УДК 691.161

# РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНІВ, МОДИФІКОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНОЮ ДОБАВКОЮ НА ОСНОВІ ВТОРИННОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ ПОЛІДОМ

**Кіщинський С.В.,** *начальник центру асфальтобетонів та органічних в'яжучих*

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»)*

**Вступ**

Асфальтобетони, модифіковані полімерами, відзначаються високими показниками міцності в усьому діапазоні експлуатаційних температур, а також збільшеною водо- та морозостійкістю. Влаштовані з таких асфальтобетонів покриття є більш стійкими до дії тривалих транспортних навантажень та несприятливих погодних умов. Як наслідок, на них набагато менше виникають різні види деформацій та руйнувань: колії, зсуви, низькотемпературні тріщини, тріщини від втоми матеріалу, вибоїни та ями.

Основною причиною, що стримує широке розповсюдження полімер асфальтобетонів є висока вартість полімерів. Із дешевих полімерних матеріалів, що відомі в Україні, найбільш придатними для суміщення з бітумом є вторинний поліетилен – продукт переробки відходів виробів з поліетилену високого тиску. Вторинний поліетилен підвищує в'язкість та теплостійкість бітуму, що робить його придатною основою для створення дешевого полімерного модифікатора бітуму та асфальтобетону.

Розробка більш дешевого ніж закордонні аналоги модифікатора на основі вторинного поліетилену Полідом дозволить збільшити обсяги використання полімерасфальтобетонів і тим самим поліпшити загальний стан покриттів мережі автомобільних доріг України. Технологічною перевагою модифікатора Полідом є те, що він може вводитись як у бітум, так і безпосередньо в асфальтобетонну суміш під час її приготування.

**Аналіз публікацій**

Вторинний поліетилен є достатньо жорстким матеріалом в аспекті модифікації бітуму. Використання поліетилену забезпечує істотну зміну реологічних властивостей модифікованого бітуму, що доведено дослідженнями [1], [2], [3]. Згідно наведеним в [1 - 3] даним, поліетилен може значно змінювати реологічні властивості бітуму та забезпечити високий опір колієутворенню, деформаціям, втомі, а також розширити інтервал температурної працездатності асфальтобетону.

Існують дослідження [4], орієнтовані на визначення можливості використання полімерів типу СЕБС, СБР, НР спільно із поліетиленом для надання модифікованому бітуму переваг обох модифікаторів.

Додаткові дослідження [5] вказують на те, що використання хімічно активних добавок може забезпечити достатню сумісність поліетилену із бітумом, що гарантує відносну стабільність отриманого в'яжучого.

У Франції відходи поліетилену додають в асфальтобетони в кількості 0,4 – 1,0% від маси мінеральної частини з метою армування сумішей, підвищення в'язкості в'яжучого, заповнення порожнин мінерального остову. Як структурувальна добавка відходи поліетилену збільшують

жорсткість та знижують термочутливість асфальтобетону при високих температурах, таким чином підвищуючи зсувостійкість покриттів [6, 7, 8].

Компанія Iterchimica (Італія) розробила і пропонує для модифікації асфальтобетону добавку Superplast, яка є аморфним поліолефіном. Випробування показали, що введення Superplast суттєво покращує фізико механічні характеристики асфальтобетону [9].

У ДП «ДерждорНДІ» за участю автора було розроблено композицію, основу якої складав вторинний поліетилен, до нього додавалась мінімально необхідна кількість більш ефективних спеціалізованих модифікаторів: термоеластопластів типу СБС марок Kraton D 1101, Calpren 501, ДСТ-30-01 та латексів – аніонного Butonal NS 104, катіонного Butonal NS 198. Для кращого суміщення як самих полімерів між собою так і всієї композиції з бітумом додавались пластифікатори нафтового походження: нафтовий гудрон, пластифікатор шинний (ПШ-1), нафтові екстракти тощо.

Кращі результати були досягнуті при використанні латексів серії Butonal. Виходячи з критерію мінімізації вартості продукту при одночасній відповідності модифікованого бітуму вимогам ДСТУ Б В.2.7-135 «Бітуми дорожні, модифіковані полімерами», було прийнято таке співвідношення компонентів: вторинний поліетилен від 60% до 70%, латекс – від 20–30%, пластифікатор – 10–15%. Така композиція отримала назву Полідом. Раціональний вміст композицій при цьому в бітумі становив 3–4%.

Модифікація бітуму Полідомом підвищує в’язкість, когезійну міцність та теплостійкість бітуму, надає йому високої еластичності та покращує низькотемпературні характеристики в’яжучого (збільшує розтяжність при 0°С та залишає температуру крихкості на рівні вихідного менш в’язкого бітуму) [10-14].

Приготування Полідому здійснюється шляхом суміщення компонентів вторинного поліетилену, латексу та за необхідності індустріального масла в спеціальних агломераторах або екструдерах з подальшою грануляцією гомогенізованого розплаву [15].

**Постановка проблеми**

Завдяки покращеним характеристикам бітуму асфальтобетон з Полідомом має більшу міцність та теплостійкість, відзначається підвищеним опором низькотемпературному та втомному тріщиноутворенню.

Разом з цим стандартні випробування відповідно ДСТУ Б В.2.7-319 не дають достатньої інформації щодо поведінки асфальтобетону в шарах дорожнього одягу. Для отримання такої інформації треба визначити реологічні показники, які розкривають сутність релаксаційних процесів, що відбуваються в матеріалі при деформуванні.

**Мета та постановка задачі**

Метою дослідження є встановлення впливу композиційної добавки на основі вторинного поліетилену Полідом на реологічні властивості асфальтобетону, що дає можливість більш повно оцінити позитивну роль добавки у збільшенні строків служби асфальтобетонних покриттів.

Було виконано комплекс досліджень бітумів, модифікованих композиційним полімером Полідом, полімерасфальтобетонів на основі цього бітуму та полімерасфальтобетонів, отриманих прямим введенням полімеру в асфальтобетонну суміш. Дослідження включали експериментальні роботи з визначення реологічних властивостей при циклічному (синосоїдальному) деформуванні.

Методологічний принцип дослідження полягав у порівняні властивостей асфальтобетону на вихідному бітумі та бітумах, модифікованих різним вмістом добавки Полідом. Крім цього, властивості цих асфальтобетонів порівнювали з властивостями полімерасфальтобетону, отриманого введенням полімеру безпосередньо в мішалку.

**Основна частина**

*Матеріали, прийняті для досліджень*

В дослідженні було використано найбільш поширені в Україні бітуми, отримані за технологією окислення з гудрону. Марка вихідного бітуму БНД 90/130, марка еквіпенетраційного бітуму БНД 60/90. При введені 3% композиційної полімерної добавки Полідом було отримано модифікований бітум марки БМПА 60/90-53.

Композиційна полімерна добавка Полідом представлена крихтами і складається з вторинного поліетилену, синтетичного латексу Butonal NS 104, нафтових екстрактів, індустріальних масел та інших нафтопродуктів.

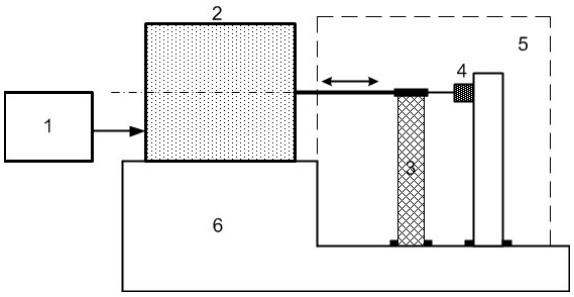
Для визначення впливу добавки Полідом на властивості асфальтобетону був обраний дрібнозернистий тип «Б», який використовується у всіх дорожньо-кліматичних зонах України та поєднує оптимальну кількість щебеню з оптимальною товщиною плівки в'яжучого. Зерновий склад для такої суміші розраховували відповідно до рекомендацій стандарту ДСТУ Б В.2.7-119 таким чином, щоб отримані значення повних залишків на ситах були наближені до середини інтервалів, нормованих стандартом.

Кількість в'яжучого у суміші визначалася за комплексом стандартних показників. Оптимальна кількість бітуму зазвичай приймається такою, що відповідає максимальній міцності асфальтобетону. При цьому мають бути забезпечені межі водонасичення, передбачені стандартом.

За залежностями міцності на стиск при 50°С прийнято наступний вміст в'яжучого в асфальтобетонних сумішах: для бітуму БНД 90/130 – 4,6%; БНД 60/90 – 4,8%; БМПА 60/90-53 з 3% добавки Полідом – 5,0%.

*Методи, прийняті для досліджень*

Визначення реологічних характеристик здійснювали на спеціальному вібростенді [16]. На вібростенді реалізується наступна схема випробування асфальтобетону при динамічному деформуванні (рисунок 1).




*1 – генератор гармонійних сигналів; 2 – віброперетворювач; 3 – асфальтобетонний зразок; 4 – датчик переміщення віброапаратури; 5 – термокамера; 6 – жорсткий фундамент*

*Рисунок 1 – Схема вібростенда*

Консольно-закріплений зразок асфальтобетонної балки (3) циклічно згинається від дії сили штока віброперетворювача (2). Віброперетворювач реалізує механічне навантаження різної форми, частоти і амплітуди, яку задає генератор гармонійних сигналів (1). Прогин консолі зразка фіксується датчиком переміщення віброапаратури (4). При такій схемі випробувань виникають примусові коливання асфальтобетонного зразка. Частоти деформування на вібростенді можна змінювати від 0,01 Гц до 40 Гц. Вважається, що нижня межа відповідає статичному впливу автомобіля на покриття дороги, верхня – динамічного навантаження автомобіля, який рухається зі швидкістю понад 100 км/год.

Для досліджень використовувалась прямокутна балка розміром 4×4×25 см, яку виготовляють із асфальтобетонної суміші у спеціальних формах.

Зусилля розраховується на підставі встановленої в процесі тарування прямо пропорційної залежності між амплітудою струму і зусиллям, що розвивається котушкою збудження. Паралельно записується синусоїдальний електричний сигнал, що надходить від моста опору, утвореного тензодатчиками на твердому перехідному динамометрі, розташованому між штоком і закладною деталлю. Сигнал, посилений тензопідсилювачем, також знімається з осцилографа Н-115 і може служити для встановлення кута зрушення фаз між напругою і деформацією.

Деформації виміряються за допомогою вібровимірювальної апаратури ВІ5-6МА, що включає в себе індуктивний датчик горизонтальних вібрацій, підсилювач, блок живлення, джерело постійного струму.

Для забезпечення випробувань при фіксованих температурах зразок розміщено у термостаті.

Основні параметри вібростенду:

- максимальне зусилля – 100 Н;
- температура випробування – 30…+50ºС;
- чутливість системи замірювання деформацій – 4,1 мкм/мм осц.;
- жорсткість системи підвісок – 2 кН/м;
- довжина зразка – 25,0 см.

Для зразків у вигляді балочок розрахунок комплексного динамічного модуля пружності здійснювали за формулою:

$$E^* = \frac{4l^3}{bh^3}\left(\frac{P}{y} - C\right),$$

де $l, b, h$ – розміри зразка;

$P$ – зусилля;

$y$ – деформація;

$C$ – загальна жорсткість системи підвісок.

Відносний прогин визначався за формулою: $\varepsilon = y / l$

Методика випробувань передбачає визначення граничних значень деформацій та напружень, що є границею області лінійного деформування. Ці значення визначали за залежністю напруження від деформації, а саме шляхом встановлення точки, з якої починається порушення пропорційності між напруженням та деформацією. При цьому нормоване відхилення приймалось близьким до 10%.

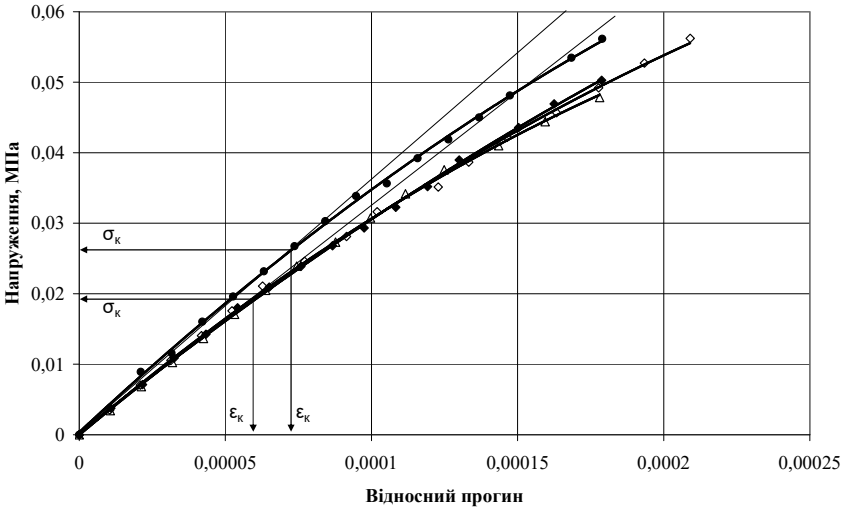
*Експериментальні дослідження*

Асфальтобетон і полімерасфальтобетон не належать до істинно пружних систем. Однак, виходячи із умов розрахунку дорожніх одягів, при їх дослідженнях насамперед необхідно встановити зону лінійної в'язкопружності. Така фізична лінійність вказує, що в матеріалі розвиваються тільки зворотні деформації, а відношення між напруженням і деформацією є незмінною величиною, яка не залежить від напружено-деформованого стану.

Найбільш простим і поширеним способом визначення області лінійної в'язкопружності є побудова графічних залежностей діючого напруження від деформації. Основні показники переходу із зони лінійності в зону нелінійності – критичне напруження ($\sigma_{кр}$) і критична деформація ($\varepsilon_{кр}$).

За допомогою такого способу можна отримати реологічні характеристики асфальтобетону, які не залежать від діючої величини навантаження та зробити коректні порівняння властивостей різних асфальтобетонів. Крім того, зона лінійної в'язкопружності є критерієм якості асфальтобетону (полімерасфальтобетону), що характеризує його

експлуатаційні властивості. Залежності такого виду для матеріалів, які досліджувалися, представлено на рисунку 2.




В'яжучі: ◊ – БНД 90/130; ◆– БНД 90/130 + 3% Полідом; ● – БНД 90/130 + 4% Полідом у суміші; Δ – БНД 60/90

*Рисунок 2 – Залежність напруження-прогин асфальтобетонів та полімерасфальтобетонів за температури 20°С та частоти 0,5 Гц*

Наведені залежності свідчать, що модифікація бітуму добавкою Полідом практично не змінює зону лінійної в'язкопружності. Це узгоджується з даними по модифікації бітуму полімером Кратон в кількості близько 3%, коли різниця зони лінійності між асфальтобетоном і полімерасфальтобетоном на в'яжучих однакової консистенції неістотна. В той же час, введення добавки Полідом безпосередньо у суміш збільшує модуль пружності асфальтобетону при обраній температурі випробування 20°С і частоті деформування 0,5 Гц, а також збільшує значення критичних напружень ($\sigma_{кр}$) з 0,019 МПа до 0,026 МПа, а критичний прогин ($\varepsilon_{кр}$) з $0{,}60 \cdot 10^{-3}$ до $0{,}75 \cdot 10^{-3}$. Тобто використання добавки Полідом у суміші збільшує $\sigma_к$ на 37%, а $\varepsilon_{кр}$ на 25%. Як і для інших полімерів, модифікувальна активність проявляється в більшій мірі по відношенню до критичних напружень ніж до критичних прогинів (деформацій). Це дозволяє припустити більшу ефективність використання полімерасфальтобетону по відношенню до зростання транспортних навантажень.

Для аналізу деформаційної поведінки полімерасфальтобетону вихідними даними є частотні залежності комплексного динамічного модуля пружності в діапазоні температур від - 20 до + 50ºС і області частот від 0,01 до 40 Гц. При значеннях частот коливань, близьких до (20 - 40) Гц та, в залежності від температури, спостерігаються резонансні явища, котрі впливають на результати вимірювань. Внаслідок цього верхні частоти обмежувалися значенням 10 Гц.

Вимірювання проводили при різних рівнях навантаження, потім визначались значення комплексного динамічного модуля пружності з урахуванням того, що між напруженням та деформацією існує пряма пропорційна залежність. Тобто, значення комплексного динамічного модуля пружності визначали для області лінійної в'язко-пружності. Результати вимірювань комплексних динамічних модулів пружності для асфальтобетонів та полімерасфальтобетонів, наведено в таблицях 2 - 5.

**Таблиця 2** – Значення комплексного динамічного модуля пружності Е* асфальтобетону на бітумі БНД 60/90 (1)

| f, Гц | Е*, МПа при температурах, °С | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 35 | 50 |
| 0,01 | 5515 | 4055 | 2069 | 1280 | 745 | 199 | 94 |
| | 5661 | 4055 | 2740 | 1353 | 745 | 173 | 93 |
| 0,05 | 6099 | 5077 | 3033 | 1572 | 1004 | 288 | 121 |
| | 5223 | 5077 | 3106 | 1645 | 1004 | 258 | 129 |
| 0,1 | 7560 | 5515 | 3179 | 1864 | 1134 | 325 | 139 |
| | 7414 | 5515 | 3252 | 1864 | 1065 | 312 | 141 |
| 0,5 | 8144 | 6392 | 4201 | 2594 | 1426 | 515 | 212 |
| | 8290 | 6392 | 4201 | 2594 | 1426 | 485 | 225 |
| 1 | 8436 | 6684 | 4785 | 2887 | 1718 | 685 | 225 |
| | 8582 | 6684 | 4858 | 2887 | 1645 | 589 | 235 |
| 5 | 9020 | 7268 | 5077 | 3471 | 2156 | 900 | 372 |
| | 9020 | 7268 | 5223 | 3471 | 2302 | 745 | 355 |
| 10 | 9312 | 7560 | 5661 | 4055 | 2302 | 900 | 390 |
| | 9020 | 7560 | 5661 | 3617 | 2375 | 815 | 378 |

**Таблиця 3** – Значення комплексного динамічного модуля пружності Е* асфальтобетону на бітумі БНД 90/130 (2)

| f, Гц | Е*, МПа при температурах, °С | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 35 | 50 |
| 0,01 | 4911 | 4293 | 2128 | 1200 | 513 | 144 | 101 |
| | 4911 | 4293 | 2128 | 1200 | 513 | 154 | 93 |
| 0,05 | 5529 | 4911 | 2746 | 1510 | 745 | 211 | 129 |
| | 5684 | 4911 | 2746 | 1587 | 725 | 224 | 123 |
| 0,1 | 6148 | 5220 | 3056 | 1819 | 891 | 283 | 150 |
| | 6457 | 5220 | 3056 | 1742 | 863 | 273 | 134 |
| 0,5 | 7385 | 6457 | 3983 | 2437 | 1313 | 413 | 189 |
| | 7385 | 6457 | 3983 | 2437 | 1200 | 394 | 189 |
| 1 | 8003 | 7075 | 4293 | 2901 | 1819 | 546 | 211 |
| | 8003 | 7075 | 4447 | 2901 | 1587 | 484 | 224 |
| 5 | 8621 | 7075 | 5529 | 3674 | 2437 | 725 | 305 |
| | 8621 | 7075 | 5529 | 3674 | 2360 | 725 | 317 |
| 10 | 8621 | 7385 | 5839 | 3829 | 2592 | 670 | 273 |
| | 8621 | 7385 | 5839 | 3829 | 2515 | 725 | 305 |

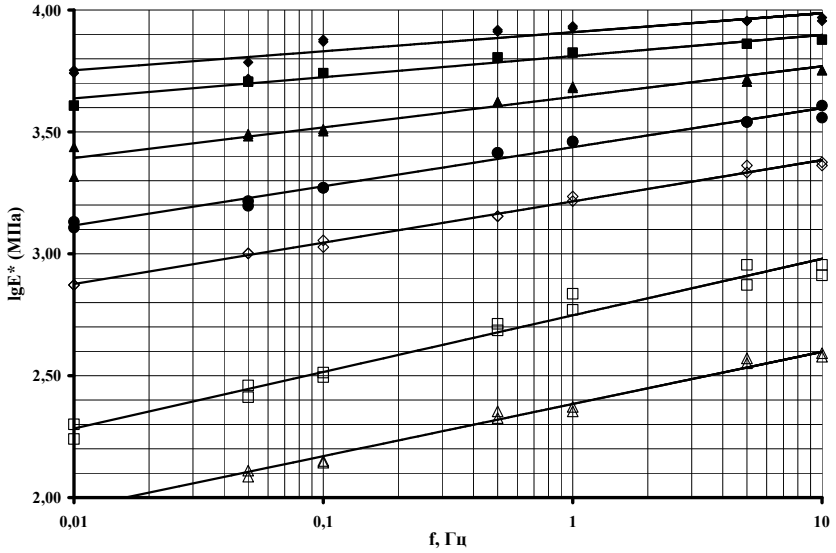
**Таблиця 4** – Значення комплексного динамічного модуля пружності E* полімерасфальтобетону на бітумі БНД 90/130, модифікованому 3% добавкою Полідом (3)

| f, Гц | E*, МПа при температурах, °С | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 35 | 50 |
| 0,01 | 5831 | 3815 | 2223 | 1170 | 646 | 237 | 134 |
| | 5831 | 3816 | 2223 | 1185 | 679 | 221 | 125 |
| 0,05 | 6672 | 4490 | 2643 | 1470 | 874 | 310 | 172 |
| | 6502 | 4532 | 2643 | 1427 | 877 | 302 | 164 |
| 0,1 | 7007 | 4912 | 2896 | 1888 | 943 | 367 | 195 |
| | 6837 | 4827 | 2853 | 1720 | 984 | 358 | 183 |
| 0,5 | 7843 | 5831 | 3484 | 2223 | 1385 | 544 | 262 |
| | 7843 | 5916 | 3484 | 2182 | 1385 | 502 | 257 |
| 1 | 8261 | 6254 | 4070 | 2476 | 1720 | 611 | 294 |
| | 8261 | 6254 | 4070 | 2476 | 1552 | 574 | 292 |
| 5 | 8849 | 6841 | 4573 | 3148 | 2055 | 790 | 375 |
| | 8934 | 6926 | 4573 | 3148 | 2055 | 830 | 385 |
| 10 | 9102 | 7512 | 4995 | 3314 | 2140 | 860 | 385 |
| | 9102 | 7427 | 4910 | 3316 | 2140 | 830 | 372 |

**Таблиця 5** – Значення комплексного динамічного модуля пружності E* асфальтополімербетону з 4% добавкою Полідом введеною у суміш (4)

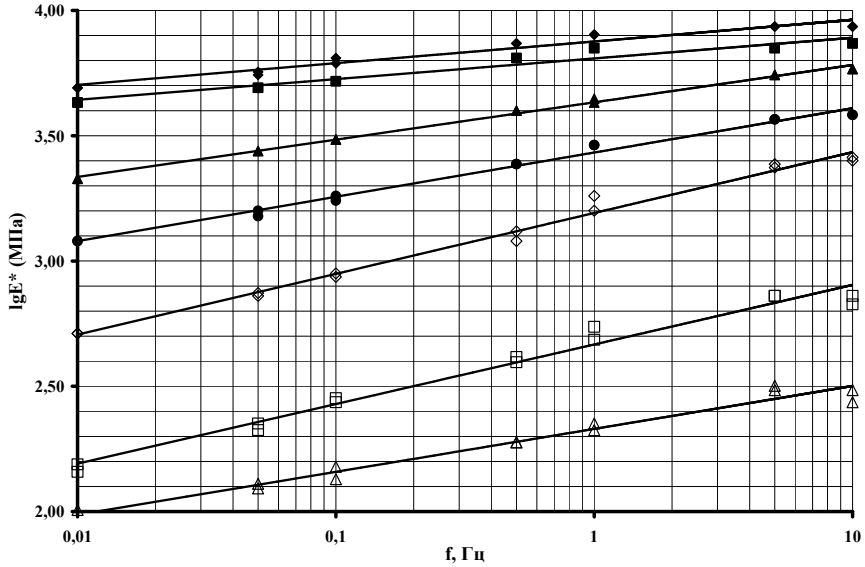
| f, Гц | E*, МПа при температурах, °С | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 35 | 50 |
| 0,01 | 5313 | 3640 | 2302 | 1490 | 784 | 285 | 171 |
| | 5313 | 3724 | 2302 | 1388 | 784 | 267 | 163 |
| 0,05 | 5982 | 4309 | 2971 | 1633 | 934 | 389 | 216 |
| | 6149 | 4309 | 2971 | 1633 | 980 | 372 | 188 |
| 0,1 | 6651 | 4644 | 3139 | 1800 | 1031 | 447 | 228 |
| | 6651 | 4393 | 3139 | 1800 | 1031 | 426 | 228 |
| 0,5 | 7320 | 5982 | 3808 | 2302 | 1466 | 630 | 318 |
| | 7320 | 5647 | 3975 | 2302 | 1466 | 630 | 306 |
| 1 | 7989 | 5982 | 4644 | 2637 | 1633 | 725 | 357 |
| | 7989 | 6149 | 4477 | 2804 | 1633 | 725 | 330 |
| 5 | 8323 | 6316 | 4978 | 3473 | 2302 | 1031 | 496 |
| | 8323 | 6484 | 4978 | 3473 | 2302 | 1031 | 447 |
| 10 | 8323 | 6651 | 5313 | 3640 | 2470 | 1031 | 496 |
| | 8323 | 6651 | 5313 | 3473 | 2637 | 1031 | 470 |

За всіх температур в області частот 0,01…10 Гц зміна комплексного динамічного модуля пружності як для асфальтобетонів, так і для полімерасфальтобетонів в логарифмічних координатах має прямолінійну залежність (рисунок 3 – 6).



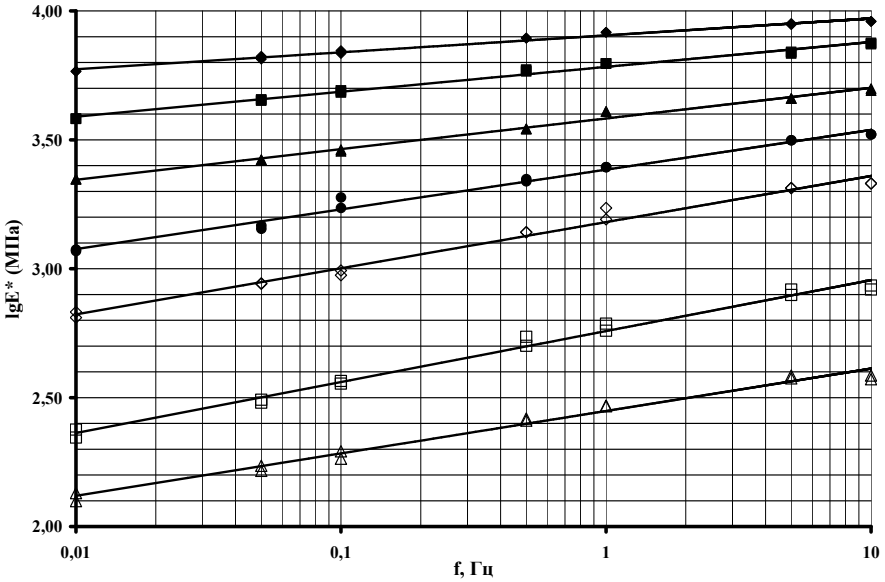

Температура, °С: △ – 50 ºС; □ – 35 ºС; ◊ – 20 ºС; ● – 10 ºС; ▲ – 0 ºС; ■ – мінус 10 ºС; ◆ – мінус 20

*Рисунок 3 – Температурно-частотні залежності комплексного динамічного модуля пружності Е* асфальтобетону на еквіпенетраційному бітумі*



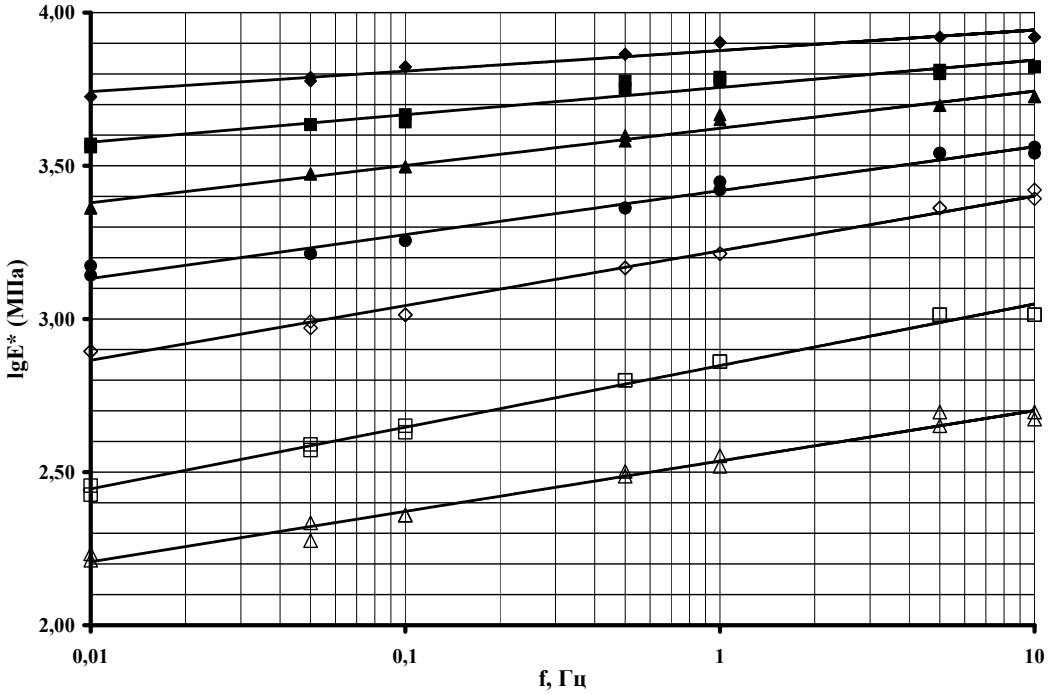

Температура, °С: △ – 50 ºС; □ – 35 ºС; ◊ – 20 ºС; ● – 10 ºС; ▲ – 0 ºС; ■ – мінус 10 ºС; ◆ – мінус 20

*Рисунок 4 – Температурно-частотні залежності комплексного динамічного модуля пружності Е* асфальтобетону на вихідному бітумі*




Температура, °С: △ – 50 ºС; □ – 35 ºС; ◊ – 20 ºС; ● – 10 ºС; ▲ – 0 ºС;
■ – мінус 10 ºС; ◆ – мінус 20

*Рисунок 5 – Температурно-частотні залежності комплексного динамічного модуля пружності E* полімерасфальтобетону з БМП*




Температура, °С: △ – 50 ºС; □ – 35 ºС; ◊ – 20 ºС; ● – 10 ºС; ▲ – 0 ºС;
■ – мінус 10 ºС; ◆ – мінус 20

*Рисунок 6 – Температурно-частотні залежності комплексного динамічного модуля пружності E* полімерасфальтобетону при введенні полімеру в суміш*

Такі залежності підпорядковуються ступеневому рівнянню:

$$\frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^m,$$

де, $E_1$ – комплексний динамічний модуль пружності при частоті деформування $f_1$,

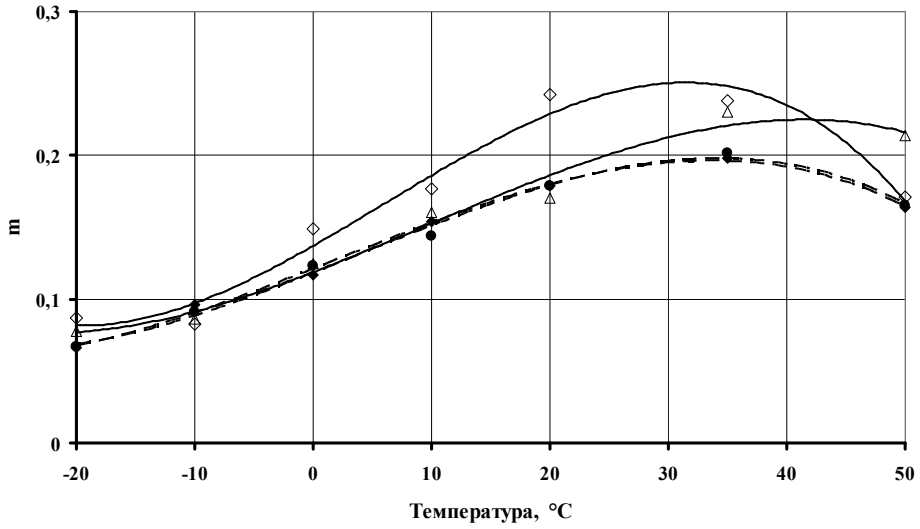
$E_2$ – комплексний динамічний модуль пружності при частоті деформування $f_2$,

$m$ – показник ступеня (показник пластичності).

Значення комплексного динамічного модуля пружності асфальтобетону (полімерасфальтобетону) зростає з підвищенням частоти деформування та з пониженням температури випробування. Зі зниженням температури випробування зменшується кут нахилу частотної залежності даного модуля пружності. Ці залежності було використано для визначення коефіцієнтів пластичності.

Порівняння полімерасфальтобетону з асфальтобетоном свідчить, що при однакових додатних температурах і частотах деформування значення комплексного динамічного модуля пружності більше у полімерасфальтобетону, що обумовлено посилювальною дією полімеру. Зі зниженням температури ця дія зменшується.

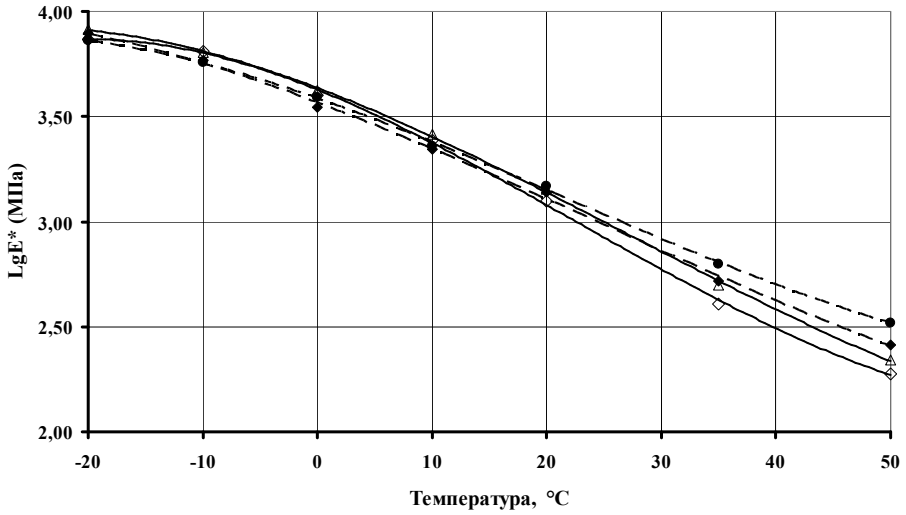
На рисунку 7 представлено температурні залежності показника пластичності для всіх чотирьох досліджених систем. Всі залежності мають максимум, який зміщується в сторону високих температур при збільшенні в'язкості бітуму для асфальтобетонів та використання полімерного модифікатора у полімерасфальтобетоні. Такий характер залежностей зміни показника пластичності асфальтобетону може пояснюватися релаксаційним механізмом деформування, що обумовлюється співвідношенням інтенсивності релаксаційних процесів і механічного впливу і свідчить про більшу стійкість полімерасфальтобетонів на основі добавки Полідом при підвищених температурах.




Використовувані в'яжучі: ◊ – БНД 90/130; ◆– БНД 90/130 + 3% Полідом;
● – БНД 90/130 + 4% Полідом у суміші; Δ – БНД 60/90

*Рисунок 7 – Температурна залежність показника пластичності асфальтобетону (—) та полімерасфальтобетону (---)*

Введення полімеру як у бітум, так і безпосередньо в асфальтобетонну суміш зменшує максимальні значення показника пластичності з 0,22-0,23 (для асфальтобетону) до 0,19-0,20 (для полімерасфальтобетону). Це властиво асфальтобетонам на бітумах більшої в'язкості. Тобто, додавання полімерного модифікатора в бітум приводить до підвищення в'язкості в'яжучого і, таким чином, до меншої інтенсивності зміни комплексного динамічного модуля пружності з частотою при однакових температурах. Для визначення ролі полімерного модифікатора також були встановлені температурні залежності комплексного динамічного модуля пружності. Ці залежності (рисунок 8) мають S-подібний характер. На них можна виділити три характерні ділянки, які відповідають крихкому, в'язкопружньому та в'язкопластичному стану. При низьких температурах час релаксації матеріалу значно більше часу дії навантаження, що призводить до склоподібного стану. В області високих температур релаксаційні процеси встигають завершитися, і матеріал проявляє в'язко-пластичну поведінку. В цих зонах зміна комплексного динамічного модуля пружності невелика на відміну від зони в'язко-пружності, де час релаксації близький, до часу дії навантаження.



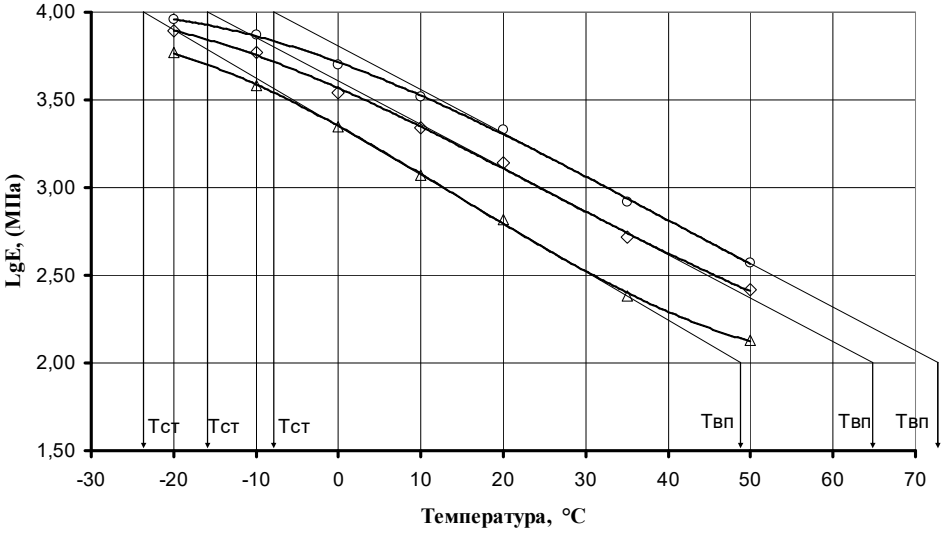

Використовувані в'яжучі: ◊ – БНД 90/130; ◆– БНД 90/130 + 3% Полідом;
● – БНД 90/130 + 4% Полідом у суміші; Δ – БНД 60/90

*Рисунок 8 – Температурні залежності комплексного динамічного модуля пружності асфальтобетону (—) та полімерасфальтобетону (---) при f=0,5 Гц*

Звідси знаходять три параметри: показник температурної чутливості в зоні в'язкопружної поведінки, що є відношенням прирощення логарифма комплексного динамічного модуля пружності на градус ( $\Delta LgE^* / \Delta T$ ); умовна температура переходу в склоподібний стан ($T_{ст}$), що відповідає досягненню модулем значення $10^4$ МПа; умовна температура переходу до в'язкопластичного стану ($T_{вп}$), що відповідає досягненню модулем значення $10^2$ МПа (рисунок 9 та 10).

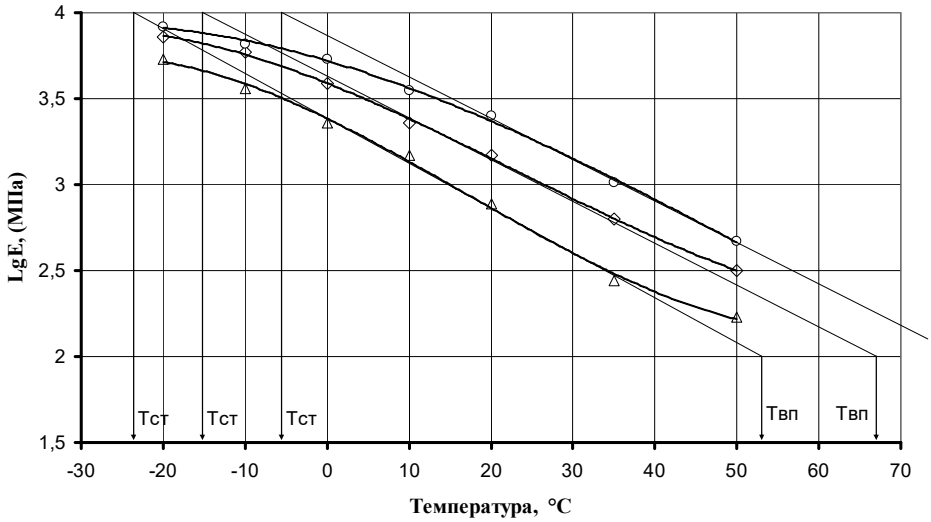
Температура склування асфальтобетону є кінетичною характеристикою, вона залежить як від консистенції в'яжучого, складу асфальтобетону так і від швидкості охолодження та швидкості механічного навантаження. Зазвичай для асфальтобетону збільшення частоти

деформування в 10 разів збільшує температуру склування на (5 - 7) °С. Для досліджених асфальтобетонів таке збільшення становить (4 - 5) °С, а для полімерасфальтобетонів (5 - 6) °С (рисунок 11). Це доводить, що існує єдиний принцип деформаційної поведінки бітумів і асфальтобетонів, бітумів, модифікованих полімерами, і полімерасфальтобетонів.



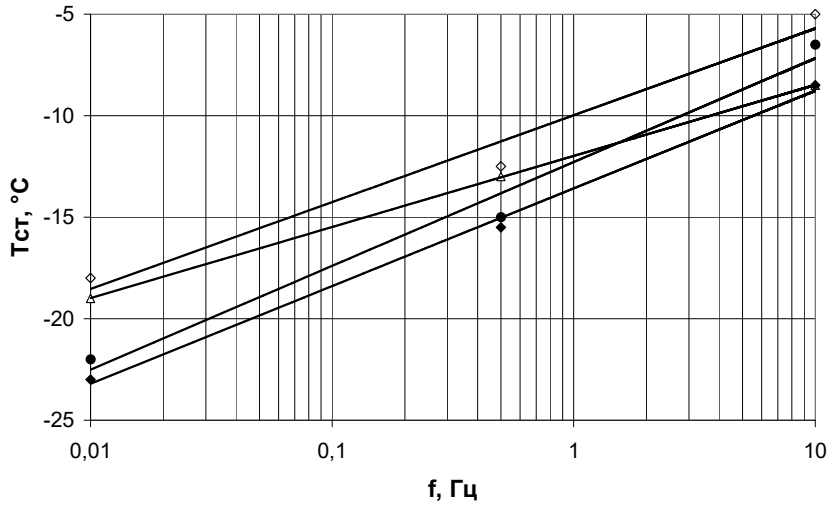

Частота деформування, Гц: Δ – 0,01; ◊ – 0,5; ○ – 10

*Рисунок 9 – Температурні залежності комплексного динамічного модуля пружності асфальтополімербетону на модифікованому бітумі при різних частотах деформування*




Частота деформування, Гц: Δ – 0,01; ◊ – 0,5; ○ – 10

*Рисунок 10 – Температурні залежності комплексного динамічного модуля пружності полімерасфальтобетону (введення полімеру в суміш) при різних частотах деформування*




Використовувані в'яжучі: ◊ – БНД 90/130; ◆– БНД 90/130 + 3% Полідом;
● – БНД 90/130 + 4% Полідом у суміші; Δ – БНД 60/90

*Рисунок 11 – Залежність температури склування асфальтобетону від частоти деформування*

Отримані значення реологічних показників асфальтобетону і полімерасфальтобетону наведено у таблиці 6. Аналіз цих даних показує, що температура переходу в склоподібний стан полімерасфальтобетону знижується на (2,0 - 2,5) °С в порівнянні з асфальтобетоном на бітумі однакової консистенції (БНД 60/90) і залишається практично незмінною по відношенню до асфальтобетону на вихідному менш в'язкому бітумі (БНД 90/130).

Температури склування асфальтобетону, як і температура крихкості бітуму при модифікації малим вмістом полімеру (до 4% термоеластопласту), залежить від структури та властивостей мальтенової складової вихідного бітуму. В даному випадку при модифікації незмінність температур склування полімерасфальтобетону і асфальтобетону та температур крихкості модифікованого бітуму та менш в'язкого вихідного бітуму можна пояснити тим, що поглинання Полідомом певної частини мальтенових фракцій компенсується більш низькою температурою склування полімеру. Крім того, завдяки полімеру бітум частково зберігає пластичність за низьких температур, про що свідчить збільшення розтяжності в'яжучого при 0°С. Разом з цим температура склування полімерасфальтобетонів є нижчою ніж асфальтобетонів на еквіпенетраційному бітумі, що пов'язане з переносом температури крихкості вихідного бітуму на модифікований.

Таким чином, можна казати про поліпшену низькотемпературну поведінку полімерасфальтобетону з добавкою Полідом в порівнянні з асфальтобетоном на бітумі з в'язкістю еквівалентною модифікованому бітуму.

Умовна температура переходу до в'язкопластичного стану у полімерасфальтобетону вище на 9°С в порівнянні з асфальтобетоном на вихідному бітумі і на 5°С вище порівняно з асфальтобетоном на еквіпенетраційному бітумі. Це узгоджується із зростанням температури розм'якшеності бітуму при його модифікації полімером. При введенні добавки Полідом у суміш ця різниця збільшується ще на 3 градуси. Такі зміни температур фізичного стану призводять до того, що інтервал пластичності асфальтополімербетону на модифікованому бітумі більше, ніж асфальтобетонів на 6°С, а полімерасфальтобетону, в який введено полімер, на 12°С.

**Таблиця 6** – Реологічні показники асфальтобетонів

| Найменування показника | T, °C | f, Гц | Асфальтобетони | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 (на БНД 60/90) | 2 (на БНД 90/130) | 3 (на модифікованому бітуму) | 4 (Полідом введений у суміш) |
| Комплексний модуль пружності $E^*$, МПа | -20 | 0,5 | 8220 | 7380 | 7840 | 7320 |
| | 0 | 0,5 | 4200 | 3980 | 3480 | 3890 |
| | +20 | 0,5 | 1420 | 1260 | 1390 | 1470 |
| | +50 | 0,5 | 220 | 189 | 260 | 310 |
| Умовна температура склування $T_{ст}$, °C | - | 0,5 | -13 | -16 | -15,5 | -15 |
| Умовна температура переходу до в'язкопластичного стану $T_{вп}$, °C | - | 0,5 | 60 | 55 | 64 | 67 |
| Температурний інтервал пластичності $T_{вп}$ - $T_{ст}$, град | - | 0,5 | 73 | 72,5 | 79,5 | 85 |
| Показник температурної чутливості $\Delta LgE^* / \Delta T$, 1/град | - | 0,5 | 0,028 | 0,029 | 0,025 | 0,023 |
| Критична деформація, $\varepsilon_{кр} \cdot 10^4$ | 20 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,75 |
| Критичне напруження при 20 °C, $\sigma_{кр}$, МПа | | 0,5 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,026 |

Полімерасфальтобетон має менший показник температурної чутливості $\Delta LgE^* / \Delta T$ в порівнянні з асфальтобетоном (таблиця 6), що узгоджується з даними показника пластичності $m$ (рисунок 7). Така близькість тенденцій зміни модуля пружності зі зміною температури, або зі зміною частоти деформування є наслідком принципу температурно-часової аналогії, що притаманний таким системам, як асфальтобетон та полімерасфальтобетон.

Ефект дії добавки Полідом можна представити залежністю значень модуля пружності асфальтобетону без добавки та з добавкою Полідом (рисунок 12).

На осі абсцис відкладено значення модуля пружності асфальтобетону на вихідному бітумі БНД 90/130 (інд. 2) при частоті деформування 0,5 Гц і при певних температурах, на осі ординат – для асфальтополімербетону на тому самому бітумі, але модифікованому полімером (інд. 3) і асфальтобетону з добавкою Полідом безпосередньо у суміш (інд. 4).

При низьких експлуатаційних температурах комплексний динамічний модуль пружності полімерасфальтобетону практично не відрізняється від асфальтобетону, але при високих експлуатаційних температурах проявляється ефект модифікації полімером в більших значення модуля пружності. Найбільший ефект підсилення спостерігається при введенні добавки Полідом у суміш.

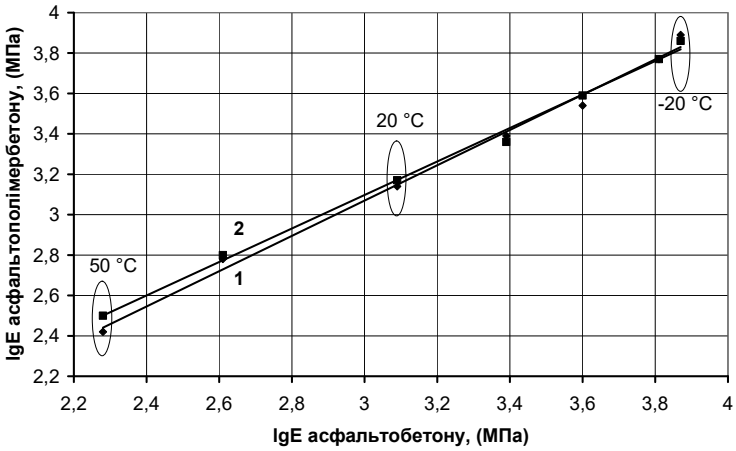



*Рисунок 12 – Ступінь посилення асфальтобетонів при введенні добавки Полідом (1 – у бітум, 2 – у асфальтобетонну суміш)*

**Висновки**

Досліджено ефективність дії комплексної полімерної добавки Полідом на властивості асфальтобетонів. Виконано порівняльні дослідження асфальтобетонів на вихідному та еквіпенетраційному бітумі, виготовлених за технології приготування сумішей способом введення в них бітуму, модифікованого добавкою Полідом, та способом введення добавки Полідом в асфальтобетонну суміш.

Реологічні дослідження асфальтобетонів на трьох в'яжучих, виконані в широкому температурному та частотному діапазоні, свідчать про те, що модулі пружності полімерасфальтобетону на БМП при високій температурі вищі, ніж асфальтобетонів на вихідному та еквіпенетраційному бітумах, а полімерасфальтобетону, в який введено полімер, вище ніж полімерасфальтобетону на БМП. За низьких температур спостерігається зворотня тенденція. Критичні деформації напруження однакові, температура склування дещо нижча, а інтервал пластичності дещо ширший у полімерасфальтобетону з введеним в нього полімером, ніж асфальтобетону на еквіпенетраційному бітумі. Коефіцієнт пластичності в діапазоні температур від 10 °С до 30 °С полімерасфальтобетону нижче ніж асфальтобетонів. Це добре погоджується з температурною чутливістю цих асфальтобетонів та відповідає принципу температурно-часової суперпозиції (табл. 6). Показник температурної чутливості нижче у полімерасфальтобетону, ніж у асфальтобетонів. Температура механічного склування полімерасфальтобетонів та асфальтобетонів зі зміною частоти деформування знижується на (4 – 6) °С, що достатньо близько для раніше встановленого рівня для асфальтобетонів.

Таким чином, проведені дослідження засвідчили позитивний вплив композиційної добавки на основі вторинного поліетилену Полідом на реологічні характеристики асфальтобетону, що дозволяє прогнозувати підвищену довговічність асфальтобетонів з добавкою Полідом, отриманих як на модифікованому бітумі так і при безпосередньому введені добавки в суміш.

Подальші дослідження буде спрямовано на встановлення впливу композиційної полімерної добавки Полідом на підвищення коліє- та тріщиностійкості асфальтобетонних покриттів.

**Література**


1. Effect of thermoplastic copolymers on microstructure and viscoelastic behaviour of bitumen. Noor Zainab Habib, Ibrahim Kamaruddin, Madzlan Napiah and Isa Mohd Tan / Proceeding of Malaysian Universities Transportation Research Forum and Conferences 2010 (MUTRFC2010), 21 December 2010, Universiti Tenaga Nasional. ISBN 978-967-5770-08-1 P.79-87.
2. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. Giovanni Polacco, Stefano Berlincioni, Dario Biondi, Jiri Stastna, Ludovit Zanzotto / European Polymer Journal 41 (2005) P. 2831–2844.
3. Rheological Properties of Polyethylene and Polypropylene Modified Bitumen. Noor Zainab Habib, Ibrahim Kamaruddin, Madzalan Napiah and Isa Mohd Tan / International Journal of Civil and Environmental Engineering 3:2 2011 P 96-100.
4. Rubber-polyethylene Modified Bitumens. Ali Akbar Yousefi / Iranian Polymer Journal Volume 13 Number 2 (2004) P. 101-112.
5. Physical and Rheological Properties of Asphalts Modified with Polyethylene-co-methylacrylate and Acids. W. Trakarnpruk, R. Chanathup Journal of Metals, Materials and Minerals. Vol.15 No.2 P.79-87, – 2005.
6. Модифицированные битумные вяжущие, специальные битумы и битумы с добавками в дорожном строительстве // Всемирная дорожная ассоциация. Технический комитет «Нежесткие дороги» (Сб) / Пер. с франц. д. т. н. В.А. Золотарёва, Л.А. Беспалевой под общей ред. Золотарева В.А
7. P. Bense. Enrobes armes par dechets de matieres plastiques. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Fonts et Chaussees // n 128 –1983.
8. Note d'Information SETRA Chaussees Dependances n° 28. Enrobes bitumineux renforces par addition de dechets plastiques // May – 1987.
9. Висновок ДП «ДерждорНДІ» щодо підтверження придатності для застосування в дорожньому будівництві матеріалу – полімерної добавки Superplast виробництва «Iterchimica S.r.I» (Італія) для модифікації асфальтобетонних сумішей. – К. 2009
10. Кіщинський С.В. Використання вторинного поліетилену для модифікації бітумів // Дороги і мости : Зб. наук. статей. – 2006. – Вип. 5. – С. 243 – 258.
11. Кіщинський С.В. Поліпшення властивостей бітумів шляхом модифікації полімерною добавкою на основі вторинного поліетилену // Вестник ХНАДУ : Сб. научн. трудов. – 2006. – Вып 34 – 35.
12. Кіщинський С.В. Новий полімерний модифікатор бітумів Полідом на основі вторинного поліетилену // Дороги і мости : Зб. наук. статей. – 2008. – Вип. 8. – С. 149 – 153.
13. Кіщинський С.В. Фізико-механічні властивості бітумів, модифікованих комплексним модифікатором Полідом // Вестник ХНАДУ. – 2008. – Вып. 40.
14. Кіщинський С.В. Вплив комплексного модифікатора на основі вторинного поліетилену на властивості бітумів та асфальтобетонів // Матеріали міжнародній науково- технічній конференції, яка присвячена 80-річчю ХНАДУ та дорожньо-будівельного факультету. – Харків, 2010

15. Кіщинський С.В. Підвищення ефективності модифікації бітуму композиційною добавкою Полідом на основі вторинного поліетилену // Автошляховик України: 3’2013 – С. 27.
16. Золотарёв В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / Золотарёв В.А. – Харьков: «Вища школа», 1988 – 116 с.