

**М. Шидловський**  
Доцент, канд. техн. наук

**Д. Шпак**  
Доцент, канд. техн. наук

**А. Крикун**  
Інженер

Національний технічний  
університет України  
"Київський політехнічний  
інститут",  
Науково-випробувальний  
центр "Надійність",  
м. Київ

**УДК 539.3**

## **В'ЯЗКО-ПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ**

*Розглянуті питання експериментальної оцінки якості та надійності матеріалів, що застосовуються для виготовлення елементів гальм автомобілів. Описано засоби вимірювання в'язко-пружних характеристик матеріалів, що використовують для виготовлення елементів гальмівних систем. Вивчено вплив рідких середовищ на характеристики релаксаційних процесів, що супроводжують роботу матеріалів при стиску. Запропоновано використовувати результати вимірювання швидкостей релаксації напружень як показник якості матеріалів для гальмівних систем.*

**деталі транспортних засобів, гальмівна система, колодка, накладка, стиск, в'язко-пружність, релаксація**

**Вступ.** У процесі розробки нових матеріалів та оптимізації технологічних режимів виготовлення елементів гальмівних систем до автомобільного транспорту, перш за все фрикційних накладок до колодок дискових та барабанних гальм, необхідно враховувати багато фізико-механічних характеристик цих матеріалів. До них, зокрема, відносяться деформації при стисканні з урахуванням впливу температури та інших зовнішніх факторів.

Для визначення зазначених характеристик використовуються методи, що відображені в чинних міжнародних та вітчизняних стандартах. Ці стандарти нормують типи зразків, необхідне обладнання та засоби вимірювальної техніки, їхні технічні характеристики та умови проведення випробувань.

Одним з основних, на наш погляд, обмежень стандарту [1] є неврахування в експерименті в'язко-

пружних процесів, що відбуваються в накладках гальмівних колодок при дії зовнішніх навантажень.

Матеріали, що використовуються для виготовлення безазбестових гальмівних фрикційних накладок до колодок зазначених типів, є багатокомпонентними композитами, до складу яких входять фенолформальдегідні смоли, каучук, глинозем, скляна вата, графіт та інші речовини. Вони виготовляються методами пресування при підвищених тиску та температурі з подальшою термічною обробкою та мають певні реологічні властивості.

Реологічні ефекти (повзучість та релаксація напружень) навіть за короткий проміжок часу при стискуванні можуть привести до суттєвої зміни напружено-деформованого стану накладки. Наявність цих процесів, вочевидь, не зменшує міцність та надійність гальмівної системи у цілому. Проте, на наш погляд, підвищення швидкості повзучості та релаксації

матеріалу, що виникає за рахунок зростання ступеня молекулярної рухомості полімерної матриці, може бути опосередкованим свідченням наявності певних недоліків структури матеріалу [2, 3]. Експлуатація накладок з таких матеріалів може супроводжуватися виникненням суттєвих проблем, наприклад, підвищеної зношувальності при терті у контакті накладки з металевими поверхнями інших елементів гальмівної системи.

Практика застосування в'язко-пружних композиційних матеріалів показує, що за такими показниками, як швидкість релаксації напружень, можна оцінювати якість матеріалу в цілому та, зокрема, визначати ступінь впливу на ці матеріали зовнішнього середовища.

Таким чином, порівнюючи швидкість релаксації напружень при стискуванні гальмівних накладок різних типів, можна оцінювати їхні властивості за реакцією на дію зовнішнього навантаження, зокрема при підвищених температурах. Зміна в'язко-пружних характеристик матеріалів, з яких виготовляються накладки, під впливом зовнішнього середовища є також, на наш погляд, важливим показником їх якості. До таких середовищ відносяться різні агресивні рідини (паливно-мастильні матеріали, кислоти, лужні матеріали та ін.).

**Мета роботи.** Наскільки нам відомо, питання зміни в'язко-пружних властивостей матеріалу накладок під впливом агресивних середовищ до сих пір не розглядалося. У зв'язку з цим представило певний інтерес об'єднати стандартну методику вимірювання пружних характеристик матеріалів накладок з одночасним дослідженням особливостей релаксаційних процесів, що відбуваються у матеріалі при дії стисних навантажень.

За об'єднаною методикою було досліджено вплив температури та середовища на швидкість розвитку релаксаційних процесів з метою оцінки якості досліджених матеріалів.

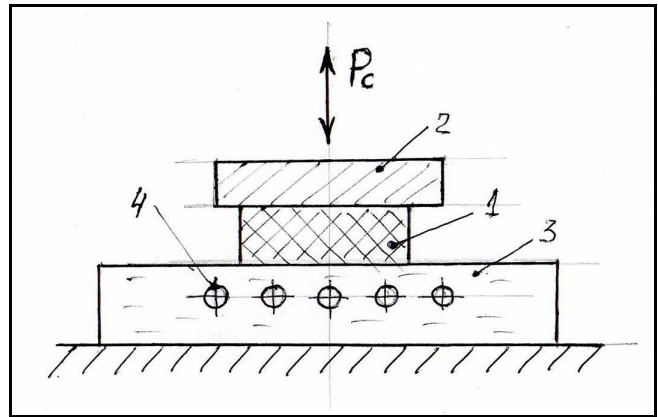
#### Методики та обладнання для випробувань.

**Вимірювання стислості матеріалу накладок.** Випробування за стандартом [1] передбачають оцінку деформаційних властивостей матеріалу гальмівної накладки при стискуванні в широкому діапазоні температур (200<sup>0</sup>С – для барабанних колодок, 400<sup>0</sup>С – для дискових колодок).

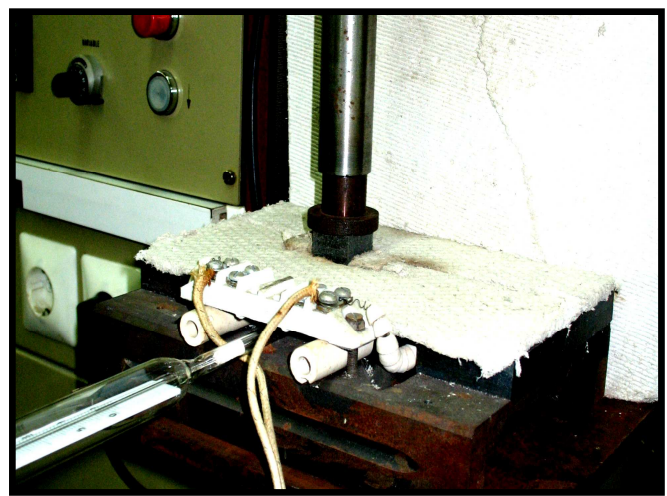
У випробуваннях використовували стандартні зразки матеріалу, виготовлені з гальмівних накладок. Стислість матеріалу накладок визначали за зміною товщини зразків під навантаженням у напрямку, перпендикулярному поверхні тертя накладки. Випробування проводили при кімнатній та підвищеній температурах за схемою, що зображена на **рис. 1**. На зразок 1 через плунжер 2 передавали стисне навантаження  $P_c$ . Зразок розміщували на нагрівній чавунній плиті 3 з вмонтованою ніхромовою спіраллю 4.

Навантаження зразків та вимірювання деформацій виконували за допомогою пристрою (**рис. 2**), що був встановлений на універсальній випробувальній машині **TIRAtest-2151**. Стисне навантаження виміряли динамометром з точністю 0.1 Н. Деформацію зразка

вимірювали датчиком переміщення, що входить до складу випробувальної машини, з точністю 0.01 мм.



**Рис. 1.** Схема випробувань накладок на стислість за стандартом [1]: 1 – зразок; 2 – плунжер (пуансон) для передавання навантаження; 3 – нагрівна чавунна плита; 4 – спіраль нагрівача



**Рис. 2.** Пристрій для випробування на стиск при підвищених температурах

Випробування проводили на стандартних зразках розмірами 25 × 25 мм, що були виготовлені з накладок дискових та барабанних колодок. До зразків, що вирізані з накладок до дискових колодок прикладали навантаження 2.500, 3.750 та 5.000 кН, які відповідають тиску 4000, 6000 та 8000 кПа. До зразків, що вирізані з накладок до барабанних колодок прикладали навантаження 0.938 та 1.875 кН (тиск 1500 та 3000 кПа відповідно). Для кожного рівня навантаження вимірювали величини деформацій зразків.

Після одноразового навантаження зразки піддавали п'ятиразовому навантаженню 5.0 кН (накладки до дискових колодок) та 1.875 кН (накладки до барабанних колодок). Вимірювання деформацій зразків проводили для кожного циклу навантаження.

Значення стислості матеріалу зразків (**табл. 1**) розраховували як відношення абсолютної деформації зразків (загальна деформація мінус деформація машини) до товщини зразка.

Величини стисності при кімнатній та підвищеній температурах

Модель випробуваних гальмівних дискових колодок	Стисність під тиском 4000 кПа		Стисність під тиском 8000 кПа		Стисність після п'ятиразового навантаження тиском 8000 кПа	
	T=20 <sup>0</sup> С	T=400 <sup>0</sup> С	T=20 <sup>0</sup> С	T=400 <sup>0</sup> С	T=20 <sup>0</sup> С	T=400 <sup>0</sup> С
до автомобілів "Hyundai"	1.00	2.60	1.60	3.70	1.10	2.90
	0.90	2.40	1.80	3.90	1.30	2.90
	0.90	2.40	1.80	3.90	1.40	2.90
до автомобілів "KIA"	1.00	2.60	1.90	4.00	1.30	2.60
	1.00	2.60	1.90	4.00	1.10	2.70
	1.00	2.70	1.90	4.00	1.10	2.60
до автомобілів "DAEWOO"	0.67	2.40	1.47	4.13	1.73	4.40
	0.53	2.67	1.60	4.27	1.86	4.53
	0.67	2.53	1.47	4.13	1.73	4.40
до автомобілів "Таврія"	1.00	2.45	1.55	3.81	1.09	2.64
	0.91	2.36	1.45	3.73	1.00	2.54
	1.09	2.54	1.64	3.91	1.18	2.72
до автомобілів "Toyota"	0.73	1.36	1.34	3.89	1.16	2.84
	0.63	1.47	1.47	3.89	1.05	2.84
	0.63	1.47	1.47	4.00	1.05	2.84
до автомобілів "NISSAN"	0.63	1.88	1.88	4.25	0.88	3.13
	0.88	2.00	1.75	4.13	0.75	3.13
	0.63	1.88	1.88	4.25	1.00	3.38
Нормативні показники, не більше	2 %	5 %	2 %	5 %	2 %	5 %

**Вимірювання релаксації напружень.** Для проведення експериментальних досліджень застосовували схему випробувань, в якій стандартний метод визначення стисності матеріалу гальмівних накладок був поєднаний з реєстрацією зміни напруження у місці контакту.

Стандартний зразок у вигляді паралелепіпеда зі сторонами 25×25 мм<sup>2</sup> та товщиною, яка залежить від фактичної товщини накладки, розміщували на плиті випробувальної машини та прикладали попереднє навантаження, яке забезпечувало величину стандартного стискаючого напруження на рівні 0.5 МПа.

Після цього зразок стискали зі швидкістю переміщення 0.5 мм/хв. до досягнення такого навантаження  $P_0$ , яке забезпечує одне з рекомендованих у [1] стискаючих напружень ( 4.0, 6.0 або 8.0 МПа). Після стискання реєстрували зміну навантаження у часі. При зазначеній швидкості переміщення максимальне навантаження  $P_0$  досягалося за 10 - 15 секунд від початку деформування.

Модуль релаксації (МПа) визначали за формулою

$$E(t) = \frac{P(t) \cdot h_0}{F_0 \cdot \Delta h_k}$$

де  $t$  – час;  $P(t)$  - навантаження в момент спостереження, Н;  $F_0$  - площа зразка, мм<sup>2</sup>;  $h_0$  - початкова висота (товщина) зразка, мм;  $\Delta h_k$  - абсолютна деформація зразка, мм.

Суттєвим недоліком вимірювальної системи TIRAtest є відсутність периферійних засобів надійного запису динамічних процесів з достатньою швидкістю. Застосування механічних систем запису за рахунок суттєвої інерції цих систем не дає змоги якісно записувати початкові ділянки кривих релаксації.

Було запропоновано використати для запису зазначених кривих вбудовану веб-камеру 1,3 мрх

ноутбука ASUS. Швидкість запису складала 384 Kbps. Дискретність запису значення стискаючої сили дорівнювала 0.1 с. Фіксацію зміни навантажень у зразку на веб-камеру проводили протягом 300 с. Надалі фіксацію результатів виконували візуально.

**Результати вимірювань в'язко-пружних характеристик.** В зв'язку з можливістю експлуатації деталей транспортних засобів у складних умовах, зокрема при дії агресивних середовищ, було проведено дослідження впливу зовнішніх факторів на зміну швидкості процесу релаксації напружень. Випробування проводили при кімнатній та підвищених температурах, попередньо витримуючи зразки в маслі марки **80W90** та бензині марки **A-95** протягом 120 годин.

На **рис. 3** зображені криві зміни модуля релаксації матеріалу дискових гальмівних накладок до легкових автомобілів марки "**MERCEDES**". Видно, що витримка в агресивних середовищах суттєво впливає на процес релаксації напружень в матеріалі.

Модулі релаксації, що були виміряні після 100 с дії стискаючого навантаження при температурі 400<sup>0</sup>С, склали:

6390 МПа для матеріалу в початковому стані,

6150 МПа та 5030 МПа для зразків, що були витримані у бензині та маслі відповідно. У відсотковому відношенні це складає 3.75 % та 21.28 % зменшення модуля релаксації.

За наведеними залежностями були виміряні швидкості релаксації як тангенси кутів нахилу дотичних до кривих релаксації у відповідних точках. Швидкості релаксації, що були розраховані на сотій секундні процесу, склали:

0.88 МПа/с для матеріалу у початковому стані,

3.19 МПа/с та 2.53 МПа/с для зразків, що були витримані у бензині та маслі відповідно. У

відсотковому відношенні це складає 262.5 % та 187.5 % збільшення швидкості релаксації.

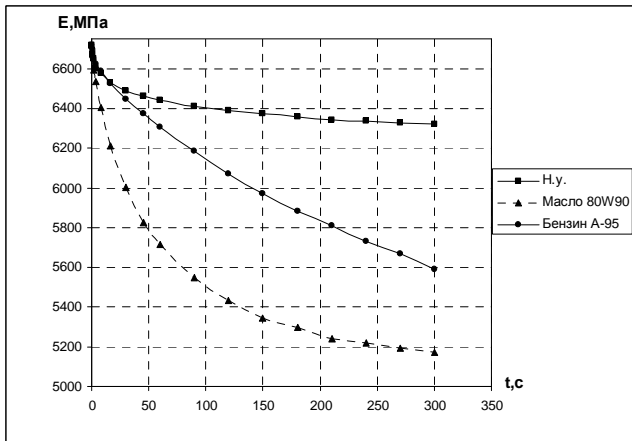


Рис. 3. Залежності модулів релаксації від часу при 400°C

Для дослідження зміни в'язко-пружних властивостей при довготривалій дії рідин використані накладки гальмівних колодок марки "PAGID" виробництва фірми "TMD Friction GmbH". Зразки накладок було попередньо витримано у таких середовищах: 1. дистильована вода; 2. насичений розчин повареної солі NaCl; 3. стандартна рідина СЖР-3 (ТУ 38 10195-86), що містить найбільш хімічно-активні складові паливно-мастильних матеріалів; 4. гальмівна рідина, що застосовується на автомобільному транспорті.

Витримку здійснювали протягом 120 год. при кімнатній температурі. Після цього з поверхні зразків видаляли залишки рідини та проводили кондиціювання зразків при кімнатній температурі протягом 24 год.

Зразки, встановлені на робочий стіл випробувальної машини, піддавали стисканню на величину  $\Delta h_k = 0.15$  мм. При цьому початкове максимальне навантаження  $P_0$  при  $t = 0$  складало  $(5000 \pm 25)$  Н, а відповідне стисне напруження  $(8.0 \pm 0.04)$  МПа. У кожному експерименті було використано 3 зразка матеріалу, отримані результати усереднювали.

На рис. 4 наведено криві релаксації напружень, одержані в інтервалі від 0 до 300 с під час перебування зразка у стиснутому стані при відносній деформації

$\epsilon_k = (\Delta h_k / h_0) \times 100\% = 1.53\%$  при товщині зразка 9.8 мм. На цьому рисунку криві релаксації побудовані в координатах "відношення  $P(t) / P_0$  – час  $t$ ", де  $P(t)$  - навантаження, що спостерігаються в кожний момент часу  $t$ .

Для аналітичного описання кривих релаксації напружень, зображених на рис.4, використано узагальнену модель Максвелла та рівняння, що відповідає цієї моделі [2]:

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \cdot \exp(-t/\tau_i),$$

де  $E(t)$  - модуль релаксації (1);  $E_0, E_i, \tau_i$  - коефіцієнти рівняння релаксації.

Зазначені коефіцієнти, які визначали за допомогою програми OriginPro, наведені в табл. 2. Встановлено, що для описання кривих релаксації напружень досліджених матеріалів достатньо взяти перші три доданки в експоненціальному ряду. Подальше збільшення числа експонент дає поправку на рівні експериментальної похибки і тому позбавлене сенсу.

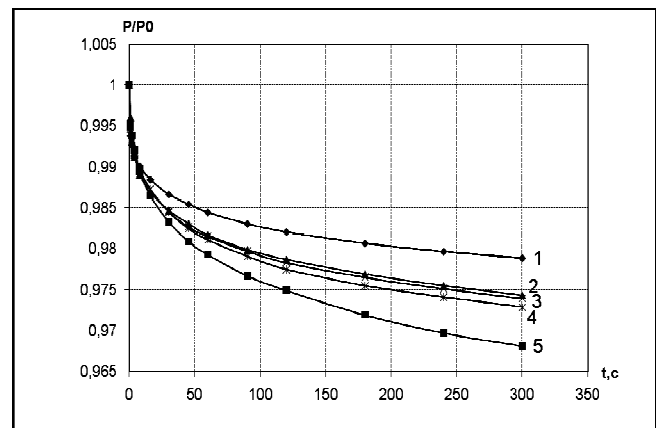


Рис. 4. Криві релаксації напружень в матеріалі гальмівних колодок після дії різних середовищ протягом 120 годин. 1 – контрольний зразок; 2 - дистильована вода; 3 - сольовий розчин; 4 - рідина СЖР-3; 5 - гальмівна рідина

Таблиця 2.

Коефіцієнти рівняння, що відповідає узагальненій моделі Максвелла.

Середовище	Коефіцієнти $E_i$ , МПа				Часи релаксації $\tau_i$ , сек.		
	$E_0$	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$
Контрольні зразки	465.58	4.94	2.25	3.34	132.7	12.40	0.615
Дистильована вода	462.16	6.40	3.48	4.04	225.7	23.81	1.719
Розчин NaCl	463.30	6.49	3.91	3.14	174.3	16.85	0.798
Рідина СЖР-3	462.54	7.10	3.69	2.86	130.8	14.65	0.726
Гальмівна рідина	459.60	9.89	4.52	2.30	162.8	12.52	0.547

Як видно з рис. 3 та 4, криві релаксації є гладкими та монотонними. Модулі пружності матеріалів, визначені у початковий момент часу прикладення навантаження як сума  $E_0, E_1, E_2$  та  $E_3$ , практично не відрізняються для зразків, що були витримані у різних рідинах. Надалі при збільшенні часу спостереження

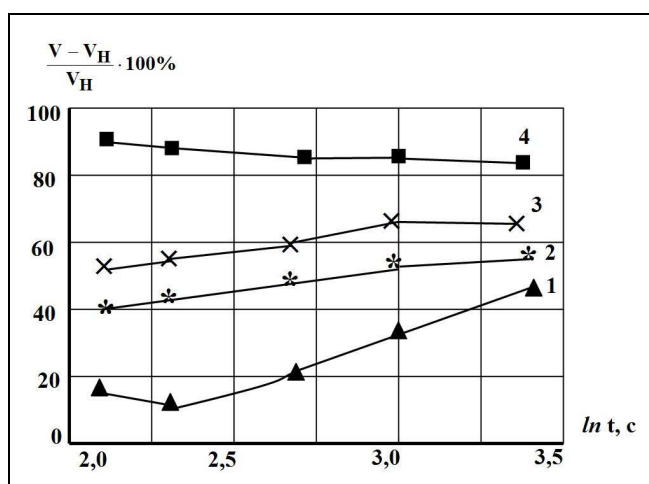
різниця між модулями  $E(t)$  стає більш помітною. Модуль релаксації зразків, витриманих у гальмівній рідині та виміряний при стискуванні протягом 300 сек., зменшився у порівнянні з модулем контрольних зразків приблизно на 10-11%.

За наведеними експериментальними даними були розраховані швидкості релаксації напружень у різні моменти часу. При цьому абсолютну величину швидкості релаксації визначали за формулою

$$v(t) = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot \exp(-t/\tau_i)}{\tau_i}$$

Встановлено, що після витримки зразків у застосованих в експериментах рідинах швидкості процесу релаксації суттєво збільшується. При цьому максимальна зміна швидкості спостерігається після витримки у гальмівній рідині, найменша - у дистильованій воді.

На **рис. 5** відображена зміна швидкостей релаксації у залежності від часу спостережень релаксаційного процесу. У вищезазначеному інтервалі часу швидкості релаксації після витримки у гальмівній рідині збільшилися на (80-90%) (у середньому на 87%) порівняно з контрольними зразками. Швидкості релаксації після витримки у дистильованій воді, сольовому розчині та стандартній рідині СЖР-3 збільшилися у середньому на 29, 42 та 56% відповідно.



**Рис. 5.** Зміни швидкостей релаксації напружень  $V$  після витримки зразків у різних середовищах порівняно з швидкостями релаксації контрольних зразків  $V_H$ : 1 - дистильована вода; 2 - сольовий розчин; 3 - рідина СЖР-3; 4 - гальмівна рідина

**Висновки:** 1. Пружні характеристики антифрикційних накладок до гальмівних колодок випробуваного типу практично не змінюються після витримки їх у різних рідких середовищах.

2. Модулі релаксації, виміряні у контрольних зразках та у зразках, що були витримані у цих рідинах, відрізняються не більш, ніж на 10-11%.

3. Витримка у рідинах, застосованих у наших дослідях, збільшує швидкості релаксації напружень матеріалу фрикційних накладок від 17-42% (дистильована вода) до 80-90% (гальмівна рідина), що свідчить про зміну структури матеріалу.

4. Наведені результати показують можливість застосування швидкості релаксації напружень як структурно-чутливого параметру, що характеризує стан матеріалу накладок.

#### Література

1. Державний стандарт України ДСТУ ГОСТ ІСО 6310:2006 "Транспорт дорожній. Накладки гальмівні. Метод визначення стисності".

2. Релаксационные явления в полимерах. / Под ред. Г.М.Бартенева и Ю.В.Зеленева. – Л.: Химия, 1972. – 376 с.

3. Нарисава И. Прочность полимерных материалов. М.: Химия, 1987. – 400 с.