

А.Ф.Булат¹, В.І.Дирда¹, В.Г.Карнаухов², Г.М.Агальцов¹

ПРО ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА МЕХАНІЧНУ ПОВЕДІНКУ ГУМОВИХ МАТЕРІАЛІВ

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАНУ,
вул. Сімферопольська, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: office.igtm@nas.gov.ua

²Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ,
вул. Нестерова, 3, 03057, Київ, Україна; e-mail: karn@inmech.kiev.ua

Abstract. The influence of ionizing radiation on the mechanical behavior of rubber-like materials is investigated by theory of viscoelasticity with the Volterra's integral operators. The experimental results on the effect of ionizing radiation on the dynamic shear modulus, dissipation coefficient, durability, and fracture mechanism of rubber elements under the joint action of radiation and cyclic loading are presented.

Key words: theory of viscoelasticity, integral operator, rheological parameters, mechanical behavior, ionizing radiation, rubber.

Вступ.

В останні роки механіка зв'язаних полів, яка досліджує вплив взаємодії полів різної фізичної природи на механічну поведінку матеріалів та елементів конструкцій, привертає велику увагу вчених-механіків [1, 7 – 10]. Розглянуте у даній статті іонізуюче випромінювання (або γ -випромінювання) є електромагнітним випромінюванням з надзвичайно малою довжиною хвилі. Довготривала дія γ -випромінювання може суттєво змінити властивості конструкційних матеріалів і вплинути на працездатність елементів конструкцій з таких матеріалів.

Дослідження впливу іонізуючих випромінювань на механічну поведінку пружно-спадкових середовищ (в даному випадку гуми і гумоподібних матеріалів) мають два напрямки: перший пов'язаний зі створенням нових радіаційностійких матеріалів; другий – з дослідженням змін механічних і теплових параметрів вже існуючих матеріалів для визначення гранично допустимих доз опромінення в конкретних умовах експлуатації.

Такі дослідження досить широко проводилися в другій половині минулого століття в тому числі і авторами цієї роботи [4]. Останнім часом відомості про аналогічні дослідження у відомій доступній літературі відсутні.

Разом з тим, у зв'язку зі збільшенням видобутку уранових руд і використанням ядерного палива на атомних електростанціях (в Україні за допомогою АЕС виробляється більше 60 % всієї електроенергії [6]) такі дослідження стають дуже актуальними. У цій галузі є клас машин, що працюють в екстремальних умовах, тобто при тривалих циклічних навантаженнях і впливі зовнішнього агресивного середовища: іонізуючого випромінювання, підвищених і знижених температур і т.п. Такі машини, в тому числі і машини вібраційного типу (живильники, конвеєри, грохоти та ін.), використовуються при видобутку, переробці та збагаченні уранових руд, а також при виконанні технологічних операцій з паливними елементами атомних електростанцій. При цьому гумові пружні ланки таких машин повинні забезпечувати напрацювання до відмови не менше 20 – 25 тис. годин і зберігати стабільність жорсткісних характеристик в межах 15 – 25 % при інтенсивному режимі циклічного навантаження: дефо-

рмації відносного зсуву не менше 0,20 – 0,25 при частоті навантаження 10,0 – 12,0 Гц і амплітуді коливань робочих органів машин не менше 10 – 12 мм. Такий інтенсивний режим роботи машин викликаний специфікою технологічних процесів.

Більшість з існуючих амортизаційних гум не відповідають цим вимогам. Відомі в промисловості марки гуми при таких умовах навантаження мали напрацювання на відмову не більше 800 – 1200 годин і зміну основних характеристик до 60 – 80 % [1].

Тому для таких машин було створено спеціальну гуму, яка в екстремальних умовах навантаження (без впливу іонізуючого випромінювання) мала напрацювання на відмову понад 45000 годин. При цьому її жорсткісні параметри збільшувалися не більше ніж на 17 – 25 %. Таку гуму було створено на основі синтетичного поліізопренового каучуку (наповнення технічним вуглецем 5 мас.ч.), вона отримала шифр 51-1562 і широко використовувалася у вібраційній техніці саме завдяки стабільності механічних властивостей [5].

Результати численних експериментальних досліджень показують, що стійкі до старіння при тривалій втомі гуми виявляють підвищену стійкість і до впливу іонізуючих випромінювань. Тому для досліджень було обрано дві гуми: гума 51-1562 і добре вивчена гума 2959 [1]. З цих гум були виготовлені пружні елементи вібромашини: елементи зсуву для віброживильників для випуску і доставки уранових руд; елементи зсуву та шарніри для двомасових близькорезонансних конвеєрів КВ2Т.

З гуми 51-1562 були виготовлені елементи зсуву типу БРМ102 (блок гумометалевий) з розміром еластичного елемента 50×100×200 мм, що зазнають при навантаженні деформації простого зсуву з амплітудою 10,5 – 12,0 мм (відносний зсув 0,21 – 0,24); з гуми 2959 виготовлялися шарніри типу ШРМ (шарніри гумометалеві), які зазнають коаксіального зсуву (відносний зсув 0,06).

При дії іонізуючих випромінювань на машини з такими пружними елементами в гумі відбувалися суттєві зміни – так звані радіаційні пошкодження. Ступінь цих пошкоджень визначався дозою опромінення, структурою матеріалу, температурою і ступенем агресивності зовнішнього середовища [3]. Крім цього при дії іонізуючих випромінювань відбувалося розкладання повітря і утворення озону, який сприяв виникненню на поверхні гуми тріщин.

Для інженерної практики при розрахунку машин найбільший інтерес представляє залежність механічних властивостей гум і довговічності від дози опромінення, які отримані для натурних пружних елементів. У цьому випадку в рецептуру матеріалу можна вносити зміни відповідно до останніх досягнень: наприклад, використовувати нові модифікатори типу фулеренів, нові типи технічного вуглецю і т.п. [2].

Роботу присвячено дослідженню змін реологічних, теплофізичних і втомних параметрів масивних гумових елементів машин під дією іонізуючих випромінювань і визначенню гранично допустимих доз їх опромінення для експлуатації в екстремальних умовах.

1. Математичні співвідношення для визначення реологічних параметрів гумових деталей.

Для математичної інтерпретації механічної реакції гумового зразка застосовувалась лінійна теорія в'язкопружності з інтегральними операторами типу Вольтерра з дробово-експоненціальними ядрами релаксації та післядії. Як ядро релаксації використовувалась дробова функція Ю.М. Работнова порядку α

$$E_{\alpha}(-\beta, t-t') = (t-t') \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t-t')^{n(1+\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1+\alpha)]}, \quad (1)$$

де $\Gamma(n+1)$ – гамма-функція.

Співвідношення між реологічними параметрами при цьому наступні:

$$K_i^* = \chi_i E_{\alpha}^*(-\beta_i) \quad (i=1, 2), \quad -1 < \alpha < 0; \quad (2)$$

$$\beta_i = \frac{1}{t_i^{1+\alpha}}; \quad \chi_i = \frac{\lambda_i}{t_i^{1+\alpha}}; \quad (3)$$

$$\lambda_1 = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0}; \lambda_2 = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0}. \quad (4)$$

У (2) – (4) χ, λ, β – реологічні параметри матеріалу, що мають конкретний фізичний зміст; E_0 і G_0 – миттєві значення модуля пружності та модуля зсуву; E_∞, G_∞ – усталені значення модуля пружності та модуля зсуву, знайдені як

$$E_\infty = \lim_{\omega \rightarrow 0} E(\omega); G_\infty = \lim_{\omega \rightarrow 0} G(\omega); E_0 = \lim_{\omega \rightarrow \infty} E(\omega); G_0 = \lim_{\omega \rightarrow \infty} G(\omega);$$

$E_\alpha^*(-\beta_i)$ – оператор

$$E_\alpha^*(-\beta_i)\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t \mathcal{E}_\alpha(-\beta_i, t-t')\varepsilon(t')dt'.$$

Якщо при одночасному навантаженні зразка із спадкового матеріалу типу гуми зв'язок між напруженнями і деформацією представляється у вигляді $\sigma = \bar{E}\varepsilon$, а в якості ядер релаксації використовуються дробово-експоненціальні функції типу (1), то вираз для оператора \bar{E} можна представити у вигляді

$$\bar{E} = E_0[1 - \chi E_\alpha^*(-\beta)]. \quad (5)$$

У цьому випадку для визначення реологічних властивостей матеріалу доцільно використовувати співвідношення

$$\frac{\varepsilon_1(t) - \varepsilon(0)}{\varepsilon(0)} = \lambda_3 [1 - E_{1+\alpha}(-\beta t^{1+\alpha})] \left(\beta = t_0^{-(1+\alpha)}; \lambda_3 = \frac{\varepsilon_1(\infty) - \varepsilon(0)}{\varepsilon(0)} \right), \quad (6)$$

де t_0 – узагальнений час релаксації; $\varepsilon_1(0)$ – миттєва деформація зразка; $\varepsilon_1(\infty)$ – усталене значення деформації, знайдене як $\varepsilon_1(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_1(t)$.

Реологічні параметри матеріалу α, λ і t_0 , а також модулі E_0 і G_0 для гум можуть бути визначені з достатнім ступенем точності при динамічних випробуваннях зразків.

Якщо при цьому оператор об'ємного стиску \bar{k} не залежить від часу, то за допомогою цих параметрів можна аналітично визначити реологічні параметри операторів \bar{E} і \bar{G} . У разі, коли \bar{k} залежить від часу, параметри операторів \bar{E} та \bar{G} визначаються незалежно за результатами відповідних випробувань. Для обчислення параметра α в спеціальній літературі рекомендується використовувати залежність технічного коефіцієнта поглинання енергії ψ від частоти навантаження. Таку залежність отримують при обробці петель гістерезису, які знайдено за допомогою спеціальної апаратури при гармонійному навантаженні зразків, що досліджуються.

Якщо при цьому для опису механічної реакції матеріалу використовуються ядра релаксації типу замкнутого циклу, то для визначення в'язко-пружних властивостей матеріалу можна використовувати наступні співвідношення:

$$\frac{E(\omega)}{E(0)} = 1 - A(\omega); \quad (7)$$

$$\psi = 2\pi\chi B(\omega), \quad (8)$$

де A і B – косинус- і синус-перетворення дробово-експоненціальної функції

$$A = \frac{\omega^{1+\alpha} \cos \delta + \beta}{\omega^{2(1+\alpha)} + 2\omega^{1+\alpha} \beta \cos \delta + \beta^2}; \quad (9)$$

$$B = \frac{\omega^{1+\alpha} \sin \delta}{\omega^{2(1+\alpha)} + 2\omega^{1+\alpha} \beta \cos \delta + \beta^2}. \quad (10)$$

У (8) – (10) $-1 < \alpha < 0$, $\beta > 0$, $\delta = 0,5\pi(1 + \alpha)$; $\chi / \beta = \lambda < 1$; ψ – коефіцієнт поглинання енергії, що визначається за петлю гістерезису.

Нижче наведено формули, що забезпечують визначення динамічних характеристик A і B , а також основних реологічних параметрів α , λ , t_0 для деталей з марок гуми, що досліджується за найбільш характерними параметрами петель гістерезису. Якщо механічна реакція гуми описується лінійним інтегральним рівнянням типу Вольтерра, то петля гістерезису представляється у вигляді еліпса, який нахилений під певним кутом φ до осі деформації. Для цього випадку рівняння (7) набуде вигляду

$$1 - A = \frac{E(\omega)}{E_0} = \sqrt{\frac{[P_1(\omega)]^2}{P_0^2} - \frac{\psi^2}{4\pi^2}}. \quad (11)$$

Формули (8) і (11) при наявності параметрів петель гістерезису P_0 , P_1 , X_0 і δ в досить широкому діапазоні змін режиму навантаження дозволяють визначити залежність від частоти основних реологічних характеристик матеріалу $A(\omega)$ і $B(\omega)$.

Формули для визначення основних реологічних параметрів записуються у вигляді

$$\alpha = 1 - \frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\psi_{\max}}{\pi\lambda}; \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0} \text{ або } \lambda = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0}; \quad (13)$$

$$t_0 = \frac{1}{\omega_0} = [\omega(\psi_{\max})]^{-1}. \quad (14)$$

Для визначення реологічних характеристик гуми α і t_0 за формулами (12), (14) необхідно мати у своєму розпорядженні дані значень величин E (або G) і ψ в досить широкому діапазоні частот навантаження.

Розраховані за формулами (11) – (14) значення реологічних параметрів для досліджуваних гум були наступними: для гуми 2959: $\alpha = -0,64$, $\beta = 1,04$, $\lambda = 0,58$; для гуми 51-1562: $\alpha = -0,64$, $\beta = 0,89$, $\lambda = 0,35$.

2. Експериментальні методи.

Дослідження, результати яких викладені нижче, проводилися виключно на натурних зразках і на оригінальних експериментальних стендах, в тому числі і на «Ін-строн 1126» [1].

Втомні характеристики гумових елементів визначалися на спеціальних стендах і на стендах-конвеєрах типу КВ2Т при режимах навантаження, близьких до реальних [1].

Зразки відбиралися за умовно-рівноважним модулем зсуву (діапазон для партії з 10 – 64 зразків не перевищував $\pm 2,5\%$), піддавалися комплексу експериментальних досліджень з визначенням реологічних характеристик і температури дисипативного само-розігріву, потім опромінювалися інтегральними дозами від $1,0 \cdot 10^2$ до $200 \cdot 10^2$ МГр. Епізодично, після отримання певних доз, випробування повторювалися. Зразки опромінювали на γ -установці з використанням препаратів Co^{60} в умовах, що виключають перегрів матеріалу від дії γ -випромінювання. Отриману дозу визначали відомими спектрофотометричними методами.

3. Вплив γ -випромінювання на фізико-механічні характеристики гумових елементів.

Результати тривалих експериментальних досліджень впливу γ -випромінювань на реологічні та втомні характеристики гумових елементів показано на рис. 1 і 2.

На рис. 1 представлена залежність динамічного модуля зсуву і коефіцієнта дисипації енергії від дози опромінення для елементів типу БРМ з гуми 15-1562 при частоті навантаження 10,8 Гц і амплітуді 10,5 мм (відносний зсув 0,21).

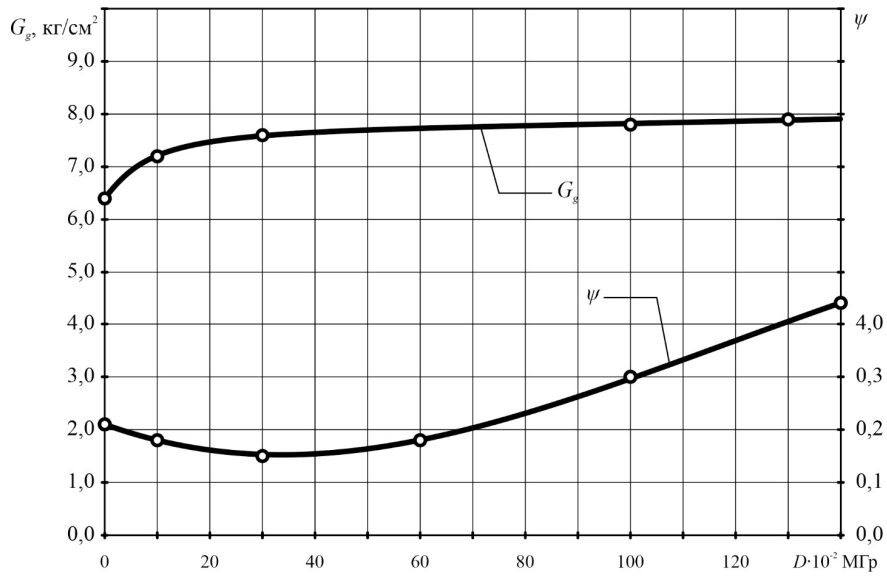


Рис. 1

На рис. 2 показано залежність довговічності шарнірів ШРМ102 від дози опромінення при частоті 11,2 Гц і відносному зсувові 0,06.

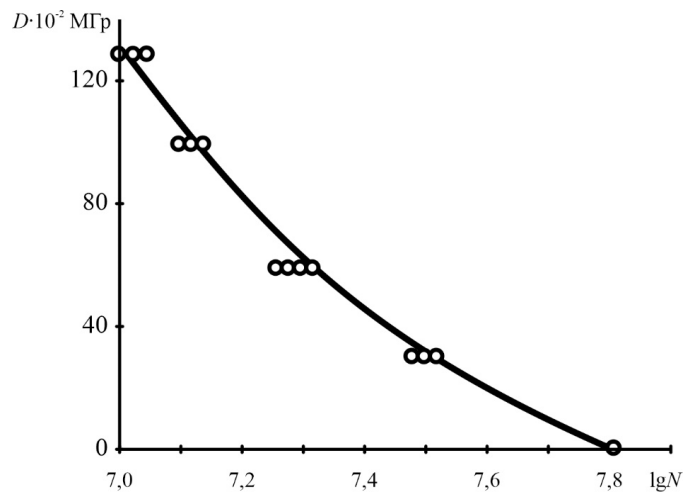


Рис. 2

Слід зазначити, що жорстке γ -опромінення зменшує швидкість релаксаційних процесів в гумі, змінює форму частотних залежностей коефіцієнта дисипації та модуля зсуву, особливо в області релаксаційного піку, зміщує за шкалою частот вправо пік релаксації.

Як видно, опромінення змінює також реологічні характеристики матеріалу. Найбільш чутливими виявилися параметри λ і t_0 . Так, для гуми 51-1562 величина λ (в літературі її іноді називають «дефектом модуля») у її початковому стані дорівнює 0,35, при опроміненні дозою $20 \cdot 10^2 \text{ Mr}$ $\lambda = 0,41$.

Динамічний модуль зсуву в залежності від дози опромінення (рис. 1) змінювався приблизно за експоненціальним законом. При $D > 10^2 \text{ Mr}$ вплив опромінення на величину модуля можна описати емпіричною залежністю

$$G(D) = G_1 \left\{ 1 + \frac{G_2 - G_1}{G_1} \left[1 - \exp(-\alpha_2 D^{\xi_2}) \right] \right\},$$

де G_1 – модуль зсуву неопроміненого зразка; G_2 – модуль зсуву зразка при максимальній дозі опромінення; α_2 , ξ_2 – постійні, що залежать від типу гуми, її фізико-механічних властивостей і умов опромінення (для гуми 2959 – $\alpha_2 = 0,045$, $\xi_2 = 0,95$).

Дисипація енергії спочатку зменшувалася, потім завдяки процесам структуризації число поперечних зшивок в гумі різко зростала і це викликало зростання коефіцієнта дисипації. Аналогічні результати отримано і для гуми 2959.

Що стосується термомеханічних властивостей гумових елементів, то характер залежностей температури дисипативного саморозігріву від дози опромінення визначався, в основному, зміною механічних характеристик, оскільки зміни теплофізичних властивостей, зокрема коефіцієнта теплопровідності, від дії радіації не спостерігалося. Для опромінених гумових елементів, як і для неопромінених, характерна нелінійна залежність температури саморозігріву від частоти і амплітуди навантаження. Якісно однаковий і градієнт температури в обсязі досліджуваних гумових деталей.

Втонні властивості гумових елементів під дією опромінення також визначалися зміною структури матеріалу. На рис. 2 в напівлогарифмічних координатах показано залежність кількості циклів до руйнування партій шарнірів ШРМ102 (на кожен дозу попередньо опромінених шарнірів припадало 8 – 16 зразків, жорсткісні характеристики яких відрізнялися від середнього значення не більш як на 2,5 %) від дози опромінення для гуми 2959. Як видно, довговічність шарнірів істотно залежить від дози опромінення.

У процесі дослідження опромінених гумових елементів було відзначено певну адекватність впливу радіації і тривалості циклічної втоми. Якщо для одних і тих же гум порівняти фізико-механічні характеристики, наприклад, залежності зміни динамічного модуля зсуву під час тривалого циклічного навантаження і залежності модуля від дози опромінення, то можна відзначити їх якісний збіг. Криві $G(t)$ і $G(D)$ описуються однією і тією ж експоненціальною функцією, але з різними константами швидкості. Розглянемо, наприклад, гуму 51-1562. Після 20 тис. годин навантаження динамічний модуль елементів зсуву БРМ102 збільшився на 15 %. Приблизно таке ж збільшення модуля спостерігалося і при опроміненні елементів дозою $30 \cdot 10^2$ МГр (див. рис. 1).

4. Механіка руйнування попередньо опромінених зразків.

Такі дослідження проводилися при тривалих циклічних навантаженнях елементів зсуву типу БРМ102 з гуми 51-1562 на стендах-конвеєрах КВ2Т при наступних параметрах навантаження: амплітуда коливань 10,5 мм (відносний зсув 0,21) і частота навантаження 10,8 Гц. Випробуванням підлягали три партії зразків: неопромінені зразки, опромінені до $30 \cdot 10^2$ МГр і опромінені до $60 \cdot 10^2$ МГр. У кожній партії було по 64 зразки. Розглянемо деякі відмінності в механізмі руйнування опромінених і неопромінених зразків. Ці відмінності полягали, насамперед, в механізмі зародження і кінетики росту втонних тріщин. У попередньо опромінених до дози $30 \cdot 10^2$ МГр елементах зсуву після напрацювання 27 тис. годин тріщини зароджувалися як на стику гума – метал, так і на вільній поверхні і проростали переважно на поверхні. Спостерігалося розгалуження тріщин і виривання гумового масиву. Ці особливості пов'язані, мабуть, з поверхневим ефектом: радіаційна пошкоджуваність на поверхні була більшою, ніж усередині масиву, перш за все внаслідок довулканізації гуми.

Зі збільшенням дози опромінення в процесі руйнування елементів зсуву все більш помітну роль відігравала температура дисипативного саморозігріву. Руйнування зразків, які отримали дозу опромінення $60 \cdot 10^2$ МГр і більше, носило переважно термомеханічний характер.

В цілому можна вважати, що доза опромінення $30 \cdot 10^2$ МГр для досліджуваних умов експлуатації є гранично допустимою.

5. Механіка руйнування при комплексній дії опромінення і циклічного навантаження.

Такі унікальні дослідження (аналогі у відомій літературі відсутні) проводилися для гумометалевих шарнірів ШРМ102 з гуми 2959. Експериментальний стенд встановлювався безпосередньо в радіаційній камері таким чином, щоб потік γ -квантів від випромінювача потрапляв безпосередньо на шарніри. Одночасно випробовувалося

вісім шарнірів. Реєструюча апаратура для визначення динамічного модуля зсуву, коефіцієнта дисипації та температури саморозігріву гуми розміщувалася поза зоною опромінення. Експериментальний стенд дистанційно включався при введеному в дію радіаційному джерелі, спостереження за його роботою здійснювалося за допомогою телекамери.

Шарніри зазнавали стаціонарного циклічного навантаження з амплітудним значенням кута коаксіального скручування внутрішньої металевої обойми 6° при $\omega = 10,8$ Гц і відсутності статичного радіального підтискування. Опромінювалися досліджувані шарніри в звичайних умовах на повітрі. Зміна механічних характеристик шарнірів, перш за все G і ν , якісно така ж, як і попередньо опромінених деталей. Температура дисипативного розігріву була на $(4 - 6)$ К вище, ніж шарнірів в звичайних умовах випробувань. Це підвищення температури пов'язано з гальмуванням γ -квантів в гумі і металевій арматурі і зазвичай пропорційне потужності дози. Дослідження шарнірів з реєстрацією їх механічних властивостей тривали аж до руйнування, критерієм якого служила поява на поверхні гумового масиву втомних магістральних тріщин.

У процесі руйнування виявлено деякі ефекти, які невластиві гумовим елементам як в звичайному стані, так і у попередньо опроміненому. Найбільш важливі з них наступні.

Поява залишкової деформації гумових елементів. Після напрацювання приблизно $10 \cdot 10^6$ циклів і дози опромінення близько $10 \cdot 10^2$ МГр в шарнірах спостерігалася необоротна залишкова деформація гумових елементів: зовнішні металеві сегменти були повністю зімкнуті, зовнішній діаметр зменшився на $(1,5 - 2,0)$ мм, а внутрішній приблизно на стільки ж збільшився.

Підвищена корозія металевої арматури. Цей ефект пов'язаний з наявністю підвищеної концентрації озону.

Поява на поверхні гумового елемента озонних тріщин. Озонні тріщини – тонкі, вузькі, переходять одна в одну та розташовані концентричними колами. При комплексній дії іонізуючих випромінювань і циклічного навантаження втомні тріщини розташовувалися приблизно під кутом 45° до напрямку деформації. Їх перетинала мережа дрібних концентрично розташованих тріщин, що переходять одна в одну.

Глибина озонних тріщин зазвичай не перевищувала $(2 - 3)$ мм. Однак при циклічному навантаженні вони ставали концентраторами напружень і згодом вироджувалися в магістральні тріщини, що призводило в остаточному підсумку до кінцевого руйнування шарнірів. У попередньо опромінених шарнірах тріщини з'являлися переважно від дії циклічного навантаження. Випробування їх проводилися на відкритому повітрі зі звичайним вмістом озону. Напрацювання таких шарнірів до відмови при інтегральній дозі опромінення $30 \cdot 10^2$ МГр, куті закручування гумового елемента $\varphi = 6^\circ$ і частоті навантаження $\omega = 12,7$ Гц становило приблизно $40 \cdot 10^6$ циклів.

При комплексній дії опромінення і циклічного навантаження при $\varphi = 6^\circ$, $\omega = 12,7$ Гц довговічність шарнірів становила $(18 \div 20) \cdot 10^6$ циклів при інтегральній дозі опромінення лише $18 \cdot 10^2$ МГр. Критерії виходу шарнірів з ладу були однаковими як для попередньо опромінених зразків, так і для зразків з комплексним впливом опромінення і циклічного навантаження. В останньому випадку в механізмі руйнування шарнірів істотний вплив мали озонні тріщини. Руйнування гумових елементів починалося з поверхні, зазвичай з росту найбільш глибокої озонної тріщини. Така тріщина з'являлася, як правило, в місцях з'єднання сегментів зовнішньої і внутрішньої обойм. Крім зростання тріщини, руйнування шарнірів супроводжувалося прогресуючим відшаруванням гуми від металевої арматури, найбільш вираженим на торці шарніра з боку джерела опромінення.

Порівняння механізму руйнування неопромінених шарнірів і шарнірів при комплексній дії опромінення і циклічного навантаження показало певні їх відмінності. У першому випадку втомні тріщини зароджувалися переважно на поверхні гуми, звичайне навколишнє середовище не мало помітного впливу на їх зростання, довговічність шарнірів визначалася в основному інтенсивністю прикладеного циклічного навантаження і температурою дисипативного розігріву. У другому випадку ініційовані озоном тріщини з'являлися на самому початку випробувань, і їх розвиток, в основному,

зумовлював появу і розвиток магістральної тріщини. Отже, при створенні радіаційно-стійких гум важливу роль відіграє правильне конструювання і захист від впливу іонізуючих випромінювань гумових елементів машин, що працюють в полі опромінення.

Висновок.

Досліджено зміну реологічних, теплофізичних і втомних параметрів масивних гумових елементів машин під дією іонізуючих випромінювань і визначено гранично допустимі дози їх опромінення для експлуатації в екстремальних умовах. У процесі руйнування шарнірів під дією стаціонарного циклічного навантаження та опромінення виявлено деякі ефекти, які невластиві гумовим елементам як в звичайному стані, так і у попередньо опроміненому. Найбільш важливі з них такі: поява залишкової деформації гумових елементів, підвищена корозія металеві арматури, поява на поверхні гумового елемента озонних тріщин. Виконано порівняння механізму руйнування неопромінених шарнірів і шарнірів при комплексній дії опромінення і циклічного навантаження і показано певні їх відмінності.

Наукові дослідження, результати яких опубліковані в даній статті, виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Підтримка пріоритетних напрямків наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

РЕЗЮМЕ. Досліджується вплив іонізуючого випромінювання на механічну поведінку гумових матеріалів. Механічна поведінка матеріалу описується теорією в'язкопружності з інтегральними операторами Вольтерра. Наведено експериментальні результати про вплив іонізуючого випромінювання на динамічний модуль зсуву, коефіцієнт дисипації, довговічність і механізм руйнування гумових елементів при сумісній дії радіації та циклічного навантаження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: теорія в'язкопружності, інтегральний оператор, реологічні параметри, механічна поведінка, іонізуюче випромінювання, гума.

1. Булат А.Ф., Дырда В.И. и др. Прикладная механика упруго-наследственных сред: в 4-х томах. – Киев: Наук. думка, 2011–2014.
2. Дырда В.И., Лисица Н.И., Калганков Е.В., Цаниди И.Н., Черний А.А., Агальцов Г.Н. Некоторые особенности экспериментальных исследований резиновых футеровок тяжёлых машин в экстремальных условиях // Геотехническая механика, 2018. – Вып. 138. – С. 150–59.
3. Мецанинов С.К., Дырда В.И., В.М. Изменение оптических свойств резины на основе СКИ-3 при деформировании, утомлении, тепловом и радиационном старении // Механика композитных материалов. – 1991. – № 2. – С. 261–265.
4. Потураев В.Н., Дырда В.И. Влияние γ -излучения на динамические характеристики резинометаллических изделий // Каучук и резина. – 1969. – № 8. – С. 20–22.
5. Потураев В.Н., Дырда В.И., Виноградова Н.А., Голованов Д.В. Низкомодульная резина из СКИ-3 для амортизаторов, эксплуатируемых при экстремальных динамических нагрузках // Каучук и резина. – 1975. – № 3. – С. 37–39.
6. Пухальский В.Н., Синчук В.В., Басараб Н.Н. Добыча и переработка урановой руды в Украине // Геотехническая механика. – 2017. – Вып. 133. – С. 27–34.
7. Bulat A.F., Dyrda V.I., Karnaukhov V.G. Durability of Thermoviscoelastic Bodies under Long-Term Cyclic Loading // Int. Appl. Mech. – 2019. – 55, N 5. – P. 495–504.
8. Karnaukhov V. G., Kirichok I.F., Kozlov V.I. Thermomechanics of Inelastic Thin-Walled Structural Members with Piezoelectric Sensors and Actuators under Harmonic Loading (Review) // Int. Appl. Mech. – 2017. – 53, N 1. – P. 6–58.
9. Karnaukhov V.G., Kozlov V.I., Karnaukhova T.V. Critical Electric Load on a Hinged Thermoelectroelastic Rectangular Plate with Piezoelectric Sensors and Actuators // Int. Appl. Mech. – 2019. – 55, N 6. – P. 596–600.
10. Kirichok I. F., Chernyushok O. A. Forced Vibration and Self-Heating of a Flexible Viscoelastic Beam with Piezoelectric Sensor and Actuator with Account of Shear Strain // Int. Appl. Mech. – 2018. – 54, N 5. – P. 568–576.

Надійшла 30.07.2020

Затверджена до друку 18.03.2021