

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСМІСІЇ ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ ПРИ ДІЇ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Калінін Євгеній Іванович

доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-6191-8446

kalinin@nubip.edu.ua

Колодненко Віталій Миколайович

старший викладач

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-8450-6759

kolodnenko_vn@ukr.net

Міцнісні і втомні властивості є найбільш цінними механічними характеристиками гуми як конструкційного матеріалу. Для практики найцікавіше питання роботоздатності виробу та діапазону зміни його фізико-механічних параметрів при заданих умовах впливу середовища та режиму експлуатації.

Інтерес до проблем міцності та втоми гуми в останній час значно зріс у зв'язку з широким впровадженням у практику різних виробів, що несуть великі силові вантажі. Тому вивченню ефектів старіння, втоми та руйнування гум присвячені численні теоретичні та експериментальні дослідження.

У виданих останнім часом монографіях підбивається підсумок багаторічних теоретико-експериментальних досліджень проблем міцності полімерних тіл і значна увага в цих роботах приділена гумі.

При тривалій дії статичних чи знакозмінних навантажень у гумі можуть накопичуватися незворотні механіко-хімічні зміни. Таке накопичення зазвичай називають втомним процесом або втомою, а руйнування зразка в результаті його дії – втомним руйнуванням. У ході тривалого вивчення цього процесу розроблені для характеристики окремих його елементів специфічні терміни. Так, час роботи деталі від початку експлуатації до виходу з ладу називають довговічністю, витривалістю або терміном служби. Однак у масивних гумових виробках виявити тріщину надзвичайно складно, а після першої видимої тріщини ресурс наробітку деталі досягає 30% і більше загального терміну служби.

З урахуванням викладеного вище, визначимо вплив форми імпульсу тиску, що «біжить» з постійною швидкістю, на напружено-деформований стан порожнистого циліндра в межах пружності, так як описані вище елементи трансмісії автомобіля повинні працювати пружно.

Для розрахунку втомного руйнування гумових елементів трансмісії приймемо наступні припущення: в матеріалі є велика кількість різних дефектів і недосконалостей структури з різним ступенем небезпеки; із збільшенням об'єму деталі ймовірність наявності небезпечного дефекту зростає; міцність деталі визначається найнебезпечнішим дефектом.

У вихідному напруженому матеріалі гумового елемента також існують різні дефекти, що виникають в результаті механічного та теплового впливу або технології виготовлення, недосконалості структури (домішки в навантаженні та інгредієнтах гумової суміші), погане диспергування наповнювача або вулканізація, місця концентрації залишкових напружень і т.п. Такі недосконалості матеріалу є осередками мікротріщин, що дають початок руйнуванню навантаженої деталі. Ймовірність розвитку тріщини з найнебезпечнішого дефекту може бути задовільно описана у межах класичної теорії математичної статистики.

Ключові слова: трансмісія, гумові елементи, міцність, втома, силові вантажі, навантаження, руйнування, імпульс, тиск, мікротріщини, потужність.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.22>

Вступ. Інтерес до проблем міцності та втоми гуми в останній час значно зріс у зв'язку з широким впровадженням у практику різних виробів, що несуть великі силові вантажі. Тому вивченню ефектів старіння, втоми та руйнування гум присвячені численні теоретичні та експериментальні дослідження. Накопичений до теперішнього часу матеріал, особливо з певних питань, настільки об'ємний, що повний його виклад має бути предметом самостійного викладення.

Матеріали та методи. У виданих останнім часом монографіях підбивається підсумок багаторічних теоретико-експериментальних досліджень проблем міц-

ності полімерних тіл. Значна увага в цих роботах приділена гумі.

При тривалій дії статичних чи знакозмінних навантажень у гумі можуть накопичуватися незворотні механіко-хімічні зміни. Таке накопичення зазвичай називають втомним процесом або втомою, а руйнування зразка в результаті його дії – втомним руйнуванням. У ході тривалого вивчення цього процесу розроблені для характеристики окремих його елементів специфічні терміни. Так, час роботи деталі від початку експлуатації до виходу з ладу називають довговічністю, витривалістю або терміном служби. При цьому користуються також термінами

«границя втоми» або «межа витривалості», розуміючи під ними таке найбільше напруження, яке зразок може витримати, при скільки завгодно великому числі циклів навантаження.

Ці поняття запозичені з методики дослідження металів, де характер діаграми напруження-цикли напруження $N(\sigma)$, робити їх прийнятними. При випробуванні полімерних матеріалів зламу діаграми $N(\sigma)$ практично не спостерігається, тому поняттю «межа витривалості» фактично відповідає напруження при певній базі випробувань і деякої малої ймовірності руйнування.

Термін «втомне руйнування» є невизначеним Для металів і деяких жорстких пластмас в більшості випадків випробувань він означає остаточне руйнування зразка. Для гум таке визначення недостатньо повне, оскільки враховує різний характер двох стадій випробувань – до й після утворення тріщин. Більш того, для масивних гумових деталей досить важко встановити остаточне руйнування, оскільки при випробуваннях, наприклад на стиснення і зсув, поділ зразка на частини, як правило, не відбувається. З теоретичної точки зору найбільш правильною ознакою втомного руйнування, очевидно, слід вважати появу першої видимої тріщини. Для металів та деяких пластмас виявити тріщину можна за допомогою електронного мікроскопа.

Однак у масивних гумових виробках виявити тріщину надзвичайно складно, а після першої видимої тріщини ресурс наробітку деталі досягає 30% і більше загального терміну служби.

До того ж механічні характеристики вихідного матеріалу і зруйнованого зразка в ряді випадків відрізняються незначно. Усе це змушує розробляти деякі специфічні оцінки визначення довговічності зразка стосовно конкретних видів випробувань, про що докладніше буде сказано нижче.

У процесі втоми поряд з механічними зусиллями неминуче діють такі механічні фактори, як світло, тепло, хімічно активне середовище і т.п. Ці фактори негативно впливаючи на властивості матеріалу, проте, не призводять до руйнування деталі. У зв'язку з цим необхідно розділяти поняття втоми і старіння, маючи на увазі, що в першому випадку йдеться про зміни властивостей матеріалу, обумовлених у більшості випадків дією тільки механічних факторів. Поняття «старіння» охоплює всі механічні, фізичні, хімічні та електричні процеси, які у своїй колективно-функціональній взаємодії призводять до незворотної зміни властивостей матеріалу.

Слід також зазначити, що поняття «старіння» та «втоми» взяті з термінології випробування металів, де, у свою чергу, вони були запозичені із біології. Тому при вживанні таких термінів слід звернути увагу на різне значення цих понять для біології та матеріалознавства.

Результати досліджень. Завдання вирішуємо із застосуванням інтегрального перетворення Фур'є в рухомій системі координат, що пов'язана з рухомим вздовж осі z імпульсом тиску. Визначимо радіальне переміщення u , об'ємну деформацію θ і напруження σ_r і τ . Інші параметри напружено-деформованого стану знахо-

димо за формулами узагальненого закону Гука. Розв'язок для перерахованих вище функцій виглядає так:

$$f = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P(\xi) F(\xi) e^{-i\xi z} d\xi, \quad (1)$$

де f – вираз для функцій u , θ , σ_r або τ ; $P(\xi)$ – трансформанта функції тиску; $F(\xi)$ – трансформанта відповідної функції (u , θ , σ_r або τ); t – параметр перетворення.

Трансформанта Фур'є для навантаження $P(\xi)$ має вигляд:

$$P(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(z) e^{i\xi z} dz, \quad (2)$$

або

$$P(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(z) \cos \xi z dz + i \int_{-\infty}^{+\infty} p(z) \sin \xi z dz = P_1(\xi) + iP_2(\xi), \quad (3)$$

де $p(z)$ – закон зміни навантаження вздовж осі z (у рухомих осях координат).

В формулі (1.3) функція $P_1(\xi)$ є парною за параметром ξ , а $P_2(\xi)$ – непарною. Підставивши (1.3) в (1.3) для парної подінтегральної функції $F(\xi)$ за параметром ξ , отримуємо:

$$f = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} (P_1(\xi) \cos \xi z + P_2(\xi) \sin \xi z) F(\xi) d\xi, \quad (4)$$

для $F(\xi) = i\bar{F}(\xi)$, де $\bar{F}(\xi)$ непарна по ξ .

Тоді маємо:

$$f = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} (P_1(\xi) \sin \xi z - P_2(\xi) \cos \xi z) \bar{F}(\xi) d\xi. \quad (5)$$

Вираз (1.4) використовується для обчислення функцій u , θ та σ_r , вираз (3.5) – для обчислення τ . Якщо $p(z)$ парна по z , то $P_2(\xi) = 0$.

Розглянемо різні закони змінення навантаження вздовж осі z .

1) імпульс тиску прямокутного профілю:

$$p(z) = \begin{cases} p & \text{при } \left| \frac{z}{c} \right| \leq 1; \\ 0 & \text{при } \left| \frac{z}{c} \right| > 1. \end{cases} \quad (6)$$

$$p(\xi) = \frac{2p \sin \xi c}{\xi} = 2pd \frac{\sin \eta \frac{c}{d}}{\eta}, \quad (7)$$

де $\eta = \xi d$; d – внутрішній діаметр циліндра; c – півширина імпульсу;

2) імпульс тиску, що має форму експоненти

$$p(z) = \begin{cases} p e^{(bd)z/d} & \text{при } -\infty < \frac{z}{d} \leq 0; \\ 0 & \text{при } 0 < \frac{z}{d} < \infty. \end{cases} \quad (8)$$

$$P_1(\eta) = \frac{pd(\beta d)}{\eta^2 + (\beta d)^2}; \quad (9)$$

$$P_2(\eta) = \frac{p\eta d}{\eta^2 + (\beta d)^2}; \quad (10)$$

3) імпульс тиску, що має форму косинусоїди:

$$p(z) = \begin{cases} p \cos \frac{\pi z}{2c} & \text{при } \left| \frac{z}{c} \right| \leq 1; \\ 0 & \text{при } \left| \frac{z}{c} \right| > 1. \end{cases} \quad (11)$$

$$P(\eta) = \frac{4\pi c p \cos \eta \frac{c}{a}}{\pi^2 - 4\eta^2 \left(\frac{c}{a} \right)^2}. \quad (12)$$

Розв'язок для трансформантів функцій u , θ , σ_r та τ буде мат вигляд:

$$[F(\eta)]_u = \frac{\eta}{\Delta(\eta)} \left\{ \varepsilon \left[\Delta_A I_1 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) + \Delta_B K_1 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) \right] + \Delta_C I_1 \left(\gamma \eta \frac{r}{d} \right) - \Delta_D K_1 \left(\gamma \eta \frac{r}{d} \right) \right\}; \quad (13)$$

$$[F(\eta)]_\theta = \frac{\eta^2}{\Delta(\eta)} \left[\Delta_A I_0 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) - \Delta_B K_0 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) \right]; \quad (14)$$

$$[F(\eta)]_\tau = \frac{\eta^2}{\Delta(\eta)} \left\{ I \left[-\Delta_C I_1 \left(\gamma \eta \frac{r}{d} \right) + \Delta_D K_1 \left(\gamma \eta \frac{r}{d} \right) \right] + 2\varepsilon \left[\Delta_A I_1 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) + \Delta_B K_1 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) \right] \right\}; \quad (15)$$

$$[F(\eta)]_{\sigma_r} = \frac{\eta}{\Delta(\eta)} \left\{ -\Delta_A \left[I_0 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) - \frac{2\varepsilon}{r/d} I_1 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) \right] + \Delta_B \left[\eta K_0 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) + \frac{2\varepsilon}{r/d} K_1 \left(\varepsilon \eta \frac{r}{d} \right) \right] + 2\Delta_C \left[\eta I_0 \left(\gamma \eta \frac{r}{d} \right) - \frac{I_1 \left(\gamma \eta \frac{r}{d} \right)}{r/d} \right] + 2\Delta_D \left[\eta K_0 \left(\gamma \eta \frac{r}{d} \right) + \frac{K_1 \left(\gamma \eta \frac{r}{d} \right)}{r/d} \right] \right\}; \quad (16)$$

Причому $M_1 = \frac{v}{C_1}$; $M_2 = \frac{v}{C_2}$; $\varepsilon = \sqrt{1 - M_1^2}$;

$$\gamma = \sqrt{1 - M_2^2}; \quad C_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}; \quad C_2 = \sqrt{\frac{G}{\rho}}; \quad I = 1 + \gamma^2; \quad \lambda$$

та G – постійні Ляме; ρ – густина матеріалу.

Визначник $\Delta(\eta)$, що входить в рівняння (13) – (16) має вигляд:

$$\Delta(\eta) = \begin{vmatrix} F_1(d) & F_2(d) & iF_3(d) & iF_4(d) \\ F_1(D) & F_2(D) & iF_3(D) & iF_4(D) \\ if_1(d) & if_2(d) & f_3(d) & f_4(d) \\ if_1(D) & if_2(D) & f_3(D) & f_4(D) \end{vmatrix}, \quad (17)$$

де D – зовнішній діаметр циліндру.

При цьому:

$$f_1(j) = 2\varepsilon I_1(\varepsilon n);$$

$$f_2(j) = -2\varepsilon K_1(\varepsilon n);$$

$$f_3(j) = -I_1(\gamma n);$$

$$f_4(j) = -IK_1(\gamma n);$$

$$F_1(j) = k \left[I_0(\varepsilon n) - \frac{f_1(j)}{n} \right]; \quad (18)$$

$$F_2(j) = k \left[IK_0(\varepsilon n) - \frac{f_2(j)}{n} \right];$$

$$F_3(j) = 2k \left[\gamma I_0(\gamma n) + \frac{f_3(j)}{nl} \right];$$

$$F_4(j) = -2k \left[\gamma K_0(\gamma n) - \frac{f_4(j)}{nl} \right],$$

де для $j = d$, $k = \eta^2$, $n = \eta$, а для $j = D$, $k = \eta$, $n = \frac{b}{d} \eta$.

Вирази для Δ_A , Δ_B , Δ_C та Δ_D видно зі співвідношення

$$\Delta(\eta) = F_1(d)\Delta_A - F_2(d)\Delta_B - F_3(d)\Delta_C + F_4(d)\Delta_D. \quad (19)$$

При розрахунку u , θ та σ_r за формулами (13) – (16) на ПК інтеграли у виразах, отриманих з (4), розбивалися

на два, причому перший інтеграл \int_0^α обчислювався за формулами (13) – (16), а другий \int_α^∞ – за асимптотичним

представленням функцій Бесселя, в яких утримувався один член. Величина α вибиралася залежно від геометрії циліндра. Коефіцієнт Пуассона $\mu = 1/3$. Точність розрахунку величини σ_r на межах дозволяє оцінити точність прийнятого методу розрахунку порівнянням з граничними умовами:

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{p} = -1 \text{ при } \frac{r}{d} = 0 \text{ та } \frac{z}{d} = 0; \quad (20)$$

$$\sigma_r = 0 \text{ при } \frac{r}{d} = \frac{b}{d}. \quad (21)$$

Обговорення. Розрахунки показали, що напруження руйнування раніше за все з'являються на колі внутрішньої поверхні $r/d = 1$, $z/d = 0$ (або біля неї).

На рис. 1 показані зміни деформацій, напружень та радіального переміщення для циліндру однієї геометрії під дією прямокутного (рис. 1, а), косинусоїдального (рис. 1, б) та експоненціального (рис. 1, в) імпульсів по довжині циліндру z/d (в рухомих координатах), що «біжать» з однаковою швидкістю, причому для експоненціального профілю $\beta\alpha = 1$, а для прямокутного та косинусоїдального однакові c/d та $\left| \frac{p(z)}{p} \right|_{\max} = 1$.

З рис. 1 видно, що всі параметри суттєво залежать від форми імпульсу тиску. Прямокутний імпульс призводить до появи більших напружень та деформацій, ніж косинусоїдальний, а поява вістря в імпульсі (експонента)

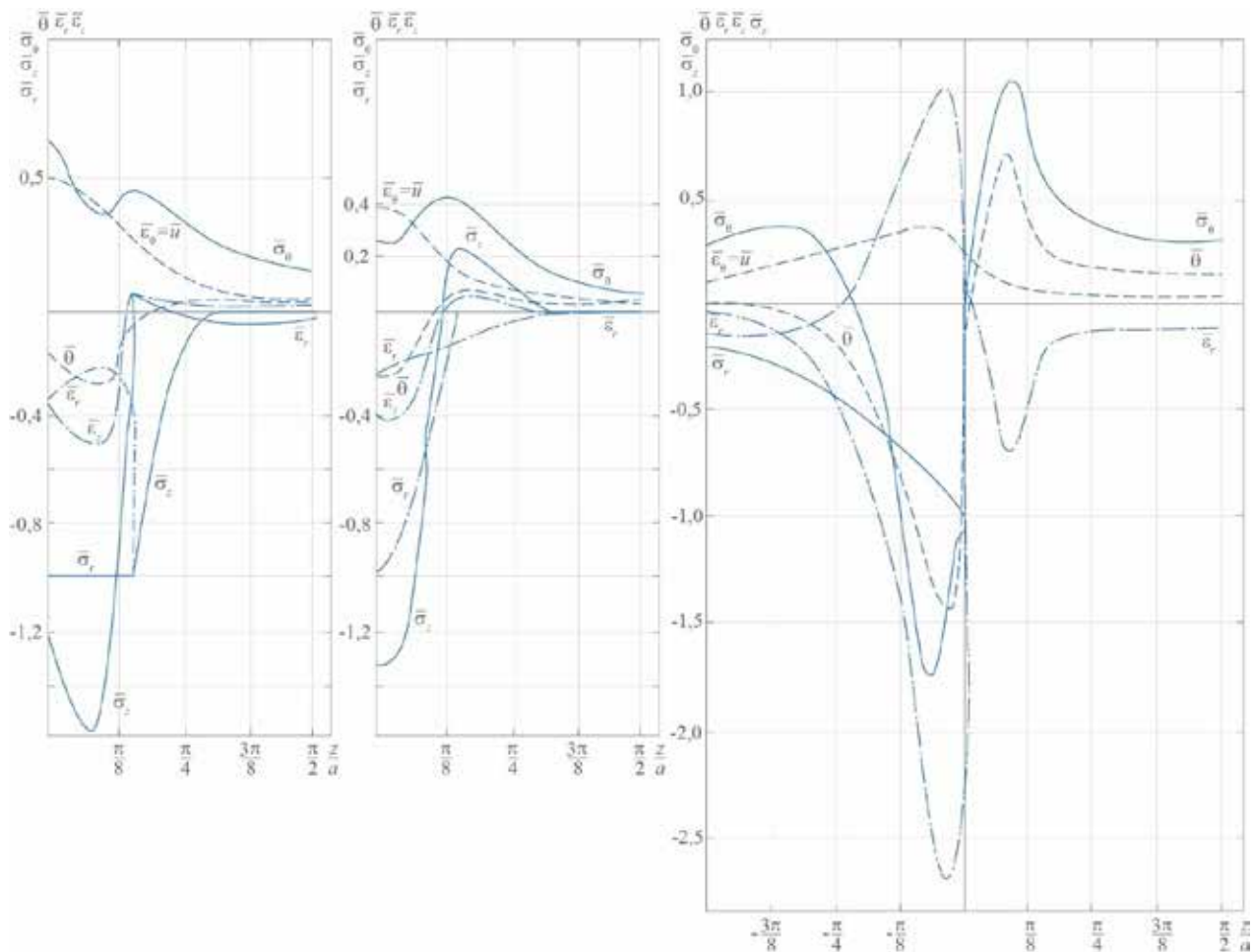


Рис. 1. Зміни деформацій, напружень та радіального переміщення для циліндру однієї геометрії під дією прямокутного (а), косинусоїдального (б) та експоненціального (в) імпульсів

викликає сильне зростання усіх параметрів навколо вістря навантаження.

З рис. 2 видно, що радіальне переміщення в перерізі $r/d = 1$, $z/d = 0$ має максимум, що залежить від b/d , причому при рівних b/d значення \bar{u} для прямокутного імпульсу для розрахованих значень $c/d \leq \pi$ більше, ніж для косинусоїдального. При ширині імпульсу $c/d > \pi$ функція $\bar{u}(c/d)$ досягає постійного значення, яке залежить від b/d .

З залежності (рис. 2) $\bar{u} = f(\gamma)$ при $b/d = 5$ і $c/d = 3\pi/32$ видно, що зі зменшенням швидкості пробігу імпульсу (збільшенням γ) \bar{u} зменшується за будь-якої форми імпульсу, причому для прямокутного імпульсу \bar{u} більше, ніж для косинусоїдального.

На рис. 3 дана залежність величини інтенсивності напруження $\sigma_i = \frac{\sigma_i}{\rho}$ по довжині циліндра z/a для різних форм імпульсу при $b/a = 4$; $\gamma = 0,6$;

$c/d = 5\pi/32$; $r/d = 1$. Крива $\bar{\sigma}_i = f(z/d)$ для косинусоїдального імпульсу має максимум в центральній точці $z/d = 0$, а для прямокутного максимум «розпливається» в межах $z/d = \pm c/d$. Зі збільшенням $|z/d|$ величина $\bar{\sigma}_i$ різко зменшується, причому для прямокутного імпульсу $\bar{\sigma}_i$ більше, ніж для косинусоїдального.

Висновки. Для імпульсу експоненціального профілю $\bar{\sigma}_i$ поблизу $z/d = 0$ значно зростає, оскільки вістря імпульсу призводить до великого місцевого стиснення на внутрішній поверхні циліндра.

Необхідно враховувати, що врахування форми імпульсу тиску призводить до ряду труднощів: необхідності обчислення межі при $\eta \rightarrow 0$ підінтегрального виразу для кожної форми імпульсу; необхідності уникнути перетворення в нуль знаменника підінтегральної функції, підбору відповідної асимптотики для розрахунку інтеграла при прагненні аргументу до нескінченності.

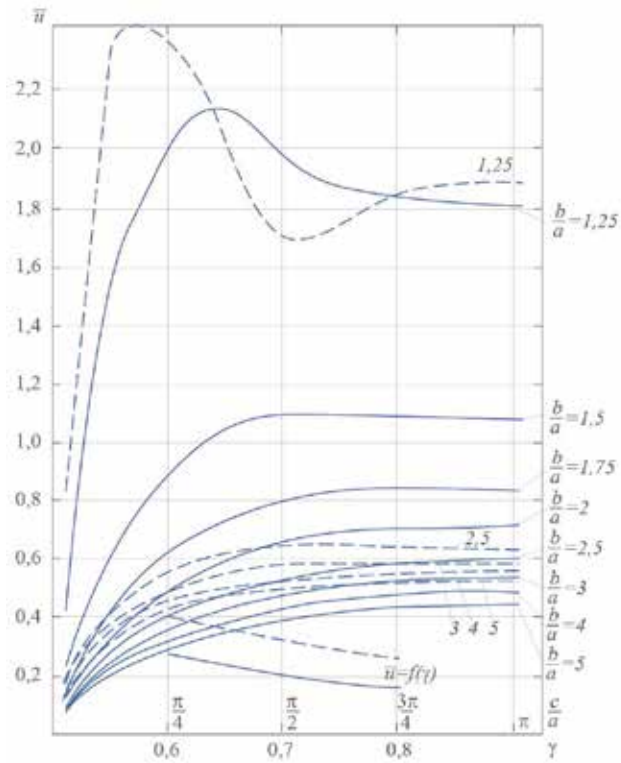


Рис. 2. Зміни середнього значення радіального переміщення для циліндру однієї геометрії під дією прямокутного та косинусоїдального імпульсів

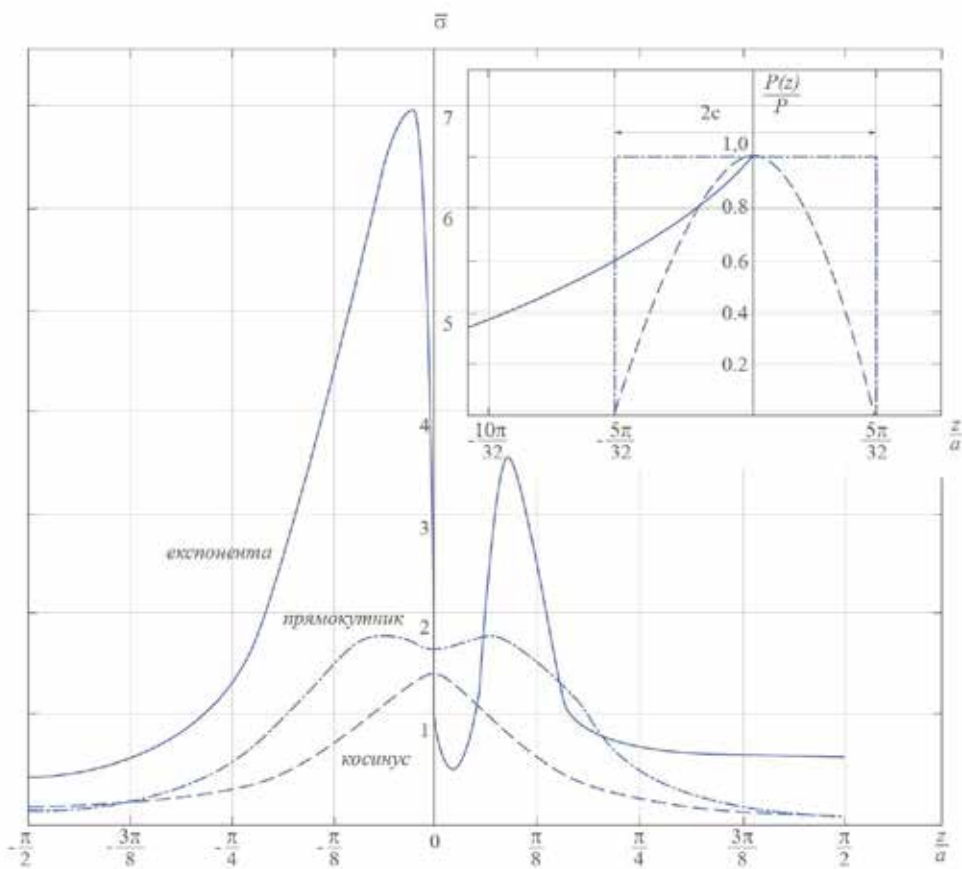


Рис. 3. Залежність величини інтенсивності напруження $\sigma_i = \frac{\sigma_i}{\rho}$ по довжині циліндра z/a

Бібліографічні посилання:

1. M.R.M. Aliha, S. Shaker, Effect of bitumen type, temperature and aging on mixed I/ II fracture toughness of asphalt binders-experimental and theoretical assessment, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 110 (2020), 102801, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102801>.
2. L. Bockstal, T. Berchem, Q. Schmetz, A. Richel, Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review, *J. Clean. Prod.* 236 (2019), 117574, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.049>.
3. H.R. Karimi, M.R.M. Aliha, E. Khedri, A. Mousavi, S.M. Salehi, P.J. Haghightapour, P. Ebneabbasi, Strength and cracking resistance of concrete containing different percentages and sizes of recycled tire rubber granules, *J. Build. Eng.* 67 (2023), 106033, <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106033>.
4. N.S. Mashaan, M.R. Karim, N.S. Mashaan, M.R. Karim, Waste tyre rubber in asphalt pavement modification Waste tyre rubber in asphalt pavement modification, 8917 (2014) 5–9. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000922>.
5. T. Wang, F. Xiao, S. Amirkhanian, W. Huang, M. Zheng, A review on low temperature performances of rubberized asphalt materials, *Constr. Build. Mater.* 145 (2017) 483–505, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.031>.
6. S. Amid, A. Foroutan, S. Dessouky, H. Mork, A. Kavussi, The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process, *Constr. Build. Mater.* 222 (2019) 643–653, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.180>.
7. K. Liu, K. Zhang, X. Shi, Performance evaluation and modification mechanism analysis of asphalt binders modified by graphene oxide, *Constr. Build. Mater.* 163 (2018) 880–889, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.171>.

Kalinin E.I., Doctor of technical sciences, Professor, National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Kolodnenko V. M., Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Research of free oscillations of the body of the vehicle while driving

Strength and fatigue properties are the most valuable mechanical characteristics of rubber as a construction material. For practice, the most interesting question is the product's performance and the range of changes in its physical and mechanical parameters under the given conditions of environmental influence and operating mode.

Interest in the problems of strength and fatigue of rubber has recently increased significantly due to the widespread introduction into practice of various products that carry large power loads. Therefore, numerous theoretical and experimental studies are devoted to the study of the effects of aging, fatigue and destruction of rubber.

In recently published monographs, a summary of many years of theoretical and experimental research on the problems of the strength of polymer bodies is summed up, and considerable attention is paid to rubber in these works.

Irreversible mechanical and chemical changes may accumulate in rubber during long-term exposure to static or sign-changing loads. Such accumulation is usually called the fatigue process or fatigue, and the destruction of the sample as a result of its action – fatigue failure. During the long-term study of this process, specific terms were developed to characterize its individual elements. Thus, the working time of a part from the start of operation to failure is called durability, endurance or service life.

However, it is extremely difficult to detect a crack in massive rubber products, and after the first visible crack, the service life of the part reaches 30% or more of the total service life.

Taking into account the above, let's determine the influence of the shape of the pressure pulse, which "runs" at a constant speed, on the stressed-deformed state of the hollow cylinder within the limits of elasticity, since the above-described elements of the car transmission must work elastically.

To calculate the fatigue failure of the rubber elements of the transmission, we will accept the following assumptions: 1) the material contains a large number of various defects and structural imperfections with varying degrees of danger; 2) with an increase in the volume of the part, the probability of the presence of a dangerous defect increases; 3) the strength of the part is determined by the most dangerous defect.

In the original stressed material of the rubber element, there are also various defects arising as a result of mechanical and thermal effects or manufacturing technology, structural imperfections (impurities in the load and ingredients of the rubber mixture), poor dispersion of the filler or vulcanization, places of concentration of residual stresses, etc. Such material imperfections are centers of microcracks that give rise to the destruction of the loaded part. The probability of the development of a crack from the most dangerous defect can be satisfactorily described within the classical theory of mathematical statistics.

Key words: transmission, rubber elements, strength, fatigue, power loads, load, destruction, impulse, pressure, microcracks, power.