

УДК 622.73:621,926.002.75

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ ГУМОМЕТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ ОБ'ЄМНОГО СТИСКУ

¹Дирда В.І., ¹Калганков Є.В., ¹Цаніді І.М., ¹Черній О.А., ²Толстенко О.В.,
²Деркач О.Д., ²Кабат О.С.

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ²Дніпровський державний аграрно-економічний університет

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТОВ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЁТОМ ЭФФЕКТА ОБЪЁМНОГО СЖАТИЯ

¹Дырда В.И., ¹Калганков Е.В., ¹Цаниди И.Н., ¹Черний А.А., ²Толстенко А.В.,
²Деркач О.Д., ²Кабат О.С.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ²Днепровский аграрно-экономический университет

SPECIFICITY OF RUBBER-METAL ELEMENTS CALCULATION WITH TAKING INTO ACCOUNT EFFECT OF BULK COMPRESSION

¹Dyrda V.I., ¹Kalgankov Ye.V., ¹Tsanidy I.N., ¹Cherniy A.A., ²Tolstenko A.V.,
²Derkach O.D., ²Kabat O.S.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine, ²Dnipro State Agrarian and Economic University

Анотація. Розглядаються масивні гумометалеві деталі виконані з середньонаповнених матеріалів (30-60 мас.ч. технічного вуглецю). При гармонійному навантаженні такі деталі демонструють ефект фізичної нелінійності навіть при малих деформаціях. В цьому випадку динамічні характеристики гуми залежать від амплітуди напружень і деформацій. При використанні тонкошарових елементів при досить великих величинах відношення радіусу елемента R до товщини шару гуми h_p (тобто R/h_p) можливий прояв ефекту об'ємного стиску. В цьому випадку об'ємний модуль стиску K набагато більше ніж модуль Юнга і це необхідно враховувати при розрахунках конкретних гумометалевих деталей.

Розглядається алгоритм розрахунків жорсткісних і дисипативних параметрів деталей. Об'ємна поведінка матеріалу моделюється гіпотезою $\nu = 0,495$ (ν – коефіцієнт Пуассона), що характерно для елементів зі слабко-стискаємих еластомерів.

В основі розрахунків лежить введення універсального конструктивно-деформаційного параметра β , який дозволяє встановити параметри жорсткості й температури дисипативного розігріву для елементів різної конфігурації, виконаних з середньонаповнених гум, з урахуванням ефектів фізичної не лінійності.

Параметри типу β є доволі зручним для досліджень: вони безрозмірні і залежать тільки від геометрії деталі і є її універсальною характеристикою. Коефіцієнти β дають вичерпну інформацію про поведінку елементів, а також дають інформацію про їх конструкційне виконання. Тобто вони є конструктивно-деформаційним параметром, що характеризує деформаційні властивості деталей. При $\nu = 0,5$ напружений стан у тонкошарових елементах наближений до всебічного стиску; при цьому змінюється і величина β .

Наведено методику дослідження та розрахунок жорсткісних і дисипативних параметрів гумових елементів при довільному комбінованому навантаженні зсуву-стиску, а також впливу на фізико-механічні характеристики гуми модифікатора нанорозмірного типу – фулеренової сажі.

Наведені результати експериментальних досліджень гумометалевих елементів циліндричної форми з різною товщиною гумового шару; визначено співвідношення R/h , при якому виникає ефект об'ємного стиску. Наведені також результати експериментальних досліджень гумових деталей з наповненням 45 мас.ч. технічного вуглецю і модифікованих фулереновмісним технічним вуглецем (10 % фулерена C_{60}). При монофазному стисканні експериментально встановлено, що динамічні характеристики гуми змінюються при використанні фулеренової сажі.

Ключові слова: гума, гумометалевий елемент, дисипативний розігрів, статична жорсткість, об'ємний стиск, коефіцієнт Пуассона, фулеренова сажа, наномодифікатор, деформація.

Незважаючи на різноманітність конструктивних форм гумометалевих деталей, силові елементи базуються на основних формах: прямокутній, призматичній й циліндричній.

Основні види навантаження: зсув, стиск, комбінований зсув зі стиском при тривалому циклічному навантаженні. Діапазони гармонійного навантаження: частоти ($0 \div 100$) Гц; амплітуди ($0 \div 20$) мм. Попереднє статичне навантаження від 3 до 25 % [1]. Використовуються середньонаповнені гуми на основі натуральних та синтетичних каучуків, що містять 30-60 мас.ч. технічного вуглецю. Такі гуми демонструють при гармонійному навантаженні ефекти фізичної нелінійності в області малих деформацій, що проявляються в залежності динамічних характеристик матеріалу від амплітуд напружень і деформацій [2]. У випадку використання тонкошарових елементів (при досить великих величинах відношення радіуса елемента до товщини шару гуми) можливий прояв ефекту об'ємного стиску [2].

Тому метою є: побудова співвідношень для розрахунку жорсткісних характеристик гумових деталей, встановлення співвідношення R/h_p , при яких виникає ефект об'ємного стиску.

Теоретичні передумови. Гумометалеві деталі машин являють собою досить масивні елементи, виконані з наповнених гум, у зв'язку із чим, їх жорсткісні й дисипативні параметри визначаються в результаті розв'язання зв'язаної задачі нелінійної термов'язкопружності.

Методика розрахунків жорсткісних і дисипативних параметрів елементів будується в результаті здійснення наступних етапів досліджень:

- розв'язання зв'язаної задачі нелінійної термов'язкопружності стосовно до заданих конфігурацій елементів з метою визначення їх характеристик у певному діапазоні зміни геометричних розмірів, частот і амплітуд навантаження;
- вибір найбільш зручних для досліджень механічних характеристик, через які досить просто можуть бути виражені жорсткісні параметри елементів;
- побудова наближених співвідношень для розрахунків жорсткісних характеристик шляхом використання встановлених закономірностей;
- оцінка їх точності.

Нижче послідовно викладаються основні положення й передумови, необхідні для реалізації зазначених етапів дослідження.

При теоретичних дослідженнях гумові деталі розглядаються як ізотропні нелінійно-в'язкопружні тіла у формі призми прямокутного перетину $|\delta| \leq t$, $|y| \leq h$ й циліндра $R_0 \leq r \leq R$, $|z| \leq h$ піддані кінематичному збудженню по торцях $y, z = \pm h$. Бічні поверхні вільні від навантаження. На поверхні елементів здійснюється теплообмін за законом Ньютона.

Для зазначених умов навантаження в елементах реалізується простий (монофазний) деформований стан [2] і розрахункова схема має той же вид, що й у лінійній в'язкопружності

$$\tilde{\sigma}_{ij} = 0; \quad c\dot{\theta} = k(\theta_{,i})_{,i} + \bar{D}'; \quad (1)$$

$$\tilde{\sigma}_{ij} = 2\tilde{G}\left(\tilde{\varepsilon}_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu}\tilde{\varepsilon}_{kk}\delta_{ij}\right); \quad \tilde{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\tilde{u}_{ij} + \tilde{u}_{ji}); \quad (2)$$

$$\bar{D}' = \frac{\omega}{2}(\sigma''_{ij}\varepsilon'_{ij} - \sigma'_{ij}\varepsilon''_{ij}); \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (3)$$

де $(\tilde{\cdot}) = (\cdot)' + i(\cdot)''$ – комплексна амплітуда; c і k – коефіцієнти об'ємної теплоємності й теплопровідності; \tilde{G} і ν – модуль зсуву й коефіцієнт Пуассона; $\tilde{\sigma}_{ij}$, \tilde{u}_i – компоненти тензорів напруг і переміщень; ω – частота навантаження.

Навантаження характеризується наступними граничними умовами:

- для призматичних елементів стиску

$$\begin{aligned} \tilde{u}_y = \tilde{u}_{0y}; \quad \tilde{u}_x = 0; \quad y = \pm h; \\ \tilde{\sigma}_x = 0; \quad \tilde{\sigma}_{xy} = 0; \quad x = \pm \ell; \end{aligned} \quad (4)$$

- для призматичних елементів зсуву

$$\begin{aligned} \tilde{u}_y = 0; \quad \tilde{u}_x = u_{0x}; \quad y = \pm h; \\ \tilde{\sigma}_x = 0; \quad \tilde{\sigma}_{xy} = 0; \quad x = \pm \ell; \end{aligned} \quad (5)$$

- для циліндричних елементів зсуву

$$\begin{aligned} \tilde{u}_z = \pm u_{0z}; \quad \tilde{u}_r = 0; \quad z = \pm h; \\ \tilde{\sigma}_r = 0; \quad \tilde{\sigma}_{rz} = 0; \quad r \in [R_0, R]; \end{aligned} \quad (6)$$

- для циліндричних елементів при зсуві у здовж осі

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{rr} = u_{0x} \cos \theta; \quad \tilde{u}_{\theta\theta} = -u_{0x} \sin \theta; \quad u_{zz} = 0; \quad z = h; \\ u_{rr} = \tilde{u}_{\theta\theta} = \tilde{u}_{zz} = 0; \quad z = -h; \\ \tilde{\sigma}_{rx} = \tilde{\sigma}_{rr} = \tilde{\sigma}_{r\theta} = 0; \quad r \in [R_0, R]. \end{aligned} \quad (7)$$

Комбіноване навантаження стиск-зсув призматичних елементів у загальному випадку описується граничними умовами:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{rr} = u_{0x} \cos \varphi; \quad \tilde{u}_x = u_{0x} \sin \varphi; \quad y = 2h; \\ \tilde{u}_y = 0; \quad \tilde{u}_x = 0; \quad y = 0; \\ \tilde{\sigma}_{xx} = 0; \quad \tilde{\sigma}_{yy} = 0; \quad x = \pm \ell; \end{aligned} \quad (8)$$

$$u_{0i} = u'_{0i} \cos \omega t - u''_{0i} \sin \omega t = |u_{0i}| \cos(\omega t + \varphi_{0i}),$$

де φ_{0i} – фази коливань, $i = x, y$.

Аналогічні граничні умови мають місце для циліндричних елементів.

Теплові граничні умови мають вигляд:

- для призматичних елементів

$$\begin{aligned} \theta_{,x} \pm \alpha_1 k^{-1}(\theta - \theta_c) = 0; \quad y = \pm h; \\ \theta_{,y} \pm \alpha_2 k^{-1}(\theta - \theta_c) = 0; \quad y = \pm \ell; \end{aligned} \quad (9)$$

- для циліндричних елементів

$$\begin{aligned} \theta_{,z} \pm \alpha_1 k^{-1}(\theta - \theta_c) = 0; \quad z = \pm h; \\ \theta_{,r} \pm \alpha_2 k^{-1}(\theta - \theta_c) = 0; \quad r \in [R_0, R]. \end{aligned} \quad (10)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти теплопередачі.

Початковий розподіл температури дається рівнянням

$$\theta(x_i, 0) = \theta_0(x_i). \quad (11)$$

У прийнятих співвідношеннях $\theta_0(\vec{x}, t)$, $\tilde{u}_{0i}(\vec{x}, t)$ – повільно мінливі функції часу й амплітуд.

Залежність комплексного модуля зсуву від температури, частоти й амплітуди деформації часу й амплітуди деформації на підставі експериментальних даних [2] має вигляд

$$\tilde{G} = \tilde{G}(\omega, \theta, e) = G_L'(\omega, \theta) F'(\theta)(e),$$

де $G_L'(\omega, \theta)$ – модулі зсуву лінійної теорії в'язкопружності, що відповідають дуже малим деформаціям $\varepsilon = 0,5\%$ [1, 2]; e – інтенсивність амплітуди девіатора деформації.

$$a = (a'_{ij} \cdot a'_{ij} + a''_{ij} \cdot a''_{ij})^{1/2};$$

$$\tilde{e}_{ij} = \tilde{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}; \quad |\tilde{\varepsilon}| = (\varepsilon_{i,j}'^2 + \varepsilon_{i,j}''^2)^{1/2}; \quad \tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_{kk},$$

де $F'(\theta)$ – функції, що задовольняють умовам $F'(0) = F''(0) = 1$.

Об'ємна поведінка матеріалу моделюється гіпотезою $\tilde{\nu} = \nu' = \text{const} = 0,495$, що характерно для елементів зі слабостискаємих еластомірів з досить розвинутою вільною поверхнею.

Розв'язання зв'язаної задачі (1)-(12) дозволяє конкретизувати величини, що в неї входять, розрахувати поля напружень, а також комплексний параметр $\tilde{\beta}_n = \beta' + i\beta''$ згідно з формулами [3, 4]:

- для призматичних елементів

$$\tilde{\beta}_n = \frac{\tilde{E}_k}{E_0} = \ell^{-1} \int_0^\ell \frac{\sigma_{yy}(x, h) dx}{E_0 \varepsilon_0};$$

$$\tilde{\beta}_\tau = \frac{\tilde{G}_k}{G_0} = \ell^{-1} \int_0^\ell \frac{\tilde{\sigma}_{xy}(x, h) dx}{G_0 \gamma_0};$$
(13)

- для циліндричних елементів

$$\tilde{\beta}_n = 2(R^2 - R_0^2)^{-1} \int_{R_0}^R \frac{r \tilde{\sigma}_{zz}(r, h) dr}{E_0 \varepsilon_0};$$

$$\tilde{\beta}_\tau = \frac{1}{S} \int_S \frac{t_x dS}{G_0 \gamma_0}; \quad t_x = \sigma_{zr} \cos \theta' - \sigma_{z\theta} \sin \theta',$$
(14)

де n, τ – індекси, що відповідають стискаючим та зсувним зусиллям; S – площа прикладання навантаження; G_0, E_0 – деякі відлікові модулі.

$$G_0 = \tilde{G}_L(\omega, \theta), \quad E_0 = \tilde{E}_L(\omega_0, \theta_0),$$

$$\varepsilon_0 = u_0(y, z)/h, \quad \gamma_0 = u_{0x}/h.$$

Параметри типу $\tilde{\beta}$ є самими зручними для досліджень. Вони безрозмірні при фіксованому значенні коефіцієнта Пуассона, залежать тільки від геометрії

елемента і є його універсальною характеристикою. Коефіцієнти $\tilde{\beta}$ дають вичерпну інформацію про механічну поведінку елементів, оскільки повною мірою характеризують модулі накопичення і втрат

$$\tilde{E}_k = \tilde{\beta}_n E_0, \quad \tilde{G}_k = \tilde{\beta}_\tau G \quad \text{або} \quad E_k^{',''} = \beta_n^{',''} E_0, \quad G_k^{',''} = \beta_\tau^{',''} G_0. \quad (15)$$

Визначають коефіцієнти жорсткості елементів в залежності від амплітуди навантаження через амплітудно-залежні модулі \tilde{E}_k, \tilde{G}_k .

$$\tilde{C}_n = \tilde{E}_k \cdot S/H, \quad \tilde{C}_\tau = \tilde{G}_k \cdot S/H. \quad (16)$$

Коефіцієнт $\tilde{\beta}$, включаючи в себе також інформацію про конструкційне виконання елементів, являється конструктивно-деформаційним параметром, що характеризує деформаційні властивості елементів.

В роботі [4] проведено обґрунтування універсальних параметрів типу β як об'єктів дослідження, що однозначно визначають усі характеристики елементів (силові й дисипативні) при циклічному деформуванні.

Розрахунки $\tilde{\beta}$ проводяться по формулах (13) – (14) шляхом розв'язання завдання (1)-(11) методом змінних параметрів пружності в комбінації із МКЕ при конкретизації (9), (10), (12) властивостями модельної гуми, що володіє істотною не лінійністю в області малих деформацій ($0 \leq \gamma \leq 0,15$). Значення геометричних розмірів варіюються в межах $0,2 \leq b = h/\ell \leq 1$; $0,2 < z_0 = h/R \leq 1$. Дані експериментальних досліджень (12) узагальнюються на випадок багатовісної деформації за допомогою співвідношення $e = \gamma/\sqrt{2}$

$$F^{',''}(e) = G^{',''}(\sqrt{2}e)/G_0^{',''}.$$

Розрахунок жорсткісних параметрів циліндричних гумометалевих елементів з урахуванням ефектів об'ємного стиску.

Розрахунки жорсткості будемо робити по формулі [2]

$$\beta = \frac{\tilde{E}_k}{\tilde{E}} = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu) + 15,42\nu(1 - \nu)y_0^2}, \quad (17)$$

де \tilde{E} і \tilde{E}_k – дійсний і гаданий модулі Юнга; $y_0 = h_p/R$ (h_p – товщина гумового шару, R – радіус циліндра).

З (17) випливає гранична рівність для елементів малої товщини у вигляді

$$\lim_{y_0 \rightarrow 0} \beta = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}. \quad (18)$$

Звідси випливає, що при зменшенні товщини шару гуми жорсткість елемента прагне до деякого граничного значення, зокрема

$$\tilde{E}_k = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} = K, \quad (19)$$

де K – модуль об'ємного стиску.

При $\nu \cong 0,5$ напружений стан у тонкошарових елементах наближений до всебічного стиску. Відомо, що особливістю поведінки гуми в цьому випадку є істотний ріст коефіцієнта жорсткості при зменшенні товщини

$$\lim_{\nu \rightarrow 0,5} \beta = \frac{1}{c y_0^2},$$

де постійна c не залежить від y_0 .

Експериментальні дослідження. Мета експерименту: установити величини співвідношень R/h_p при яких виникає ефект об'ємного стиску.

Досліджувались гумометалеві елементи циліндричної форми з різною товщиною гумового шару h_p (табл. 1). Металева арматура була приєднана до гумового масиву в процесі вулканізації. У таблиці прийняті наступні позначення: h_m – товщина металу (для всіх елементів $h_m = 5$ мм); n – кількість елементів у стопці, що підлягають випробуванню; P – сила при стиску елементів; Δ – деформація стопки елементів; C – статична жорсткість стопки елементів при стиску й витримці її під навантаженням не менш 30 хв. Елементи виготовлялися з середньонаповненої гуми типу 2959.

Дослідження проводилися на універсальному стенді FP100/1 з автоматичним записом кривої «навантаження-деформація» (рис. 1). Попередньо всі елементи піддавалися тренуванню: трикратному деформуванню з наступним розвантаженням, швидкість навантаження 0,2 мм/сек.

Результати випробувань наведені в табл. 1 та на рис. 2 і рис. 3. Як видно (рис. 2), залежність $P(\Delta)$ при деформації стиску до $\varepsilon \leq 0,1$ практично лінійна.

Таблиця 1 – Результати випробувань

№	h_p , мм	n	Δ , мм	P , кг	R/h_p	C , кг/см	h_m , мм
1	40	1	2	2100	2,5	1050	5
2	20	2	2	5000	5	2500	5
3	10	4	2	10000	10	5000	5
4	5	8	2	10800	20	5400	5

Вплив нового модифікатора нанорозмірного типу на фізико-механічні характеристики гуми. В останні роки в якості модифікаторів гум стали використовувати фулерени [5]. Вважається, що механізм їх взаємодії не вкладається в рамки відомої теорії підсилення. Модифікуючу активність фулеренів та фулереновмісного технічного вуглецю зазвичай пов'язують з їх розвиненою питомою поверхнею; для фракції фулерена C_{60} вона складає 600 м²/г, що перевищує всі існуючі наповнювачі та модифікатори гум [5]. Існує також думка, що синтез вуглецевих наноматеріалів (в даному випадку фулереновмісних структур, що являють собою нову алотропну форму вуглецю) призведе до створення нових типів еластомерів з покращеними властивостями.

Метою даних досліджень є випробування середньо наповненої гуми 2959 (на основі натурального каучуку з наповненням технічним вуглецем 45 мас. частин), модифікованої фулереновмісним технічним вуглецем (10 % фулерена C_{60} ,



Рисунок 1 – Універсальний стенд FP100/1

приблизно 0,005-0,007 мас.ч.). Зразки діаметром 100 мм і висотою 50 мм у звичайному виконанні та модифіковані фулереновмісткою сажею випробувались при монофазному стиранні; методика досліджень викладена раніше.

Результати досліджень: зміна модуля Юнга знаходилась в межах точності експерименту; спостерігалось деяке збільшення еластичності (збільшення коефіцієнта дисипації ψ у межах 6-8 %), що не суперечить даним, отриманим в роботі [5] при випробуванні легкових шин на основі нановуглецю (фулерена C_{60}).

Висновки. 1. Співвідношення $R/h_p \sim C$ показує, що в тонкошарових елементах при $R/h_p > 10$ виникає об'ємний стиск.

2. Експериментально встановлено, що в тонкошарових гумометалевих елементах при $R/h_p > 10$ виникає ефект об'ємного стику; при урахуванні цього ефекту у випадку визначення жорсткісних параметрів для тонкошарових елементів модуль Юнга E потрібно замінити на модуль об'ємного стику K .

3. Експериментально встановлено збільшення коефіцієнту дисипації гуми модифікованої фулереновою сажею на 6-8 %.

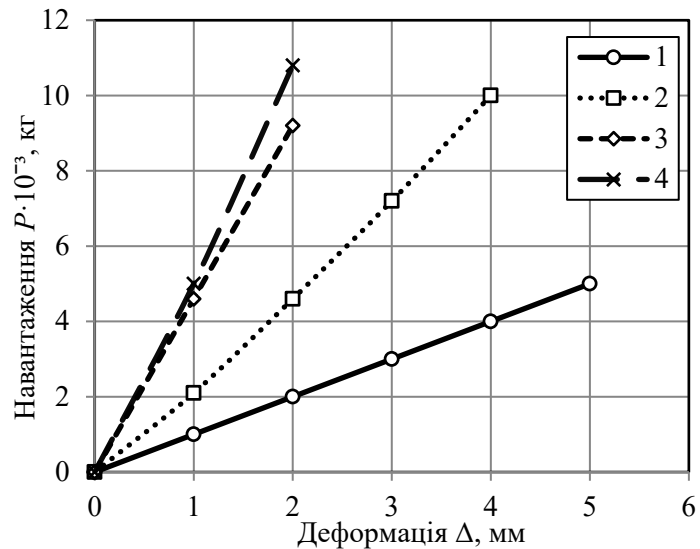


Рисунок 2 – Залежність $P \sim \Delta$

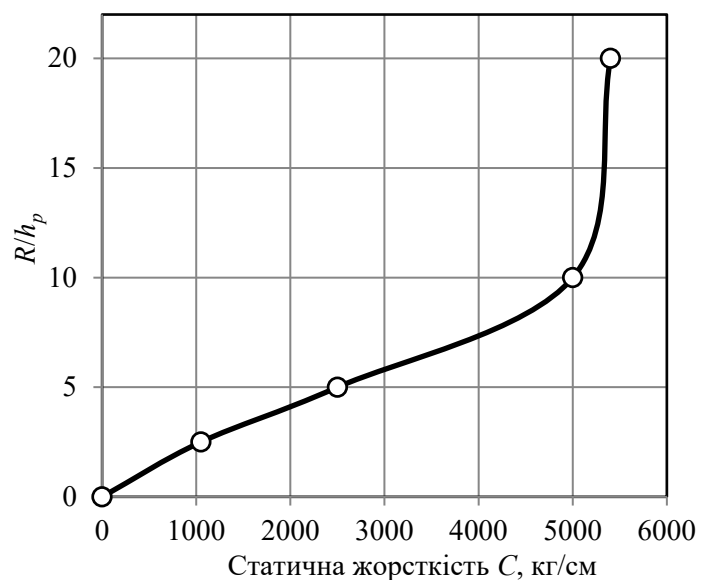


Рисунок 3 – Залежність $R/h \sim C$

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дырда, В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях / В.И. Дырда. – Киев: Наукова думка, 1988. – 232 с.
2. 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.
3. Расчет стационарных колебаний и диссипативного разогрева нелинейных вязкоупругих тел при периодическом нагружении / И.К. Сенченков, В.И. Дырда, В.И. Козлов, О.П. Терещенко, А.Б. Мазнецова // Прикладная механика. – 1986. – № 6. – С. 49-55.
4. Определение физико-механических свойств наполненных резин / В.И. Дырда, Е. В. Калганков, Г.Н. Агальцов [и др.] // Геотехническая механика. – Днепропетровск. – 2014. – № 116. – С. 158-173.

5. Леонтьева, М.А. Повышение качества легковых шин на основе нанокремнезема / М.А. Леонтьева, Н.Л. Клейменова, Т.И. Игуменова // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3. – С. 135-136.

REFERENCES

1. Dyrda, V.I. (1988), *Prochnost i razrusheniye elastomernykh konstruksiy v ekstremalnykh usloviyakh* [Strength and destruction of elastomeric structures in extreme conditions], Naukova dumka, Kyiv, USSR.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zviagilskii, E.L. and Kobets, A.S. (2012), *Prikladnaya mekhanika uprugo-nasledstvennykh sred. Tom 2. Metody rascheta elastomernykh detalei* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Design techniques of elastomeric parts], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
3. Senchenkov, I.K., Dyrda, V.I., Kozlov, V.I., Tereshchenko, O.P. and Maznetcova, A.B. (1986), "Calculation of stationary oscillations and dissipative heating of nonlinear viscoelastic bodies under periodic loading", *Prikladnaya mehanika* [Applied mechanics], no. 6, Kyiv, USSR.
4. Dyrda, V.I., Agaltsov, G.N., Novikova, A.V., Kalgankov, E.V., Tsanidi, I.N. and Dorohov, M.A. (2014) "Determination of physical and mechanical properties of the filled rubber", *Geo-Technical Mechanics*, no. 116, Dnipro, Ukraine.
5. Leontieva, M.A. Klejmenova, N.L. and Igumenova, T.I. (2016), "Improving the quality of car tires based on nanocarbon", *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik* [International Student Scientific Bulletin], no. 3. Moscow, RF.

Про авторів

Дирда Віталій Іларіонович, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу механіки еластомерних конструкцій гірських машин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна, vita.igtm@gmail.com

Калганков Євген Васильович, аспірант, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна, kalgankov.ye.v@dsau.dp.ua

Цаніді Іван Миколайович, аспірант, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна.

Черній Олександр Анатолійович, аспірант, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна, sanek20.1984@gmail.com

Толстенко Олександр Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Надійність і ремонт машин», Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна, info@dsau.dp.ua

Деркач Олексій Дмитрович, кандидат технічних наук, доктор філософії, доцент, завідувач кафедри експлуатації машинно-тракторного парку, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна, addsau@gmail.com

Кабат Олег Станіславович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації машинно-тракторного парку, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна

About the authors

Dyrda Vitaly Illarionovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Kalgankov Yevgeniy Vasilievich, Ph. D. Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, kalgankov.ye.v@dsau.dp.ua

Tsanidy Ivan Nikolaevich, Ph. D. Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine

Cherniy Alexandr Anatolyevich, Ph. D. Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, sanek20.1984@gmail.com

Tolstenko Alexandr Vasilyevich, Candidate of Technical Science (Ph. D.), Associate Professor of Department «Reliability and repair of machinery», Dnepropetrovsk State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnipro, Ukraine, info@dsau.dp.ua

Derkach Olexsii Dmitrovich, Candidate of Technical Science (Ph. D.), Head of Department of operation of the machine-tractor park Dnipro State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnipro, Ukraine, addsau@gmail.com

Kabat Oleg Stanislavovich, Candidate of Technical Science (Ph. D.), Associate Professor of Department of operation of the machine-tractor park Dnipro State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnipro, Ukraine

Аннотация. Рассматриваются массивные резинометаллические детали, выполненные из средненаполненных материалов (30-60 масс.ч. технического углерода). При гармонической нагрузке такие детали демонстрируют эффект физической нелинейности даже при малых деформациях. В этом случае динамические характеристики резины зависят от амплитуды напряжений и деформаций. При использовании тонкослойных элементов при достаточно больших величинах отношения радиуса элемента R к толщине слоя резины h_p (т.е. R/h_p) возможно проявление эффекта объемного сжатия. В этом случае объемный модуль сжатия K намного больше, чем модуль Юнга и это необходимо учитывать при расчётах конкретных резинометаллических деталей.

Рассматривается алгоритм расчётов жесткостных и диссипативных параметров деталей. Объемное поведение материала моделируется гипотезой $\nu = 0,495$ (ν – коэффициент Пуассона), что характерно для элементов из слабосжимаемых эластомеров.

В основе расчётов лежит введение универсального конструктивно-деформационного параметра β , который позволяет установить параметры жёсткости и температуры диссипативного разогрева для элементов различной конфигурации, выполненных из средненаполненных резин, с учётом эффектов физической нелинейности.

Параметры типа β довольно удобны для исследований: они безразмерные, зависят только от геометрии детали и являются её универсальной характеристикой. Коэффициенты β дают исчерпывающую информацию о поведении элементов, а также дают информацию об их конструктивном исполнении. То есть они являются конструктивно-деформационным параметром, характеризующим деформационные свойства деталей. При $\nu = 0,5$ напряжённое состояние в тонкослойных элементах приближено к всестороннему сжатию; при этом изменяется и величина β .

Приведена методика исследования и расчёт жесткостных и диссипативных параметров резиновых элементов при произвольной комбинированной нагрузке сдвига-сжатия, а также влияние на физико-механические характеристики резины модификатора наноразмерного типа – фуллереновой сажи.

Приведенные результаты экспериментальных исследований резинометаллических элементов цилиндрической формы с различной толщиной резинового слоя; определено соотношение R/h , при котором возникает эффект объёмного сжатия. Приведены также результаты экспериментальных исследований резиновых деталей с наполнением 45 масс.ч. технического углерода и модифицированных фуллереносодержащим техническим углеродом (10 % фуллерена C_{60}). При монофазном сжатии экспериментально установлено, что динамические характеристики резины изменяются при использовании фуллереновой сажи.

Ключевые слова: резина, резинометаллических элемент, диссипативный разогрев, статическая жёсткость, объёмное сжатие, коэффициент Пуассона, фуллереновая сажа, наномодификатор, деформация.

Abstract. In the article, massive rubber-metal elements made of medium-filled materials (30-60 mass fractions of carbon black) are considered. When load is harmonic, these elements demonstrate effect of physical nonlinearity even at small deformations. In this case, rubber dynamic characteristics depend on amplitude of stresses and deformations. When thin-film elements are used and ratio of radius of element R to the thickness of the rubber layer h_p (i.e. R/h_p) is sufficiently great, effect of bulk compression can occur. In this case, compression modulus K is much greater than the Young's modulus, and this fact should be taken into account while calculating specific rubber-metal elements.

An algorithm for calculating the stiffness and dissipative parameters of the element is considered. Behavior of material volume is modeled by the hypothesis $\nu = 0.495$ (ν is Poisson's ratio), which is characteristic for elements made of weakly compressible elastomers.

Essence of the new computing method is introduction of universal constructive-deformation parameter β , which takes into account effects of physical nonlinearity and makes it possible to determine stiffness parameters and temperature of dissipative heating for elements of various configurations made of medium-weight rubber.

Parameters of the β type are quite convenient for researches: they are dimensionless, depend only on the element geometry and are the universal characteristic of the element. Coefficients β provide exhaustive information about behavior of the elements and also provide information on their design. That is, they are a design-and-deformation parameter, which characterizes deformation properties of the elements. At $\nu = 0.5$, stress state of the thin-layered elements is approximated to all-round compression, and value of the β also changes.

New technique of investigation and calculation of the stiffness and dissipative parameters of rubber elements for any arbitrary combined shear-compressive load are presented, as well as effect of nanomodifier – fullerene soot – on the rubber physical and mechanical characteristics is described.

The article presents results of experimental studies of cylindrical rubber-metal elements with different thickness of the rubber layer. Ratio R/h , at which effect of volume compression occurs, was determined. The article also presents results of experimental studies of rubber elements filled by 45 mass fractions of carbon black and modified fullerene-contained carbon black (10 % of fullerene C_{60}). It was experimentally established that dynamic characteristics of rubber at monophasic compression changed if fullerene soot was used.

Keywords: rubber, rubber-metal element, dissipative heating, static stiffness, bulk compression, Poisson's ratio, fullerene soot, nanomodifier, deformation.

Статья поступила в редакцию 18.01.2018

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым