

Ю. А. ВЯЗОВИЧЕНКО, О. О. ЛАРІН

ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ПІДХІД МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМО-НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ШИНИ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ АНАЛІЗУ ЇЇ САМОНАГРІВУ. ЧАСТИНА 2 – ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДУ

Використання еластомерів та їхніх композитів в інженерії стало основою для створення багатьох важливих конструкцій, таких як шини, антивібраційні елементи, демпфери, а також різноманітні прокладки, підшипники та інші компоненти, що піддаються високим динамічним навантаженням. Особливістю таких елементів є циклічна динаміка навантажень, що супроводжується утворенням гістерезисних петель і, як наслідок, самонагріванням матеріалу. Підвищення температури в еластомерних матеріалах може призвести до зміни їх механічних властивостей, зниження міцності, прискорення старіння та деградації, а також до значного впливу на процеси втоми. Крім того, високі температури викликають термічні напруження, які можуть змінити картину напружено-деформованого стану (НДС) конструкції. Метою даної роботи є розробка чисельного підходу для оцінки термо-напруженого стану елементів конструкцій з еластомерних матеріалів в умовах експлуатації. Теоретичні основи запропонованого підходу, що базуються на методах скінченних елементів (МСЕ) і комплексному застосуванні моделей теплопровідності, термопружності та в'язкопружності, докладно викладено у статті, частина 1. У цьому дослідженні застосовано розроблений підхід до аналізу пневматичної шини, що дозволило вивчити її поведінку за різних температурних і механічних навантажень. Для цього побудовано температурне поле, що отримане на основі попереднього розрахунку задачі теплопровідності, яке накладається на модель для розрахунку Т-НС. Порівняння результатів НДС та Т-НС було проведене для різних режимів навантаження (нормативного, перевантаженого та ненормативного) і швидкості руху. Зокрема, особливу увагу приділено аналізу деформацій і напружень в гумокордних шарах шини, таких як каркас і брекер. Виявлено суттєві зміни у характері розподілу деформацій та напружень, що підтверджує важливість врахування температурних ефектів для більш точного аналізу та оцінки робочих характеристик конструкцій. Таким чином, запропонований підхід дозволяє проводити комплексний і точніший аналіз термо-напруженого стану конструкцій з еластомерів, що може бути використано для їх оптимізації в реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: т термонапружений стан, алгоритм, еластомерні композити, в'язкопружність, дисипація, самонагрівання, пневматична шина.

Yu. A. VIAZOVYCHENKO, O. O. LARIN

COMPUTATIONAL APPROACH TO THERMAL-STRESSED STATE MODELING OF TIRE BASED ON THE ALGORITHM OF ITS SELF-HEATING ANALYSIS .PART 2 – PRACTICAL RESULTS OF APPLYING THE APPROACH

The use of elastomers and their composites in engineering has become fundamental for the creation of many important structures, such as tires, antivibration elements, dampers, as well as various seals, bearings, and other components exposed to high dynamic loads. A distinctive feature of such elements is the cyclic nature of the loads, which is accompanied by the formation of hysteresis loops and, as a result, self-heating of the material. An increase in temperature in elastomeric materials can lead to changes in their mechanical properties, reduced strength, accelerated aging and degradation, as well as significantly affect fatigue processes. Moreover, high temperatures induce thermal stresses, which can alter the picture of the stress-strain state (SSS) of the structure. The aim of this study is to develop a numerical approach for assessing the thermo-stress state of elastomeric construction elements under operating conditions. The theoretical foundations of the proposed approach, based on finite element methods (FEM) and the comprehensive application of heat conduction, thermoelasticity, and viscoelasticity models, are presented in detail in Part 1 of the article. In this work, the developed approach was applied to the analysis of a pneumatic tire, allowing the study of its behavior under various thermal and mechanical loads. For this, a temperature field was constructed, which was obtained based on a preliminary heat conduction problem calculation, and this was applied to the model for calculating thermal stress state. A comparison of the results of stress-strain state and thermal stress state was carried out for different loading modes (nominal, overloaded, and non-nominal) and vehicle speed. Special attention was given to the analysis of deformations and stresses in the elastomeric layers of the tire, such as the carcass and breaker. Significant changes in the distribution of deformations and stresses were observed, confirming the importance of considering temperature effects for a more accurate analysis and assessment of the operational characteristics of the structures. Thus, the proposed approach allows for a more comprehensive and accurate analysis of the thermo-stress state of elastomeric constructions, which can be used for their optimization in real-world operating conditions. To determine the thermo-strain-stress characteristics of a pneumatic tire and corresponding pictures of its distribution were obtained.

Key words: thermal stress state, algorithm, composite materials, elastic properties, pneumatic tire.

Шина є однією з найважливіших частин транспортного засобу, яка забезпечує безпеку, комфорт та ефективність руху. Водночас, вона піддається різноманітним навантаженням, серед яких особливу роль відіграють температурні напруження. Несправність шини може стати результатом як зовнішніх факторів (погода, дорожнє покриття), так і внутрішніх джерел тепла, що виникають безпосередньо в самій шині під час її експлуатації [1]. Внутрішнє тепло є одним із основних факторів, які можуть призвести до деградації матеріалу, утворення

втомних тріщин та скорочення ресурсу шини [2]. Оскільки ці дефекти не завжди видимі при зовнішньому огляді, розуміння їхнього походження і впливу є критично важливим для забезпечення надійності та безпеки транспорту [3].

Найбільша небезпека для шини полягає саме в утворенні внутрішнього тепла, оскільки воно може призвести до змін у властивостях матеріалу без очевидних зовнішніх ознак. Наприклад, перегрів шини не завжди проявляється у вигляді змін форми або тріщин, які можна побачити під час зовнішнього

огляду. Високі температури, що виникають через тертя об поверхню дороги, можуть спричинити структурні зміни в гумі, які не відразу видно [4]. Це явище може призвести до втомного руйнування матеріалу через циклічні навантаження та накопичення тепла [5]. Перегрів шини може привести до таких наслідків, як зменшення еластичності гуми, зміни її молекулярної структури, погіршення зчеплення з дорогою та збільшення ризику виникнення втомних тріщин [6]. В результаті шина може втратити свої властивості значно раніше, ніж очікувалося. Це також веде до зниження ефективності пального, підвищення витрат на обслуговування та скорочення терміну служби шини [7].

Температурні напруження в шинах виникають через декілька факторів. Тертя між шиною та дорогою є основним джерелом тепла, оскільки постійний контакт шини з дорогою створює тертя, яке перетворюється на тепло. Коли шина працює за великих швидкостей або при високих навантаженнях, це може призводити до перегріву. Циклічні навантаження, що виникають під час руху, сприяють розвитку втомних пошкоджень, які неможливо виявити під час звичайного огляду [8]. Погіршення властивостей гуми через перегрів призводить до того, що шина втрачає свою здатність ефективно працювати, і її ресурс зменшується. Такі пошкодження можуть проявлятися тільки в разі значного зносу чи вибуху, що може статися через накопичення тепла в її структурі [9]. Іншими важливими факторами є надмірне навантаження або неправильний тиск у шинах, що також спричиняють збільшене тертя і, як наслідок, надмірне перегрівання. Це, своєю чергою, значно зменшує термін служби шини та збільшує ризик її пошкодження [10].

Дослідження показали, що шини, що працюють на високих швидкостях, мають значно більшу температуру через постійне тертя та нагрівання, що впливає на швидкість їх деградації. При великих швидкостях температура в шинах може перевищувати допустимі межі, що негативно позначається на їхньому ресурсі та безпеці. Внутрішнє тепло — це важливий фактор, який безпосередньо впливає на втому матеріалу шини. Циклічні навантаження сприяють розвитку втомних пошкоджень, а перегрів може призвести до змін у структурі гуми, що не завжди видно під час огляду [11]. За умов високих температур та неналежного тиску в шинах виникає великий ризик виникнення внутрішніх дефектів, які важко виявити без спеціалізованих досліджень. Це веде до того, що навіть невеликі пошкодження можуть значно зменшити ресурс шини та створити небезпеку для транспортного засобу [12].

Останні дослідження показують, що перегрів шини може спричинити утворення втомних тріщин, що є основною причиною збоїв у роботі шинних конструкцій і зменшення їхнього ресурсу. Підвищене навантаження та неправильне балансування колеса сприяють накопиченню тепла, що впливає на термін служби шини та її працездатність. У дослідженні,

проведеному дослідниками із Michelin, акцентується увага на тому, що температурні напруження значно знижують безпеку шини, оскільки вони можуть спричинити мікротріщини, що розвиваються на молекулярному рівні та не виявляються при зовнішньому огляді [13]. Несправності у конструкції або дефекти виробництва також можуть сприяти збільшенню внутрішнього тепла в шинах, що ще більше погіршує їх ресурс. За умов високих температур температура в шинах може досягати критичних значень, що зменшує їх ефективність та безпеку на дорозі [14].

Високі температури не тільки погіршують зчеплення з дорогою, але й ведуть до швидшого старіння гуми, що в свою чергу значно зменшує ефективність роботи шин. Тому контроль температурного режиму є важливими чинниками для забезпечення безпеки та комфорту водіїв. Наявність технологій для контролю температури в шинах допомагає знизити ризик виникнення дефектів, пов'язаних з перегрівом. У випадку перевантаження або неправильно підібраного тиску температурні напруження значно збільшуються, що також може призвести до пошкодження шини або навіть її вибуху [15; 16].

Інші дослідження також підкреслюють, що неправильний баланс, високі швидкості та великі навантаження можуть спричинити додаткові температурні зміни в шинах [17], що прискорює їх деградацію та збільшує ймовірність аварійних ситуацій на дорогах. Ці факти підтверджують, що управління температурними напруженнями є ключовим для продовження терміну служби шин та забезпечення безпеки транспортних засобів [18].

У першій частині статті «Обчислювальний підхід моделювання термо-напруженого стану шини на основі алгоритму аналізу її самонагріву. Частина 1 [19]. — Теоретичні основи підходу» була описана методологія і основні особливості побудови КС моделей та розрахунку термо-напруженого стану (Т-НС) шини в експлуатації, що формується в наслідок прояву явища самонагріву.

Такий підхід може бути застосований для розрахунку Т-НС на різних експлуатаційних режимах з метою аналізу кількісних і якісних залежностей характеристик Т-НС від умов навантаження.

Відомо, що є декілька експлуатаційних режимів роботи шини, що класифікуються за величиною внутрішнього тиску, вертикального навантаження від ваги автомобіля, крім того вони включають різні швидкісні режими.

В даній роботі запропоновано дослідити варіанти навантаження, для яких зазвичай проводяться експериментальні тести на стенді:

- 1) за величиною внутрішнього тиску:
 - а) номінальний (0.21 МПа);
 - б) ненормативний (0.158 МПа);
- 2) за величиною вертикального навантаження:
 - а) нормативний (1.2 т.);

- б) перевантажений (2.5т);
- 3) за швидкістю обертання:
 - а) номінальний (50 км/год);
 - б) максимальний (240 км/год).

Залежно від поєднання різних значень основних параметрів навантаження, а саме внутрішнього тиску в шині та ваги транспортного засобу, було сформовано три характерних режими роботи конструкції:

1. Нормативний режим — відповідає стандартним умовам експлуатації, при яких внутрішній тиск у шині становить 210 кПа, а маса автомобіля дорівнює 1 тонні. Цей режим приймається як базовий для аналізу напружено-деформованого стану (Т-НС) конструкції.
2. Перевантажений режим — імітує умови надмірного навантаження, за яких внутрішній тиск залишається на рівні 210 кПа, однак маса автомобіля зростає до 2.5 тонн. Такий режим дозволяє оцінити, як конструкція реагує на надлишкову вагу без зміни внутрішнього тиску.
3. Ненормативний режим — моделює умови, що не відповідають технічним нормам, з одночасним зниженням внутрішнього тиску до 158 кПа та збільшенням ваги автомобіля до 2.5 тонн. Цей режим дозволяє оцінити найкритичніший сценарій навантаження на конструкцію.

Для кожного з трьох режимів навантаження Т-НС (напружено-деформований стан) визначався з урахуванням двох варіантів швидкості руху автомобіля:

- Номінальна швидкість — 50 км/год, що відповідає стандартним умовам руху по міських або заміських дорогах;
- Максимальна швидкість — 240 км/год, що дозволяє оцінити поведінку конструкції в умовах високошвидкісного руху, наприклад, на автомагістралях.

Крім того, з метою врахування впливу температурного чинника на поведінку матеріалу та конструкції в цілому, проводився аналіз температурної складової Т-НС. Для цього здійснювались розрахунки напружено-деформованого стану в умовах різних температур, застосованих до кожного з трьох вищезначених режимів навантаження. Такий підхід дозволив оцінити зміни Т-НС в залежності від комбінації навантаження та температурного впливу, що є важливим при прогнозуванні надійності конструкції в реальних умовах експлуатації.

Результати проведених розрахунків представлені на рис. 1-12.

Оскільки основним джерелом теплогенерації в шині, а відповідно і осередком виникнення термонапружено-деформованого стану (термо-НДС), є кордні шари, особлива увага була приділена аналізу їх поведінки при різних умовах навантаження. Результати розрахунків Т-НДС, виконаних з урахуванням

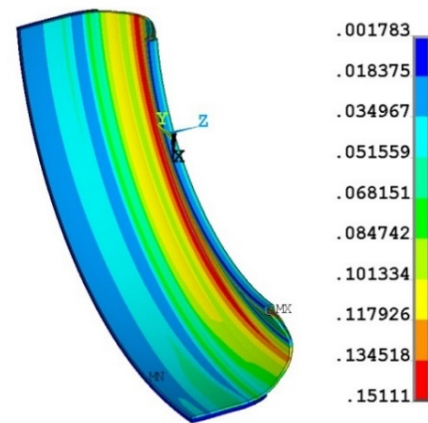
температурної складової, представлені окремо для кордних шарів на рисунках 2 та 3.

На рисунку 2 подано розподіл деформацій по кордних шарах для нормативного режиму навантаження (внутрішній тиск 210 кПа, вага автомобіля 1 т), та за номінальної швидкості руху 50 км/год. отриманий для двох сценаріїв:

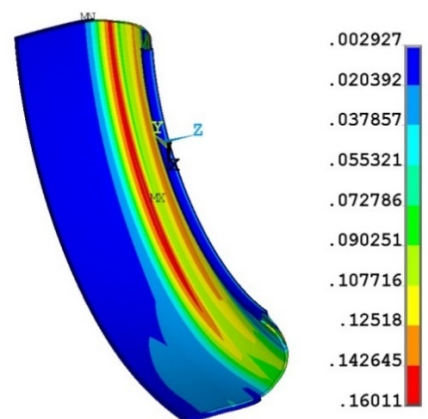
- без урахування температурного впливу (НДС);
- з урахуванням температурної складової (Т-РС).

На рисунку 3 наведено порівняння відповідних полей напружень у кордних шарах для нормативного режиму навантаження.

Проведений порівняльний аналіз рисунків 2 (а) та 2 (б) виявив важливі особливості зміни характеру деформацій у кордних шарах залежно від врахування теплових ефектів.



а



б

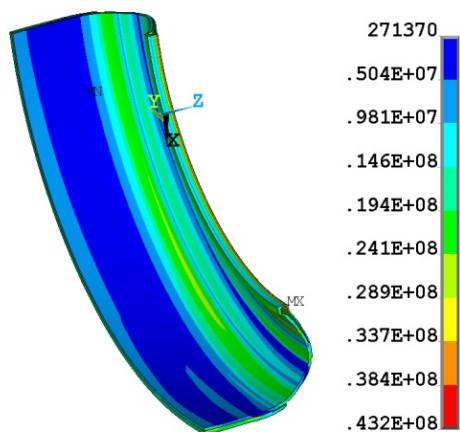
Рис. 2 – Результати розрахунку НДС – а та Т-НС – б для нормативного режиму навантаження при швидкості руху 50 км/год: розподіл деформацій по кордним шарам

Зокрема, встановлено, що зона максимальних значень деформацій каркасу при

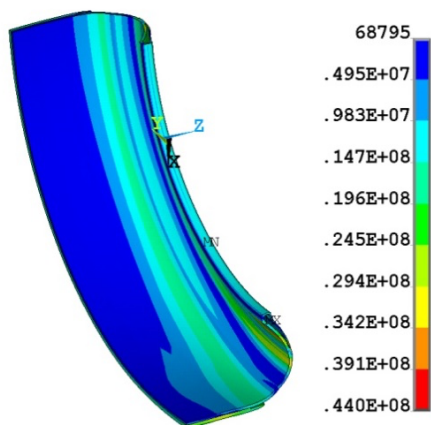
включенні температурної складової зміщується з бортової частини шини (у випадку без врахування температури) до плечової зони. Це свідчить про перерозподіл зусиль у шині, викликаний внутрішнім нагріванням під час руху.

При цьому різниця в максимальних значеннях деформацій у зазначених зонах становить 26% для бортової зони та 20% для плечової, що вказує на істотний вплив температурного чинника навіть у межах нормативного режиму навантаження.

Щодо розподілу напружень, представленого на рисунку 3, результати демонструють суттєву різницю між розрахунками з урахуванням та без урахування температурної складової. Зокрема: у плечовій зоні шини напруження зростає на 32% при врахуванні температури, а у бортовій зоні — відповідна різниця становить 24%.



a



б

Рис. 3 – Результати розрахунку НДС – а та Т-НС – б для нормативного режиму навантаження при швидкості руху 50 км/год: розподіл напружень по кордним шарам

Однак, якщо порівнювати максимальні абсолютні значення деформацій та напружень по всій конструкції, то вони відрізняються не суттєво:

деформації — близько 6%, а напруження — приблизно 1%.

Ці відмінності є очікувано невеликими, оскільки аналіз проводився для номінального режиму навантаження, який характеризується близькими до оптимальних умовами експлуатації. Однак, навіть за таких умов тепловий вплив здатен змінити локалізацію зон концентрації деформацій і напружень, що є критично важливим для довготривалої надійності шини.

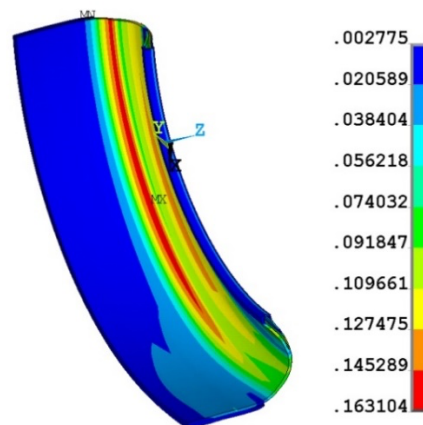


Рис. 4– Результати розрахунку Т-НС для номінального режиму навантаження при швидкості руху 240 км/год: розподіл деформацій по кордним шарам

На рисунках 4 і 5 подано результати чисельного аналізу термонапружено-деформованого стану конструкції для двох характерних режимів роботи – нормативного навантаження та максимального швидкісного режиму.

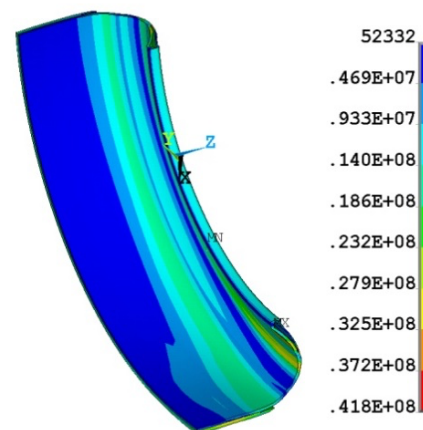


Рис. 5– Результати розрахунку Т-НС для номінального режиму навантаження при швидкості руху 240 км/год: розподіл напружень по кордним шарам

Разом з тим, порівняльний аналіз кількісних параметрів виявив помітні відмінності між двома режимами. Зокрема, деформації в плечовій зоні зросли на 9%, а в зоні борту – на 5%. Ще виразніше

проявляється вплив швидкісного навантаження на рівень напружень: у відповідних зонах приріст склав 13% та 9%. Це свідчить про підвищене навантаження на найбільш вразливі ділянки конструкції за умов інтенсивної експлуатації.

Загалом, максимальне абсолютне значення деформацій збільшилось на 5%, а напружень – на 7% у порівнянні з нормативним режимом.

Подібні відхилення, хоч і не виходять за межі допустимих значень, вказують на необхідність їх урахування при оцінці довговічності та надійності елементів, зокрема з огляду на можливість накопичення втомних пошкоджень в умовах тривалої експлуатації на підвищених швидкостях.

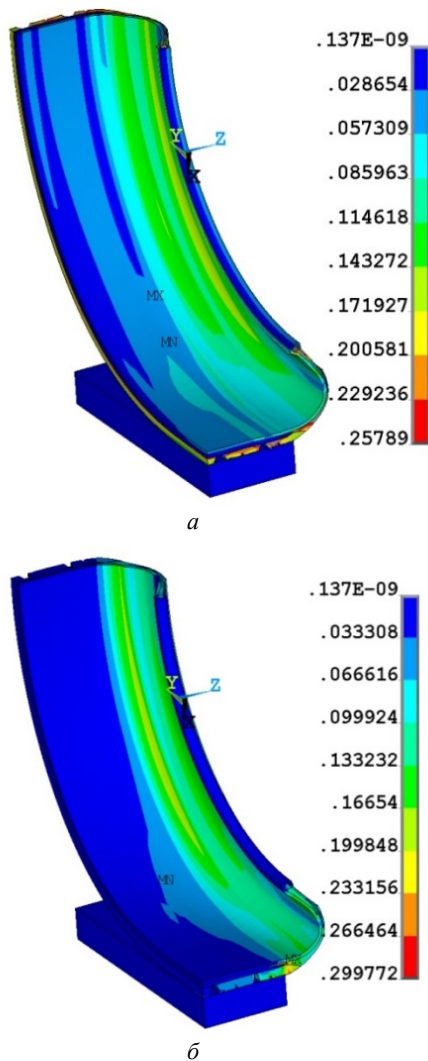


Рис. 6 – Результати розрахунку НДС – а та Т-НС – б для перевантаженого режиму при швидкості руху шини 50 км/год: розподіл деформацій по шині

На рисунках 6–8 наведено результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) шини в умовах перевантаженого режиму експлуатації (внутрішній тиск 210 кПа, маса автомобіля 2,5 т), за номінальної швидкості руху 50

км/год, із урахуванням температурного впливу та без нього.

Аналіз розподілу деформацій та напружень свідчить про суттєвий вплив температурної складової на просторову структуру навантаження.

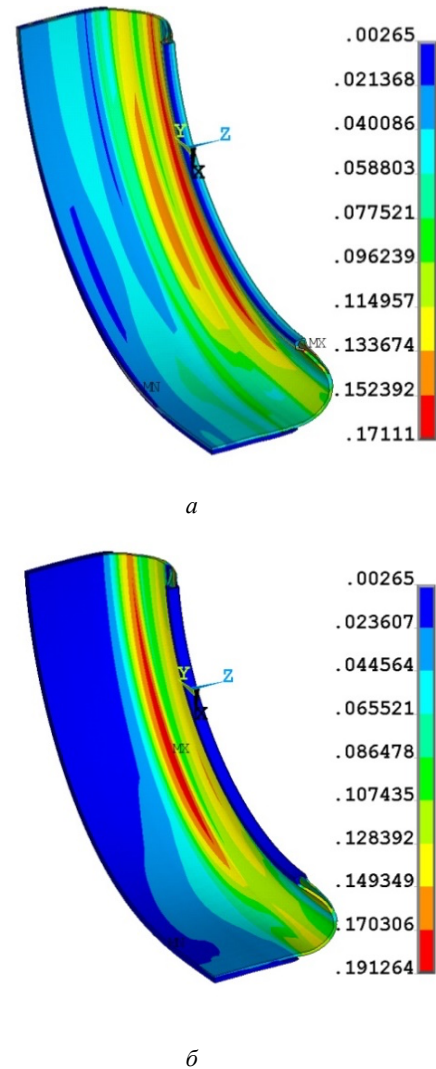


Рис. 7 – Результати розрахунку НДС – а та Т-НС – б для перевантаженого режиму при швидкості руху шини 240 км/год: розподіл деформацій по кордних шарах

Подібно до ситуації, спостереженої при нормативному режимі (див. Рис. 4), температура викликає зміщення зони концентрації екстремальних значень у напрямку плечової ділянки шини. Така локалізація зумовлена зміною жорсткісних характеристик матеріалу при нагріванні та нерівномірністю температурного поля в поперечному перерізі.

Кількісна оцінка впливу температури засвідчує значні відмінності в рівнях деформацій та напружень між термомеханічним (Т-НС) та суто механічним (НДС) розрахунками. У плечовій зоні деформації зростають на 27%, тоді як у бортовій – навпаки, зменшуються на 23%. Подібна тенденція простежується і щодо напружень: у плечовій частині їх

значення збільшуються на 23%, а в зоні борту спостерігається зменшення на 21%.

Порівняння результатів чисельного моделювання для номінального (рис. 6-8) та високого швидкісного режиму (рис. 9-10) при нормативному навантаженні дозволяє оцінити вплив швидкісного фактора на напружено-деформований стан конструкції.

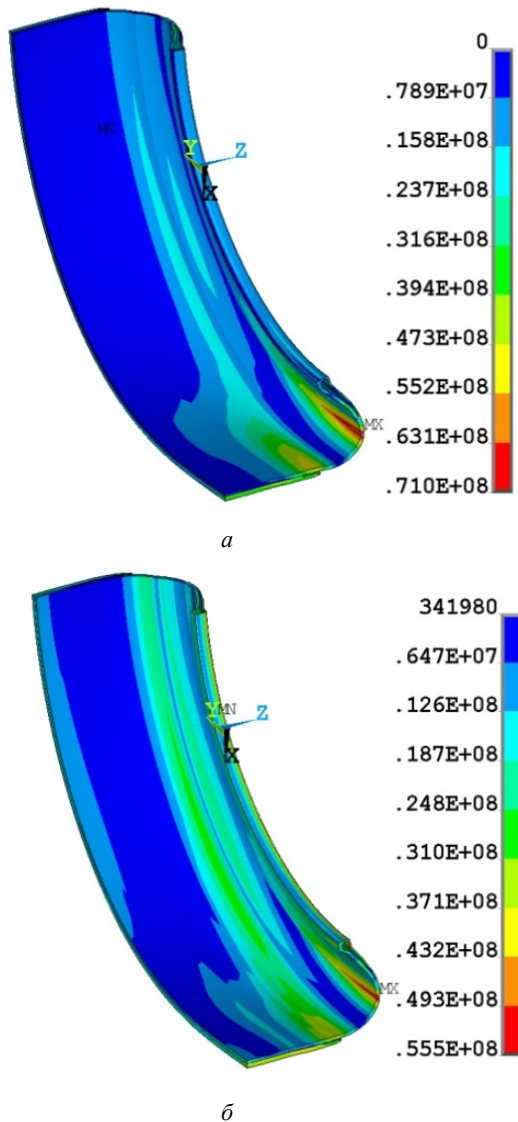


Рис. 8 – Результати розрахунку НДС – *a* та Т-НС – *б* для перевантаженого режиму при швидкості руху шини 50 км/год: розподіл напружень по кордних шарах

Зокрема, у плечовій зоні спостерігається зростання деформацій на 13%, що вказує на більш інтенсивне механічне навантаження в умовах високої швидкості. Це може бути зумовлено як збільшенням динамічного впливу на матеріал шини, так і зміною її поведінки в умовах підвищеного термічного режиму, характерного для швидкісної експлуатації.

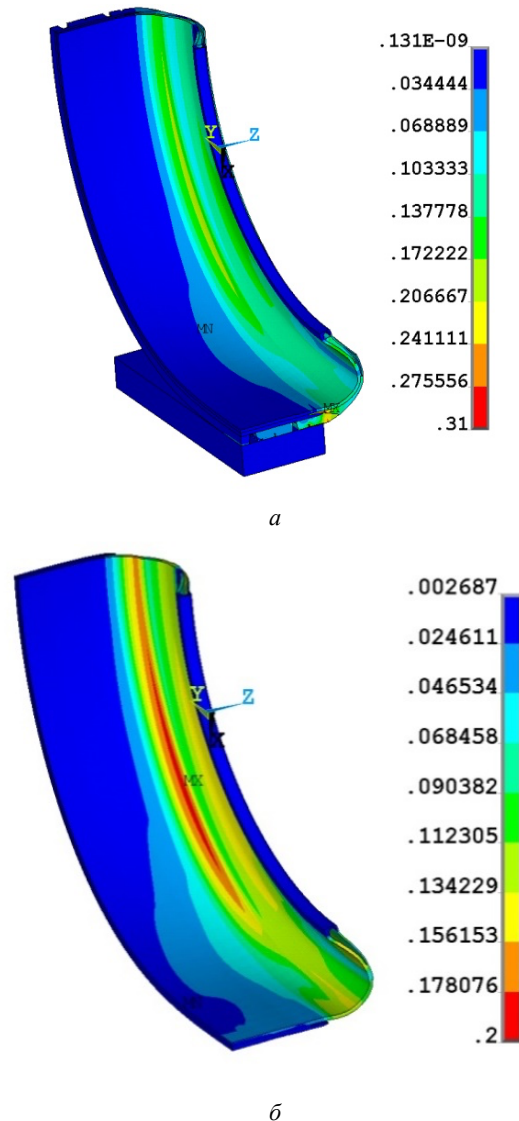


Рис. 9 – Результати розрахунку Т-НС для перевантаженого режиму при швидкості руху шини 240 км/год: розподіл деформацій по шині – *a*, по кордним шарам – *б*

Водночас у бортовій зоні деформації збільшуються на 10%. Це свідчить про зростання навантаження не лише на периферії, але й на більш віддалені від центру конструкції елементи, що може вказувати на значний розподіл сил у поперечному перерізі шини.

Крім того, було встановлено, що підвищення швидкості руху транспортного засобу в умовах нормативного режиму навантаження призводить до суттєвих змін у розподілі напружень в основних зонах конструкції шини. Зокрема, розмір значення напружень у плечовій зоні збільшився на 10%, що свідчить про зростання інтенсивності силового впливу в цій критичній області конструкції. Аналогічно, у бортовій зоні шини приріст напружень становить 9%, що вказує на загальну тенденцію до підвищення навантаження у всіх частинах каркасу під впливом динамічних чинників.

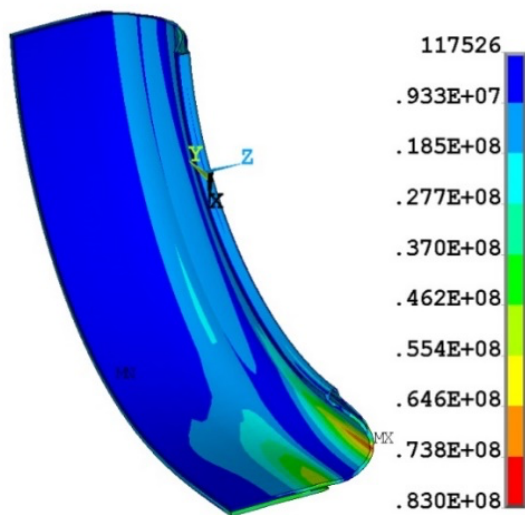
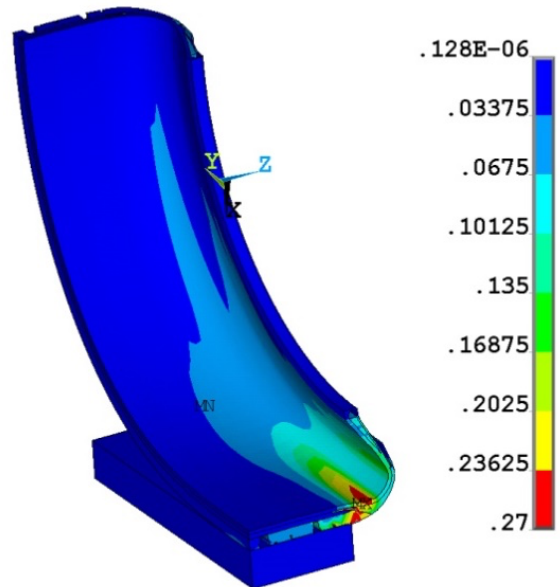


Рис. 10 – Результати розрахунку Т-НС для перевантаженого режиму при швидкості руху шини 240 км/год: розподіл напружень по кордним шарам

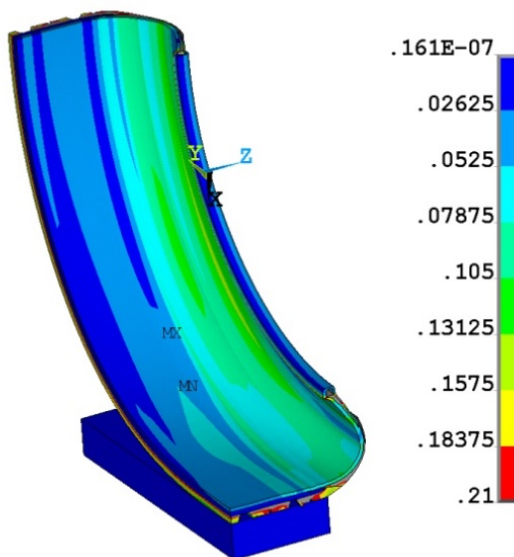
Також, спостерігається приріст абсолютних максимальних значень: деформації збільшилися на 12%, а напруження — на 8%. Такий результат свідчить про загальну тенденцію до підвищення рівня як деформаційної, так і силової активності шини при переході до високошвидкісного режиму. Незважаючи на те, що приріст напружень є дещо меншим за приріст деформацій, це все ж свідчить про посилення навантажувального стану, що може негативно позначитись на довговічності шини при тривалому використанні в екстремальних умовах.



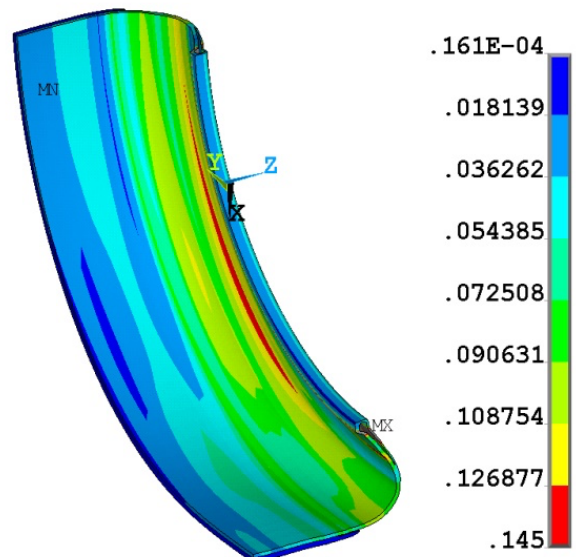
б

Рис. 11 – Результати розрахунку НДС – а та Т-НС – б для ненормативного режиму при швидкості руху шини 50 км/год: розподіл деформацій по шині

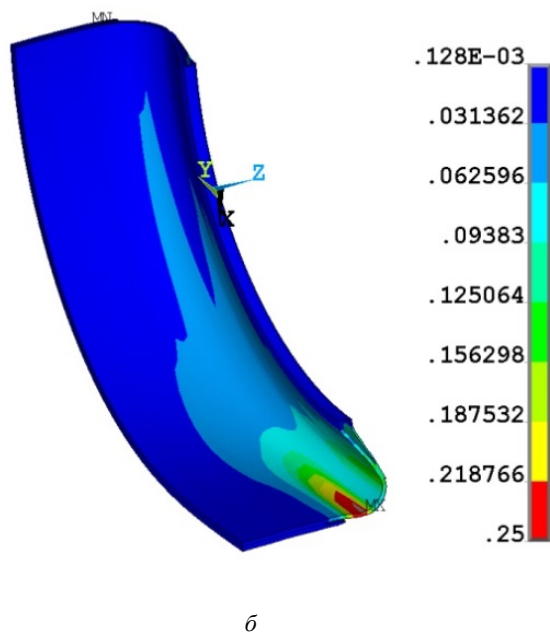
Рисунки 11–13 ілюструють результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) шини за умов ненормативного режиму експлуатації, що передбачає внутрішній тиск 210 кПа та вертикальне навантаження 2.1 т при номінальній швидкості руху автомобіля — 50 км/год.



а



а



рівень внутрішніх напружень, що виникають у матеріалі.

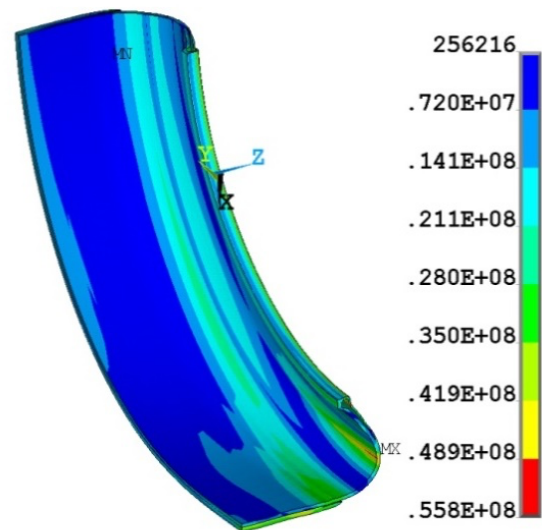


Рис. 12 – Результати розрахунку НДС – а та Т-НС – б для ненормативного режиму при швидкості руху шини 50 км/год: розподіл деформацій по кордним шарам

Тенденція зміни характеру розподілу деформацій у шині зберігається й для ненормативного режиму навантаження, що характеризується внутрішнім тиском 210 кПа та вертикальним навантаженням 2.1 т при номінальній швидкості руху (50 км/год). Аналіз отриманих результатів розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) із урахуванням температурного поля (Т-НС) свідчить про суттєвий вплив теплового чинника на розподіл механічних характеристик у гумокордних шарах.

Зокрема, у плечовій зоні спостерігається зростання значень деформацій на 30% порівняно з розрахунком без урахування температури. Це свідчить про підвищену гнучкість матеріалу у цій зоні внаслідок термічного розширення та зниження модуля пружності при підвищених температурах.

Натомість, у бортовій зоні деформації зменшуються на 14%, що може бути зумовлено локальним зменшенням температурного впливу внаслідок тепловідведення через контакт з ободом колеса та нижчою температурною чутливістю даної зони.

Щодо розподілу напружень, то у плечовій зоні зафіксовано зростання на 34%, що вказує на підвищене навантаження матеріалу у цій ділянці при термічному впливі, можливо, внаслідок концентрації механічних і теплових навантажень. У бортовій зоні, навпаки, напруження знижуються на 20%, що корелює зі зменшенням деформацій у цій області. Абсолютні максимальні значення деформацій у всій шині змінилися на 6%, тоді як відповідні зміни для напружень склали 15%. Це вказує на те, що температурне поле має помірний вплив на загальну деформативність конструкції, але суттєвіше впливає на

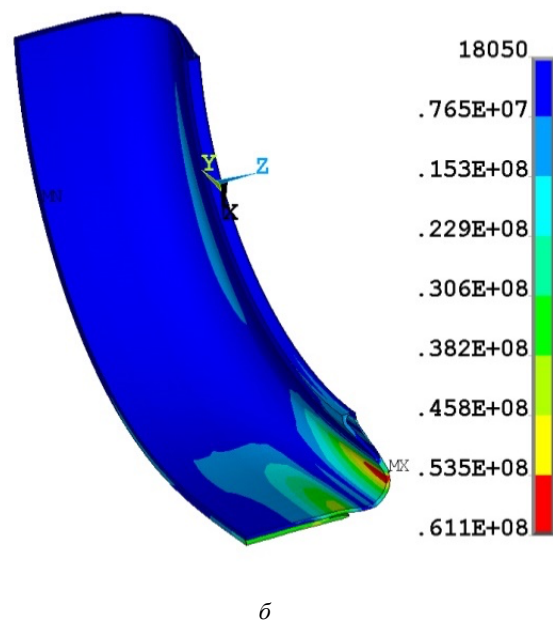


Рис. 13 – Результати розрахунку НДС – а та Т-НС – б для ненормативного режиму при швидкості руху шини 50 км/год: розподіл напружень по кордним шарам

На основі аналізу результатів, представлених на рисунках 13, 14(б) та 15, було встановлено виразну залежність напружено-деформованого стану (НДС) шини від зміни швидкісного режиму руху транспортного засобу в умовах ненормативного навантаження. Зокрема, спостерігається суттєве зростання рівня деформацій у плечовій зоні каркасу при переході від номінальної швидкості (50 км/год) до максимального швидкісного режиму (240 км/год) — значення зростає на 16%, що свідчить про посилення механічної активності в найбільш навантаженій ділянці шини.

Водночас у бортовій зоні каркасу відмічається зростання деформацій на 7%, що вказує на менш виражену, але все ж відчутну реакцію цієї зони на підвищення швидкості.

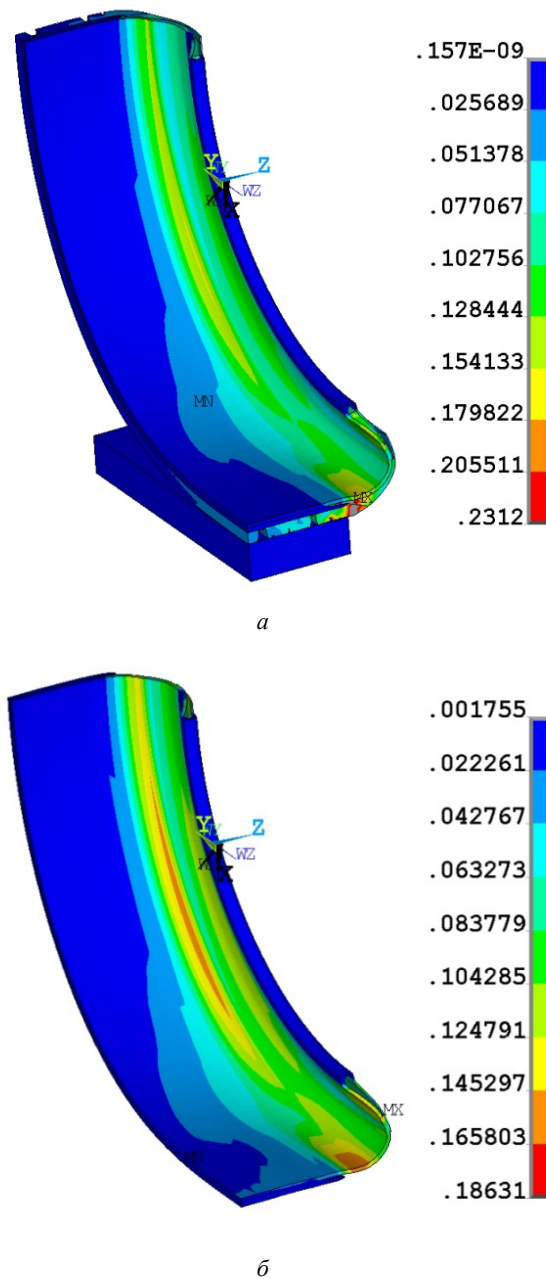


Рис. 14 – Результати розрахунку Т-НС для ненормативного режиму при швидкості руху шини 240 км/год: розподіл деформацій по шині – а, по кордним шарам – б

Такий характер змін може бути зумовлений складною взаємодією інерційних та контактних сил, а також перерозподілом температурного поля, яке інтенсифікується із зростанням швидкості руху та, відповідно, збільшенням тепловиділення внаслідок внутрішнього тертя.

Щодо напруженого стану, то результати моделювання показують, що напруження у плечовій зоні каркасу зростають на 19%, що є критичним з

огляду на можливість локального перевантаження матеріалу конструкції. У бортовій зоні напруження зростають на 17%, що також є суттєвим і потребує врахування при конструюванні шин для умов експлуатації на високих швидкостях.

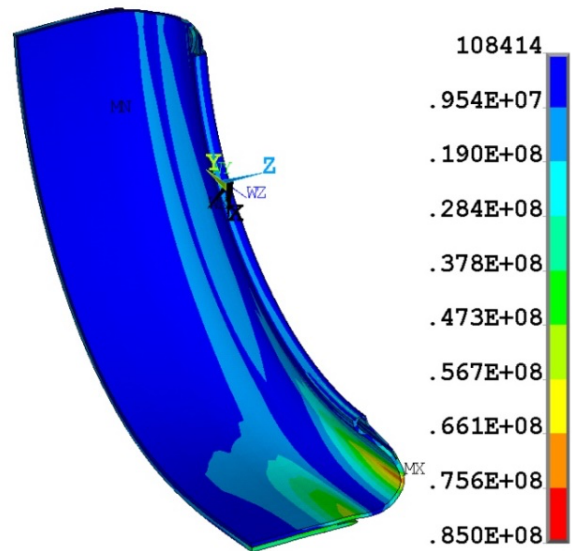


Рис. 15 – Розподіл напружень по кордним шарам шини для ненормативного режиму навантаження при швидкості руху 240 км/год

Абсолютні максимальні значення деформацій при цьому зросли на 6%, тоді як напруження – на 18%, що свідчить про переважаючий вплив швидкісного режиму саме на силову компоненту термомеханічного стану. Такий дисбаланс між приростами деформацій і напружень вказує на потенційно небезпечне підвищення внутрішніх силових факторів у структурі шини без суттєвої зміни її геометрії, що може призводити до крихкого руйнування при тривалій експлуатації.

Висновки

В статті запропоновано підхід до розв'язку зв'язаної задачі розрахунку термо-напруженого стану, що формується у шині під час її кочення і супроводжується процесом самонагріву. Запропонована методологія базується на низці послідовних розрахунків методом скінченних елементів НДС, що формується у шині протягом її кочення при різних режимах навантаження.

Отримані результати вказують на зростання локального механічного навантаження в умовах інтенсифікації експлуатаційного режиму. Виявлені зміни можуть бути критичними в контексті аналізу втомної довговічності та оцінки граничного ресурсу конструкції, що вимагає додаткового врахування в інженерних розрахунках та експлуатаційних рекомендаціях.

Загалом, отримані результати дозволяють зробити важливий висновок: температурний вплив має більш виражену чутливість до варіацій вертикального

навантаження, ніж до змін внутрішнього тиску в шині. Це означає, що при перевантаженні транспортного засобу навіть за стабільного тиску у шині, термомеханічна взаємодія компонентів конструкції суттєво змінюється. Ігнорування термічного впливу може призвести до суттєвого недооцінювання ризиків перевантаження окремих зон конструкції, зокрема плечової, яка демонструє як зростання деформацій, так і напружень. Це підкреслює необхідність комплексного термомеханічного аналізу при оцінці працездатності шини в умовах інтенсивної експлуатації, зокрема у високотемпературних режимах руху.

Швидкісний режим є важливим фактором, що впливає на зміну напружено-деформованого стану шини, особливо у поєднанні з ненормативним навантаженням. Отримані результати підкреслюють необхідність врахування експлуатаційних швидкостей при проектуванні шин та оцінці їхньої довговічності, зокрема у високошвидкісних режимах.

Список літератури

- Anupam, K., Srirangam, S. K., Scarpas, A., & Kasbergen, C. (2013). Influence of temperature on tire-pavement friction analyses. *Transportation Research Record*, 2369, 114–124. <https://doi.org/10.3141/2369-13>
- Qiu, X., Yin, H., Xing, Q., & Jin, Q. (2023). Development of Fatigue Life Model for Rubber Materials Based on Fracture Mechanics. *Polymers*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/polym15122746>
- Premarathna, W. A. A. S., Jayasinghe, J. A. S. C., Wijesundara, K. K., Gamage, P., Ranatunga, R. R. M. S. K., & Senanayake, C. D. (2021). Investigation of design and performance improvements on solid resilient tires through numerical simulation. *Engineering Failure Analysis*, 128, 105618. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105618>
- Ma, S., Wu, L., & Liu, W. V. (2023). Numerical Investigation of Temperatures in Ultra-Large Off-the-Road Tires Under Operating Conditions at Mine Sites. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 15(2). <https://doi.org/10.1115/1.4056086/1148486>
- Nguyen, T. C., Cong, K. D. do, & Dinh, C. T. (2023). Rolling Tires on the Flat Road: Thermo-Investigation with Changing Conditions through Numerical Simulation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/AP13084834>
- Luo, W., Li, M., Huang, Y., Yin, B., & Hu, X. (2019). Effect of temperature on the tear fracture and fatigue life of carbon-black-filled rubber. *Polymers*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/POLYM11050768>
- Choi, J. H., Kang, H. J., Jeong, H. Y., Lee, T. S., & Yoon, S. J. (2005). Heat aging effects on the material property and the fatigue life of vulcanized natural rubber, and fatigue life prediction equations. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19(6), 1229–1242. <https://doi.org/10.1007/BF02984044/METRICS>
- Woo, C. S., Kim, W. D., Lee, S. H., Choi, B. I., & Park, H. S. (2009). Fatigue life prediction of vulcanized natural rubber subjected to heat-aging. *Procedia Engineering*, 1(1), 9–12. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2009.06.004>
- Zarrin-Ghalami, T., & Fatemi, A. (2013). Fatigue life predictions of rubber components: Applications to an automobile cradle mount. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227(5), 691–703. https://doi.org/10.1177/0954407012461863/ASSET/958516E9-DE81-4429-97B4-784A5FAB6E11/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_0954407012461863-FIG12.JPG
- Zarrin-Ghalami, T., & Fatemi, A. (2013). Multiaxial fatigue and life prediction of elastomeric components. *International Journal of Fatigue*, 55, 92–101. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2013.05.009>
- Tobajas, R., Elduque, D., Ibarz, E., Javierre, C., & Gracia, L. (2020). A New Multiparameter Model for Multiaxial Fatigue Life Prediction of Rubber Materials. *Polymers* 2020, Vol. 12, Page 1194, 12(5), 1194. <https://doi.org/10.3390/POLYM12051194>
- Wang, H., Xuan, F., & Liu, X. (2021). Prediction and evaluation of fatigue life under random load based on low load strengthening characteristic. *International Journal of Fatigue*, 151, 106346. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2021.106346>
- Zhu, X., Pan, X., & Shangguan, W. bin. (2022). A Fatigue Life Prediction Method of Rubber Material for Automobile Vibration Isolator under Road Load Spectrum. *SAE Technical Papers*, 2022. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0253>
- Mars, W. V., & Fatemi, A. (2004). Factors that Affect the Fatigue Life of Rubber: A Literature Survey. *Rubber Chemistry and Technology*, 77(3), 391–412. <https://doi.org/10.5254/1.3547831>
- Shaw, B., Ramier, J., & Busfield, J. J. C. (2022). The Effect of Thermal Ageing on the Fatigue Resistance of Hydrogenated Acrylonitrile Butadiene Rubber (HNBR) Compounds. *Advances in Polymer Science*, 289, 143–165. https://doi.org/10.1007/12_2022_122
- Luo, W., Huang, Y., Yin, B., Jiang, X., & Hu, X. (2020). Fatigue Life Assessment of Filled Rubber by Hysteresis Induced Self-Heating Temperature. *Polymers* 2020, Vol. 12, Page 846, 12(4), 846. <https://doi.org/10.3390/POLYM12040846>
- Ruellan, B., le Cam, J. B., Jeanneau, I., Canévet, F., Mortier, F., & Robin, E. (2019). Fatigue of natural rubber under different temperatures. *International Journal of Fatigue*, 124, 544–557. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2018.10.009>
- Neuhaus, C., Lion, A., Jöhrlitz, M., Heuler, P., Barkhoff, M., & Duisen, F. (2017). Fatigue behaviour of an elastomer under consideration of ageing effects. *International Journal of Fatigue*, 104, 72–80. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2017.07.010>
- Вязовиченко Ю. А., Ларін О. О. (2022). "Обчислювальний підхід моделювання термо-напруженого стану шини на основі алгоритму аналізу її самонагріву. Частина 1 – теоретичні основи підходу." *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Сер. : Динаміка і міцність машин. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.2.270935>

References (transliterated)

- Anupam, K., Srirangam, S. K., Scarpas, A., & Kasbergen, C. (2013). Influence of temperature on tire-pavement friction analyses. *Transportation Research Record*, 2369, 114–124. <https://doi.org/10.3141/2369-13>
- Qiu, X., Yin, H., Xing, Q., & Jin, Q. (2023). Development of Fatigue Life Model for Rubber Materials Based on Fracture Mechanics. *Polymers*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/polym15122746>
- Premarathna, W. A. A. S., Jayasinghe, J. A. S. C., Wijesundara, K. K., Gamage, P., Ranatunga, R. R. M. S. K., & Senanayake, C. D. (2021). Investigation of design and performance improvements on solid resilient tires through numerical simulation. *Engineering Failure Analysis*, 128, 105618. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105618>
- Ma, S., Wu, L., & Liu, W. V. (2023). Numerical Investigation of Temperatures in Ultra-Large Off-the-Road Tires Under Operating Conditions at Mine Sites. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 15(2). <https://doi.org/10.1115/1.4056086/1148486>
- Nguyen, T. C., Cong, K. D. do, & Dinh, C. T. (2023). Rolling Tires on the Flat Road: Thermo-Investigation with Changing Conditions through Numerical Simulation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/AP13084834>
- Luo, W., Li, M., Huang, Y., Yin, B., & Hu, X. (2019). Effect of temperature on the tear fracture and fatigue life of carbon-black-filled rubber. *Polymers*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/POLYM11050768>
- Choi, J. H., Kang, H. J., Jeong, H. Y., Lee, T. S., & Yoon, S. J. (2005). Heat aging effects on the material property and the fatigue life of vulcanized natural rubber, and fatigue life prediction equations. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19(6), 1229–1242. <https://doi.org/10.1007/BF02984044/METRICS>
- Woo, C. S., Kim, W. D., Lee, S. H., Choi, B. I., & Park, H. S. (2009). Fatigue life prediction of vulcanized natural rubber subjected to heat-aging. *Procedia Engineering*, 1(1), 9–12. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2009.06.004>
- Zarrin-Ghalami, T., & Fatemi, A. (2013). Fatigue life predictions of rubber components: Applications to an automobile cradle mount.

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 227(5), 691–703.
10. Zarrin-Ghalami, T., & Fatemi, A. (2013). Multiaxial fatigue and life prediction of elastomeric components. *International Journal of Fatigue*, 55, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.05.009>
 11. Tobajas, R., Elduque, D., Ibarz, E., Javierre, C., & Gracia, L. (2020). A New Multiparameter Model for Multiaxial Fatigue Life Prediction of Rubber Materials. *Polymers* 2020, Vol. 12, Page 1194, 12(5), 1194. <https://doi.org/10.3390/POLYM12051194>
 12. Wang, H., Xuan, F., & Liu, X. (2021). Prediction and evaluation of fatigue life under random load based on low load strengthening characteristic. *International Journal of Fatigue*, 151, 106346. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106346>
 13. Zhu, X., Pan, X., & Shangguan, W. bin. (2022). A Fatigue Life Prediction Method of Rubber Material for Automobile Vibration Isolator under Road Load Spectrum. *SAE Technical Papers*, 2022. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0253>
 14. Mars, W. V., & Fatemi, A. (2004). Factors that Affect the Fatigue Life of Rubber: A Literature Survey. *Rubber Chemistry and Technology*, 77(3), 391–412. <https://doi.org/10.5254/1.3547831>
 15. Shaw, B., Ramier, J., & Busfield, J. J. C. (2022). The Effect of Thermal Ageing on the Fatigue Resistance of Hydrogenated Acrylonitrile Butadiene Rubber (HNBR) Compounds. *Advances in Polymer Science*, 289, 143–165. https://doi.org/10.1007/12_2022_122
 16. Luo, W., Huang, Y., Yin, B., Jiang, X., & Hu, X. (2020). Fatigue Life Assessment of Filled Rubber by Hysteresis Induced Self-Heating Temperature. *Polymers* 2020, Vol. 12, Page 846, 12(4), 846. <https://doi.org/10.3390/POLYM12040846>
 17. Ruellan, B., le Cam, J. B., Jeanneau, I., Canévet, F., Mortier, F., & Robin, E. (2019). Fatigue of natural rubber under different temperatures. *International Journal of Fatigue*, 124, 544–557. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.10.009>
 18. Neuhaus, C., Lion, A., Jöhltz, M., Heuler, P., Barkhoff, M., & Duisen, F. (2017). Fatigue behaviour of an elastomer under consideration of ageing effects. *International Journal of Fatigue*, 104, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.07.010>
 19. Viazovychenko Yu., Larin O. (2022). "Computational Approach to Modeling the Thermo-Stressed State of a Tire Based on the Self-Heating Analysis Algorithm. Part 1 – Theoretical Foundations of the Approach." *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Dynamics and Strength of Machines*. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.2.270935>

Надійшла (received) 19.12.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Вязовиченко Юлія Андріївна (Yuliia Viazovychenko) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6510-3164>; e-mail: Yuliia.Viazovychenko@khpi.edu.ua

Ларін Олексій Олександрович (Larin Oleksiy) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», директор навчально наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-68-79; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5721-4400>; e-mail: oleksiy.larin@khpi.edu.ua