

О. І. ЗІНЧЕНКО

ОБГРУНТУВАННЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОРСІОННИХ ВАЛІВ СИСТЕМ ПІДРЕСОРИЮВАННЯ ЛЕГКИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН ЗА КРИТЕРІЯМИ МІЦНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ

В роботі показана необхідність удосконалення торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин з метою поліпшення їх основних характеристик. У результаті проведення аналізу існуючих методів та методик розрахунку торсіонних валів прийшли до висновку про необхідність створення адекватної моделі, яка би включала в себе оцінку напружено-деформованого стану торсіонного валу у різних зонах із врахуванням безлічі факторів.

Ключові слова: підвіска, системи підресорювання, легка броньована машина, торсіонний вал, тактико-технічні характеристики, транспортні засоби спеціального призначення, головка торсіонного вала, стебло торсіонного вала, галтельний перехід, узагальнене параметричне моделювання

O. ZINCHENKO

JUSTIFICATION OF THE PROBLEMS OF RESEARCH OF TORSION SHAFTS OF SUSPENSION SYSTEMS OF LIGHT ARMORED VEHICLES ACCORDING TO STRENGTH AND DURABILITY CRITERIA

The paper shows the necessity of improving the torsion shafts of the suspension systems of light armored vehicles in order to improve their main characteristics. As a result of the analysis of the existing methods and methodologies of torsion shafts calculation, we came to the conclusion about the need to create an adequate model, which would include an assessment of the stress-strain state of the torsion shaft in different zones, taking into account many factors.

Known simplified methods for calculating the stress-strain state of torsion shafts are not suitable for the complex non-homogeneous components distribution of the stress-strain state and are a source of potential errors. Therefore, there is a need to apply the incremental flow theory, taking into account the load history of the torsion shaft material. In the work, it is proposed to reduce the problem to a sequence of problems with the breakdown of the load history into separate steps and within each step to simultaneously take into account the elastic-plastic deformation and contact interaction and their relationship and mutual influence. The necessity of generalized parametric modeling of the torsion shaft is shown, according to which the generalized parameters represent a set of distributions, functions, dependencies, structures, forms, properties, etc., which uniquely identify the torsion shaft. At the same time, this method makes it possible to purposefully change the current technical solution. All these studies will provide an opportunity to substantiate the parameters of torsion shafts in the context of improving their strength and durability.

Key words: suspension, suspension systems, light armored vehicle, torsion shaft, tactical and technical characteristics, special purpose vehicles, torsion shaft head, torsion shaft stem, halyard transition, generalized parametric modeling

Вступ.

На часі актуальним питанням є модернізація та розробка нової бойової техніки для створення сильної армії України, здатної відбивати напади ворога. Забезпечення ефективності та підвищення технічного рівня бронетанкової техніки пов'язано із модернізацією вузлів, систем та деталей. Така модернізація повинна забезпечувати виконання відповідних вимог, що стосуються поліпшення тактико-технічних характеристик (ТТХ) сучасних вітчизняних легких броньованих машин (ЛБМ). Це буде стосуватися торсіонних валів (ТВ) систем підресорювання (СП) ЛБМ. Становить інтерес модернізація основної складової підвісок ЛБМ - ТВ СП. Оскільки ТВ є найбільш навантаженими деталями в СП, то передчасний вихід їх із ладу матиме негативні наслідки на полі бою.

Аналіз основних досягнень і публікацій.

Порівняння різних видів техніки є складним завданням, оскільки необхідно орієнтуватися на нагальні обставини. Необхідне безперервне вдосконалення існуючих зразків, оскільки безперервно змінюється тактика ведення бою. Має місце проблема, яка стосується нинішнього стану ЗСУ та українського оборонно-промислового комплексу загалом, що не відповідає сучасним вимогам. Досягнутий рівень технічної оснащеності ЗСУ вітчизняними зразками техніки

не забезпечує їхню достатню боєздатність, а зарубіжні види техніки, спроможні витримувати удари ворога, доставляють недостатньо швидко та в недостатній кількості. Застаріла вітчизняна техніка швидко виходить із ладу, бо має обмежений ресурс. Тому необхідна модернізація або розробка нових зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) з поліпшеними характеристиками, які будуть відповідати сучасним вимогам, які ставляться до них.

Робота СП дуже впливає на показники роботи транспортного засобу (ТЗ), такі як: довговічність, керованість, прохідність, надійність, стійкість, плавність ходу, витрата палива тощо.

Характеристики СП зазвичай оптимізують із точки зору середньостатистичних умов, в яких працюватиме ТЗ. Але підвіска, яка вважається оптимальною за цілим діапазоном умов експлуатації ТЗ, може бути неоптимальною в конкретній ситуації, особливо, коли мова йде про її використання на полі бою. Хоча більшість провідних автовиробників і здійснюють інтенсивні дослідження в галузі СП, але розробці та удосконаленню сучасних СП у сфері військового застосування до недавнього часу дослідники не приділяли значної уваги. Тому вдосконалення СП має важливе значення, особливо в умовах ведення війни.

Передумовою для здійснення необхідних розробок щодо удосконалення зразків ОВТ є, в першу чергу, виділення коштів на проведення розробок та здійснення експериментів. Наприклад, за даними [1] військовий бюджет України у 2020 р. склав \$ 5,9 млрд., що на 11 % більше проти 2019 р. За даними Defence News, що були оприлюднені в серпні 2021 р., у 2020 р. до Топ-100 оборонно-промислових компаній потрапили ті, що мали дохід від продажу ОВТ на суму більше \$ 600 млн. Перші 10 місць займають компанії США, Китаю, Великої Британії. До вищевказаного рейтингу вперше за останні роки (починаючи з 2018 р.) повернулося АТ "Укроборонпром". У рейтингу американського видання АТ "Укроборонпром" посіло 97-ме зі 100 місць і стало єдиним представником України. За 2020 р. ним було реалізовано продукції військового призначення на \$ 650 млн., що на 15 % менше проти 2019 р. (\$ 764 млн). Саме ці фірми в останні роки витрачали суттєві кошти на наукові дослідження і розроблення технологій, у тому числі і у сфері ОВТ.

В цій же роботі розглядається публікаційна активність протягом 2016 – 2019 рр. Зроблений наступний висновок: у сфері ОВТ найбільш активними авторами є науковці Китаю, США, Російської Федерації, Німеччини та Індії. Цей перелік майже повторює перелік країн із найвищими військовими витратами у світі, тільки Німеччина із 7-им місцем за обсягами військових витрат посідає 4-те місце за кількістю публікацій, а Велика Британія – 5-те та 6-те місця відповідно. Україна у цьому рейтингу за публікаціями займає 28 місце із 52. Найбільша кількість публікацій присвячена інжинірингу (49,3% загальної вибраної кількості), на другому місці розташувалися комп'ютерні науки (32,3%), на третьому – телекомунікації (18,0%) .

Як зазначено у цих дослідженнях, військові технології найбільше патентують у 4 патентних офісах світу: США, ЄС, Японія, Китай, що свідчить про цілеспрямовані інвестиції в ці технології та широкий ринок винаходів у цих регіонах. Останніми роками винахідники подають заявки у більш ніж 4 патентні офіси світу, що свідчить про розширення ринків виробництва і придбання озброєння. Найбільше патентів за період 2016-2020 рр. отримали китайські розробники технологій, далі йдуть США, Росія, Корея та Німеччина. Найвищі середньорічні темпи росту патентування притаманні Російській Федерації (180,5%), Китай у цьому рейтингу посідає 2-е місце – 160,0%, далі йдуть Корея (138,0%), Німеччина (117,2%), Японія (109,8%). Для США характерні спадні темпи росту із патентування військових технологій, а середньорічні за останні 5 років становлять 99,0% [1].

Україна має 119 патентів, або 0,1% загальної кількості військових патентів у базі Derwent Innovation.

Детальний аналіз динаміки патентування виявив перспективні напрями всієї військової сфери, до яких відносяться, зокрема, броньовані або бойові транспортні засоби [1].

Виходячи з вищезазначеного, маємо: із огляду на вимоги комплексності та системності підходів, необхідно розробляти моделі, методи та засоби забезпечення ТТХ бойових

броньованих машин (ББМ), як таких, що відносяться до перспективних напрямків військової сфери.

Мета та постановка задачі.

Мета дослідження полягає у розробці методів та моделей для забезпечення ТТХ ББМ, які мають поліпшені показники роботи ТВ СП, які будуть враховувати не лише пружно-пластичне деформування, а і контактну взаємодію зі спряженими деталями, і історію навантаження.

Витоки та загальні підходи до вирішення проблеми, що сформована у галузі ОБТ.

Для виконання сучасних бойових завдань під час війни або під час масових безладів можуть застосовуватись як броньовані колісні машини (бронетранспортери), так і автомобільна техніка підвищеної надійності. Існуючі бронетранспортери та спецмашини мають занадто низький ККД трансмісії і, відповідно, низькі показники паливної економічності, що не відповідає вимогам сучасності. Так, аналіз конструкцій існуючих броньованих колісних машин та автомобільної техніки Національної Гвардії України вказує на доцільність досліджень, спрямованих на модернізацію трансмісій існуючих бронетранспортерів та автомобільної техніки.

На сьогоднішній день має місце тенденція створення високоефективних відносно легких та малогабаритних бронемашин, які мають прийти у деяких випадках на заміну основним бойовим машинам (танкам, самохідним артилерійським установкам та іншим важким машинам). Очікується, що такі бойові машини повинні бути за своїми вогневими можливостями та експлуатаційними характеристиками кращими за попередні бойові машини. Як вже було зазначено, поліпшення ТТХ сучасних вітчизняних ЛБМ досягається впливом на структуру і параметри основних елементів бронемашин. Особливо це стає важливим в умовах бойових дій зі спротиву України повномасштабній агресії із боку РФ.

Системою, яка значною мірою визначає експлуатаційні характеристики колісних транспортних засобів (КТЗ), є система підвіски [2].

У роботі [3] описані тенденції розвитку конструкцій підвісок військових автомобілів. Наголошується на важливу роль конструкції підвісок для забезпечення підвищення швидкостей руху та мобільності при русі бездоріжжям та визначаються основні напрямки обґрунтування раціональних конструктивних параметрів підвіски. Для ТЗ спеціального призначення (танки, бронетранспортери, бойові машини піхоти та десанту тощо), важких дорожніх машин, грузовиків та інших машин широке застосування знайшли СП, у яких основним пружним елементом є ТВ, які і будуть нас цікавити. Вдосконалення їх конструкції призведе до покращень у сферах міцності, довговічності та масово-габаритних характеристик. Розглянемо основні проблеми, які виникають.

По-перше, необхідне досягнення балансу між міцністю та вагою ТВ, щоб забезпечити високу довговічність та ефективність при значних навантаженнях. По-друге, необхідно вибрати такий матеріал для ТВ, що має високу міцність та витривалість при різних умовах експлуатації. Для отримання оптимального балансу між функціональністю та тривалістю служби застосовують високоміцні сплави або спеціальні композитні матеріали, що дають змогу отримати легкість конструкції, при цьому поліпшити і міцність [4].

У загальному випадку торсіони у підвісках можуть розташовуватись як у поздовжньому (у цьому випадку вони слугують одночасно і осями, зазвичай нижніми, поперечних важелів у паралелограмній підвісці), так і у поперечному (у цьому випадку кожен з них може працювати як стабілізатор попереційної стійкості, з тією різницею, що торсіон з одного кінця кріпиться нерухомо, і жорстко пов'язується з кузовом чи рамою автомобіля) напрямках.

Підвіски з поперечним розташуванням торсіонів набули досить значного поширення на малолітражних автомобілях 1950-х та 1960-х років завдяки компактності та відносній простоті виготовлення. Головною перевагою такої підвіски є більша компактність в поздовжньому і вертикальному напрямках.

Але з точки зору кінематики ця підвіска не є досконалою.

При тривалій експлуатації підвісок з поздовжніми торсіонами був виявлений серйозний недолік конструкції, пов'язаний з уразливістю до корозії низько розташованих кріплень торсіонів.

У порівнянні з пружинною, торсіонна підвіска дозволяє досягнути вищої плавності ходу і керованості.

Торсіони виготовляють із хромистих або хромо-кремністих сталей із вмістом вуглецю 0,45-0,65%, хрому 1-1,5%, з додаванням [ванадію](#), [нікелю](#), [молібдену](#) та інших легуючих елементів. [Легована сталь](#) (45ХНМФА), що використовується для виготовлення торсіонів, має високу пружність та міцність в умовах втоми.

Для підвищення динамічних властивостей, навантаження, що сприймається, і максимального кута закручування торсіон піддають заневолюванню. Ця технологічна операція є останньою серед операцій механічної та термічної обробки. Вона полягає у закручуванні гарячого торсіона за межу його пружного стану та витримувати в такому стані деякий час. При цьому у поверхневих шарах виникають пластичні деформації, а в серцевині пружні. Після розвантаження торсіона серцевина, прагнучи звільнитися від напружень і повернутися в початковий стан, зазнає опору з боку пластично деформованого поверхневого шару. Залишкові напруження, отримані при заневолюванні, дозволяють підвищити робоче навантаження і кут закручування торсіона в експлуатації. У деяких випадках торсіон піддається подвійному заневолюванню.

Щоб адекватно оцінити напружено-деформований стан (НДС) у різних зонах ТВ (стебло, головка, галтельний перехід), необхідно розробити системний підхід, який буде враховувати безліч факторів. Кожен із дослідників, які займалися або займаються різноманітними розрахунками ТВ для їх вдосконалення, враховували певні фактори [5-12], які впливають на роботу ТВ, але комплексного системного підходу, який би враховував важливі аспекти щодо забезпечення міцності та довговічності ТВ СП ЛБМ, розроблено не було.

У сучасному світі ЛБМ стають все більш важливим компонентом транспортного середовища. Ефективним їх функціонуванням є, зокрема, якість ТВ. Застосування спеціальних програмно-модельних комплексів дають можливість спроектувати форму ТВ, визначити оптимальні параметри, враховуючи концентрації напружень в різних його точках. Оскільки ТВ піддаються у процесі руху ТЗ значним обертовим навантаженням, то міцність і довговічність є вирішальними факторами у процесі їх проектування.

Розглянемо загальні підходи до вирішення даної проблеми.

1. Необхідно вирішити проблему інтенсифікації динамічних навантажень на СП. Цей чинник призводить до руйнування ТВ, що, в свою чергу, призводить до втрати рухливості ТЗ.

2. Необхідно визначитися із конструктивним рішенням ТВ та технологічними режимами заневолювання.

У цілому геометрична форма ТВ може бути визначена скінченним набором чисельних параметрів (довжини, діаметри, радіуси, глибини шліців тощо). Окрім того, до цієї моделі додається матеріал (механічні та фізико-механічні властивості), із якого виготовляється ТВ (рис. 1).

Що стосується технологічного процесу, то він здійснюється на тому чи іншому обладнанні в умовах певного виробництва, що чинить відповідний відбиток на службові характеристики ТВ як виробу. Для контролю цих службових характеристик здійснюється їх визначення на спеціальних стендах.

3. Необхідно провести етап експлуатації та бойового застосування. Якщо виникне відмова ТВ, то різко знизиться рухливість ЛБМ, а, значить, і захищеність.

4. Необхідно уникнути протиріччя між бажаними та реальними властивостями у розрізі службових властивостей ТВ, тобто позбавитися ситуації, коли кінцева невідповідність може бути викликана похибками на будь-якій із ланок ланцюга, зображеного на рис. 2.

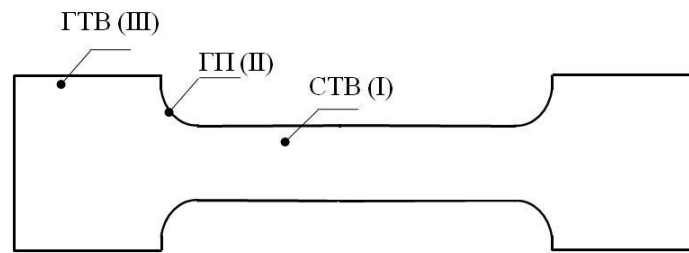


Рис. 1 – Загальний вигляд торсіонного валу

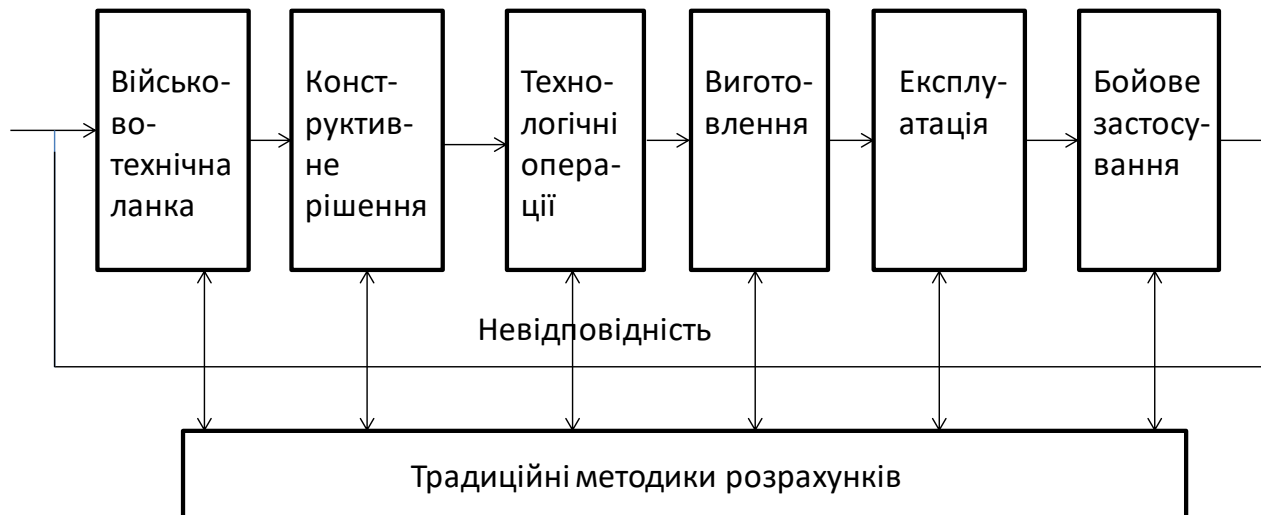


Рис. 2 – Ланцюг етапів життєвого циклу ТВ СП ЛБМ

Слід зазначити, що усі етапи життєвого циклу мають прямі та зворотні зв'язки із існуючими традиційними методиками розрахунків ТВ. Відповідно, базовим системним джерелом проблем у такій системі можуть бути саме існуючі методики розрахунків.

5. Необхідно проаналізувати існуючі методики розрахунку ТВ і розробити адекватну методику, яка проаналізує процеси і стани, які виникають у ТВ при їх експлуатації.

Тут можна зробити наступні висновки:

а. По-перше, і існуючі аналітичні, і новітні чисельні моделі (наприклад, методи скінченних елементів (МСЕ)) [13-16] спрямовуються у першу чергу на стебло торсіонного валу (СТВ (I)) (див. рис. 1). Але, як свідчить аналіз результатів існуючих випадків поломок ТВ ЛБМ, для них характерне руйнування у головці торсіонного валу (ГТВ (III)) та галтельному переході (ГП (II)) (див. рис. 1). Таким чином, похибка допускається уже на етапі вибору, так би мовити, “локалізації” уваги на НДС у тій чи іншій частині ТВ.

б. Аналіз НДС ТВ здійснюється на спрощеній моделі, яка враховує пружно-пластичне деформування, по-перше, тільки у СТВ, а, по-друге, за спрощеними співвідношеннями [17]. І якщо для чистого кручення ці спрощені співвідношення ще більш-менш придатні, то для складного неоднорідного розподілу компонент НДС вони є джерелом потенційних принципових похибок. Отже, необхідно звертатися до більш складних, проте і більш адекватних моделей. Зокрема, це теорії течії інкрементального типу [18, 19]. Ці теорії формулюють задачу у прирощеннях, що дає можливість урахувувати історію навантаження матеріалу ТВ, різномірну у просторі та зі складною залежністю від рівня навантажень.

с. Якщо акцент при аналізі НДС ТВ змістити із СТВ на ГТВ та ГП, то у цьому випадку не можна ігнорувати сам механізм прикладання навантаження, тобто контактну взаємодію “муфта - ГТВ” уздовж робочих поверхонь шліців. За своєю природою контактна задача, навіть

для фізично лінійних задач, призводить до структурної нелінійності. Якщо ж урахувати ще й фізичну нелінійність, то задача аналізу НДС набуває ще більшої складності. Разом із тим слід зазначити, що обидві ці нелінійності взаємовпливають одна на одну. Якщо ж для розв'язання такого типу задач застосовувати ітераційні способи, то викладені процедури різко ускладнюють алгоритми, що застосовуються. Тому привабливим виглядає розроблення процедури покрокового розв'язання задачі, тобто зведення задачі до послідовності підзадач із розбивкою історії навантаження на окремі кроки. А вже у межах кожного кроку пропонується сумісно враховувати і пружно-пластичне деформування, і контактну взаємодію, і їх взаємозв'язок та взаємовплив. Цим самим можна позбавитися “вкладених процедур”, а, отже, різко підвищити оперативність розрахунків, проте за збереження високої адекватності моделей та точності результатів.

d. Задля можливості визначення НДС такого складного об'єкту, як ТВ при дії контактної навантаження та за пружно-пластичного деформування, необхідно застосовувати чисельні методи. Зокрема, це МСЕ, причому стосовно не до окремих фрагментів, а – до усього ТВ. При цьому попередньо важливо здійснити коректну теоретичну постановку задачі, обґрунтувати вибір того чи іншого типу скінчених елементів, умов контактної сполучення, крайових умов та навантажень тощо. А це – окремий важливий етап досліджень.

e. Враховуючи, що при аналізі НДС ТВ важливим є історія навантаження, то необхідно ввести до розгляду відповідний параметр навантаження. Якщо при цьому буде задаватися, наприклад, кут закручування, то при заневолюванні відбувається двоциклове навантаження, яке чергується із розвантаженням, а надалі – робоче навантаження. Отже, НДС стає залежним від параметру навантаження, тобто розглядається як процес.

6. Необхідно обґрунтувати таку структуру, форму, розміри, матеріали та технологію оброблення того чи іншого елемента, які би забезпечували задані службові характеристики – міцність, жорсткість, довговічність тощо.

У загальному випадку така задача формулюється у вигляді задачі оптимізації:

$$T(u) \rightarrow \min (\max), \quad (1)$$

$$H(u) \geq [H], \quad (2)$$

$$L(u) = 0. \quad (3)$$

де: u – змінні стану, T – ті чи інші компоненти ТТХ, H – характеристики із накладеними на них обмеженнями $[H]$, L – оператор задачі аналізу.

Формально задача (1) – (3) розв'язується ітераційно.

7. Необхідно провести узагальнене параметричне моделювання ТВ, доповнене та адаптоване для досліджень ТВ. Згідно із ним узагальнені параметри являють собою набір розподілів, функцій, залежностей, структур, форм, властивостей тощо, які однозначно ідентифікують ТВ. Проте основною властивістю такого методу моделювання є варіативність. Тобто шляхом варіювання параметрів P можна цілеспрямовано змінювати поточне технічне рішення об'єкту. А ця властивість є цінною для розв'язань задач синтезу.

Аналіз результатів дослідження.

Таким чином, має місце актуальна науково-прикладна проблема розробки наукових основ обґрунтування технічних рішень, які забезпечують на етапі проектних досліджень необхідні параметри елементів СП ЛБМ задля досягнення заданих міцності та довговічності.

Вирішення проблем, сформованих у пунктах 1–7, дає можливість обґрунтувати параметри елементів СП ЛБМ, а саме ТВ, що дасть можливість поліпшити ТТХ сучасних вітчизняних ЛБМ.

Висновки. Описаний у статті аналіз дає підстави для обґрунтування задач дослідження торсійних валів систем підресорювання легких броньованих машин за критеріями міцності та довговічності. Вони включають у себе розробку удосконалених підходів, інтегрованих математичних моделей та розвинених і адаптованих методів досліджень напружено-

деформованого стану торсіонних валів у системах підресорювання легких броньованих машин із урахуванням контактної взаємодії, пластичного деформування та історії навантаження; розробку нового підходу до обґрунтування проєктно-технологічних рішень елементів систем підресорювання легких броньованих машин; розробку удосконалених варіаційних формулювань та методів досліджень міцності та довговічності торсіонних валів підвісок транспортних засобів легких броньованих машин.

Список літератури

1. Писаренко Т.В. *Аналіз світових технологічних трендів у військовій сфері*: монографія [Електронний ресурс] / Т. Писаренко, Т. Кваша, Т.Гаврис та ін., за заг. редакцією Т.В. Писаренко. К.: УкрІНТЕІ, 2021. 110 с.
2. Зінченко О. І. Інтеграція передових методів та моделей у методології розрахунку торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин (оглядова стаття). *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Машинознавство та САПР*. 2023. №1. С. 19-27.
3. Манзяк М.О., Крайник Л.В., Грубель М.Г. Тенденції розвитку конструкцій підвісок військових автомобілів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 1(65). С. 27-35. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.65.04>
4. Feuye, L.E., Edo, S.M., & Badasa, T.D. (2021). Optimization of driveshaft material for light commercial vehicle (automobile). *Natural Volatiles & Essential Oils*, 8(5), 10368-10382. <https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/2938/2468>
5. Склярів М.В., Шаповалов О.І. Математичне моделювання руху по деформованій опорній поверхні при зміні тиску в шинах коліс багатоцільового броньованого автомобіля на прикладі КраЗ “УРАГАН”. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2021. 1(37). С. 78-88. <https://scholar.archive.org/work/am7sirk6hzayj13ugwibabqmx4/access/wayback/http://znp.nangu.edu.ua/article/download/237881/236545>
6. Кайдалов Р. О., Баштовий В. М., Ларін О. О., Водка О. О. Експериментальне оцінювання плавності ходу спеціального транспортного засобу з нелінійним підресорюванням при русі по бездоріжжю. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків: НАНГУ. 2015. Вип. 2 (26). С. 27–31.
7. Склярів М. В., Воробйов С. О. Вплив конструктивних факторів на прохідність автомобільної техніки багатоцільового призначення. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків: НАНГУ. 2020. Вип. 1 (35). С. 69–78.
8. Zeng, W., Mao, L., Huang, D., Wang, C., & Chen, Q. (2023). Simulation analysis and lightweight design of automotive transmission shafts based on Optistruct. *Journal of Physics: Conference Series*, 2660, article number 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2660/1/012039>
9. Osakue, D.E., Anetor, D.L., & Odetunde, D.C. (2015). Fatigue shaft design verification for bending and torsion. *International Journal of Engineering Innovation and Research*, 4(1), 197-206. <https://ijeir.org/index.php/issue?view=publication&task=show&id=439>
10. Поляк І. Є., Борисов О. В., Мацаєнко А. М. Моделювання підресореної частини мобільного транспортного засобу. *Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2023. 3, 66-73. <https://doi.org/10.58254/viti.3.2023.08.66>
11. Liang, M., Wang, S., & Ma, J. (2022). Modeling and simulation of torsional resistance of hollow shaft with small diameter based on ABAQUS. *Journal of Physics: Conference Series*, 2403, article number 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2403/1/012044>
12. Koch, A., Brauer, J., & Falkenstein, J. (2023). Detection of torque security problems based on the torsion of side shafts in electrified vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 14(6), article number 151. <https://doi.org/10.3390/wevj14060151>
13. G. Zhou, X. Li, Y. Shi, Y. Zhu, B. Xu. Numerical simulation of the working process and life prediction of a tank torsion shaft. *Journal of Mechanical Strength*. 2006. 28(4): 578-581.
14. V. V. Močilnik, N. Gubelj, J. Predan. Model for fatigue lifetime prediction of torsion bars subjected to plastic presetting. *Tehniski Vjesnik*. 2011.18(4): 537-546.
15. V. Močilnik, Nenad Gubelj, Jozef Predan. Surface residual stresses induced by Torsional Plastic Presetting of Solid Spring Bar. *International Journal of Mechanical Sciences*. 92 (2015): 269-278.
16. Sun Weiqun, He Feng-ming. Design and manufacture of vehicle torsion bar spring. *J. Automobile Science and Technolgy*. 2002. 2(2):23-27.
17. Буров С.С. *Конструкция и расчет танков* / С.С. Буров. М.: ВАБТВ им. Малиновского, 1973. 602 с.
18. Васидзу К. *Вариационные методы в теории упругости и пластичности*: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 542 с.
19. Рудаков К.М. *Числові і аналітичні методи аналізу динаміки і міцності машин та стійкості руху*: посібник. К.: НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", 2022. 120 с.

References (transliterated)

1. Pysarenko T.V. *Analiz svitovykh tekhnolohichnykh trendiv u viys'koviy sferi: monohrafiya* [Elektronnyy resurs] / T. Pysarenko, T. Kvasha, T. Havryts ta in., za zah. redaktsiyeyu T.V. Pysarenko. K.: UkrINTEI, 2021. 110 p.
2. Zinchenko O. I. Intehratsiya peredovykh metodiv ta modeley u metodolohiyi rozrakhunku torsionnykh valiv system pidresoryuvannya lehkykh bron'ovanykh mashyn (ohlyadova stattya). *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI», seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. 2023. №1. PP. 19-27.
3. Manzyak M.O., Kraynyk L.V., Hrubel' M.H. Tendentsiyi rozvytku konstruksiy pidvisok viys'kovykh avtomobiliv. *Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika*. 2021. № 1(65). PP. 27-35. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.65.04>
4. Feyye, L.E., Edo, S.M., & Badasa, T.D. (2021). Optimization of driveshaft material for light commercial vehicle (automobile). *Natural Volatiles & Essential Oils*, 8(5), 10368-10382. <https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/2938/2468>
5. Sklyarov M.V., Shapovalov O.I. Matematychno modelyuvannya rukhu po deformovaniy oporniy poverkhni pry zmini tysku v shynakh kolis bahatotsil'ovoho bron'ovanoho avtomobilya na prykladi KrAZ "URAHAN". *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noyi akademiyi Natsional'noyi hvardiyi Ukrainy*. 2021. 1(37). PP. 78-88. <https://scholar.archive.org/work/am7sirk6hzayj13ugwibabqmx4/access/wayback/http://znp.nangu.edu.ua/article/download/237881/236545>
6. Kaydalov R. O., Bashtovyy V. M., Larin O. O., Vodka O. O. Eksperymental'ne otsynyuvannya plavnosti khodu spetsial'noho transportnoho zasobu z neliniynym pidresoryuvannyam pry rusi po bezdorizhzhyyu. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noyi akademiyi Natsional'noyi hvardiyi Ukrainy*. Kharkiv: NANHU. 2015. Vyp. 2 (26). PP. 27–31.
7. Sklyarov M. V., Vorobyov S. O. Vplyv konstruktivnykh faktoriv na prokhdnist' avtomobil'noyi tekhniki bahatotsil'ovoho pryznachennya. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noyi akademiyi Natsional'noyi hvardiyi Ukrainy*. Kharkiv: NANHU. 2020. Vyp. 1 (35). PP. 69–78.
8. Zeng, W., Mao, L., Huang, D., Wang, C., & Chen, Q. (2023). Simulation analysis and lightweight design of automotive transmission shafts based on Optistruct. *Journal of Physics: Conference Series*, 2660, article number 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2660/1/012039>
9. Osakue, D.E., Anetor, D.L., & Odetunde, D.C. (2015). Fatigue shaft design verification for bending and torsion. *International Journal of Engineering Innovation and Research*, 4(1), 197-206. <https://ijeir.org/index.php/issue?view=publication&task=show&id=439>
10. Polyak I. YE., Borysov O. V., Matsayenko A. M. Modelyuvannya pidresorenoyi chastyny mobil'noho transportnoho zasobu. *Systemy i tekhnolohiyi zv'yazku, informatyzatsiyi ta kiberbezpeky*. 2023. 3, 66-73. <https://doi.org/10.58254/viti.3.2023.08.66>
11. Liang, M., Wang, S., & Ma, J. (2022). Modeling and simulation of torsional resistance of hollow shaft with small diameter based on ABAQUS. *Journal of Physics: Conference Series*, 2403, article number 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2403/1/012044>
12. Koch, A., Brauer, J., & Falkenstein, J. (2023). Detection of torque security problems based on the torsion of side shafts in electrified vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 14(6), article number 151. <https://doi.org/10.3390/wevj14060151>
13. G. Zhou, X. Li, Y. Shi, Y. Zhu, B. Xu. Numerical simulation of the working process and life prediction of a tank torsion shaft. *Journal of Mechanical Strength*. 2006. 28(4): 578-581.
14. V. V. Močilnik, N. Gubeljak, J. Predan. Model for fatigue lifetime prediction of torsion bars subjected to plastic presetting. *Tehnicky Vjesnik*. 2011. 18(4): 537-546.
15. V. Močilnik, Nenad Gubeljak, Jozef Predan. Surface residual stresses induced by Torsional Plastic Presetting of Solid Spring Bar. *International Journal of Mechanical Sciences*. 92 (2015): 269-278.
16. Sun Weiqun, He Feng-ming. Design and manufacture of vehicle torsion bar spring. *J. Automobile Science and Technolgy*. 2002. 2(2):23-27.
17. Burov S.S. *Konstruksiya i raschet tankov* / S.S. Burov. M.: VABTV im. Malinovskogo, 1973. 602 p.
18. Vasidzu K. *Variatsionnyye metody v teorii uprugosti i plastichnosti*: per. s angl. M.: Mir, 1987. 542 p.
19. Rudakov K.M. *Chyslovi i analitychni metody analizu dynamiky i mitsnosti mashyn ta stiykosti rukhu*: posibnyk. K.: NTUU "KPI im. Ihorya Sikors'koho", 2022. 120 p.

Надійшла (received) 21. 04.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Зінченко Олена Іванівна (Zinchenko Olena) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", докторантка кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2961-5861>; e-mail: ez99953@gmail.com