

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ГУМИ НА ВТОМНЕ РУЙНУВАННЯ

Калінін Євгеній Іванович

доктор технічних наук, професор

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

ORCID: 0000-0001-6191-8446

kalinin@nubip.edu.ua

Колодненко Віталій Миколайович

старший викладач

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-8450-6759

kolodnenko_vn@ukr.net

Інтерес до проблем міцності та втоми гуми в останній час значно зріс у зв'язку з широким впровадженням у практику різних виробів, що несуть великі силові вантажі. Тому вивченню ефектів старіння, втоми та руйнування гум присвячені численні теоретичні та експериментальні дослідження. Накопичений до теперішнього часу матеріал, особливо з певних питань, настільки об'ємний, що повний його виклад має бути предметом самостійного викладення. Термін «втома» застосовується для означення визначального фактора виду руйнування у вигляді несподіваного раптового поділу деталі чи елемента машини на дві або більше частини в результаті дії протягом деякого часу циклічних навантажень або деформацій. Руйнування відбувається шляхом зародження і поширення тріщини, котра стає його причиною після досягнення деякого критичного розміру і стає нестійкою й швидко збільшується. Кількість циклів навантаження, при якому настає руйнування, залежить від рівня діючого напруження – зі збільшенням змінних напружень зменшується кількість циклів, необхідних для зародження та розвитку тріщини. У виданих останнім часом монографіях підбивається підсумок багаторічних теоретико-експериментальних досліджень проблем міцності полімерних тіл. Значна увага в цих роботах приділена гумі. При тривалій дії статичних чи знакозмінних навантажень у гумі можуть накопичуватися незворотні механіко-хімічні зміни. Таке накопичення зазвичай називають втомним процесом або втомою, а руйнування зразка в результаті його дії – втомним руйнуванням. У ході тривалого вивчення цього процесу розроблені для характеристики окремих його елементів специфічні терміни. Так, час роботи деталі від початку експлуатації до виходу з ладу називають довговічністю, витривалістю або терміном служби. При цьому користуються також термінами «границя втоми» або «межа витривалості», розуміючи під ними таке найбільше напруження, яке зразок може витримати, при скільки завгодно великому числі циклів навантаження.

Ключові слова: міцність, робота здатність, навантаження, гума, руйнування, границя втоми, межа витривалості, напруження.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.8>

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

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

До того ж механічні характеристики вихідного матеріалу і зруйнованого зразка в ряді випадків відрізняються незначно. Усе це змушує розробляти деякі специфічні оцінки визначення довговічності зразка стосовно

конкретних видів випробувань, про що докладніше буде сказано нижче.

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

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

Методи випробувань. Зазвичай метою втомних випробувань деталей або зразків є визначення їх

довговічності при заданому напруженні з амплітудою, що змінюється у відповідності за певним законом. У ряді випадків можуть ставитися і особливі цілі випробування, наприклад визначення тріщиноутворення, початку руйнування деталі, руйнування деталей в залежності від різних факторів або коли до випробуваного елемента прикладаються напруження в заданій послідовності. В залежності від умов експлуатації гумових виробів до них пред'являються різні вимоги, а звідси виникає необхідна мета різних часових режимів навантаження.

У практиці дослідження втомних властивостей полімерів існує велика кількість різноманітних методів досліджень, які можуть бути віднесені до одного з наступних режимів: статичному (випробування при постійному деформуючому зусиллі і випробування при заданій величині деформації) або динамічному (випробування при постійній швидкості навантаження або деформації; циклічні та випробування при ударних деформаціях). Більш детально розглянемо випробування при циклічних навантаженнях. З них найбільш розповсюджені такі, при яких різні зразки досліджуваних серій піддаються дії напружень з різними амплітудами, аж до руйнування, але для кожної партії зразків амплітуда навантаження залишається постійною. Такий вид втомних досліджень зазвичай називають дослідженням з постійною амплітудою. Існують також дослідження з амплітудою, що збільшується, коли при навантаженні зразка амплітуда знакозмінного напруження монотонно або ступінчасто зростає.

Іноді для відтворення натурних робочих режимів проводять випробування з більш складною послідовністю зміни амплітуд, для чого використовується спеціалізоване експериментальне обладнання. У більшості випадків експериментальні установки принципово не відрізняються від описаних вище і працюють при двох гармонійних режимах навантаження: режим постійних амплітуд деформацій $\varepsilon_0 = const$ та режим постійних амплітуд напружень $\sigma_0 = const$.

Слід також зазначити, що розроблені дотепер методи експериментальних досліджень відносяться до досліджень стандартних гумових зразків і в більшості випадків запозичені з методології випробування металів. Тому при вивченні втомних властивостей гум необхідно враховувати їхню відмінність від металів і в першу чергу слід врахувати їх теплоутворення, залежність від впливу зовнішнього середовища, тимчасову міцність і т. п.

Методологія втомних досліджень гуми найбільш повно викладена в роботах.

Механізм втомного руйнування гум. При постійному напруженні руйнування високополімерного матеріалу відбувається у часі і характеризується двома стадіями – повільною та швидкою. При цьому, на відміну від твердих полімерів, короточасовий розрив дає гладку з дзеркальним блиском поверхню, а тривалий розрив дає дві зони поверхні розриву: на повільній стадії утворюється шорстка зона, а на швидкій – дзеркально гладка, тоді як при крихкому розриві твердих тіл чергування зон має зворотний порядок.

Чим довше процес руйнування, тим чіткіше виражена шорстка зона, і навпаки, при швидкому розриві шорстка

зона не встигає проявитися і всю поверхню розриву займає дзеркальна зона.

За інших рівних умов характер механізму руйнування ненаповнених і наповнених гум різний. У ненаповнених гумах руйнування зразка відбувається або при розриві макромолекул, або при порушенні міжмолекулярної взаємодії, тобто має когезійний характер. У наповнених системах, крім цього, руйнація може відбуватися також по межі гума-наповнювач, тобто спостерігається адгезійний характер руйнування.

У системах, що містять неактивні наповнювачі, коли міцність гуми вище адгезійного зв'язку, тріщина, що утворилася, зустрівшись з часткою наповнювача, проходить по межі розділу фаз. Це пов'язано з тим, що концентрація напружень завжди виникає у межфазній зоні гума-стороннє включення.

Таким чином, неактивний наповнювач, збільшуючи жорсткість гуми, по суті зменшує її міцність.

Якщо адгезія досить велика, але нижче за когезійну міцність полімеру, то введення наповнювача дещо збільшує міцність матеріалу. Це викликано тим, що при розвитку тріщини її шлях подовжується, і до того ж тріщина відхиляється для обходу частинок наповнювача, що потребує додаткових витрат енергії.

Дещо інша картина спостерігається у разі, коли адгезія гуми до наповнювача перевищує когезійну міцність прошарку матеріалу в зазорі між частинками наповнювача. При цьому тріщина проростає в об'ємі гуми, але все ж таки поблизу частинки наповнювача, оскільки концентрація напружень як і раніше знаходиться в міжфазній зоні.

Останнім часом виявлено, що наповнювач в гумовій суміші розташовується у вигляді довгих ланцюжків, причому механічні властивості вулканізаторів значною мірою визначаються розвитком таких ланцюжкових структур. Якщо міцність ланцюжків наповнювача досить велика та адгезія системи гума-наповнювач також висока, то тріщина, що утворилася в матеріалі, не зможе прорости через зазор між частинками ланцюжкової структури. У цьому випадку тріщина огинатиме ланцюжок біля межі фаз (у місцях підвищеної концентрації напружень) до тих пір, поки не зустрине якогось дефекту. Таке збільшення шляху призводить до додаткових витрат енергії для виконання акту руйнування і фізично виражається в шорсткості зони поділу поверхонь гуми. Цей механізм достатньою мірою пояснює підвищену міцність високонаповнених структур.

При багаторазових деформаціях механізм руйнування більш складніший, ніж при одноразовому навантаженні, і пов'язаний з механіко-хімічною втомою гуми. Спочатку під дією циклічного навантаження в найбільш напружених місцях зразка виникають осередки руйнування у вигляді субмікроскопічних тріщин. Такі тріщини утворюються як всередині, так і на його поверхні, показуючи тим самим про ймовірнісний характер втомного руйнування гум. Надалі субмікроскопічні тріщини розростаються, причому серед них виділяється одна або кілька, які згодом і призводять до руйнування. Після того як одна з тріщин починає розвиватися, характер втомного процесу дещо змінюється. Розвиток тріщин відбувається

безперервно, напруження у її вершини зростає, досягаючи деякої критичної величини, після чого настає швидке руйнування зразка. При цьому для гум майже завжди спостерігається чітко виражена шорстка зона поверхні розриву і слабо розвинена дзеркальна зона, що утворюється на швидкій стадії руйнування зразка.

Таким чином, втомна міцність гуми визначається в основному ймовірністю утворення найбільш небезпечних дефектів, розвиток яких надалі залежить від структури матеріалу, напруженого стану деталі, температури і агресивного впливу зовнішнього середовища.

Вплив різних факторів. Дослідження процесу втомного руйнування гуми значно ускладнюється впливом численних факторів: типу каучуку і складу вихідної суміші; ступеня вулканізації; агресивності доквілля; дії світла, сонячної радіації, радіоактивного опромінення; режиму випробувань, механічних деформацій і т. п. Коротко зупинимося на впливі деяких з них, приділивши дещо більше уваги факторам механічного походження.

Результати досліджень. У сучасній практиці втомних випробувань найбільш поширеним режимом навантаження є гармонійний режим. Існуючі теорії тимчасової міцності високоеластичних матеріалів розвивалися відносно цього найпростішого режиму деформування. Спроби перенести вже розроблений математичний апарат на складніші режими випробування досі не увінчалися успіхом. Наявні деякі результати в цій галузі свідчать про труднощі проблеми і вказують на суттєву залежність довговічності матеріалів від режиму навантаження і виду напруженого стану.

Дослідження довговічності гуми у вигляді гантелевидних зразків діаметром 16 мм і висотою 24 мм при симетричному і асиметричному режимах навантаження показали суттєву залежність довговічності гуми від величини асиметрії циклу, яка варіювалася за рахунок зміни статичної складової деформації.

Середня складова деформації визначалася як

$$\varepsilon_{cp} = \varepsilon_0 + \varepsilon_{cm}, \quad (1.15)$$

де ε_0 – амплітудна деформація; ε_{cm} – статична деформація. Як видно, зменшення динамічної складової у загальній деформації призводить до появи монотонної залежності витривалості гум при асиметричному циклі навантаження.

При вивченні міцності втоми гумово-металевих шарнірів було відзначено зменшення терміну служби при збільшенні радіального зусилля за рахунок статичного підтискання деталі. Як відомо, асиметрію циклів можна врахувати за формулою

$$\sigma_r = \sigma_m(1 - \alpha) + \sigma_{-1}, \quad (1.16)$$

де σ_r і σ_{-1} – межі міцності відповідно при асиметричному та симетричному циклах; σ_m – середнє напруження циклу; α – дослідний коефіцієнт.

Говорячи про вплив механічної деформації на втомне руйнування гуми, необхідно насамперед зупинитися на зв'язку між втомною міцністю і міцністю при одноразовому навантаженні. Цей зв'язок очевидний при розгляді втомних характеристик, що відповідають гранично малій і великій витривалості.

Ясно, що чим вище амплітуда навантаження, тим ближче за своєю втомою руйнування до звичайного розриву. У межі, коли витривалість зменшується до одного циклу, міцність втоми збігається при симетричному знакозмінному навантаженні з опором відриву. З цієї точки зору граничну амплітуду напружень, що викликає руйнування при одноразовому навантаженні, доцільно характеризувати межею міцності на розрив, що визначається згідно ДСТУ 270–53. У цьому випадку для кількості циклів N до руйнування зразка справедливе співвідношення виду

$$N = \left(\frac{\sigma_g}{\sigma_N} \right)^\beta, \quad (1.17)$$

де σ_N – амплітудне значення напруження; β – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує залежність міцності від повторності навантаження.

Зі зменшенням прикладених напружень час до руйнування зростає. При цьому витривалість гуми буде визначатися не тільки механічними впливами, але й іншими факторами, пов'язаними зі старінням (світло, тепло, хімічно агресивне середовище тощо). Таким чином, загальне положення про те, що втомна міцність матеріалу тим вище, чим вищий його опір розриву і хімічна стійкість, що характеризується опором різним видам старіння, очевидно, не потребує спеціальних доказів.

Зі збільшенням напружень втомна міцність гум суттєво зменшується. Для всіх досліджуваних деталей працездатність зростала зі зменшенням напружень і крива $\tau - N$ асимптотично наближалася до осі абсцис.

У загальному випадку між числом циклів до руйнування гумового зразка і напруженням σ (або деформацією ε) при симетричних циклах навантаження справедливий співвідношення

$$N\sigma^\alpha = c_1 \quad \text{або} \quad N\varepsilon^\alpha = c_2, \quad (1.18)$$

де постійні c_1 і c_2 не залежать від частоти, а α , окрім того, від температури і режиму випробувань.

У логарифмічних координатах залежність динамічної витривалості від амплітудного значення напруження описується ступеневим законом виду

$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{\sigma_{N_1}}{\sigma_{N_2}} \right)^\beta, \quad (1.19)$$

де σ_{N_1} і σ_{N_2} – амплітудні значення напружень, що відповідають витривалості N_1 і N_2 циклів. Коефіцієнту β приписується фізичний зміст параметра чутливості до повторних навантажень або параметра втомної витривалості гуми.

Дуже важливим є питання про вибір допустимих напружень для гум. Враховуючи складність фізико-механічних перетворень, що супроводжують процес деформування гуми, це питання на сьогоднішній день не може бути вирішене однозначно навіть для матеріалів одного складу. Думка дослідників розходиться в оцінці допустимих напружень, проте при оцінці допустимих деформацій результати досліджень досить близькі.

Висновки. У статті були узагальнені дані експериментальних досліджень у цьому аспекті і для каучуків на основі НК зі статичним модулем близько 0,7 МН/м²

вивів такі емпіричні правила: надійна робота при стисканні зразків можлива в області, обмеженій кривими. Вище цієї області надійність може бути отримана лише при експлуатації деталей на плоский зсув; при скручуванні деталей допустимі напруження слід зменшувати

в 1,5 рази в порівнянні з деформаціями плоского зсуву; деформації стиснення понад 50 % можуть бути реалізовані лише при епізодичних навантаженнях, коли надійність системи не така важлива. Граничними величинами деформацій слід вважати 25 %.

Бібліографічні посилання:

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

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

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

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

Interest in the problems of strength and fatigue of rubber has increased significantly recently due to the wide implementation in practice of various products that carry large power loads. Therefore, numerous theoretical and experimental studies are devoted to the study of the effects of aging, fatigue and destruction of rubber. The material accumulated up to now, especially on certain issues, is so voluminous that its full presentation should be the subject of an independent presentation. The term "fatigue" is used to denote the determining factor of the type of failure in the form of an unexpected sudden division of a part or machine element into two or more parts as a result of the action of cyclic loads or deformations over a period of time. The destruction occurs by the initiation and propagation of a crack, which becomes its cause after reaching a certain critical size and becomes unstable and rapidly increases. The number of load cycles at which failure occurs depends on the level of the applied stress – as the variable stress increases, the number of cycles required for crack initiation and development decreases. In recently published monographs, a summary of many years of theoretical and experimental research on the problems of the strength of polymer bodies is summed up. Considerable attention is paid to rubber in these works. Irreversible mechanical and chemical changes may accumulate in rubber during long-term exposure to static or sign-changing loads. Such accumulation is usually called the fatigue process or fatigue, and the destruction of the sample as a result of its action – fatigue failure. During the long-term study of this process, specific terms were developed to characterize its individual elements. Thus, the working time of a part from the start of operation to failure is called durability, endurance or service life. Thus, the working time of a part from the start of operation to failure is called durability, endurance or service life. At the same time, the terms "fatigue limit" or "endurance limit" are also used, meaning the greatest stress that the sample can withstand, with an arbitrarily large number of load cycles.