). *Construction and Building Materials*, 2014. 58, P. 1–8.

201. Stewart C.M., Reyes J.G., Garcia V.M. Comparison of fracture test standards for a super pave dense-graded hot mix asphalt. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017. № 169, P. 262–275.

202. Zhou F., Newcomb D., Hu S. Ruggedness of Laboratory Tests for Asphalt Mixture Cracking Resistance. №. NCHRP Project 09-57A. 2022. 114 p.

203. Stewart C.M., Oputa C.W., Garcia E. Effect of specimen thickness on the fracture resistance of hot mix asphalt in the disk-shaped compact tension (DCT) configuration. *Construction and Building Materials*, 2018. 160, P. 487–496.

204. Johanneck L. et al. DCT low temperature fracture testing pilot project. №. MN/RC 2015-20. 2015. 32 p.

205. Pérez-Jiménez F. et al. Fénix test: Development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures. *Transportation research record*. 2010. T. 2181. №. 1. P. 36-43.

206. Pérez-Jiménez F., Valdés G.A., Botella R., Miró R., Martínez A. Approach to fatigue performance using Fénix test for asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 2012. 26(1), P. 372–380.

207. Miró R., Martínez A.H., Pérez-Jiménez F., Botella R. Analysis of cracking resistance of bituminous mixtures using Fenix test. *Construction and Building Materials*, 2014. 59, P. 32–38.

208. Garcia-Gil L., Miró R., Pérez-Jiménez F.E. New approach to characterize cracking resistance of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 2018. 166, P. 50–58.

209. Pérez-Jiménez F., Botella R., Moon K.-H., Marasteanu M. Effect of load application rate and temperature on the fracture energy of asphalt mixtures. Fénix and semi-circular bending tests. *Construction and Building Materials*, 2013. 48, P. 1067–1071.

210. Garcia-Gil L., Miró R., Pérez-Jiménez F. Evaluating the Role of Aggregate Gradation on Cracking Performance of Asphalt Concrete for Thin Overlays. *Applied Sciences*, 2019. 9(4), 628. P. 1-13.

211. Valdés Vidal G., Miró Recasens R., Martínez Reguero A. Assessment of the adhesive capacity of asphalt binders in the aggregate-binder bonds by means of new methodology. *Revista de la Construcción*. 2015. T. 14. №. 1. P. 69-76.

212. Pérez-Jiménez F., Botella R., Martínez A.H., Miró R. Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures. *Construction and Building Materials*, 2013. 46, 193–202.

213. Germann F.P., Lytton R.L. Methodology for Predicting the Reflection Cracking Life of Asphalt Concrete Overlays, Res. Rpt. No. 207-5. Texas Trans. Inst., Texas Univ. 1979. 149 p.

214. Zhou F., Scullion T. Upgraded overlay tester and its application to characterize reflection cracking resistance of asphalt mixtures. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, №. FHWA/TX-04/0-4467-1. 2003. 44 p.

215. Walubita L.F., Faruk A.N.M., Das G., Tanvir H.A., Zhang J., Scullion T. The Overlay Tester: A Sensitivity Study to Improve Repeatability And Minimize Variability In The Test Results (Report FHWA/TX-12/0-6607-2). Texas Department of Transportation, Austin, TX. 2012. 153 p.

216. Zhou F., Scullion T. Overlay tester: A rapid performance related crack resistance test (FHWA/TX-05/0-4467-2). Texas Transportation Institute, College Station, Texas, 2005. 85 p.

217. Garcia V.M., Miramontes A., Garibay J., Abdallah I., Carrasco G., Lee R., Nazarian S. Alternative methodology for assessing cracking resistance of hot mix asphalt mixtures with overlay tester. *Road Materials and Pavement Design*, 2017. 18(sup4), 388–404.

218. Zhou F., Hu S., Scullion T. Integrated asphalt (overlay) mixture design, balancing rutting and cracking requirements. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System. №. FHWA/TX-06/0-5123-1. 2006. 162 p.

219. Ji R.Y., Mandal T., Yin H. Laboratory characterization of temperature induced reflection cracks. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020. T. 7. №. 5. P. 668-677.

220. Gu F., Zhang Y., Luo X., Luo R., Lytton R.L. Improved Methodology to Evaluate Fracture Properties of Warm-Mix Asphalt Using Overlay Test. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2015. 2506, P. 8–18.

221. Koh C., Lopp G., Roque R. Development of a dog-bone direct tension test (DBDT) for asphalt concrete. *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Two Volume Set. CRC Press, 2009. P. 601-612.

222. Koh C., Roque R. Use of Nonuniform Stress-State Tests to Determine Fracture Energy of Asphalt Mixtures Accurately. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2010. 2181(1), P. 55–66.

223. Roque R., Koh C., Chen Y., Sun X., Lopp G. Introduction of fracture resistance to the design and evaluation of open graded friction courses in Florida. University of Florida. 2009. 267 p.

224. Akentuna M., Kim S.S., Nazzal M., Abbas A.R., Arefin M.S. Study of the thermal stress development of asphalt mixtures using the Asphalt Concrete Cracking Device (ACCD). *Construction and Building Materials*, 2016. 114, P. 416–422.

225. Akentuna M. *Laboratory investigation of low-temperature performance of asphalt mixtures*. Doctoral dissertation, Ohio University. 2017. 198 p.

226. Kim S.S., Sargand S., Wargo A. *A simple test procedure for evaluating low temperature crack resistance of asphalt concrete*. Ohio Research

Institute for Transportation and the Environment. №. FHWA/OH-2009/5. 2009. 122 p.

227. Siavashani A.Z. *Development of indirect ring tension test for fracture characterization of asphalt mixtures*. Theses and Dissertations. Civil Engineering. University of Kentucky. 2014.

228. Stempihar J., Kaloush K. A notched disk crack propagation test for asphalt concrete. *MOJ Civil Eng.* 2017. T. 3. №. 5. P. 376-384..

229. Zhou F., Im S., Sun L., Scullion T. Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA. *Road Materials and Pavement Design*, 2017. 18(sup4), 405–427.

230. Zhou F., Im S., Hu S. Development and validation of the IDEAL cracking test. *Asphalt Mixtures*. 2019. T. 1. P. 1-21.

231. Li X., Marasteanu M., Iverson N., Labuz J. Observation of Crack Propagation in Asphalt Mixtures with Acoustic Emission. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2006. 1970, P. 171–177.

232. Buttlar W.G., Behnia B., Reis H.M. An acoustic emission-based test to determine asphalt binder and mixture embrittlement temperature. *Transportation Research Board*, 2011. 47 p.

233. Behnia B., Buttlar W., Reis H. Evaluation of Low-Temperature Cracking Performance of Asphalt Pavements Using Acoustic Emission: A Review. *Applied Sciences*, 2018. 8(2), 306. P. 1-20.

234. Behnia B. Application of Acoustic Emissions Technique in Assessment of Cracking Performance of Asphalt Pavement Materials. In *Acoustic Emission-New Perspectives and Applications*. IntechOpen, 2021. P. 1–14.

235. Behnia B., Buttlar W.G., Reis H., Apeageye A.K. Determining the embrittlement temperature of asphalt binders using an acoustic emission approach. In *Structural Materials Technology 2010*. p. 318-325.

236. Dave E.V., Behnia B., Ahmed S., Buttlar W.G., Reis H. Low temperature fracture evaluation of asphalt mixtures using mechanical testing and acoustic emissions techniques. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2011. 80. P. 193-225.

237. Apeageyei A.K., Buttlar W.G., Reis H. Assessment of low-temperature embrittlement of asphalt binders using an acoustic emission approach. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2009. T. 51. №. 3. P. 129-136.

238. Yang K., Li D., He Z., Zhou H., Li J. Study on acoustic emission

characteristics of low-temperature asphalt concrete cracking damage. *Materials*, 2021. 14(4), 881. P. 1-13.

239. Пиріг Я.І. Огляд вітчизняних методів оцінки низькотемпературних властивостей асфальтобетонів. *Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference*. Varna, Bulgaria. 2023. P. 397-403.

240. Saal R.N.J., Labout J.W.A. The relation between absolute viscosity and penetration of asphaltic bitumens. *Physics*, 1936. 7(11), P. 408-412.

241. Rigden P.J., Lee A.R. The Brittle fracture of tars and bitumens. *Journal of Applied Chemistry*, 1953. Vol. 3, P. 62-70.

242. Hunter R.N., Self A., Read J. *The Shell Bitumen Handbook*. Sixth edition. London: ICE Publishing. 2015. 780 p.

243. Heuckelom W. An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the air of their mechanical properties. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* 1973. T. 42. P. 67-98.

244. Besamusca J.Th.M., Willemsen A.J., Van de Ven M.F.C. A plea for the introduction of performance related bitumen specificaton. In view of limitations of the penetration grading system. *Road materials and pavement design*. 2010. Vol. 11. P. 355-377.

245. Airey G. D. Viscosity-Temperature Effects of Polymer Modification as Depicted by Heuckelom's Bitumen Test Data Chart. *International Journal of Pavement Engineering*. 2001. T. 2. №. 4. P. 223-242.

246. Dongre R., Sharma M. G., Anderson D. A. Development of fracture criterion for asphalt mixes at low temperatures. *Transportation Research Record*. 1989. T. 1228. P. 94-105.

247. Lei B. et al. Performance of asphalt mortar with recycled concrete powder under different filler-to-asphalt weight ratios. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. № 18. P. 1-18.

248. Fan X. et al. Improvement of low-temperature performance of Buton rock asphalt composite modified asphalt by adding styrene-butadiene rubber. *Materials*. 2019. T. 12. №. 15. P. 1-19.

249. Zhou P. et al. Study on performance damage and mechanism analysis of asphalt under action of chloride salt erosion. *Materials*. 2021. T. 14. №. 11. P. 1-14.

250. Weizhen S. et al. The study of producing SBS modified asphalt by using liaoshu high viscous crude oil. *Petroleum science and technology*. 2001. T. 19. №. 9-10. P. 1187-1196.

251. Rui-kun D., Li-jun S. U. N. Low temperature susceptibility indexes of asphalt binder with different aging degree. *China Journal of Highway and Transport*. 2006. Т. 19. №. 4. Р. 1-6.

252. Pechenyi B.G., Fryazhinov V.V., Akhmetova R.S. Relationship between penetration and breaking point of asphalts. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 1980. Т. 16. Р. 414-417.

253. Деуджа Х.С., Золотарьов В.О. Визначення температури крихкості бітуму розрахунковим методом. *Збірник праць з технічної хімії*. Київ, 1997. С. 395-398.

254. Пиріг Я.І. Встановлення кількісних співвідношень між технічними та технологічними властивостями дорожніх бітумів: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харків, 2013. 254 с.

255. Пиріг Я.І. Розрахунковий метод оцінки температури крихкості дорожніх бітумів. *Збірник трудів всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології будівництва й експлуатації автомобільних доріг»*, 3-4 листопада 2016 р. С. 162-167.

*Наукове видання*

ПИРИГ Ян Іванович

**НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ВЛАСТИВОСТІ БІТУМНИХ  
В'ЯЖУЧИХ ТА АСФАЛЬТОБЕТОНІВ: МЕТОДИ  
ВИЗНАЧЕННЯ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ**

Монографія

В авторській редакції