

УДК 631.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.76-84](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.76-84)

А.М. Пугач, проф., д-р наук з держ. упр., О.А. Черній, ст. вик, Є.В. Калганков, ст. викл.

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: sanek20.1984@gmail.com*

Дослідження ефекту релаксації напруження та залишкової деформації сучасних полімерних матеріалів для захисту поверхонь деталей від зношування

Метою роботи є дослідження на релаксацію напруження при стиску та визначення залишкової деформації полімерних матеріалів, які використовуються в сучасному машинобудуванні для виготовлення захисних покриттів деталей машин. Експериментальні дослідження проводились на лабораторній установці ДМ-30М. В процесі випробування було визначено залежність падіння напруження в стиснених зразках матеріалів від часу, швидкість релаксації напруження, величину падіння напруження до рівноважного значення, рівноважний модуль, а також залишкову деформацію після зняття навантаження.
гума, термопластичний поліуретан, релаксація напруження, залишкова деформація

Постановка проблеми. Широка область застосування гуми та можливість використання вже розробленого математичного апарату дали змогу проводити коло теоретичних та експериментальних досліджень та створили необхідні передумови для розвитку подальших розробок в області вивчення гуми як пружно-спадкового матеріалу. При розгляді в'язко-пружних властивостей гуми характерними є два підходи: фізичний (мікроскопічний) та феноменологічний. Кінцевою метою в загальному випадку є побудова аналітичних залежностей між напруженням та деформацією з врахуванням впливу фактора часу та передісторії навантаження на деформований стан системи. Розробці математичного апарату теорії в'язко-пружності присвячено багато наукових праць. Найбільшого застосування для вирішення практичних задач отримали моделі Фохта-Кельвіна (в цій моделі пружня та в'язкісна складові системи розміщені паралельно) та модель Максвелла (розміщення пружної та в'язкісної складових послідовне).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поведінку в'язко-пружного конструкційного матеріалу при сталій його деформації досліджено в численних наукових працях. Результати досліджень на релаксацію мало- та середньонаповнених гум висвітлено в монографії професора Дирди В.І. [1]. Експериментально встановлено, що на протікання релаксаційних процесів в гумах мають суттєвий вплив такі фактори як старіння гуми при дії циклічних навантажень, радіаційне опромінення, ефекти на торцях, дія агресивного середовища тощо. Так встановлено, що опромінення зразків гуми до 200 Мрад, зменшує релаксаційні процеси в гумі та зсуває по шкалі частот пік релаксаційного спектру. При дослідженні віброізоляторів типу БРМ101 що виготовлені з гуми 1562, встановлено, що зі збільшенням часу їх втоми до 32 000 годин відмічається зміна часу релаксації напруження в гумі, модуль зсуву збільшується до величин при яких зароджуються магістральні тріщини в матеріалі. Вплив температури на релаксаційні процеси висвітлено в праці [3]. Встановлено, що зі зменшенням

температури змінюється швидкість та час релаксаційних процесів в дослідних зразках гуми. В роботі [4] досліджувались зміни реологічних параметрів гуми, що використовується для футерування барабанів кульових млинів, при дії агресивного середовища. Встановлено, що лужне середовище з взаємодією з високою температурою, призводять до суттєвих змін реологічних характеристик гум.

Дослідження на релаксацію нітрил-бутадієнових гум при температурному старінні наведено в статті [5]. Встановлено, що зі збільшенням часу тримання зразків при температурах 40° С, 50° С, 60° С, еластичність гуми деградує, а залишкова деформація зразків після випробувань має тенденцію до збільшення. Запропонований метод суперпозиції температури, часу та деформації (time-temperature-strainsuperpositionprinciple (TTSSP-R)), що враховує ефект релаксації напруження, дає змогу зменшити час з 30 днів до 10 днів на проведення прискорених випробувань на старіння нітрил-бутадієнових гум.

Експериментальні дослідження вулканізованих гум на релаксацію, та розподіл напружень в дослідному зразку представлено в праці [6]. Встановлено, що при стисканні гумового зразка найбільші напруження стиску та зсуву проявляються в місцях контакту гуми з металевими пластинами. Також приведено динаміку релаксаційних процесів в дослідних зразках в різних точках їх поперечних перерізів.

Залежності зміни показників релаксації напруження від часу при дослідженні гуми з вмістом технічного вуглецю N550 15, 30 та 45 масових частин, представлені в роботі [7]. Експериментально встановлено, що зі збільшенням вмісту технічного вуглецю швидкість релаксації напруження зростає, напруження стиску при відносних деформаціях 18%, 33%, 48%, також мають тенденцію до росту. Модуль пружності стиску гумових зразків збільшується зі збільшенням вмісту технічного вуглецю в гумі.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження на релаксацію напруження та визначення залишкової деформації сучасних в'язко-пружних матеріалів, що використовуються для захисту робочих поверхонь деталей машин від зношування. Автори вже досліджували представлені матеріали на опір абразивному зношуванню. Результати представлено в статті [8].

Виклад основного матеріалу. Для паралельного з'єднання пружного та в'язкого елементів (модель Фохта-Кельвіна), зв'язок між напруженням та деформацією має вигляд $\sigma = E(\varepsilon + \tau\dot{\varepsilon})$, де ε – відносна деформація, $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформації, $\tau = \frac{3\eta}{E}$ – час запізнювання деформації, η – коефіцієнт в'язкості. В стані спокою це середовище поводить себе як пружне ($\varepsilon = 0$). При постійній деформації ($\varepsilon = \text{const}$) напруження в ньому залишаються незмінними ($\sigma = E\varepsilon$). Якщо в початковий момент часу $t = 0$ середовищу задати постійне напруження ($\sigma = \text{const}$), то деформація буде поступово зростати по закону

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1)$$

де σ_0 – початкове напруження.

Для релаксуючого середовища Максвелла, якщо діюче напруження постійне ($\sigma = \text{const} = \sigma_0$), то в початковий період часу $t = 0$ система отримає миттєву пружну деформацію σ_0/E й надалі деформація буде протікати з постійною швидкістю. Якщо деформація незмінна в часі (наприклад, гумовий зразок стиснутий або розтягнений й кінці його зафіксовані), то при $t = 0$ та $\varepsilon = \text{const}$ напруження буде зменшуватись за законом релаксації (падіння) напруження при постійній деформації

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

де τ – час релаксації

Така модель задовільно описує якісний процес релаксації напруження ряду матеріалів, деформація яких відбувається з постійною швидкістю.

На сьогодні, для опису поведінки в'язко-пружних систем використовуються представлені моделі, але результати експериментальних досліджень вказують на те, що не завжди теоретичні дані розраховані по вказаним закономірностям гармонізуються з експериментальними. Тому на практиці при вирішенні задач динаміки машин, доволі часто використовують умовні аналоги в'язко-пружних моделей, вводячи в структурну схему еквівалентні коефіцієнти в'язкості, знайдені експериментальним шляхом, що описують поведінку конкретної досліджуваної системи.

Так, використовуючи ряди Проні, пропонується визначати в'язко-пружні реакції системи за залежністю

$$\sigma(t) = Y(t) \cdot \varepsilon_0, \quad (3)$$

де $\sigma(t)$ – напруження, що змінюється в часі, ε_0 – пікова деформація, $Y(t)$ – функція релаксації, що визначається

$$Y(t) = E_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n p_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right). \quad (4)$$

Функції релаксації в початковий момент часу ($t=0$) та в повній стадії релаксації ($t=\infty$) мають вигляд

$$\begin{aligned} Y(t=0) &= E_0, \\ Y(t=\infty) &= E_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n p_i \right), \end{aligned} \quad (5)$$

де p_i – постійна Проні (визначається дослідним шляхом);

τ_i – постійна часу запізнювання (визначається дослідним шляхом);

E_0 – миттєвий модуль пружності.

Намагання більш повніше описати механічну поведінку в'язко-пружних матеріалів призвело до створення багаточисленних реологічних моделей, що являють собою, по своїй сутності, комбінацію пружних та в'язких елементів.

Релаксація напруження гуми представляє собою складний механохімічний процес, що призводить до зміни в часі напруження при заданій деформації. Визначення релаксації напруження при осьовому стисканні регламентовано міжнародними стандартами ASTM D6147, ISO 3384.

Експериментальні дослідження проводились по методикам відповідно до стандартів: ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of stress relaxation in compression — Part 1: Testing at constant temperature» [9], ДСТУ ISO 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) «Гума вулканізована чи термопластична. Визначення залишкової деформації після стискання. Частина 1. Випробування за стандартної чи підвищеної температури [10].

Для проведення експериментальних досліджень, було підготовлено ряд зразків з сучасних полімерних матеріалів призначених для захисту поверхонь деталей машин від зношування. Такими матеріалами були: термопластичний поліуретан виробництва фірми «Covestro» з торговим найменуванням «Desmopan» (рис. 1,а), футеровочна гума виробництва ТОВ «Валса-ГТВ». Також, для дослідження впливу зміни реологічних характеристик гуми при експлуатації, на випробування були представлені зразки (рис. 1,б) футерувальної гуми, які вирізані з футерувальних плит кульового млина з завантаженими металевими кулями діаметром 100 мм. Напрацювання футеровки

становить 9300 годин. Форма зразків є циліндричною з діаметром $13 \pm 0,5$ мм, висотою $6,3 \pm 0,3$ мм. Механічні властивості досліджуваних матеріалів наступні: твердість по Шору гуми 66 од., «Desmoran» – 92 од. [2]; густина гуми $1,200 \text{ г/см}^3$, «Desmoran» – $1,240 \text{ г/см}^3$.

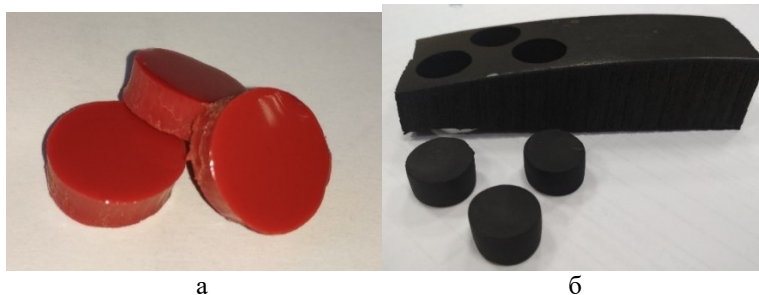


Рисунок 1 – Дослідні зразки: а– з термопластичного поліуретану «Desmoran»; б– зразки футерувальної гуми, які вирізані з фрагменту футерувальної плити кульового млина з завантаженими металевими кулями діаметром 100 мм. Напрацювання футеровки становить 9300 годин роботи

Джерело: розроблено авторами

Експериментальні дослідження проводились з використанням лабораторного обладнання. За основу взято ручний прес ДМ-30М (рис. 2,а) з вмонтованим кільцевим динамометром та максимальною силою стиску 20кН. На столі пресу закріплено пристосування ДМ-22М (рис. 2,б). На стержень центрального болта 8 (рис. 3) пристосування наклеєно чотири тензодатчика, які з'єднані за мостовою схемою. Сигнали від тензодатчиків подаються на вимірювальну апаратуру. Точність вимірювання сили стискання становить 1 Н. Схема встановлення дослідних зразків показано на рис. 3. Деформація стиску зразків фіксувалась індикаторами годинникового типу ІЧ-10 з точністю 0,01 мм. Шорсткість поверхонь пластин стискання відповідала значенню $Ra 0,4$. Зразки еластомеру стискалися болтом та гайкою пристрою до значення відносної деформації 40 % (рис. 4). Визначення релаксації напруження проводили шляхом вимірювання напружень в стержні стяжного болта через встановлені відрізки часу. Перше вимірювання проводили через 30с після стиску. Послідуючі виміри проводили через 10, 15, 60, 100, 150 хв і так поки вимірюване значення напруження досягне рівноважного значення. Загальна тривалість експерименту становила $24 \pm 0,5$ години. Температура дослідних зразків становила 22 ± 1 °С. Після випробування на релаксацію, дослідні зразки розвантажувались та витримувались при стандартній температурі протягом 30 ± 3 хв. Потім проводились заміри залишкової висоти зразка мікрометром з точністю 0,01 мм. При цьому вимірювальний тиск дії п'яток мікрометра на поверхню зразків не перевищував 0,01 МПа.

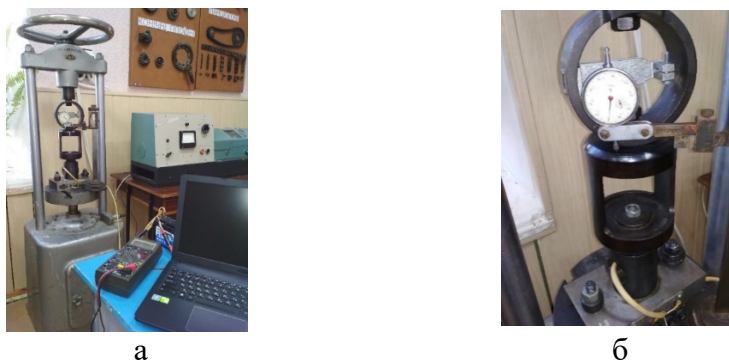
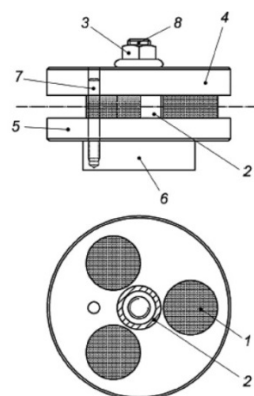


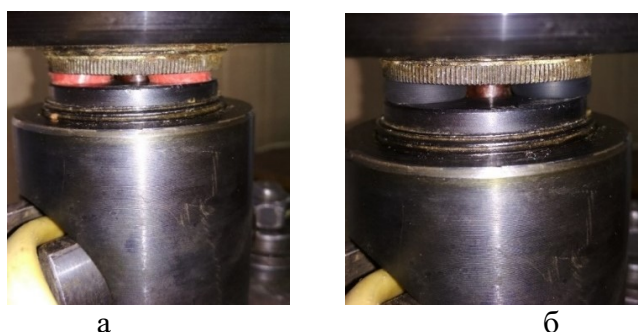
Рисунок 2 – Загальний вигляд дослідної установки: а- вид установки; б- вигляд пресу збільшений
Джерело: розроблено авторами



1-дослідні зразки, 2-дистанційна втулка, 3-гайка, 4- верхня пластина, 5- нижня пластина, 6-основа, 7-направляючий штифт, 8-болт стиску з наклеєними тензодатчиками

Рисунок 3 – Схема дослідної установки

Джерело: розроблено на підставі [10]



а– вид стиснутих зразків термопластичного поліуретану «Desmoran»;
б– вид стиснутих зразків футерувальної гуми

Рисунок 4 – Загальний вигляд стиснутих дослідних зразків з відносною деформацією 40%

Джерело: розроблено авторами

Показниками випробування являються наступні величини:

- а) швидкість релаксації напруження;
- б) величина падіння напруження до рівноважного значення (під рівноважним значенням напруження розуміється напруження, яке зберігається постійним при двох послідовних вимірюваннях);
- в) рівноважний модуль.

Напруження при заданій деформації в МПа (σ_t) визначають по формулі:

$$\sigma_t = \frac{F}{S}, \quad (6)$$

де F – навантаження, яке прикладається до випробуваних зразків, Н;
 S – площа поперечного перерізу зразка до початку випробування, мм².

Швидкість релаксації напруження характеризується величиною K та визначається по формулі:

$$K = \frac{\sigma_{t_1} - \sigma_{t_2}}{\sigma_3 (\lg t_1 - \lg t_2)}, \quad (7)$$

де σ_3 – напруження через 3 хв. після стискання зразків, МПа;
 σ_{t_1} – напруження через час t_1 хв. після стискання зразків, МПа;
 σ_{t_2} – напруження через час t_2 хв. після стискання зразків, МПа;

Для зручності обчислення K , були обрані такі часові точки: $t_1 = 10$ хв та $t_2 = 100$ хв, тоді різниця $\lg t_1 - \lg t_2 = 1$ та формула прийме вигляд:

$$K = \frac{\sigma_{10} - \sigma_{100}}{\sigma_3}, \quad (8)$$

де σ_{10} – напруження через 10 хв після стискання зразків, МПа;

σ_{100} – напруження через 100 хв після стискання зразків, МПа;

Величина падіння напруження до рівноважного значення (Δ) визначається по формулі:

$$\Delta = \frac{\sigma_3 - \sigma_{\text{рівн}}}{\sigma_3} \cdot 100, \quad (9)$$

де $\sigma_{\text{рівн}}$ – рівноважне напруження в зразках, МПа;

Рівноважний модуль в МПа ($E_{\text{рівн}}$) визначається по формулі:

$$E_{\text{рівн}} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon}, \quad (10)$$

де ε – відносна деформація зразка, що визначається по формулі:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}, \quad (11)$$

де h_0 – початкова висота зразка, мм;

h_1 – висота стисненого зразка, мм.

При визначенні залишкової деформації після стискання дослідних зразків користувались формулою:

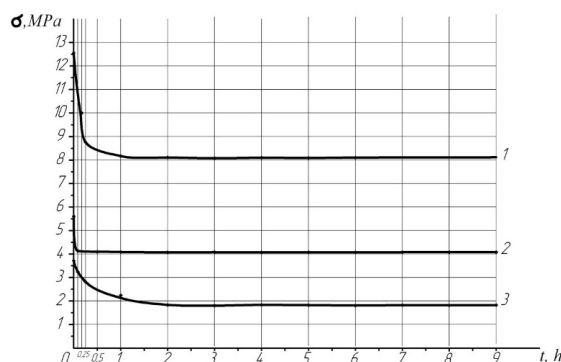
$$\delta = \frac{h_0 - h_a}{h_0 - h_s} \cdot 100, \quad (12)$$

де h_0 – початкова висота зразка, мм;

h_a – висота зразка після відновлення, мм;

h_s – висота зразка у стисненому стані, мм.

Дослідні залежності зміни напруження в випробуваних зразках при їх відносній деформації 40% від часу, представлено на рис. 5. На графіку представлено лише перші 9 годин випробування, так як в подальшому напруження в зразках змінювалось несуттєво.



1 - темнопластичний поліуретан «Desmoran»; 2- футерувальна гума з напрацюванням 9300 год.;

3- футерувальна гума (нова)

Рисунок 5 – Експериментальні залежності релаксації напруження в залежності від часу (год)

Джерело: розроблено авторами

Використовуючі математичні залежності наведені раніше, оброблено експериментальні дані. Визначено значення таких параметрів як: швидкість релаксації

напруження, K ; величину падіння напруження до рівноважного значення, Δ ,%; рівноважний модуль, $E_{\text{рівн}}$, МПа; залишкову деформацію після стискання, δ , %. Результати представлено в таблиці 1.

Експериментально встановлено, що найбільша швидкість релаксації напруження ($K=0,26$) відбувалась в зразках нової футерувальної гуми. Найменша її величина ($K=0,02$) відповідає зразкам футерувальної гуми з напрацюванням 9300 год. Такою є тенденція в значеннях величини падіння напруження до рівноважного значення. В новій гуми $\Delta=62\%$, в гуми з напрацюванням – $\Delta=33,4\%$.

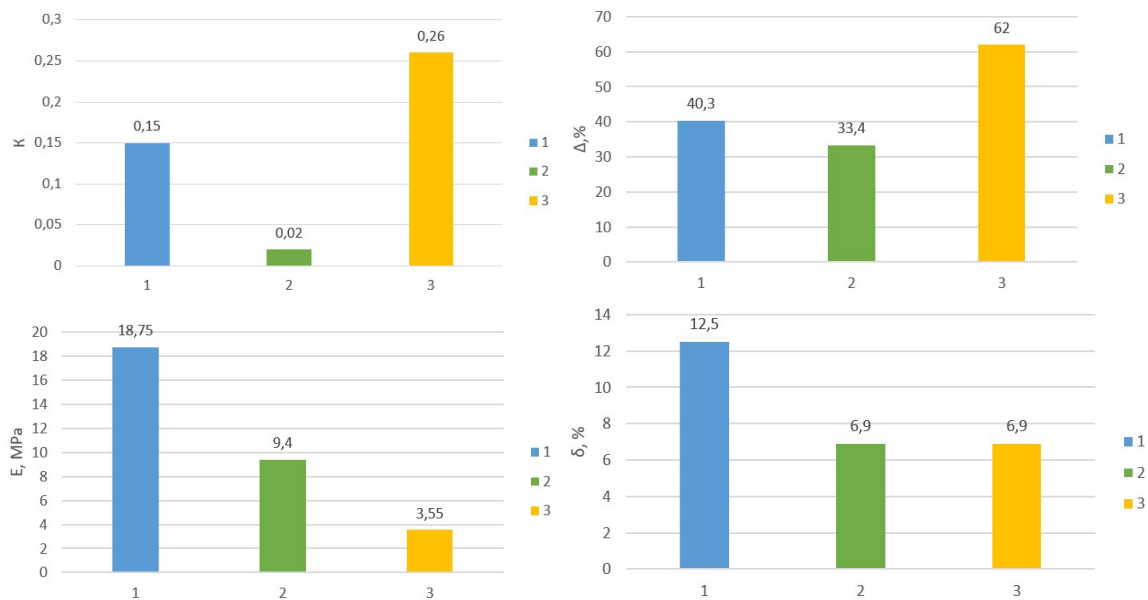
Таблиця 1 – Показники випробування дослідних матеріалів

Вид дослідного матеріалу	Показники випробування			
	Швидкість релаксації напруження, K	Величина падіння напруження до рівноважного значення, Δ , %	Рівноважний модуль, $E_{\text{рівн}}$, МПа	Залишкова деформація після стискання, δ , %
1.Термопластичний поліуретан «Desmoran»	0,15	40,3	18,75	12,5
2.Футерувальна гума з напрацюванням 9300 год	0,02	33,4	9,4	6,9
3.Футерувальна гума (нова)	0,26	62,0	3,55	6,9

Джерело: розроблено авторами

Термопластичний поліуретан «Desmoran» має найбільше значення рівноважного модуля пружності при стиску з відносною деформацією 40 % $E_{\text{рівн}}=18,75$ МПа. Найменше значення $E_{\text{рівн}}=3,55$ МПа, зафіксоване в зразках нової футерувальної гуми.

Залишкова деформація є найбільшою в зразках з термопластичного поліуретану «Desmoran»– $\delta=12,5\%$. В зразках футерувальних гум мала рівне значення $\delta=6,9\%$.



1 - термопластичний поліуретан «Desmoran»; 2- футерувальна гума з напрацюванням 9300 год.; 3- футерувальна гума (нова).

Рисунок 6– Експериментальні діаграми зміни показників випробування дослідних зразків
Джерело: розроблено авторами

Висновки. Проведено дослідження ефекту релаксації напруження та залишкової деформації сучасних полімерних матеріалів для захисту поверхонь деталей від

зношування. При сталій відносній деформації 40% термопластичний поліуретан «Desmopan» характеризується меншою схильністю до релаксації напруження, більшим модулем пружності при стиску ніж футерувальні гуми, але має більшу залишкову деформацію після розвантаження. Футерувальна гума, при порівнянні зразків з нової гуми та з напрацюванням близько 9300 годин в важких умовах роботи, показала себе як матеріал який схильний до внутрішніх структурних перетворень зі збільшенням часу сприйняття навантажень. Ці перетворення спричинюють зміну показників релаксаційних процесів: знижується швидкість релаксації напруження, зменшується величина падіння напруження до рівноважного стану, при одночасному підвищенні модуля пружності. Результати дослідження можуть бути використані при виборі матеріалу та розрахунках деталей з еластомерів захисних покриттів на роботоздатність та надійність.

Список літератури

1. Прикладная механика упругонаследственных сред: В 3-х томах. Т.2. Методы расчета эластомерных деталей / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. Киев: Наук. думка, 2012. 616 с.
2. Desmopan® – Thermoplastic Polyurethane. URL: www.covestro.com. (дата звернення 06.08.2023).
3. Dyrda V.I., Lysytsia M.I., Lapin V.A., Ahaltsov H.M., Kalhankov Ye.V., Tolstenko O.V., Chernii O.A. Dynamics of heavy vibrating machines taking into account instability in time of their parameters. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2020, Vol. 6, No 444. P. 68 – 74. doi.org/10.32014/2020.2518-170X.132.
4. Bulat A.F., Dyrda V.I., Kalhankov Y.V. Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. (5). 39–47. doi:10.29202/nvngu/2018-5/5.
5. Peng Q., Zhu Z., Jiang C., Jiang H. Effect of stress relaxation on accelerated physical aging of hydrogenated nitrile butadiene rubber using time-temperature-strain superposition principle. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2019. 2(2). 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.03.002>.
6. Sukcharoen K., Noraphaiphapaksa,N., Hasap A., Kanchanomai C. Experimental and Numerical Evaluations of Localized Stress Relaxation for Vulcanized Rubber. *Polymers*. 2022. 14(5). P.873. <https://doi.org/10.3390/polym14050873>.
7. Guzmán Sánchez M. A. Comparative study of stress relaxation phenomenological constitutive modeling of carbon black-reinforced natural rubber-based compounds. *DYNA*. 2021. 88(216). 55–61. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.89446>.
8. Экспериментальные исследования абразивного износа современных материалов для футерования рабочих поверхностей машин / В.И. Дырда и др. *Міжвідомчий збірник наукових праць інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАНУ. Геотехнічна механіка*. 2020. Вип. 151. С. 150- 56. DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.150>.
9. ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of stress relaxation in compression – Part 1: Testing at constant temperature».
10. ДСТУ ISO 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) «Гума вулканізована чи термопластична. Визначення залишкової деформації післястискання. Частина 1. Випробування за стандартної чи підвищеної температури. [Чинний з 01.09.2019] . Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2019. 14 с.

References

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zviagilskii, E.L. & Kobets, A.S. (2012), *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. Tom 2. Metody rascheta elastomernykh detalei [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Design techniques of elastomeric parts]*. Kyiv : Naukova dumka [in Russian].
2. Desmopan® – Thermoplastic Polyurethane (2023). Retrieved from www.covestro.com. [in English].
3. Dyrda, V.I., Lysytsia, M.I., Lapin, V.A., Ahaltsov, H.M., Kalhankov, Ye.V., Tolstenko, O.V. & Chernii, O.A. (2020). Dynamics of heavy vibrating machines taking into account instability in time of their parameters. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences, Vol.6, N 444* , 68 – 74. doi.org/10.32014/2020.2518-170X.132 [in English].

4. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., & Kalhankov, Y.V. (2018). Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 39–47. doi:10.29202/nvngu/2018-5/5 [in English].
5. Peng, Q., Zhu, Z., Jiang, C., & Jiang, H. (2019). Effect of stress relaxation on accelerated physical aging of hydrogenated nitrile butadiene rubber using time-temperature-strain superposition principle. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2(2), 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.03.002> [in English].
6. Sukcharoen, K., Noraphaiphaksa, N., Hasap, A., & Kanchanomai, C. (2022). Experimental and Numerical Evaluations of Localized Stress Relaxation for Vulcanized Rubber. *Polymers*, 14(5), 873. <https://doi.org/10.3390/polym14050873> [in English].
7. Guzmán Sánchez, M. A. (2021). Comparative study of stress relaxation phenomenological constitutive modeling of carbon black-reinforced natural rubber-based compounds. *DYNA*, 88(216), 55–61. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.89446> [in English].
8. Dyrda, V. I., Cherniy, O.A., Kalhankov, YE.V., Tolstenko, O.V., Filipenko, O.M. (2020) Eksperimentalnyye issledovaniya abrazivnogo iznosa sovremennykh materialov dlya futerovaniya rabochikh poverkhnostey mashin [Test for abrasive wear of modern materials for futting working surfaces of machines], *Geo-Technical Mechanics*, no. 151, Dnipro, Ukraine, DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.150> [in Russian].
9. ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of stress relaxation in compression — Part 1: Testing at constant temperature». [in English].
10. «Guma vulkanizovana chi termoplastichna. Vznachennya zalishkovoyi deformatsiyi pislya stiskannya. Chastina 1. Viprobuvannya za standartnoyi chi pidvishenoyi temperaturi [Vulcanized or thermoplastic rubber. Determination of residual deformation after compression. Part 1. Tests at standard or elevated temperature] . (2019). *DSTU 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT)* [in Ukrainian].

Andrii Puhach, Prof., DSc., **Olexandr Chernii**, Senior Lecturer, **Yevhen Kalhankov**, Senior Lecturer
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Study of the Effect of Stress Relaxation and Residual Deformation of Modern Polymer Materials to Protect the Surfaces of Parts From Wear

Stress relaxation during compression of rubber and polymers is one of the indicators of their viscoelasticity. The purpose of the work is research on stress relaxation during compression and determination of the residual deformation of polymeric materials used in modern engineering for the production of protective coatings for machine parts.

Experimental studies were carried out on a DM-30M laboratory unit with a ring dynamometer and a maximum compression force of 20kN. The DM-22M device is fixed on the press table. Samples for testing were cut from parts made of rubber produced by NVP «Valsa-GTV» and thermoplastic polyurethane with the trade name "Desmopan". During the test, the dependence of the stress drop in compressed samples of materials on time, the rate of stress relaxation was determined, the magnitude of the stress drop to the equilibrium value, the equilibrium modulus, as well as the residual deformation after the load is removed.

The conducted studies established that at a constant relative deformation of 40%, thermoplastic polyurethane "Desmopan" is characterized by a lower tendency to stress relaxation, a higher modulus of elasticity under compression than lining rubbers, but has a larger residual deformation after unloading. Lining rubber, when comparing samples from new rubber and with about 9,300 hours of operation in difficult working conditions, showed itself as a material that is prone to internal structural transformations with an increase in the time of load perception. These transformations cause a change in the indicators of relaxation processes: the rate of stress relaxation decreases, the magnitude of the stress drop to the equilibrium state decreases, with a simultaneous increase in the modulus of elasticity. The results of the study can be used in the selection of material and calculations of parts of protective coatings for performance and reliability.

rubber, thermoplastic polyurethane, stress relaxation, residual deformation

Одержано (Received) 20.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 08.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023