

ISSN 0032 - 8243

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ім. С.П. ТИМОШЕНКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

INTERNATIONAL APPLIED MECHANICS

ТОМ

57

4

2021

Журнал перекладається на англійську мову
видавництвом **Springer** під назвою

INTERNATIONAL APPLIED MECHANICS

International Applied Mechanics is abstracted or indexed in Academic Search Alumni Edition, Academic Search Complete, Academic Search Premier, Advanced Polymer Abstracts, Aerospace and High Technology Database, Aluminum Industry Abstracts, Ceramic Abstracts – World Ceramic Abstracts, Compendex, Computer and Information Systems Abstracts, Copper Data Center Database, Corrosion Abstracts, CSA Engineering Research Database, CSA High Technology Research Database with Aerospace, CSA Materials Research Database with METADEX, CSA Technology Research Database, CSA/ASCE Civil Engineering Abstracts, Current Abstracts, Current Contents/Engineering, Computing and Technology, Digital Mathematics Registry, Earthquake Engineering Abstracts, Electronics and Communications Abstracts, Engineering Materials Abstracts, Ceramics, Engineering Index Monthly, Google Scholar, INIS Atomindex, Inspec, Journal Citation Reports/Social Sciences Edition, Materials Business File-Steels Alerts, Materials Science Citation Index, Mathematical Reviews, MathSciNet, Mechanical and Transportation Engineering Abstracts, METADEX (Metals Abstracts), OCLC ArticleFirst Database, OCLC FirstSearch Electronic Collections Online, Science & Technology Collection, Science Citation Index Expanded (SciSearch), SCOPUS, Solid State and Superconductivity Abstracts, Summon by Solutions, TOC Premier, Zentralblatt Math.

Impact Factor in 2005: 1,740; RIP in 2006: 1,76; SJR in 2015: 0,268; SNIP in 2011: 2,45

Головний редактор **О.М.Гузь**

Редакційна колегія

О.М. Базно (заст. головного редактора), **В.Л. Богданов**, **В.П. Голуб**, **О.Я. Григоренко**,
Я.М. Григоренко, **А.О. Камінський**, **В.Г. Карнаухов**, **В.Д. Кубенко**, **В.Б. Ларін**, **П.З. Луговий**,
А.А. Мартинюк, **В.М. Назаренко**, **Я.Я. Руцицький**, **І.С. Чернишенко**.

Міжнародна редакційна рада
на 2021 – 2022 рр.

Л.А. Агаловян (Вірменія), **Ф.А. Алієв** (Азербайджан), **С.Н. Атлурі** (США),
К.П. Герман (Німеччина), **І.О. Гузь** (Шотландія),
І. Елішаков (США), **Ж.В. Жу** (Китай), **В.В. Зозуля** (Мексика),
Г.А. Манг (Австрія), **Ш. Маркуш** (Словаччина), **Ф.Т. Раммерсторфер** (Австрія),
Г. Сі (Китай), **Ю.К. Енгельбрехт** (Естонія).

Editor-in-chief **О.М. Guz**

Editorial Board:

О.М. Bagno (Associate Editor), **V.L. Bogdanov**, **V.P. Golub**, **O.Ya. Grigorenko**,
Ya.M. Grigorenko, **A.O. Kaminsky**, **V.G. Karnaukhov**, **V.D. Kubenko**, **V.B. Larin**, **P.Z. Lugovyi**,
A.A. Martyniuk, **V.M. Nazarenko**, **J.J. Rushchitsky**, **I.S. Chernyshenko**.

International Editorial Advisory Board
in 2021 – 2022 years

L.A. Aghalovyan (Armenia), **F.A. Aliev** (Azerbaijan), **S. N. Atluri** (USA),
K.P. Herrmann (Germany), **I.A. Guz** (Scotland), **I. Elishakoff** (USA),
Z.W. Zhou (China), **V.V. Zozulya** (Mexico), **H.A. Mang** (Austria), **S. Markus** (Slovakia),
F.G. Rammerstorfer (Austria), **G. Sih** (China), **J.K. Engelbrecht** (Estonia).

Відповідальний секретар редакції **Г.І. Щурук**

3 № 1, 2000 журнал «Прикладна механіка» представлений в Бібліотеці Конгресу США.
Library of Congress Online Catalog. Call number: TA349.P685. Request in European Reading
Room (Jefferson or Adams Building General or Area Studies Reading Rooms).

Інститут механіки НАН України, вул. Нестерова, 3, 03057 Київ, 57; тел.: 380-44-456-62-92,
тел./факс: 380-44-456-03-19; e-mail: prikl@inmech.kiev.ua, <http://pm.inmech.kiev.ua>

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

Том 57 (67), № 4, червень, 2021

Засновано в березні 1955 р.

ЗМІСТ

<i>Булат А.Ф., Дирда В.І., Карнаухов В.Г., Агальцов Г.М.</i> Про вплив іонізуючого випромінювання на механічну поведінку гумових матеріалів	3
<i>Руцицький Я.Я., Юрчук В.М.</i> Аналогії між класичною задачею про коливання тіл і некласичною задачею про поширення плоских хвиль	11
<i>Луговий П.З., Гайдайчук В.В., Скосаренко Ю.В., Котенко К.Е.</i> Напружено-деформований стан тришарових циліндричних оболонок з армованим легким заповнювачем при нестационарному навантаженні	23
<i>Беспалова О.І., Борейко Н.П.</i> Стійкість оболонок обертання різної гауссової кривизни в полі комбінованих статичних навантажень	35
<i>Бабешко М.О., Савченко В.Г.</i> Пружнопластичний осесиметричний напружено-деформований стан тонких оболонок із матеріалів, які різноопірні розтягу та стиску	47
<i>Киричок І.Ф., Чернюшок О.А.</i> Вплив граничних умов і вібророзігріву на вимушені коливання і довговічність податливих на зсув непружних циліндричних оболонок з п'єзоактуаторами	59
<i>Кононов Ю.М.</i> Про стійкість рівномірного обертання несиметричного твердого тіла у середовищі з опором під дією постійного моменту	68
<i>Пелешко І.Д., Юрченко В.В.</i> Параметрична оптимізація металевих стержневих конструкцій з використанням модифікованого методу проєкції градієнта	78
<i>Легеца В.П.</i> Динамічні процеси в механічній системі з амортизаційними вантажоопорними вузлами із сухим тертям	96
<i>Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Кошель С.О., Кошель Г.В.</i> Синтез та аналіз просторових семиланкових механізмів без надлишкового зв'язку машини для обробки деталей	110
<i>Хорошев К.Г., Глуценко Ю.А.</i> Електропружний стан п'єзоелектричного півпростору з отворами та тріщинами під дією електричного поля	122
Рашидов Т.Р., Мардонов Б.М., Ан Е.В. Стійкість і напружений стан підземного трубопроводу, спряженого з вузлом	136

CONTENTS

<i>Bulat A.F., Dyrda V.I., Karnaukhov V.G., Agaltsov G.M.</i> On Influence of Ionizing Radiation on Mechanical Behavior of Rubber Materials	3
<i>Rushchitsky J.J., Yurchuk V.M.</i> Analogies between the Classical Problem on Vibration of Bodies and Nonclassical Problem on Propagation of Plane Waves	11
<i>Lugovyi P.Z., Gaidachuk V.V., Skosarenko Yu.V., Kotenko K.E.</i> Stress-strain State of Three-layer Cylindrical Shells with Reinforced Lightweight Filler under Nonstationary Loading	23
<i>Bespalova O.I., Boreiko N.P.</i> Stability of Shells of Revolution of Different Gauss Curvatures in the Field of Combined Statical Loads	35
<i>Babeshko M.O., Savchenko V.G.</i> Elastoplastic Axisymmetric Stress-Strain State of Thin Shells from Materials with Different Strength to Tension and Compression	47
<i>Kyrychok I.F., Chernyushok O.A.</i> Influence of Boundary Conditions and Dissipative Heating on Forced Vibrations and Durability of Compliant to Shear Inelastic Cylindrical Shells with Actuators	59
<i>Kononov Yu.M.</i> On Stability of Uniform Rotation of Asymmetric Rigid Body in Resisting Medium under Action of Constant Moment	68
<i>Peleshko I.D., Yurchenko V.V.</i> Parametric Optimization of Metallic Rod Constructions with using the Modified Method of Gradient Projection	78
<i>Legeza V.P.</i> Dynamical Processes in Mechanical System with Bumper Load Support Junctions with Dry Friction	96
<i>Zalubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Koshel S.O., Koshel G.V.</i> Synthesis and Analysis of Spatial Seven-Link Mechanisms without Excessive Connection of Machine for Detail Processing	110
<i>Khoroshev K.G., Glushchenko Yu.A.</i> Electroelastic State of Piezoelectric Half-Space with holes and Cracks under Action of Electric Field	122
Rashidov T.P., Mordonov B.M., An E.V. Stability and Stress State of Underground Pipeline Jointed to Junction	136

Науковий редактор *О.М.Багно*

Редактор *Г.М.Нікіфорова*

Набір і комп'ютерна верстка:

Т.К.Леценко, Г.М.Нікіфорова

Оригінал-макет підготовлено

редакцією журналу «Прикладна механіка»

Підписано до друку 28.07.2021. Формат 70×108/16.

Ум. друк. ар. 12,6. Обл.-вид. арк. 15,55. Тираж 232 прим. Зам. № 6372.

Віддруковано ВД «Академперіодика» НАН України, Україна, 01024, Київ, вул. Терещенківська, 4
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001р.

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. Несперова, 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 використовувалася 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:

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

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

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

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

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

$E_\alpha^*(-\beta_i)$ – оператор

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

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

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

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 петлею 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

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

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

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

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 «Інстрон 1126» [1].

Втомні характеристики гумових елементів визначалися на спеціальних стендах і на стендах-конвексах 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 опромінювання для елементів типу БРМ з гуми 15-1562 при частоті навантаження 10,8 Гц і амплітуді 10,5 мм (відносний зсув 0,21).

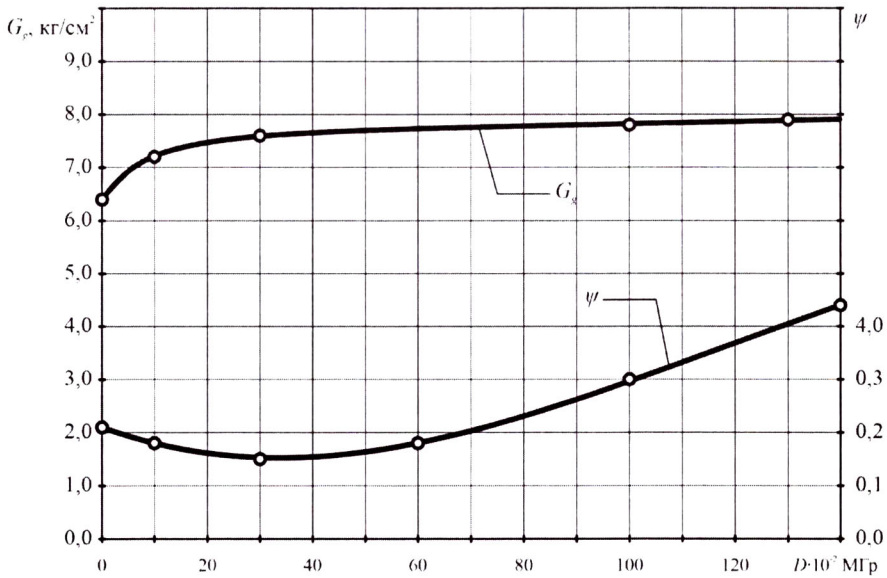


Рис. 1

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

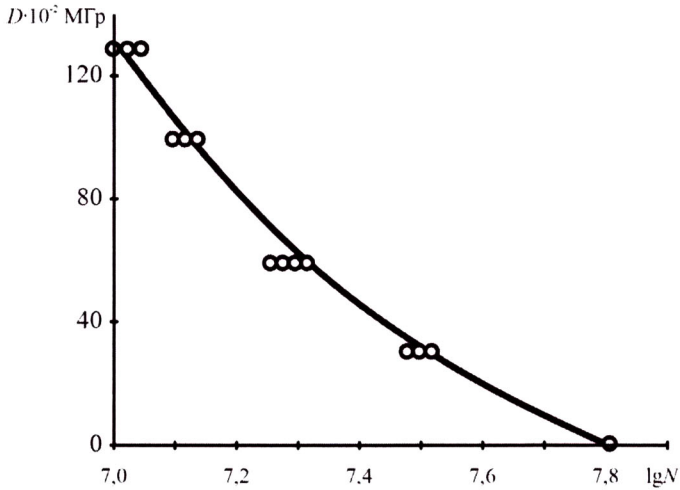


Рис. 2

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 $20 \cdot 10^2$ Mr $\lambda = 0,41$.

Динамічний модуль зсуву в залежності від дози опромінення (рис. 1) змінювався приблизно за експоненціальним законом. При $D > 10^2$ 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 спостерігалось. 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.

Втомні 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 спостерігалось 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 втомних 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. Спостерігалось розгалуження тріщин і виривання гумового масиву. Ці особливості пов'язані, мабуть, з поверхневим ефектом: радіаційна пошкодженість 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 металеві обоїми 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 металеві 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, кути 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 $(18 \pm 20) \cdot 10^6$ 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 обоїми. Крім зростання тріщини, руйнування шарнірів супроводжувалося прогресуючим відшаруванням гуми від металеві 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., Каганков 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 Thermoelastoelectric 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

ІНСТРУКЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ
Міжнародного наукового журналу «Прикладна механіка»

1. Журнал «Прикладна механіка» приймає до розгляду раніше не опубліковані і не призначені для одночасної публікації в інших виданнях оригінальні статті, що містять нові наукові результати теоретичних і експериментальних досліджень в області механіки твердого деформівного тіла і загальної механіки, а також замовлені оглядові та узагальнюючі статті. План публікації оглядів затверджується редколегією на підставі пропозицій членів редколегії.

2. Статті обсягом до 20 сторінок, набрані через один інтервал в текстовому редакторі Word версії не нижче MS Word 2003 зі використанням редактора формул MathType, слід направляти в редакцію журналу електронною поштою (текст і ілюстрації подаються окремими файлами). Назва повинна бути короткою (не більше 12 слів). Загальна кількість рисунків і таблиць: 6 – 10. Растрові рисунки повинні бути виконані в форматах JPG, JPEG, TIF в чорно-білому варіанті з роздільною здатністю не менше 600dpi. Не допускаються рисунки, підготовлені в текстовому редакторі Word.

Редакція рекомендує авторам ознайомитися з одним із останніх випусків журналу, а також з наведеним на сайті журналу зразком оформлення статті. Звертаємо увагу авторів на обов'язковість оформлення статей в стилі, відповідному журналу «Прикладна механіка».

3. На першій сторінці статті необхідно вказати українською або англійською мовою (відповідно до мови основного тексту): ініціали та прізвище автора (авторів – не більше чотирьох); назву статті; дані авторів (повна назва та адреса організації, де виконана робота із зазначенням міста, країни, e-mail); анотацію (5 – 10 рядків) і ключові слова (не більше 2-х рядків) – тільки англійською мовою. Текст статті друкується шрифтом Times New Roman розміром 10pt українською та в окремих випадках англійською мовою. Після списку літератури необхідно привести переклад анотації українською мовою (для основного тексту англійською мовою) назви статті, ініціали, прізвища авторів і їх підписи.

4. Номери цитованих в тексті формул (арабські цифри) записуються в круглих дужках біля краю правого поля сторінок. Рекомендується подвійна нумерація формул: перша цифра позначає номер параграфу, друга (після крапки) – номер формули, (наприклад, (2.13)). Формули, на які немає посилань в тексті, не нумеруються.

5. Для математичних позначень рекомендується вживати найпростіші символи та індекси. Слід уникати посилань на неопубліковані роботи, громіздких формул шляхом введення скорочених позначень, та ін.

6. Рисунки і таблиці додаються на окремих аркушах (файлах). Рисунки повинні мати чітке зображення і не мати підрисункових текстів. Всі пояснення до рисунків слід вносити в текст статті. Написи, які загартовують рисунки, повинні бути замінені цифровими або літерними позначеннями з поясненням їх в тексті. Кращим є розмір рисунків, придатний для внесення в текст статті в масштабі 1:1.

7. Фізичні величини повинні бути представлені в міжнародній системі одиниць СІ.

8. Список літератури подається в кінці статті в алфавітному порядку. Джерела, опубліковані латиницею, наводяться за алфавітом після списку статей, виданих кирилицею. Посилання на цитовані джерела повинні бути вказані в тексті у квадратних дужках (наприклад, [2, 11 – 13]). Приклади представлення основних типів посилань наведені нижче.

•*Руцицький Я.Я.* Про наближений аналіз еволюції поздовжньої хвилі, що поширюється в пружному середовищі // Доп. НАН України. – 2019. – № 8. – С. 46 – 58.

•*Grigorenko A., Yaremchenko S.* Spline-approximation method for investigation of mechanical behavior of anisotropic inhomogeneous shells // Modern Building Materials, Structures and Techniques: The 9th int. conf. Selected Papers. – Vilnius: Technika, 2007. – P. 918 – 924.

•*Guz A.N.* For the 100th Anniversary of the S. P. Timoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU) // Int. Appl. Mech. – 2018. – 54, N 1. – P. 3 – 33.

•*Guz I.A., Rodger A.A., Guz A.N., Rushchitsky J.J.* Predicting the properties of nanocomposites with brush-like reinforcement // Carbon Nano Tubes New Engineering Technologies: Abstracts of the Int. Conf. CNTNET 07, University of Cambridge, Trinity College, United Kingdom. (Cambridge, 10-12 September 2007). – Cambridge, 2007. – P.29.

•*Timoshenko S.P., Gere J.M.* Mechanics of Materials. – New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972. – 670 p.

9. Подаючи статтю до редакції журналу, автор передає всі авторські права видавцеві (Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України). Відповідна угода про передачу авторських прав підписується уповноваженим автором.

10. Адреса редакції: Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, вул. П. Нестерова, 3, 03057 Київ, 57; тел.: 380-44-456-62-92, e-mail: prikl@inmech.kiev.ua; сайт журналу: <http://pm.inmech.kiev.ua>.

Про тематику журналу «Прикладна механіка»

У Міжнародному науковому журналі «Прикладна механіка» друкуються рідше не опубліковані і не призначені для одночасної публікації в інших виданнях оригінальні статті, що містять нові наукові результати теоретичних і експериментальних досліджень в області механіки твердого деформованого тіла і механіки елементів конструкцій (оболонки і пластин) стосовно до таких процесів – напружено-деформований стан, стійкість, динаміка і поширення хвиль.

Також приділяється увага механіці композитів, механіці руйнування, механіці зв'язаних полів, механіці початкових напружень, механіці взаємодіючих з рідиною і газом конструкцій. Публікуються статті щодо стійкості руху, нелінійної динаміки, механіки твердих тіл.

Журнал приділяє постійну увагу сучасним фундаментальним і практичним проблемам інженерної механіки стосовно до технологій, розрахунків та виробництва конструкцій і матеріалів.

Починаючи з 1966 року журнал «Прикладна механіка» видається в США в перекладі на англійську мову під назвою «Soviet Applied Mechanics», а з 1992 року – «International Applied Mechanics».

*Impact Factor в 2005 р. становив 1,740; RIP в 2006р. – 1,76;
SJR в 2007р. – 0,240; SNIP в 2011р. – 2,45.*

On subjects of the journal «Prykladna Mekhanika»

The International scientific journal «Prykladna Mekhanika» publishes the original articles, which are previously unpublished and not intended for simultaneous publication in other editions and contain the new scientific results of theoretical and experimental researches in the field of solid mechanics and mechanics of structural members (shells and plates) concerning such processes – stress-strain state, stability, dynamics, and wave propagation.

Attention is paid also to mechanics of composites, fracture mechanics, coupled fields mechanics, mechanics of residual stresses, mechanics of structures interacted with fluids and gases. The articles on the stability of motion, nonlinear dynamics, mechanics of rigid bodies are published, too.

The journal deals with the modern fundamental and practice problems of engineering mechanics as applied to the technology, design, and fabrication of structures and materials.

Since 1966 the journal «Prykladna Mekhanika» is published in the USA in the English translation under the name «Soviet Applied Mechanics», and since 1992 as «International Applied Mechanics».

*Impact factor in 2005 1,740; RIP in 2006 – 1,76;
SJR in 2007 – 0,240; SNIP in 2011 – 2,45.*