

**О. І. ЗІНЧЕНКО, В. І. СЕРИКОВ, С. О. НАЗАРЕНКО, С. О. ДЕМ'ЯНЕЦЬ, Є. І. ЯЦКОВСЬКИЙ,
А. В. ФАДЄЄВ, О. С. ГЕРАСИМОВА, О. Ю. ШУТЬ, В. С. ВЕЙЛЕР**

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЇ ТОРСІОННИХ ВАЛІВ СИСТЕМ ПІДРЕСОРЮВАННЯ ЛЕГКИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН НА ДІЮ НАВАНТАЖЕННЯ

У статті наведено результати розрахунково-експериментальних досліджень реакції торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин на дію навантаження, з урахуванням комплексної взаємодії їх основних елементів. Дослідження спрямоване на подолання обмежень традиційних підходів, які переважно зосереджені на аналізі стебла торсіонного вала без належного врахування головок і галтельних переходів. Проведено аналіз існуючих конструкцій і методів дослідження, включаючи спрощені аналітичні підходи та метод скінченних елементів, що дозволило обґрунтувати необхідність комплексного підходу до оцінювання напружено-деформованого стану торсіонного вала як єдиної системи. Розроблено фізичну модель торсіонного вала з використанням технологій 3D-друку, яка включає стебло, галтельний перехід і головку зі шліцьовим з'єднанням, а також експериментальний стенд для відтворення навантаження та фіксації деформацій і контактної тиску. Експериментальні результати отримано шляхом аналізу візуалізованих деформаційних полів і контактних відбитків, що дозволило оцінити розподіли кутів закручування та контактної тиску у спряжених елементах. Встановлено, що розподіл кутів закручування уздовж стебла має близький до лінійного характеру з похибкою до 2%, тоді як контактний тиск у шліцьових з'єднаннях є нерівномірним і локалізованим, із відхиленням до 12%. Порівняння експериментальних і чисельних результатів підтвердило адекватність розроблених математичних моделей, що враховують фізичну, геометричну та контактну нелінійності. Отримані результати можуть бути використані для підвищення точності розрахунків, а також для удосконалення конструкцій торсіонних валів із метою забезпечення їх міцності та довговічності.

Ключові слова: торсіонний вал; головка торсіонного вала; стебло торсіонного вала; галтельний перехід; система підресорювання; міцність; пластичні деформації; контактний тиск; заневолювання

**O. ZINCHENKO, V. SIERYKOV, S. NAZARENKO, I. KHRAMTSOVA, S. DEMIANETS,
Ye. YATSKOVSKIY, A. FADIEIEV, O. GERASIMOVA, O. SHUT, V. VEILER**

CALCULATION-EXPERIMENTAL STUDIES OF THE RESPONSE OF TORSION SHAFTS OF SUSPENSION SYSTEMS OF LIGHT ARMORED VEHICLES TO THE ACTION OF LOAD

The article presents the results of computational and experimental studies of the response of torsion shafts of suspension systems of light armored vehicles to the action of loading, taking into account the complex interaction of their main elements. The study is aimed at overcoming the limitations of traditional approaches, which are mainly focused on the analysis of the torsion shaft stem without proper consideration of heads and fillet transitions. An analysis of existing structures and research methods was carried out, including simplified analytical approaches and the finite element method, which allowed us to substantiate the need for a comprehensive approach to assessing the stress-strain state of the torsion shaft as a single system. A physical model of the torsion shaft was developed using 3D printing technologies, which includes a stem, a fillet transition and a head with a splined connection, as well as an experimental stand for reproducing the load and fixing deformations and contact pressure. Experimental results were obtained by analyzing the visualized deformation fields and contact imprints, which allowed us to estimate the distributions of twist angles and contact pressure in the conjugated elements. It was found that the distribution of twist angles along the stem is close to linear with an error of up to 2%, while the contact pressure in spline joints is non-uniform and localized, with a deviation of up to 12%. Comparison of experimental and numerical results confirmed the adequacy of the developed mathematical models, which take into account physical, geometric and contact nonlinearities. The obtained results can be used to increase the accuracy of calculations, as well as to improve the designs of torsion shafts in order to ensure their strength and durability.

Keywords: torsion shaft; torsion shaft head; torsion shaft stem; fillet transition; suspension system; strength; plastic deformations; contact pressure; scragging

Вступ. Сучасні легкі броньовані машини (ЛБМ) мають системи підресорювання (СП), пружні елементи яких можуть мати різні фізичні принципи роботи [1]. Проте значну питому вагу серед цих елементів традиційно займають торсіонні вали (ТВ).

Торсіонний вал – це елемент СП (рис. 1), який створює силову реакцію від закручування його стебла.

Стебло торсіонного вала (СТВ) підлягає, як правило [3, 4], технологічній операції заневолювання. На кряях ТВ розміщені головки торсіонного вала (ГТВ), які сприймають крутний момент за рахунок шліцьового з'єднання із суміж-

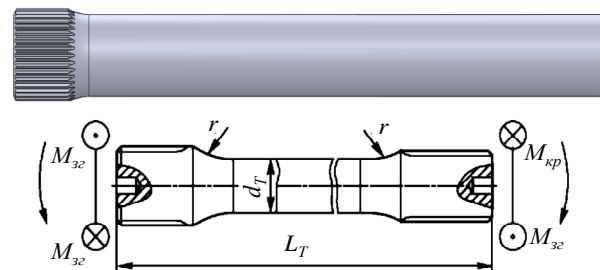


Рисунок 1 – Торсіонний вал [2]

© О. І. Зінченко, В. І. Сериков, С. О. Назаренко,
С. О. Дем'янець, Є. І. Яцковський, А. В. Фадєєв,
О. С. Герасимова, О. Ю. Шуть, В. С. Вейлер, 2026

ними деталями. Між ГТВ та СТВ – галтельний перехід (ГП).

Таким чином, ТВ має три елементи, які працюють сумісно, проте – за різних умов навантаження та граничних умов. Відтак, міцність, працездатність та довговічність ТВ залежить від службових властивостей усіх цих складових. Проте основна увага зазвичай у дослідженнях приділяється тільки СТВ.

Тому виникає проблема комплексного дослідження. Тобто, мова йде про сумісний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) системи «ГТВ – ГП – СТВ – ГП – ГТВ». Ці дослідження є однією із важливих складових аналізу етапів життєвого циклу найбільш відповідальних та навантажених елементів машинобудівних конструкцій, створення їхніх цифрових двійників, раціоналізації процесів їх виробництва тощо. Це і склало напрямок досліджень, описаних у статті, на основі розрахунково-експериментальних досліджень реакції ТВ систем підресорювання ЛБМ на дію навантаження.

Аналіз конструкцій та методів досліджень реакції торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин на дію навантаження. Аналіз конструкцій торсіонних валів СП ЛБМ є важливим етапом підвищення надійності, довговічності та ефективності роботи ходової частини бойової техніки. ТВ виконують функцію пружних елементів підвіски, забезпечуючи поглинання ударних навантажень і стабілізацію руху машини в умовах складного рельєфу.

Конструктивно торсіонні вали є довгими циліндричними стрижнями, які працюють на кручення. Вони виготовляються переважно із високоміцних легованих сталей, що забезпечують необхідну витривалість при циклічних навантаженнях. Основними конструктивними параметрами торсіонних валів є діаметр, довжина, форма поперечного перерізу, а також тип кріплення до корпусу машини та важелів підвіски.

Аналіз існуючих конструкцій свідчить, що найбільш поширеними є суцільні та порожнисті (трубчасті) ТВ. Суцільні вали відрізняються простотою виготовлення та високою міцністю, однак мають більшу масу. Завдяки порожнистим валам можна зменшити масу конструкції без суттєвого зниження жорсткості, що є критично важливим для ЛБМ, де кожен кілограм маси має значення.

Із точки зору НДС, ТВ працюють в умовах складного навантаження, що включає не тільки крутний момент, але й додаткові згинальні та ударні впливи. Це зумовлює необхідність врахування концентрацій напружень, особливо в зонах шліцьових з'єднань та місцях кріплення. Для підвищення ресурсу застосовуються методи зміцнення поверхні, такі як термообробка, наклеп або дробоструминна обробка.

Важливим напрямом удосконалення конструкцій є оптимізація геометричних

параметрів і матеріалів з урахуванням реальних умов експлуатації. Сучасні підходи включають використання чисельного моделювання (зокрема методу скінченних елементів (МСЕ)) для прогнозування поведінки ТВ під навантаженням, що дозволяє зменшити кількість експериментальних досліджень і підвищити точність розрахунків.

Таким чином, аналіз конструкцій ТВ показує, що підвищення ефективності СП ЛБМ досягається шляхом комплексного підходу, який включає вдосконалення конструкції, вибір оптимальних матеріалів і застосування сучасних методів розрахунку та випробувань.

Аналіз методів дослідження ТВ СП ЛБМ за спрощеними методиками традиційно базується на підходах, сформованих у радянській школі машинобудування і танкобудування. Ці методики орієнтовані на інженерні розрахунки з мінімальною обчислювальною складністю, але достатньою точністю для практичного проектування.

У радянських джерелах (наприклад, класичні праці з теорії машин і деталей машин: Кудрявцев, Біргер, Степин, а також галузеві видання з танкобудування) торсіонний вал розглядається як пружний стрижень круглого перерізу, що працює переважно на кручення. Основне припущення – лінійно-пружна поведінка матеріалу та однорідність напруженого стану по довжині.

У сучасній інженерній практиці дослідження торсіонних валів СП ЛБМ значною мірою спирається на застосування спрощених розрахунково-аналітичних підходів, витоки яких пов'язані з розвитком класичної теорії опору матеріалів і прикладної механіки деформівного твердого тіла. Методологічна база таких підходів сформована у фундаментальних працях [5, 6], а також узагальнена у нормативно-довідкових джерелах з проектування деталей машин [7].

У межах зазначеної парадигми ТВ інтерпретується як пружно-деформівний елемент стрижневого типу з круговим поперечним перерізом, для якого домінуючим видом навантаження приймається крутний момент. При цьому математичний опис НДС ґрунтується на використанні спрощених гіпотез, зокрема гіпотези плоских перерізів та лінійної пружності матеріалу, що дає можливість редукувати просторову задачу до одновимірної. Відповідні аналітичні залежності для визначення дотичних напружень і кутів закручування детально наведені у класичних роботах [5, 6], де також обґрунтовано допустимість ідеалізації розподілу напружень як квазірівномірного по довжині вала.

Разом із тим, у прикладних дослідженнях, орієнтованих на аналіз функціонування ходових систем броньованих машин, зазначені теоретичні положення доповнюються інженерними узагальненнями, наведеними у спеціалізованих джерелах [8-10]. У цих роботах ТВ розглядаються не ізольовано, а як складові елементи багатозв'язної динамічної системи, що функціонує

в умовах інтенсивного змінного навантаження. Водночас, з метою зниження обчислювальної складності, реальні динамічні впливи апроксимуються еквівалентними статичними або гармонічними навантаженнями, що відображено у галузевих документах [10, 11].

Суттєвою складовою спрощених методик є використання напівемпіричних підходів до оцінювання міцності та довговічності ТВ. Зокрема, циклічний характер навантаження враховується шляхом введення коефіцієнтів запасу та коригувальних множників, значення яких регламентуються рекомендаціями, наведеними у працях [7-9]. Такий підхід фактично компенсує обмеження аналітичної моделі, пов'язані з неврахуванням локальних концентрацій напружень, технологічних факторів та залишкових напружень.

Необхідно підкреслити, що в рамках спрощених методик ігнорується низка суттєвих аспектів реального НДС ТВ, зокрема тривимірність напруженого стану, нелінійність матеріальних характеристик при великих деформаціях, а також вплив конструктивних концентраторів напружень (шліцьові з'єднання, переходи перерізів тощо). Проте, незважаючи на зазначені обмеження, такі методи зберігають практичну цінність на етапах попереднього проектування та інженерної оцінки параметрів підвіски, забезпечуючи прийнятний баланс між точністю результатів і трудомісткістю розрахунків.

Таким чином, аналіз спрощених методів дослідження торсіонних валів СП свідчить про їхню методологічну завершеність у межах класичних підходів механіки деформівного твердого тіла, а також про доцільність їх подальшого використання у поєднанні з сучасними чисельними методами, що дозволяє підвищити достовірність прогнозування НДС та ресурсу елементів ходових систем ЛБМ.

Таким чином, спрощені методики дослідження ТВ, розроблені в радянський період, базуються на класичних положеннях опору матеріалів та емпіричних залежностях. Вони забезпечують достатню точність для інженерних розрахунків і проектування, але мають обмеження щодо врахування складних факторів НДС та довговічності. Саме тому сучасні підходи розширюють ці методики за рахунок чисельного моделювання, але їх основа залишається актуальною й сьогодні.

Слід зазначити, що одним із базових інструментів сучасного аналізу НДС торсіонних валів СП є МСЕ, оскільки дозволяє враховувати просторову складність навантаження та конструктивну неоднорідність елементів [5-7, 12-16]. На відміну від класичних підходів опору матеріалів, МСЕ забезпечує моделювання геометричної та фізичної нелінійності, а також локальних концентрацій напружень.

У межах чисельного моделювання ТВ дискретизується на скінченні елементи з локальним згущенням сітки у критичних зонах. Розв'язання базується на варіаційній постановці, що приводить до системи рівнянь: $K \cdot u = F$ де K – матриця жорсткості, u – вектор вузлових переміщень, F – вектор зовнішніх навантажень.

Граничні умови визначаються відповідно до реальної схеми роботи підвіски [7, 8], тоді як сучасні дослідження наголошують на необхідності врахування динамічної взаємодії елементів СП [12, 14]. МСЕ широко застосовується для оцінки жорсткісних характеристик, аналізу втомної довговічності та оптимізації конструкцій ТВ [13, 15, 16].

Таким чином, поєднання класичних підходів [4-6] із сучасними чисельними методами [12-16] забезпечує підвищення достовірності оцінювання НДС та ресурсу ТВ.

Таким чином, здійснений аналіз літературних джерел дає підстави для висновку про недостатню увагу саме на комплексний сумісний аналіз реакції усіх складових ТВ на дію навантажень. При цьому, як свідчать результати попередніх чисельних досліджень [2, 17], основні проблеми міцності та довговічності ТВ у сучасних ЛБМ зумовлені не СТВ, а зосереджені в ГТВ та ГП. Разом із тим робоче навантаження все рівно передається через СТВ. Відповідно, потрібне комплексне дослідження НДС ТВ у цілому, яке доповнює попередні чисельні дослідження.

Мета роботи – експериментальні дослідження напружено-деформованого стану торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин.

Чисельні дослідження напружено-деформованого стану торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин. Чисельним дослідженням НДС ТВ систем підресорювання ЛБМ присвячено багато публікацій [18-21].

Разом із тим дослідження, які мають комплексний характер, описані в обмеженій кількості публікацій [2-4, 17]. Справа в тому, що у цих дослідженнях враховується і пружно-пластичний характер деформування матеріалу, і контактна взаємодія зі спряженими елементами, і скінченні деформації. Отже, у цих публікаціях створені моделі, які поєднують фізичну, структурну та геометричну нелінійності.

При цьому встановлено:

- СТВ знаходиться під дією робочих навантажень у стані закручування (рис. 2), причому кут закручування постійний у поточному перерізі для всіх фіксованих радіальних відрізків і лінійно розподілений уздовж твірних циліндричної частини;

- технологічна операція заневолювання ТВ, здійснена відповідно до умов подальшої експлуатації, призводить до реалізації у тілі цього вала залишкових напружень, причому таких, що при дії експлуатаційних навантажень додаткових

зон пластичного деформування не виникає (рис. 3);

- у зоні контактування ГТВ зі спряженими деталями тиск на робочі поверхні шліців розподіляється суттєво нерівномірно (рис. 4).

Зазначені особливості НДС ТВ послужили основою при розробці експериментальних моделей для визначення реакції торсіонних валів СП ЛБМ на дію навантаження.

Експериментальні дослідження реакції торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин на дію

навантаження. Враховуючи зазначені вище особливості НДС ТВ систем підресорювання ЛБМ, спрогнозовані на основі попередніх чисельних досліджень [2, 3, 4, 17], були побудовані їх фізичні моделі. Ці моделі виконані за технологією 3D друку. На рис. 5 – елементи цієї моделі. Вони виготовлені із пластика і складаються із фрагмента СТВ, ГП та ГТВ, а також – імітатора шліцьової муфти, у взаємодії із котрою виникає реактивний крутний момент. Для передачі крутного моменту на ТВ виконано фігурну частину із плоскими гранями.

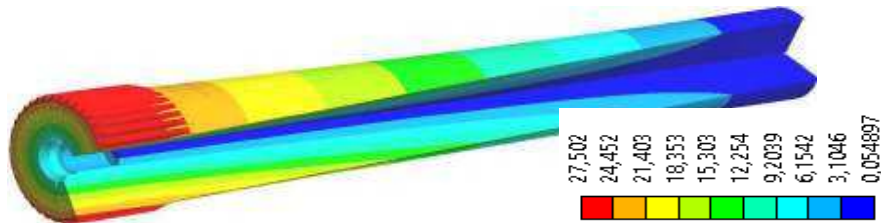


Рисунок 2 – Розподіл повних переміщень, мм, у ТВ [2]



Рисунок 3 – Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом, МПа, у ТВ [3]

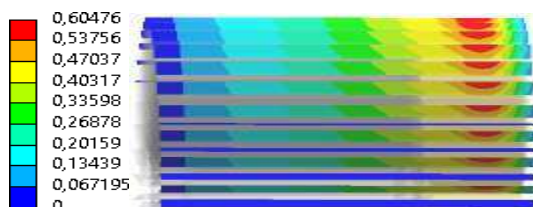


Рисунок 4 – Розподіл контактної тиску, МПа, у ГТВ [2]

На видимій частині ТВ виконано систему мікрозаглибин, які йдуть уздовж твірних та у коловому напрямку. Така текстура передбачена для візуалізації картини деформування ТВ.



Рисунок 5 – Елементи моделі, виконані за технологією 3D друку

Для здійснення досліджень було створено відповідний стенд (рис. 6). Навантаження реалізовувалося за допомогою динамометричного ключа. Деформування ТВ фіксувалося серією послідовних фотознімків. Контактний тиск відображався у вигляді контактних відбитків на чутливих до тиску плівок, які розміщені між спряженими робочими поверхнями шліців. Крім того, залучався як другий стенд токарний верстат (рис. 7–9).

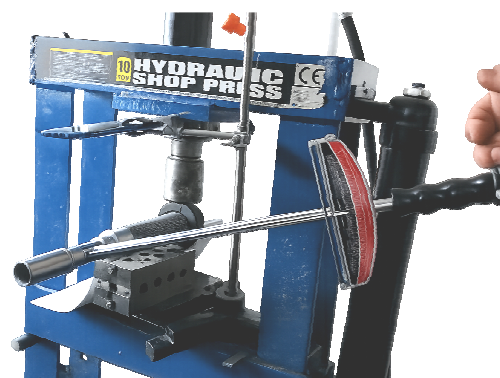


Рисунок 6 – Експериментальний стенд із гідропресом

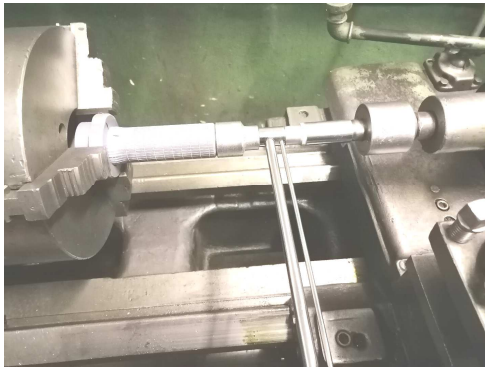


Рисунок 7 – Експериментальний стенд на токарному верстаті

На рис. 8–15 – робочі моменти та результати досліджень: на рис. 8, 9 – робочий момент випробувань на гідропресі та результати фіксації контактної тиску, на рис. 10-12 – робочі моменти випробувань на токарному верстаті, у т. ч. – із накладеними початковою та поточною текстурами на стеблі ТВ, а також моменти

руйнування вала, на рис. 11, 12 – зсув ліній вала, на рис. 13 – момент руйнування вала, а на рис. 14, 15 – картини розшифровки результатів експериментальних досліджень.

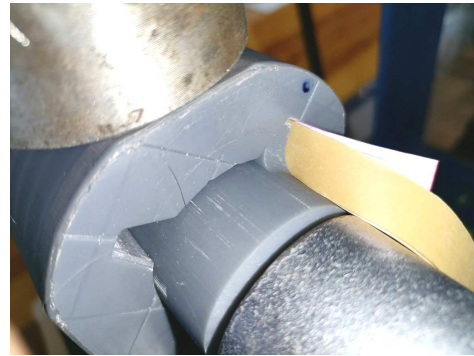


Рисунок 8 – Робочі моменти визначення контактної тиску у шліцьовому з'єднанні

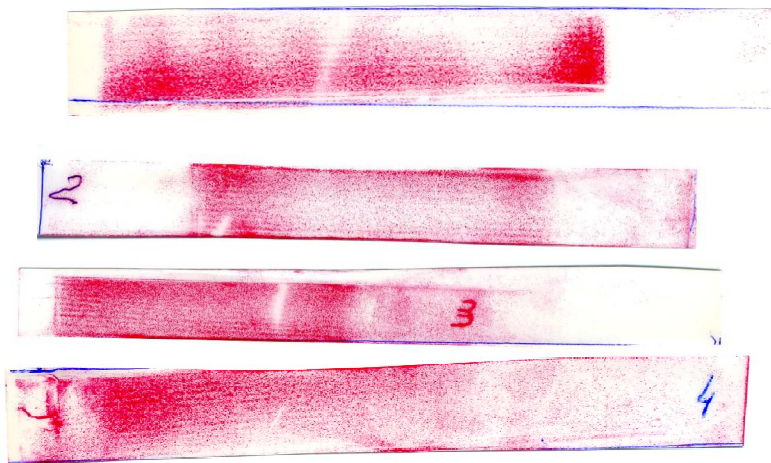


Рисунок 9 – Відбитки на суперчутливих плівках

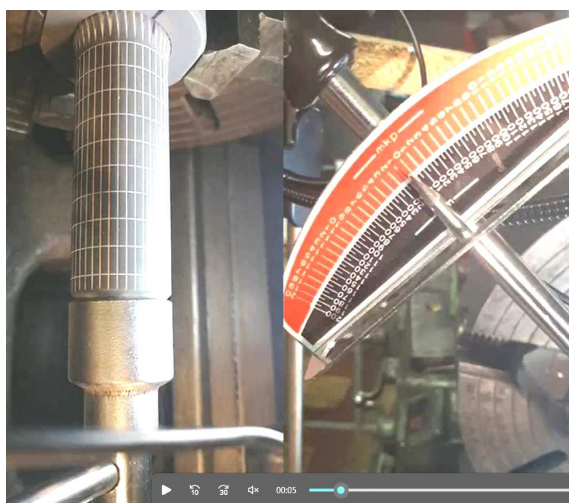


Рисунок 10 – Фіксація крутного моменту (момент фіксації 1)

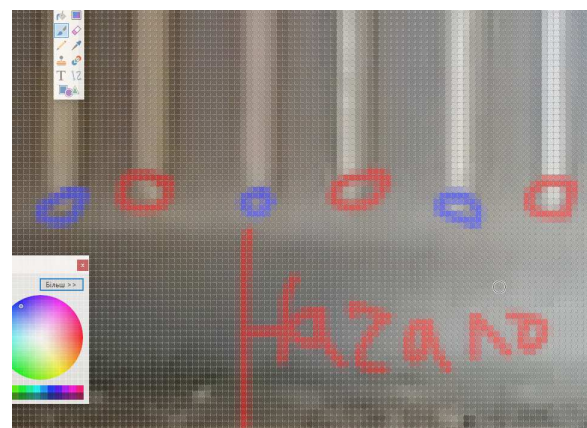


Рисунок 11 – Зсув ліній вала



Рисунок 12 – Вигляд ліній валу на момент руйнування

Попередній візуальний аналіз результатів вимірювань повністю підтверджує характер НДС ТВ, визначений чисельно.

Крім того, здійснено розшифровку картин текстур на видимих поверхнях СТВ та ГП, а також контактних відбитків на плівках (у зоні шліців ГТВ).

У цілому отримані результати розшифровки дають підстави зробити висновки про те, що кути закручування СТВ уздовж його твірної мають розподіл, який відповідає лінійному із похибкою не вище 1,5%-2%. З іншого боку, контактний тиск у спряженні робочих поверхонь шліців ГТВ зі шліцами муфти уздовж поздовжньої координати розподілені, по-перше, не по всій довжині, а тільки по частині, а по-друге, – із близьким до лінійного законом на цій ділянці (похибка – на рівні до 8%-12%).



Рисунок 13 – Руйнування валу

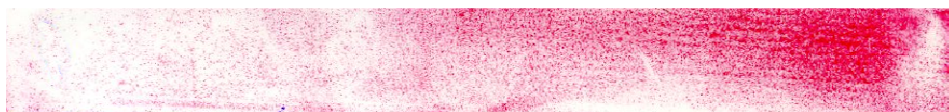
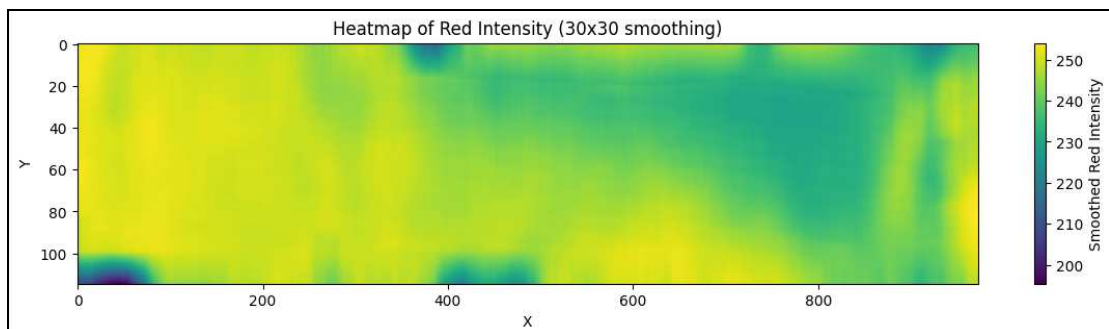


Рисунок 14 - Розподіл контактного тиску (МПа) на робочій поверхні шліца ГТВ

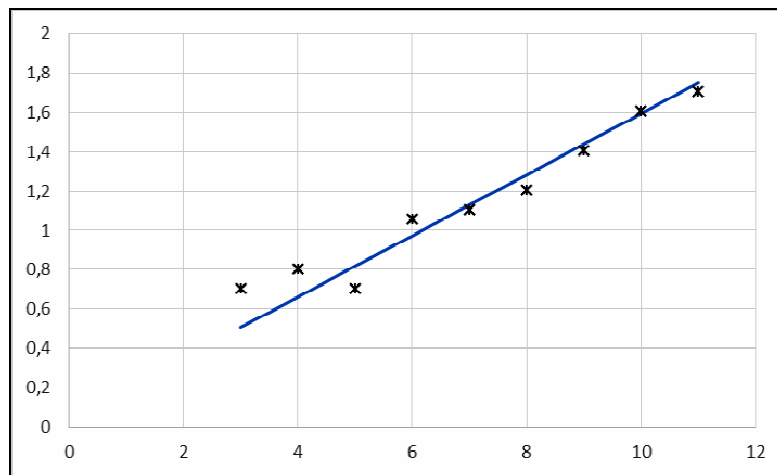


Рисунок 15 - Залежність кута закручування (град) від крутного моменту

Висновки.

1. У ході експериментальних досліджень розроблено макет торсіонного валу, який поєднує усі основні його елементи – стебло, головку торсіонного валу та шліцьову головку. Це дає можливість досліджувати реакцію торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин на дію навантаження комплексно, тобто у всій повноті основних чинників.

2. Якісна картина розподілів компонент напружено-деформованого стану елементів макета торсіонного валу повністю відповідає даним чисельних досліджень.

3. Відмінність чисельно та експериментально отриманих розподілів компонент напружено-деформованого стану макета торсіонного валу не перевищує: за деформаціями – 2%; за розподілом контактного тиску – 12%.

Таким чином, здійснені дослідження підтверджують адекватність попередньо побудованих математичних моделей напружено-деформованого стану та контактної взаємодії торсіонних валів, точність чисельного моделювання та достовірність розроблених на їх основі рекомендацій.

Список літератури

1. Дущенко В.В. *Системи підресорювання військових гусеничних і колісних машин: розрахунок та синтез: навч. посібник* Нац. техн. ун-т "Харків.політехн.ін-т". Харків: Панов А. М. 2018. 336 с.
2. Ткачук М.М., Грабовський А.В., Заворотній А.В., Куценко С.В., Саверська М.С., Клочков І.Є., Зінченко О.І., Ткачук М.А., Назаренко С.О., Пінчук Н.В., Марусенко С.І. Чисельне моделювання пружно-пластичного деформування торсіонних валів систем підресорювання транспортних засобів із урахуванням контактної взаємодії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Машинознавство та САПР*. 2022. № 1. С. 91–114.
3. Грабовський А.В., Ткачук М.М., Заворотній А.В., Куценко С.В., Саверська М.С., Клочков І.Є., Ткачук М.А., Зінченко О.І., Деревянкін Р.П. Контактна взаємодія торсіонного валу із шліцевою втулкою при пружно-пластичних деформаціях. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Машинознавство та САПР*. –2021. №1. С. 34–46.
4. Ткачук М.М., Заворотній А.В., Зінченко О.І., Грабовський А.В., Ткачук М.А., Пінчук Н.В., Шевченко А.В., Цendra Г.В. Розвиток підходів, моделей та методів дослідження міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Машинознавство та САПР*. 2022. № 2. С. 80–93.
5. Birger, I.A. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1979.
6. Stepin, P.A. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974.
7. Kudryavtsev, V.N. *Detali mashin* [Machine Elements]. Moscow: Mashinostroenie, 1980.
8. Burov, S.A. *Konstruktsiya tankov* [Tank Design]. Moscow: Voenizdat, 1976.
9. Zhukov, V.G. *Khodovaya chast tankov* [Tank Running Gear]. Moscow: Voenizdat, 1982.
10. *Teoriya tanka* [Theory of Tank]. Moscow: Voenizdat, 1970.
11. *Rukovodstvo po ekspluatatsii tanka KV* [KV Tank Operation Manual]. Moscow: Voenizdat, 1941.
12. Miralbes, R., Castejon, L., Santolaria, J. Simulation of suspensions, torsion bars and fifth wheel for semitrailers using finite elements. *Engineering Structures*, 2013, Vol. 56, pp. 1320–1331. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.06.034
13. Geonea, I., Margine, A., Ionescu, A. Computation of a torsion bar: rigidity and fatigue resistance. *Materials Today: Proceedings*, 2019, Vol. 12, pp. 456–463. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.123
14. Ciampaglia, A., Pavlovic, A., Rega, G. Advanced suspension design using finite element modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2020, Vol. 234(12), pp. 2950–2964. DOI: 10.1177/0954406220947457
15. Furch, J., Glisnik, J., Skrucany, T. Lifetime testing and numerical analysis of torsion bars. *Engineering Science and Technology*, 2020, Vol. 23(5), pp. 987–

995.
DOI: 10.1016/j.jestch.2020.03.008
16. Zotov, A., et al. Vehicle suspension based on torsion bar and elastic hinge. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, Vol. 70(2), pp. 145–156. DOI: 10.5545/sv-jme.2024.7890
 17. Ткачук М.М., М.С. Саверська, С.В. Куценко, О.І. Зінченко, І.Є. Клочков, М.А. Ткачук, І.О. Волошина. Теоретичні основи досліджень контактної взаємодії та пружно-пластичного деформування елементів машин військового та цивільного призначення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Машинознавство та САПР*, 2022. № 1. С. 139–147.
 18. Zhou G., X. Li, Y. Shi, Y. Zhu, B. Xu. (2006). Numerical simulation of the working process and life prediction of a tank torsion shaft. *Journal of Mechanical Strength*, 28(4): 578-581.
 19. Močilnik V. V., N. Gubelj, J. Predan. (2011). Model for fatigue lifetime prediction of torsion bars subjected to plastic pre-setting. *Tehnicki Vjesnik*. 18(4): 537-546.
 20. Močilnik V., Nenad Gubelj, Jozef Predan. (2015). Surface residual stresses induced by Torsional Plastic Pre-setting of Solid Spring Bar. *International Journal of Mechanical Sciences*. 92: 269-278.
 21. Sun Weiqun, He Feng-ming. (2002). Design and manufacture of vehicle torsion bar spring. *J. Automobile Science and Technology*, 2(2):23-27.

References (transliterated)

1. Dushchenko V.V. *Systemy pidresoriuvannia viiskovykh husenychnykh i kolisnykh mashyn: rozrakhunok ta syntez: navch. posibnyk*. Nats. tekhn. un-t "Kharkiv.politekh.in-t". – Kharkiv: Panov A. M. 2018. 336 p.
2. Tkachuk M.M., Hrabovskyi A.V., Zavorotnii A.V., Kutsenko S.V., Saverska M.S., Klochkov I.Ye., Zinchenko O.I., Tkachuk M.A., Nazarenko S.O., Pinchuk N.V., Marusenko S.I. (2022). Chyselne modeliuvannia pruzhno-plastychnoho deformuvannia torsionnykh valiv system pidresoriuvannia transportnykh zasobiv iz urakhuvanniam kontaktnoi vzaemodii. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», serii: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp.91-114.
3. Hrabovskyi A.V., Tkachuk M.M., Zavorotnii A.V., Kutsenko S.V., Saverska M.S., Klochkov I.Ye., Tkachuk M.A., Zinchenko O.I., Dereviankin R.P. (2021). Kontaktna vzaemodiia torsionnoho vala iz shlitsevoiu vtulkoiu pry pruzhno-plastychnykh deformatsiiakh. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», serii: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 34-46.
4. Tkachuk M.M., Zavorotnii A.V., Zinchenko O.I., Hrabovskyi A.V., Tkachuk M.A., Pinchuk N.V., Shevchenko A.V., Tsendra H.V. (2022). Rozvytok pidkhodiv, modelei ta metodiv doslidzhennia mitsnosti ta dovhovichnosti torsionnykh valiv system pidresoriuvannia lehkykh bronovanykh mashyn. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», serii: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 2, pp. 80-93.
5. Birger, I.A. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1979.
6. Stepin, P.A. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974.
7. Kudryavtsev, V.N. *Detali mashin* [Machine Elements]. Moscow: Mashinostroenie, 1980.
8. Burov, S.A. *Konstruktziya tankov* [Tank Design]. Moscow: Voenizdat, 1976.
9. Zhukov, V.G. *Khodovaya chast tankov* [Tank Running Gear]. Moscow: Voenizdat, 1982.
10. *Teoriya tanka* [Theory of Tank]. Moscow: Voenizdat, 1970.
11. *Rukovodstvo po ekspluatatsii tanka KV* [KV Tank Operation Manual]. Moscow: Voenizdat, 1941.
12. Miralbes, R., Castejon, L., Santolaria, J. (2013). Simulation of suspensions, torsion bars and fifth wheel for semitrailers using finite elements. *Engineering Structures*, Vol. 56, pp. 1320–1331. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.06.034
13. Geonea, I., Margine, A., Ionescu, A. (2019). Computation of a torsion bar: rigidity and fatigue resistance. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 12, pp. 456–463. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.123
14. Ciampaglia, A., Pavlovic, A., Rega, G. (2020). Advanced suspension design using finite element modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 234(12), pp. 2950–2964. DOI: 10.1177/0954406220947457
15. Furch, J., Glisnik, J., Skrucany, T. (2020). Lifetime testing and numerical analysis of torsion bars. *Engineering Science and Technology*, Vol. 23(5), pp. 987–995. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.03.008
16. Zotov, A., et al. (2024). Vehicle suspension based on torsion bar and elastic hinge. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 70(2), pp. 145–156. DOI: 10.5545/sv-jme.2024.7890
17. Tkachuk M.M., M.S. Saverska, S.V. Kutsenko, O.I. Zinchenko, I.Ye. Klochkov, M.A. Tkachuk, I.O. Voloshyna. (2022). Teoretychni osnovy doslidzhen kontaktnoi vzaemodii ta pruzhno-plastychnoho deformuvannia elementiv mashyn viiskovoho ta tsyvilnoho pryznachennia. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», serii: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 139-147.
18. Zhou G., X. Li, Y. Shi, Y. Zhu, B. Xu. (2006). Numerical simulation of the working process and life prediction of a tank torsion shaft. *Journal of Mechanical Strength*, 28(4): 578-581.
19. Močilnik V. V., N. Gubelj, J. Predan. (2011). Model for fatigue lifetime prediction of torsion bars subjected to plastic pre-setting. *Tehnicki Vjesnik*. 18(4): 537-546.
20. Močilnik V., Nenad Gubelj, Jozef Predan. (2015). Surface residual stresses induced by Torsional Plastic Pre-setting of Solid Spring Bar. *International Journal of Mechanical Sciences*. 92: 269-278.
21. Sun Weiqun, He Feng-ming. (2002). Design and manufacture of vehicle torsion bar spring. *J. Automobile Science and Technology*, 2(2):23-27.

Надійшла (received) 13.05.2026
Стаття прийнята до друку 20.05.2026
Опублікована 29.05.2026

Відомості про авторів / About the Authors

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

Сериков Володимир Іванович / Sierykov Volodymyr – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5295-3925>; e-mail: serikovvi@tmm-sapr.org

Назаренко Сергій Олександрович / Nazarenko Sergiy – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8213-6590>; e-mail: nazarenkoserzh7@gmail.com

Дем'янець Сергій Олегович / Demianets Serhii – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; e-mail: Serhii.Demianets@mit.khpi.edu.ua

Яцковський Євген Іванович / Yatskovskiy Yevhen – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2882-9494>; e-mail: Yevhen.Yatskovskiy@mit.khpi.edu.ua

Фадєєв Андрій Валерійович / Fadiyev Andriy – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8436-5173> e-mail: andrii.fadiyev@khpi.edu.ua

Герасимова Олена Сергіївна / Gerasimova Olena – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова», м. Харків, Україна

Шуть Олександр Юрійович / Shut Oleksandr – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна, e-mail: tma@tmm-sapr.org

Вейлер Володимир Сергійович / Veiler Volodymyr – заступник начальника Головного військового представництва, начальник групи контролю якості 85 Головного військового представництва МО України, м. Харків, Україна; e-mail: vejlervladimir@gmail.com