

**М. М. ТКАЧУК, А. В. ЗАВОРОТНИЙ, О. І. ЗІНЧЕНКО, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. А. ТКАЧУК,
Н. В. ПІНЧУК, А. В. ШЕВЧЕНКО, Г. В. ЦЕНДРА**

РОЗВИТОК ПІДХОДІВ, МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ТОРСІОННИХ ВАЛІВ СИСТЕМ ПІДРЕСОРИЮВАННЯ ЛЕГКИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН

Здійснений аналіз матеріалів з питань підходів, моделей та методів дослідження міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин. Зроблено висновок про те, що попри значні існуючі теоретичні розробки аналіз пружно-пластичного деформування матеріалів високонавантажених конструкцій, включаючи торсіонні вали, потребує розвитку та адаптації відповідних моделей. Також потребує розвитку сам підхід до здійснення низки досліджень з цього питання. У результаті низки здійснених досліджень була розроблена така модель напружено-деформованого стану торсіонного валу, здійснена варіаційна постановка задачі та виконане чисельне моделювання напружено-деформованого стану. Узагальнений параметричний опис напружено-деформованого стану торсіонного валу містить при цьому варіювані проєктно-технологічні чинники та параметри технологічного процесу. Математична модель напружено-деформованого стану торсіонного валу сформована у приращеннях. Це дає можливість врахувати контакт і пружно-пластичні деформації матеріалу торсіонного валу. При цьому напружено-деформований стан стає залежним від історії навантаження. Параметрична модель надає переваги при обґрунтуванні раціональних технічних рішень. Це стосується і проєктних, і технологічних рішень. Також враховуються усі значущі чинники на всіх етапах життєвого циклу торсіонних валів. Ці чинники впливають один на одного. Відповідно, визначаються такі проєктні, технологічні та експлуатаційні параметри, які задовольняють умовам підвищення міцності та довговічності торсіонних валів. Також важливим аспектом є обґрунтування механічних та фізико-механічних властивостей матеріалів для виготовлення торсіонних валів за цими критеріями. Відповідно, забезпечується комплекс заходів при створенні та удосконаленні торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин із підвищеними технічними характеристиками.

Ключові слова: легка броньована машина; тактико-технічні характеристики; торсіонний вал; система підресорювання; напружено-деформований стан; міцність; довговічність; пружно-пластичне деформування

**М. М. TKACHUK, A. ZAVOROTNIY, O. ZINCHENKO, A. GRABOVSKIY, M. A. TKACHUK, N. PINCHUK,
A. SHEVCHENKO, H. TSENDRA**

DEVELOPMENT OF APPROACHES, METHODS AND MODELS OF RESEARCH OF DURABILITY AND LONGEVITY OF TORSION BILLOWS OF THE SUSPENSION SYSTEM THE LIGHT ARMORED VEHICLE

The analysis of materials on approaches, methods and models of research of strength and durability of torsion shafts of systems of suspension of light armored vehicle is carried out. It is concluded that despite the existing significant theoretical developments, the analysis of elastic-plastic deformation of materials of highly loaded structures, including torsion shafts, requires the development and adaptation of appropriate models. The approach to a number of studies on this issue also needs to be developed. As a result of a number of researches, the following model of stress-strain state was performed. The generalized parametric description of the stress-strain state of the torsion shaft contains varied design and technological factors and process parameters. The mathematical model of the stress-strain state of a torsion bar of incremental type has been formulated. It accounts for the contact and elasto-plastic deformation of the material of the torsion bar. At the same time, the stress-strain state depends on the loading history. A parametric model provides advantages in justifying rational technical solutions. This applies to both design and technological solutions. Also, all significant factors at all stages of the life cycle of torsion bars are taken into account. These factors have significant interplay. Ultimately, the determined design, technological and operational parameters satisfy the conditions of the increased strength and durability of torsion bars. The mechanical and physico-mechanical properties of materials used to manufacture the torsion bars are another important factor with regard to these criteria. Accordingly, a complex workflow is established in order to design and improve the torsion bars for the suspension systems of light armored vehicles with increased technical characteristics.

Keywords: light armored vehicle; performance characteristics; torsion shaft; suspension systems; stress-strain state; strength; durability; elastic-plastic deformation

Вступ. Як свідчить практика бойових дій у східних областях України, значна частина втрат боєздатності легких броньованих машин (ЛБМ) Збройних сил України (ЗСУ) відбувалася внаслідок виходу із ладу елементів систем підресорювання (СП). Серед цих елементів одними із основних елементів є торсіонні вали (ТВ) підвісок ЛБМ. Вони, по-перше, втримують вагу машини у статичному стані, а по-друге, – підтримують динамічну рівновагу ЛБМ у русі, тобто при виникненні значних динамічних сил.

Якщо визначати тенденції вітчизняного бронетанкобудування останніх десятиліть, то слід звернути увагу на те, що ЛБМ здійснюють еволюцію від радянських зразків БТР-60, 70, 80 до модернізованих та нових машин БТР-94Б, БТР-3, БТР-4 тощо. Натепер мова йде про наступне покоління ЛБМ. При цьому зберігається принципова схема СП, хоча бойова маса нових машин має тенденцію до зростання в силу розміщення більш потужних бойових модулів (БМ) із малокаліберними автоматичними гарматами (МАГ), збільшенням бронюванням, підвищеними швидкостями

ми руху тощо. Відтак, підвищується рівень статичного та динамічного навантаження ТВ, а проєктно-технологічні методи забезпечення їх міцності та довговічності орієнтовані на застарілі методики. Таким чином, у практичному плані виникло протиріччя між реальними показниками міцності та довговічності та тими, які слід забезпечити для ЛБМ нового покоління, а особливо – майбутніх. Крім того, це протиріччя поглиблюється відсутністю поглиблених наукових методів та моделей напружено-деформованого стану (НДС), які б адекватно відобразили процеси і стани у торсіонних валах систем підресорювання ЛБМ, а також стали б основою розроблення заходів із підвищення їх міцності та довговічності. Саме на цю актуальну задачу як один із аспектів комплексу проблем при розробці, технологічній підготовці виробництва

© М. М. Ткачук, А. В. Заворотній, О. І. Зінченко,
А. В. Грабовський, М. А. Ткачук, Н. В. Пінчук,
А. В. Шевченко, Г. В. Цендра, 2022

та виготовленні нових та модернізації існуючих ЛБМ для оснащення ЗСУ та інших силових структур України спрямована ця стаття.

Метою роботи є створення наукових основ проектно-технологічного забезпечення міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин шляхом обґрунтування раціональних технічних рішень для елементів цих валів та технологічних режимів при їх виробництві на основі дослідження процесів і станів при виготовленні, експлуатації та бойовому застосуванні.

Для досягнення сформуваної мети роботи поставлені, сформульовані та вирішені наступні завдання.

1. Здійснити порівняльний аналіз методів дослідження контактної взаємодії та пружно-пластичного деформування елементів об'єктів військової техніки, а на цій основі – обрати напрямки досліджень.

2. Розробити теоретичні основи проектно-технологічно-виробничого забезпечення міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин на основі розширення, розвитку та адаптації методу узагальненого параметричного моделювання на етапі обґрунтування прогресивних технічних рішень та математичного моделювання напружено-деформованого стану при їх експлуатації та виготовленні.

3. Здійснити реалізацію розроблених моделей та методів для комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану у елементах торсіонних валів.

Базовим та адаптивним для здійснення досліджень є метод узагальненого параметричного моделювання процесів і станів складних механічних систем, який розвинений та розширений на додаткову множину проектно-технологічних чинників, властивих торсіонним валам систем підресорювання легких броньованих машин. Для моделювання напружено-деформованого стану торсіонних валів залучено методи теорії пружності і пластичності. Комп'ютерне дослідження здійснено на основі метода параметричного геометричного та скінченно-елементного моделювання у середовищі програмних пакетів SolidWorks та ANSYS.

Порівняльний аналіз методів дослідження контактної взаємодії та пружно-пластичного деформування елементів об'єктів військової техніки. Проблемам забезпечення тактико-технічних характеристик (ТТХ) ЛБМ приділяється значна увага в роботах багатьох дослідників [1–3]. При цьому увагу привертають і нові умови бойових дій у сучасних обставинах, і підвищені експлуатаційні навантаження, і удосконалені проектно-технологічні рішення. Саме останніми можна здійснювати вплив на ТТХ вітчизняних ЛБМ.

Застосування удосконалених рішень для підвищення тактико-технічних і технічних характеристик об'єктів військової техніки (ОВТ), зокрема, військових колісних і гусеничних машин (ВКГМ) передбачає роботу в умовах контактної взаємодії і пружно-пластичної деформації матеріалів [1–3]. Практично усі процеси передачі енергії в машинах та механізмах протікають при контактній взаємодії їх деталей.

Розширення діапазону швидкостей і навантажень, за яких працюють елементи машинобудівних

конструкцій, вимагало розв'язання нових задач із забезпечення їх функціональності. У сучасному машинобудуванні відбувається перехід у створенні матеріалів і конструкцій від повномасштабних випробувань прототипів до математичного моделювання їх властивостей, а також процесу виготовлення, що дає можливість виявляти і усувати конструктивні та технологічні недоліки ще до початку стадії виробництва.

Усе більш широкого поширення набувають елементи машинобудівних конструкцій, які функціонують в екстремальних умовах. Розширення діапазонів навантажень, швидкостей і умов роботи машинобудівних виробів вимагає не лише застосування нових матеріалів і оригінальних конструкцій, але і перегляду значущості механізмів контактної взаємодії, які впливають на експлуатаційні характеристики кінцевих виробів та їх вузлів. Це, у свою чергу, диктує необхідність розробки і використання нових методів досліджень.

Моделі і методи досліджень мають враховувати фізичну і структурну нелінійності. Зокрема, важливо визначати на мікроструктурному рівні властивості нових матеріалів на поверхні і в об'ємі. На цій основі можлива фізично адекватна і математично коректна постановка задач аналізу НДС елементів ВКГМ, а також інших ОВТ та машин військового і цивільного призначення (МВЦП) з обґрунтуванням їх удосконалених технічних рішень.

Процеси, що протікають при контакті елементів машинобудівних конструкцій, відрізняються своїм різноманіттям, залежністю від масштабу цієї області і значень діючих сил [1–4]. Вивчення таких процесів вимагає комплексного підходу до методичного забезпечення досліджень, що здійснюються. На рис. 1 наведена картина створюваних репрезентативних моделей контактної взаємодії (атомістичні методи і дискретна динаміка дислокацій, методи граничних і скінченних елементів (МГЕ і МСЕ)) [4].

Значні труднощі у вивченні механізмів контактної взаємодії викликає те, що зона їх протікання недоступна для засобів об'єктивного контролю. Практика досліджень, що склалася на тепер у цій області, заснована на методах аналізу морфології поверхонь тертя і часток зношування [5]. Класифікація часток і поверхонь за морфологічними видами дає можливість встановлювати характер протікання процесів деградації трибосистем, оцінювати їх поточний стан і розв'язувати діагностичні задачі. Розвиток обчислювальної техніки і методів обробки зображень дає можливість відійти від суб'єктивних методів ухвалення рішень, проте вимагає розробки представницьких способів опису морфології шорстких поверхонь і часток зношування.

На тепер широке поширення отримали запропоновані І. В. Крагельським феноменологічні моделі зношування [6]. За їх допомогою устанавлення діючих механізмів зношування здійснюється за результатами класифікації морфології поверхонь тертя і часток зношування, які наслідують особливості їх будови.

При вивченні процесів, що розвиваються при терті і зношуванні, окрім традиційно аналізованих у механіці твердого тіла деформаційно-міцнісних властивостей матеріалів, важливими параметрами, які не-

обхідно брати до уваги, є характеристики геометрії контактуючих поверхонь – хвилястість і шорсткість. Вони визначають фактичну площу контакту, що упе-

рше було відмічене в роботах І.В. Крагельського [6], Е.Р. Bowden, D. Tabor [7].

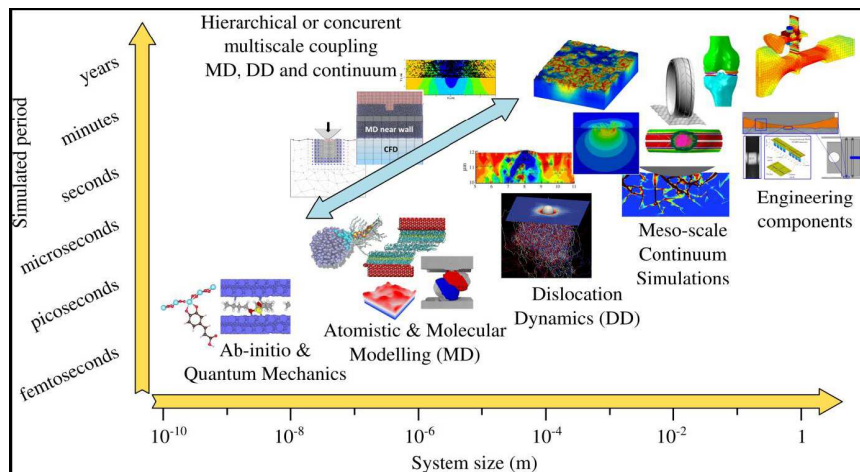


Рисунок 1 – Моделі контактної взаємодії, які характеризуються різними масштабами розмірів досліджуваних об'єктів і часом процесів згідно роботи [4]

При терті одночасно реалізується множина елементарних контактів, відбувається перетворення механічної енергії відносного руху на теплову енергію поверхневих шарів тіл, що труться, що призводить до зміни фізико-механічних властивостей матеріалу. Крім того, взаємодія контактуючих у трибоспряженні тіл супроводжується найбільш інтенсивним протіканням деформаційних, хімічних, термічних та інших процесів, передусім – на поверхні контакту. Параметри довкілля (температура, вологість, наявність агресивних середовищ), умови трибонавантаження (швидкість, рівень навантаження, наявність мастильного середовища), характер зношування (окислювальне, абразивне, втомне, деформаційне тощо) здатні істотно змінювати реакцію матеріалу, який навантажується у трибоспряженні [7].

Процеси, що розвиваються при терті і зношуванні, є багатомасштабними, тому їх дослідження становить значну складність як із позиції експериментального вивчення, так і усебічного теоретичного аналізу з урахуванням вищезгаданого різноманіття. З цієї причини на сьогодні не існує теоретичних, зокрема, чисельних, методів, що дають можливість у рамках єдиного зв'язкового розгляду врахувати багаторівневий характер процесів, що розвиваються [8]. Незважаючи на помітну кількість публікацій, у яких відзначається можливість багатомасштабного вивчення контактних задач в умовах трибоспряжень, усі вони у більшості своїй засновані на урахуванні процесу (наприклад, деформації), який переважно розвивається, або розглядають матеріал як суцільне середовище з ефективними характеристиками. У останньому випадку при розв'язанні задач, як впливає з огляду [9], активно залучається метод гомогенізації.

У роботі [10] узагальнені деякі підходи і методи, які використовуються для розв'язку задач контактної механіки. Вони включають аналітичні розв'язки, засновані на моделях Greenwood-Williamson, Archard, фрактальних теоріях Persson тощо, а також чисельні методи: МГЕ, МСЕ, рухливих клітинних автоматів,

методи молекулярної динаміки тощо.

Сучасні методи, розроблені для опису шорсткості поверхні, засновані на спектральному аналізі та імітують оцифровані шорсткі поверхні без яких-небудь припущень про розподіл нерівностей. Для зниження часу розрахунків використовуються автокореляційні функції, перетворення Фур'є, різні гібридні методи тощо. Щоб урахувати вплив на зношування нерівностей різного порядку, інтенсивно розвиваються багаторівневі моделі для прогнозування зношування.

При терті на контактуючих поверхнях, як правило, реалізуються одночасно декілька механізмів зношування. Класифікація видів зношування досить різноманітна [11]. При цьому адгезійний, абразивний, корозійний, деформаційний і втомний типи зношування зазвичай характеризуються як незалежні. Проте моделей, які могли би враховувати одночасно усі види зношування, що реалізуються, у літературі не наведено.

Натепер доступні обчислювальні засоби, засновані на змішаних аналітичних та чисельних підходах, спрямованих на вирішення трибологічних проблем: контактне моделювання шорстких поверхонь, у тому числі за наявності мастила (гідродинамічне моделювання); моделювання міжмолекулярної взаємодії; розрахунки тиску, підповерхневого напруження, прогинів; розрахунок коефіцієнта тертя в умовах змащування (моделювання кривої Stribeck); розрахунок контактних температур у твердих тілах; моделювання частот зношування, плівки перенесення і еволюції шорсткості поверхні [4]. Проблеми, які можуть бути вирішені за допомогою комп'ютерних програм, нестримно розширюються, але не дають можливості охопити одночасно увесь комплекс проблем механіки контактних взаємодій без істотних спрощень.

У роботі [12] представлений нелінійний чисельний аналіз контактних задач пружнопластичності компактних і тонкостінних металевих конструкцій. Акцент робиться на використанні вдосконалених одновимірних моделей високого порядку на основі уніфікованого фо-

рмулювання Каррери (Carrera Unified Formulation, CUF) для урахування злокалізованих ефектів. Результати CUF добре узгоджуються з еталонними тривимірними розв'язками методу скінченних елементів. CUF довів свою придатність для декількох обчислювальних задач, таких як нелінійні структурні задачі, які враховують геометричні нелінійності [13], нелінійності матеріалів [14] і багатомасштабний аналіз композитних структур [15]. При цьому відбувається значне скорочення ступенів свободи, часу аналізу і вимог до пам'яті.

Контактна взаємодія складнопрофільних елементів машинобудівних конструкцій у багатьох випадках є чинником, що визначає працездатність, довговічність, навантажувальну здатність та інші характеристики виробу в цілому. Прикладами можуть служити тіла кочення підшипників, зубці передач із модифікованими робочими поверхнями, кулькові поршні радіальних гідропередач і багато інших складнопрофільних тіл (СПТ) [16].

Метою дослідження [16] було підвищення енергоефективності і ресурсу високонавантажених зубців провідної шестерні трансмісійних валів насосів колонкового буріння за рахунок обґрунтування критичних навантажень і напруження у загартованих покриттях шестерень, які діють в умовах інтенсивного зношування контактної поверхні зі зломом. Моделювання контакту зубчастих коліс показує, за яких умов виникають максимальні значення напруження, які можуть порушити баланс сил і деформувати геометрію зуба.

Класичні методи розрахунку не враховують вплив інтенсивності і об'єму зношування на зміну конструктивної геометрії деталі. Зношена контактна поверхня впливає на динаміку перерозподілу моментів сил і контактного напруження і, як наслідок, змінює структуру взаємного положення контактних поверхонь відносно розрахункової осі симетрії [17].

У роботах [18, 19] була розроблена динамічна модель коробки передач військового автомобіля у разі поломки зуба для вивчення можливості моделювання з використанням програмного забезпечення MSC Adams. Furch J., Glos J. і Nguyen T. продемонстрували, що можна моделювати сигнали вібрації за допомогою моделі коробки передач, створеної у програмі 3D CAD, і аналізувати результати у програмі багатовимірної динаміки MSC Adams.

Аналізу НДС складнопрофільних елементів підшипників кочення в умовах контактної взаємодії та пружно-пластичної деформації матеріалів присвячено комплекс досліджень [20], у яких використали ANSYS/LS-DYNA.

Для урахування контактної взаємодії тіл часто використовують метод множників Лагранжа або метод штрафних функцій. Альтернативою можуть виступати різні варіанти методу декомпозиції області (МДО) [21]. У рівняннях цих методів є присутніми ітераційні параметри, які сильно впливають як на сам факт збіжності методу, так і на швидкість збіжності.

У роботі [22] досліджено контакт пружних тіл, одне з яких має періодичний рельєф у вигляді виїмок, а інше містить пружне покриття, з'єднане з його основою через тонкий вінклерівський шар.

Контактна задача теорії пружності для стислих напівплощин, що взаємодіють без тертя, зведена у роботі

[23] до розв'язання сингулярного інтегрального рівняння відносно функції, яка описує форму скінченного числа утворених проміжків, що виникають внаслідок дії довільної системи зосереджених сил і моментів.

Як зазначається у багатьох роботах, з метою зменшення контактного тиску в зонах силового та кінематичного сполучення проєктувальники прагнуть використовувати як спряжені поверхні близької, а також частково, фрагментарно або майже співпадаючої (конгруентної) форми. Це, наприклад, «бочкування» робочих поверхонь зубів різних зубчастих передач, модифікація поверхонь роликотідшипників, профілювання форми бігових доріжок гідрооб'ємних передач (ГОП) і поршнів двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) за висотою та в окружному напрямку тощо.

У роботі [24] описаний метод коригування профілю поверхонь контактуючих тіл у актуальному стані шляхом створення пружної деформації одного з тіл. На прикладі контактної взаємодії кулькового поршня зі складнопрофільним тілом досліджений вплив деформації одного з тіл на розміри і форму області контактної взаємодії, а також на розподіл контактного тиску між тілами.

В роботах [25, 26] описані вдосконалені методи аналізу контактної взаємодії складнопрофільних тіл і НДС з нелінійними проміжними шарами, властивості яких залежать від історії навантаження. Ці методи побудовані на основі розвитку варіаційного принципу Калькера у частині розширення множини варіюваних чинників за рахунок параметрів історії навантаження.

Елементи ВКГМ зазнають значно інтенсивніших навантажень, ніж елементи машин цивільного призначення. При їх експлуатації діє, як правило, не один, а сукупно декілька чинників, які спричиняють кожен окремо нелінійні ефекти. Вони впливають один на одного, тому розглядати їх незалежно неможливо. Отже, пряме та безпосереднє застосування створених раніше моделей та відповідних методів [1–26] не дає можливості адекватно і точно визначити довговічність, міцність та навантажувальну здатність елементів ОБТ, що працюють у складних умовах навантаження при дії декількох чинників, які спричиняють нелінійності різного типу. Отже, незважаючи на значні можливості існуючих розробок [1–26], для елементів ВКГМ вкрай важливо розробити моделі та методи досліджень, які поєднують:

- 1) мікроструктурно обґрунтовані властивості матеріалів;
- 2) чинники, які зумовлюють різні типи нелінійностей;
- 3) узагальнений параметричний опис моделей елементів досліджуваних конструкцій.

Така комплексна розробка та дослідження повною мірою натеper відсутні. Це не дає можливості розв'язувати актуальні та важливі задачі, які постають і для елементів ОБТ, і для конструкцій цивільного призначення.

Щодо пластичної деформації елементів конструкцій, то наука про пластичність охоплює великий діапазон проблем і дає можливість знаходити їх розв'язки із позицій сучасних знань фізики, математики, хімії. Звідси і поява різних напрямів теорії пластичності: механіко-математичного, фізичного і фізи-

ко-хімічного. Фундаментальний вклад у цю науку внесли багато вітчизняних і зарубіжних дослідників. Тому будемо посилалися лише на деякі книги із теорії пружності, пластичності, руйнування, пошкоджувальності, які містять велику бібліографію [27, 28].

Найбільш розвинений механіко-математичний напрям. Це пов'язано з тим, що він заснований на строгих фізичних і математичних закономірностях. Природно, що при записі основних закономірностей урахуються характеристики, знайдені експериментальним шляхом, щоб відобразити властивості матеріалу. Математична теорія пластичності є основою багатьох інженерних напрямів, дає можливість визначати поля напружень і деформацій у конструкціях, що має не лише суто теоретичний, але і практичний інтерес. Наведені у літературі теоретичні залежності ґрунтуються на теорії пружності або пластичності зі значними спрощеннями і допущеннями [27, 28].

Фізичний напрям пов'язаний із природою пластичної деформації, механізмом її протікання. Цей напрям вивчається у курсах металогRAFії та обробки металів тиском. Фізико-хімічний напрям установлює основні залежності між хімічним складом матеріалу, його структурою та механічними властивостями. Він вивчає також вплив на них температури, тиску, швидкості деформації. Цей напрям багато у чому носить ще експериментальний характер.

Виникнення пластичних деформацій на мікрорівні може призвести до розвитку тріщин і структурних руйнувань на макрорівні. Багато уваги у роботах вітчизняних і зарубіжних учених приділено проблемі аналізу механічних властивостей. Розгляд механічних властивостей мікроструктури матеріалів дає можливість аналізувати дані на різних масштабних рівнях.

Для прямих методів дослідження мікроструктур сучасних матеріалів характерні експерименти з застосуванням температури чи механічного навантаження.

Розглянутий у роботі [29] алгоритм включає наступні етапи: ідентифікація параметрів міцності із використанням даних, отриманих із зображень мікроструктури матеріалу; вивчення НДС моделі на основі варіаційно-різницевого МСЕ; побудова поверхонь текучості матеріалу для серії випробувань, які враховують різний опір композиційних матеріалів при розтягуючих і стискаючих навантаженнях. Для оцінки вірогідності виникнення пластичних деформацій запропонований метод працює не у детермінованій постановці, а використовує увесь набір імовірнісних характеристик поверхні текучості.

Застосування пластичної деформації дає можливість ефективно впливати на експлуатаційну надійність і довговічність широкої номенклатури деталей машин, що працюють в умовах циклічних навантажень, тертя та дії корозійних середовищ і напруження, яке має концентратори, місця посадок з гарантованим натягом. Прогнозування параметрів зміцнення (міру деформації, глибину зміцненого шару, шорсткість обробленої поверхні), що враховує технологічні режими обробки і фізико-хімічні властивості матеріалу деталі, є складною науковою задачею.

Натепер найбільш досконалою технологією інтенсивної пластичної деформації (SPD) вважається Equal channel angular extrusion (ECAE) [30]. Значні поліп-

шення були нещодавно внесені дослідницькою лабораторією армії США у адаптацію ECAE, щоб зробити її придатною для масового виробництва високоміцних легких металів для броньованих конструкцій [31]. Нова концепція промислової ECAE була успішно протестована у Ellwood Texas Forge Inc.

У огляді [32] Cao Y. та інш. проаналізована структурна еволюція металевих матеріалів, оброблених при інтенсивній пластичній деформації. У результаті пластичних деформацій змінюється не лише форма і розміри, але і структура та властивості початкового металу. Причому зміна структури і властивостей відбувається у сприятливу сторону: підвищуються механічні характеристики (підвищується міцність і твердість, збільшуються межі текучості і пружності), показники пластичності (відносне подовження і звуження, ударна в'язкість). Зміна механічних характеристик пояснюється спотворенням просторових кристалічних решіток металу, спотворенням площин проковзування при деформаціях зсуву і концентрацією уламків зерен на площинах проковзування.

Методи експериментальних досліджень параметрів опору деформації і руйнуванню матеріалів при статичному навантаженні регламентовані відповідним міжнародним стандартом [33].

Для підвищення геометричних і фізико-механічних характеристик поверхневого шару, який чинить початковий вплив на експлуатаційні властивості виробів, здійснюють обробно-зміцнюючу обробку деталі, для чого широко застосовуються методи поверхнево-пластичної деформації (ППД). Усі ці методи засновані на використанні пластичних властивостей металів, здатних приймати залишкове напруження без порушення цілісності і об'єму заготовки. Вони прості у реалізації, економічні, продуктивні, забезпечують формування низької шорсткості, заданої глибини і міри зміцнення, залишкового напруження стискання у поверхневих шарах, дрібнозернистої структури та інших показників якості оброблених деталей.

Усі існуючі та перспективні способи зміцнення із застосуванням ППД залежно від форми і розмірів деталі, їх міцності і жорсткості, технологічного процесу і кінематичної схеми обробки, вимог до точності та якості оброблюваних поверхонь, виду деформуєчих елементів, характеру їх контакту з оброблюваною поверхнею і виробництва підрозділяються, з певною мірою умовності, на 3 укрупнені класи – статичні, динамічні і комбіновані. Поверхнева пластична деформація традиційно здійснюється локальним робочим інструментом (кулька, ролик, диск, алмазний індентор).

На основі теорії малих деформацій пружнопластичності і МСЕ побудована математична модель процесу охоплюючого деформування, яка дає можливість визначати поточне і залишкове напруження у будь-якій точці навантаженого тіла [34].

У роботі [35] розроблені нові конструкції деформуєчого інструменту зі складним робочим профілем, засновані на механіці технологічної спадковості. Здійснений аналіз дав можливість отримати розподіл компонент тензора напружень, деформацій і швидкостей, а також оцінити вплив гідростатичного тиску на накопичення деформації та вичерпання запасу пластичності металу. В. М. Смелянським розроблена механічна тео-

рія процесу поверхневої пластичної деформації, здійснено моделювання НДС осередка деформації і встановлені правила формування поверхневого шару деталей машин.

Додавання критеріїв і параметрів механіки тріщин до умов нелінійної деформації при складному напруженому стані мають свої особливості. В основному ефекти впливу подібних станів реалізуються через зону пластичної деформації в області вершини тріщини, що зумовлює необхідність побудови досліджень у нелінійній постановці для визначення параметрів НДС експериментальних зразків і реальних елементів конструкцій.

Результати дослідження напруженого стану конструкції бронетранспортера при пластичній деформації у результаті безконтактного вибуху міни під його днищем описано у [36].

Загальним висновком із здійсненого аналізу літературних джерел є констатація того факту, що, попри значні теоретичні розробки, із точки зору застосування у тій чи іншій предметній області аналіз пружно-пластичного деформування матеріалів високонавантажених конструкцій потребує розвитку та адаптації відповідних моделей, удосконалення методів та створення засобів досліджень.

Аналіз досліджень характеристик торсіонних валів. Торсіонні системи підресорювання широко застосовуються у конструкціях сучасних гусеничних і колісних транспортних машин. Надійність функціонування вузлів і механізмів підвісок безпосередньо впливає на показники ефективності транспортної техніки. Руйнування пружних елементів підвісок істотно погіршують плавність ходу, знижують швидкохідність і прохідність машини. Відмови підвісок є раптовими і, як правило, носять втомний характер [37].

Аналіз навантаженості СП полягає у визначенні кінематичних і силових параметрів навантаження пружних елементів кожної підвіски у вигляді експлуатаційного спектру навантаження у функції часу. Дослідження навантаженості СП базується на використанні імітаційної моделі руху машини і має включати синте-

зування дорожніх умов, розрахунок режимів руху і, зрештою, моделювання робочих процесів машини, яка рухається трасою [37].

Один із підходів до створення комп'ютерних моделей ґрунтується на використанні нелінійних математичних моделей руху гусеничної або колісної машини трасами із випадковим профілем [38]. Модель має відображати спільну динаміку корпусу, силової установки і ходової частини (рис. 2), а також враховувати неутримуючий характер зв'язків між опорними катками і дорожнім профілем.

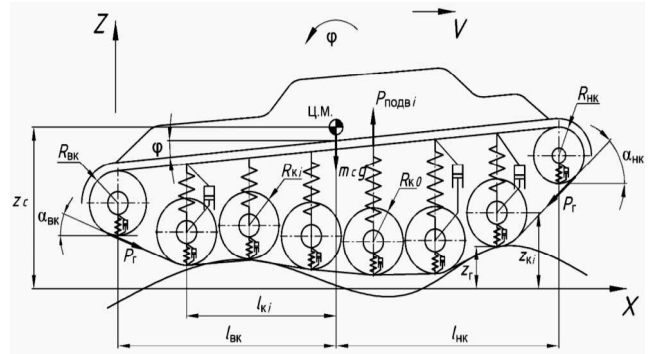


Рисунок 2 – Розрахункова схема гусеничної машини [38]

Інший підхід ґрунтується на використанні імітаційних моделей, реалізованих у програмних комплексах автоматизованого аналізу динаміки систем тіл. Об'єктами моделювання таких комплексів є системи абсолютно твердих тіл, пов'язаних за допомогою шарнірів і силових елементів (рис. 3). Після формування геометричних тіл, шарнірів і активних сил програмний комплекс автоматично синтезує диференціально-алгебраїчні рівняння із використанням формалізму Ньютон-Ейлера. Аналіз рівнянь руху здійснюється шляхом чисельного рішення методом Парку з автоматичним контролем точності.

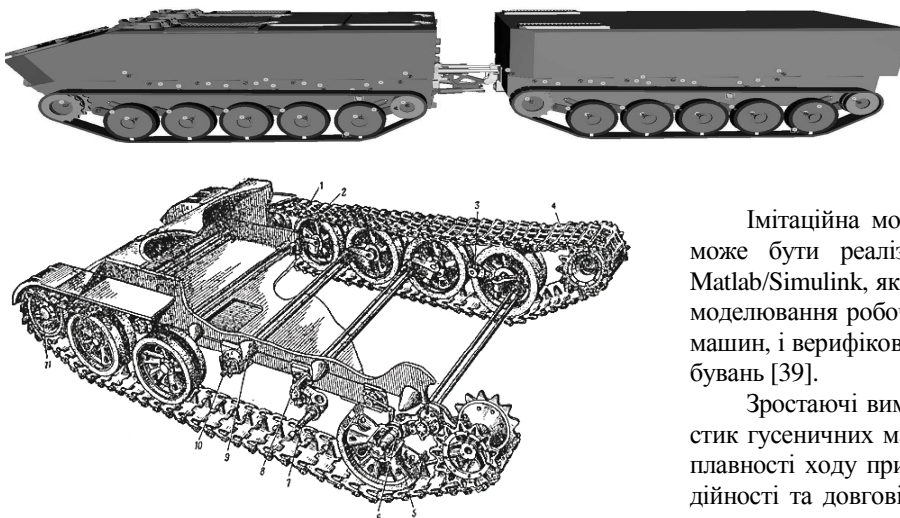


Рисунок 4 – Ходова частина транспортного засобу [40]:

- 1 – кронштейн важеля підвіски, 2 – трак гусеничної ленти,
- 3 – амортизатор, 4 – ведуча зірочка; 5 – опорний каток,
- 6 – гумова накладка, 7 – важіль, 8 – важільна опора,
- 9 – відбійник, 10 – торсіонний вал, 11 – ведоме колесо

Рисунок 3 – Візуалізація динамічних моделей гусеничних машин у програмному комплексі «Універсальний механізм» [37]

Імітаційна модель руху нерівностями місцевості може бути реалізована у програмному комплексі Matlab/Simulink, який широко застосовується у задачах моделювання робочих процесів гусеничних і колісних машин, і верифікована за результатами ходових випробувань [39].

Зростаючі вимоги до експлуатаційних характеристик гусеничних машин за масою, динамічним ходом, плавності ходу при підвищених швидкостях руху, надійності та довговічності ставлять задачу підвищення характеристик торсіонної підвіски, зокрема торсіонних валів (один із них позначений 10 на рис. 4) [40].

Торсіонні вали – пружні елементи підвіски, є однією з самих високонавантажених деталей ходової частини гусеничних машин, до яких пред'являється вимо-

га підвищення пружних властивостей (робочого напруження) при одночасному збільшенні або збереженні на заданому рівні їх циклічної довговічності [37]. Вони виготовляються із термічно обробленої сталі, що допускає велике напруження кручення і значні кути закручування (десятки градусів). ТВ застосовуються у підвісках танків та інших транспортних машин, підресорюванні колісного ходу артилерійської зброї, для урівноваження важких елементів конструкції, що відкриваються (броньована кришка люка, дах трансмісії тощо), у багатопотокових редукторах для вирівнювання моментів між паралельними передачами тощо [40]. Пружні властивості торсіонних валів проявляються при крученні. За конструкцією торсіонного елементу системи підресорювання можуть бути одновальні, двохвальні, пучкові, трубчасто-стержневі. У конструкції одновальної системи використовується один пружний стержень. Кінці торсіонів є шліцьовими або призматичними голівками, одна з яких закріплена у спеціальному кронштейні на корпусі машини, а друга пов'язана з важелем направляючого пристрою.

Одновальні підвіски прості за конструкцією, займають відносно малий об'єм усередині корпусу, добре компонується, захищені від ушкодження, технологічні при виробництві та ремонті, не вимагають обслуговування, забезпечують великий хід опорних катків і енергоємність СП. При установці довгих ТВ вузли підвісок одного та іншого бортів стають неспіввісними, а коротких торсіонних валів – забезпечується співвісність підвісок між бортами. Натепер найбільше поширення отримали одновальні торсіонні підвіски. Це пов'язано із розробкою спеціальних технологій виготовлення і обробки ТВ і застосуванням нових марок сталей, що підвищило їх якісні характеристики, уможливило обходитися одним коротким торсіоном і забезпечило простоту конструкції. Для запобігання появи концентраторів напруження торсіони покривають лаком або обмотують ізоляційною стрічкою.

Найбільш характерним видом відмови торсіонної СП, що не призводить при цьому до повної втрати рухливості, є руйнування ТВ. Для гусеничної машини важкої вагової категорії подібний вид відмови, як правило, не усувається на місці поломки. Машина продовжить виконання поставленої задачі із несправною підвіскою, що, у свою чергу, призведе до погіршення показників плавності ходу, а, отже, до вимушеного зниження механіком-водієм швидкості руху [41].

У результаті здійсненого дослідження встановлено, що найбільш критичними із точки зору впливу на середню швидкість руху гусеничних машин є відмови крайніх підвісок. Руйнування пружного елемента першої підвіски призведе до зниження швидкості за системою підресорювання на 26,4 %, а при відмові шостої підвіски втрата у швидкості складе 38,4 %. Відмова середніх підвісок призводить до зниження середньої швидкості на 3,2–19,8 % [41].

Оцінка втомної довговічності компонентів підвіски транспортних засобів із використанням нелінійного аналізу методом скінченних елементів вимагає багато часу обчислень. Ранні дослідження у основному були зосереджені на пропозиції теоретичних коефіцієнтів концентрації напруження із використанням теорії пружності. Ince A. і Glinka G. [42] розробили аналітичну

обчислювальну модель для розрахунку фактичного напруження пружнопластичності і деформацій компонентів транспортних засобів із тріщиною на основі лінійно-пружного розв'язку МСЕ.

Для підвищення динамічних властивостей, навантаження, що сприймається, і максимального кута закручування торсіон піддають заневолюванню. Ця технологічна операція є останньою серед операцій механічної і термічної обробки. Операція заневолювання полягає у закручуванні гарячого торсіону за межу його пружного стану і витримці у такому положенні деякий час. При цьому у поверхневих шарах виникають пластичні деформації, а в серцевині – пружні. Після розвантаження торсіону серцевина, прагнучи звільнитися від напруження і повернутися у початковий стан, зустрічає опір пластично деформованого поверхневого шару [37].

Залишкове напруження, отримане при заневолюванні, дає можливість підвищити робоче навантаження і кут закручування торсіону в експлуатації. У деяких випадках, як це робиться для торсіонів танків Т-72, торсіон піддається подвійному заневолюванню. Рівень залишкового напруження від технологічної операції заневолювання визначається з умови, що характер поведінки матеріалу за межею текучості відповідає ідеальному пружно-пластичному матеріалу. Робоче закручування заневолюваних торсіонів має співпадати із напрямком закручування при заневолюванні, тому вони взаємозамінні тільки в межах свого борту і невзаємозамінні між бортами.

Дослідження, здійснені підприємствами АТ «НДІ сталі», Москва, ВАТ ВНІПІ, Санкт-Петербург, засвідчили, що найбільш ефективним способом підвищення експлуатаційних характеристик ТВ, що виготовляються із конструкційних сталей, є термомеханічна обробка, зокрема, високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО). ВТМО є найбільш ефективним технологічним методом підвищення працездатності конструкційних сталей за рахунок більш повного використання їх потенційних ресурсів міцності та пластичності. При виборі технологічної схеми ВТМО для практичного використання необхідно враховувати у кожному конкретному випадку: оптимальний спосіб деформації відповідно до схеми робочих навантажень; найкращу технологічну схему, у якій вдало поєднуються операції термічної обробки і пластичної деформації. Стосовно ТВ ВТМО із деформацією кручення порівняно з іншими способами деформації видається як найбільш сприятлива як у конструктивному аспекті – для підвищення довговічності і пружних властивостей, так і у технологічному, дає можливість робити гарячу деформацію остаточно готових валів без зміни їх форми і геометричних розмірів [43].

Також стосовно ТВ, що працюють на кручення, ефективність ВТМО особливо підвищується при виконанні гарячої деформації кручення у напрямі дії робочих навантажень деталі, оскільки з'являється можливість раціонального використання анізотропії механічних властивостей, що виникає при ВТМО крученням. Крім того, деформація крученням дає можливість робити гарячу деформацію із великою швидкістю і з різною мірою одноразової деформації, що виключає імовірність рекристалізації у процесі обробки і дає можливість варіювати швидкість і величину одноразової

деформації [43].

Здійснений аналіз літератури свідчить про необхідність розвитку розрахункових моделей напружено-деформованого стану ТВ, зокрема, у частині врахування умов контактної взаємодії у зоні шліцьових головок зі спряженими деталями.

Таким чином, здійснений аналіз сучасних досліджень демонструє, що натеper, попри значний прогрес у дослідженні окремих явищ, процесів і станів (зокрема, контактної взаємодії, пружно-пластичного деформування, у т.ч. – елементів високонавантажених трансмісій, приводів, роторних систем, торсіонних валів сучасних машин військового та цивільного призначення), не завершені розробки та дослідження, які би враховували усі перераховані діючі комплексні чинники у їх сукупності та взаємодії.

Висновки за результатами порівняльного аналізу методів дослідження контактної взаємодії та пружно-пластичного деформування елементів об'єктів військової техніки та обґрунтування напрямків досліджень. Здійснений порівняльний аналіз методів дослідження контактної взаємодії та пружно-пластичного деформування елементів об'єктів військової техніки дає підстави для формування наступних висновків.

1. Для підприємств вітчизняного бронетанкобудування одним із найбільш актуальних і важливих завдань є проєктно-технологічне забезпечення міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання ЛБМ. Разом із тим натеper не розроблені адекватні моделі та методи досліджень, які би враховували сукупний вплив таких чинників як пружно-пластичне деформування матеріалу усього тіла торсіонного вала та контактна взаємодія зі спряженими деталями.

2. На сучасному етапі існує широкий арсенал методів та засобів досліджень НДС тіл із урахуванням пружно-пластичного деформування та контакту, зокрема, метод скінченних елементів. Проте вони не націлені на дослідження торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин.

3. Практичні потреби бронетанкобудування потребують сучасних адекватних моделей та методів.

4. Розв'язання задач міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання ЛБМ передбачає аналіз напружено-деформованого стану. Разом із тим це висуває як першочергову задачу інтеграції варіативного моделювання важливих чинників на всіх етапах життєвого циклу цих валів задля обґрунтування таких проєктно-технологічних рішень, які забезпечують досягнення заданих ТТХ рухливості бойових броньованих машин.

5. Задля забезпечення ефективності технічних рішень, обґрунтованості рекомендацій, точності результатів та адекватності моделей напружено-деформованого стану доцільно удосконалити існуючі моделі, методи і засоби досліджень, доповнивши їх можливостями аналізу із залученням, із одного боку, універсальних програмних засобів, а з іншого, – спеціалізованих.

Здійснений аналіз досліджень та об'єктивний стан проєктування, технологічної підготовки виробництва та виготовлення торсіонних валів СП легких броньованих машин дає підстави для обґрунтування наступних

завдань досліджень:

1) розроблення удосконалених підходів, моделей та методів досліджень НДС торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин, які об'єднують повну множину важливих чинників на усіх етапах їх життєвого циклу, на відміну від частинного та спрощеного урахування у попередніх дослідників;

2) створення методів та моделей чисельного моделювання НДС торсіонних валів систем підресорювання ЛБМ із урахуванням сумісного впливу пружно-пластичного деформування матеріалу валів та їх контактної взаємодії зі спряженими деталями;

3) реалізація розроблених моделей і методів у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу (СПМК);

4) здійснення розрахункових та експериментальних досліджень міцності та довговічності торсіонних валів у системах підресорювання легких броньованих машин та розроблення рекомендацій стосовно підвищення їхніх характеристик.

Вирішення завдань 1)–3), що є основою для вирішення завдання 4), описане у роботі нижче.

Загальні підходи до проєктно-технологічного забезпечення міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин. Здійснений аналіз сучасного стану розробок і методів досліджень міцності та довговічності різних елементів машин військового і цивільного призначення дав підстави для створення удосконаленого підходу до проєктно-технологічного забезпечення міцності та довговічності ТВ систем підресорювання ЛБМ.

Дійсно, із застосуванням сучасних моделей, методів та засобів досліджень досить просто визначити процеси і стани будь-яких елементів різних конструкцій при дії тих чи інших навантажень. Разом із тим потрібен інструмент розв'язання оберненої задачі. У випадку, що розглядається, це – обґрунтування технічних рішень, що забезпечують міцність та довговічність ТВ систем підресорювання ЛБМ.

Слід зазначити, що будь-які дослідження міцності та довговічності ТВ передбачають, у першу чергу, аналіз їх напружено-деформованого стану. Спрощені методи не враховують або враховують неналежним чином низку важливих чинників.

Отже, потребує розвитку удосконалений підхід до здійснення досліджень, який полягає у створенні низки методологічних основ:

1) загальні підходи до варіативного моделювання досліджуваних торсіонних валів СП легких броньованих машин;

2) удосконалені математичні моделі НДС ТВ, які враховують весь комплекс значущих чинників та навантажень, які діють на усіх етапах їх життєвого циклу;

3) розроблення інтегрованих розрахункових моделей, які об'єднують аспекти 1) і 2).

Якщо звернутися до задачі 1), то у першу чергу варто звернутися до способів задоволення найбільш вагомих вимог. Дійсно, при розробленні загального підходу до розв'язання задачі аналізу напружено-деформованого стану ТВ систем підресорювання ураховані такі принципові аспекти:

1) підхід, що розробляється, має давати можливість узгодженого безконфліктного варіювання конс-

структурних схем і параметрів ТВ, технологічних режимів та режимів навантаження;

2) модель НДС торсіонних валів має здатність відтворювати пружно-пластичне деформування та контактну взаємодію тіл із поверхнями близької форми як фізично та структурно нелінійні процеси, що залежать від історії навантаження;

3) методи аналізу напружено-деформованого стану ТВ мають уможлилювати моделювання його у повній просторовій постановці із варіюванням фізико-механічних властивостей матеріалів контактуючих деталей, у т.ч. – їхніх проміжних та приповерхневих шарів;

4) розробки, що здійснюються, мають давати можливість їх реалізації у вигляді цілісного програмно-модельного комплексу, що у автоматизованому режимі здатен здійснювати серії багатоваріантних досліджень;

5) створювані методологічні розробки мають бути

націлені не тільки на розв'язання задач аналізу, але й на цілеспрямований пошук варіантів технічних рішень із їх обґрунтуванням за тими чи іншими обраними критеріями [44].

На розробленій у роботі [44] основі створений удосконалений підхід до здійснення таких досліджень. Структура цього підходу наведена на рис. 5.

Як видно із рис. 5, як вихідні дані використовуються тактико-технічні вимоги (ТТВ). Зокрема, вони полягають у забезпеченні міцності ТВ протягом певної кількості циклів максимальних кутів закручування. При цьому із початкових проектно-технологічних міркувань задаються стартові значення параметрів p та характеристик H . З іншого боку, а саме із аналізу життєвого циклу, «приходять» властивості матеріалів ТВ та діючі навантаження f (технологічні, експлуатаційні та у ході бойового застосування).

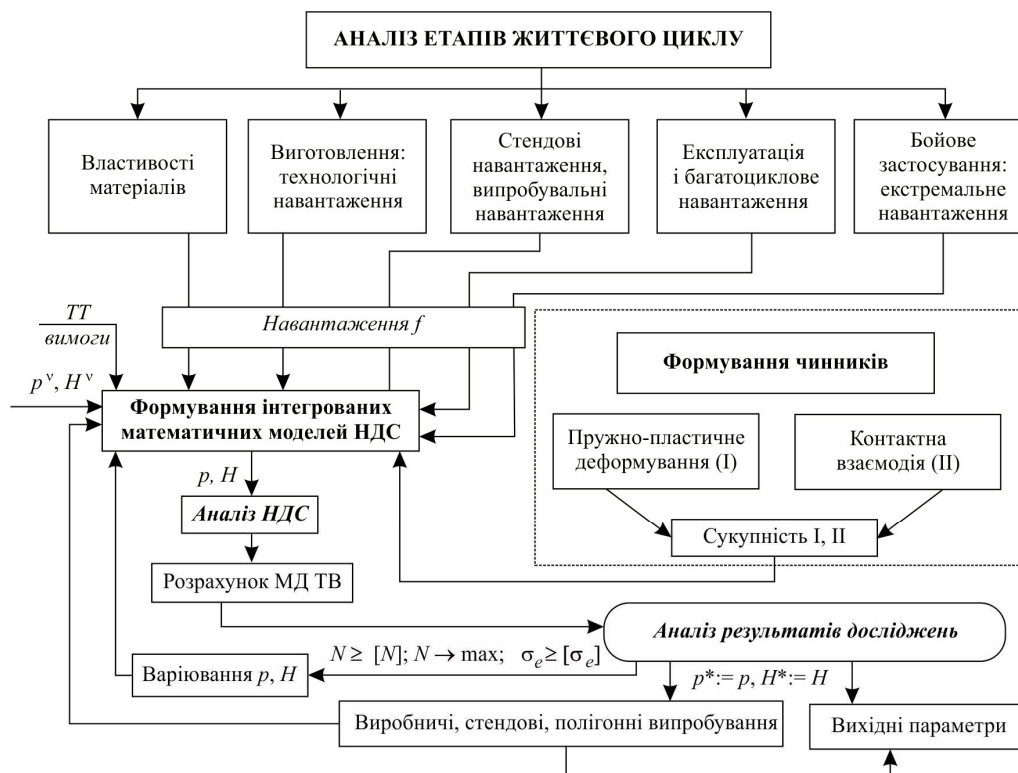


Рисунок 5 – Структура удосконаленого підходу у проектно-технологічному забезпеченні міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання ЛБМ

На основі згаданих етапів формується поточний масив даних (p, f) , які закладаються у модель НДС. Слід зазначити, що у ролі узагальнених параметрів p можуть бути форма ТВ та його елементів, розміри, навантаження. У цю модель вбудовуються чинники пружно-пластичного деформування та контактної взаємодії у їх сукупній дії. Далі на основі чисельного моделювання визначається просторово-часовий розподіл змінних стану (наприклад, переміщень $u(r, t)$, де r – радіус-вектор довільної точки ТВ, t – час; а з ними – і компоненти тензорів деформацій $\varepsilon = \varepsilon(u)$ та напружень $\sigma = \sigma(u)$). Після цього визначається виконання/невиконання умов міцності та довговічності, а на цій основі – прийняття рішення про продовження про-

цесу пошуку прийняттого рішення. Якщо процес слід продовжити, то із умов або забезпечення кількості циклів N більшим за допустимий рівень $[N]$, або максимізації N , або неперевиконання еквівалентними напруженнями σ_e допустимого рівня $[\sigma_e]$ здійснюється цілеспрямоване варіювання поточного масиву узагальнених параметрів $p := p + \Delta p$. На цьому етапі також можливе коригування характеристик H (наприклад, якщо виявилася нездатність задовольнити початковим рівням H або, навпаки, присутній резерв для їх підвищення; те ж стосується рівнів $[N]$, $[\sigma]$). Якщо ж аналіз результатів досліджень задовольняє усім вимогам міцності та довговічності, то здійснюється присвоєння поточних значень p, H рекомендованим

p^*, H^* . Ці рекомендовані величини перевіряються у ході обов'язкових виробничих випробувань, а надалі – закладаються у проєктно-технологічну документацію на ТВ систем підресорювання ЛБМ.

Розроблений підхід у цілому, по-перше, відповідає цільовим вимогам проєктного забезпечення ТТХ рухливості ЛБМ у частині міцності та довговічності їх систем підресорювання, а по-друге, інтегрує усі значущі чинники. І перше, і друге принципово відрізняє цей підхід від традиційних: він хоча й більш складний, проте дає наукове підґрунтя для прогресивних технічних рішень торсіонних валів СП ЛБМ.

Математична модель напружено-деформованого стану торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин. Математична модель та методи аналізу НДС торсіонних валів у цілому описані в роботах [44, 45]. Побудована модель є параметричною. Спеціалізований програмно-моделльний комплекс для аналізу напружено-деформованого стану ТВ також представлений у [44, 45].

Разом із тим слід зазначити певні особливості у побудові математичної моделі НДС торсіонних валів систем підресорювання ЛБМ. Вони полягають у методології варіативності, що закладена у саму суть запропонованого у роботі підходу (див. рис. 5).

Дійсно, цей підхід базується на цілеспрямованому поліпшенні технічних рішень елементів СП легких броньованих машин на основі розв'язання задач аналізу НДС систем підресорювання ЛБМ із урахуванням сумісної дії пружно-пластичного деформування та контактної взаємодії [44, 45]. Разом із тим слід наголосити, що методологія узагальненого параметричного моделювання, що у випадку, який розглядається у роботі, розширена на усі складові проєктно-технологічних рішень ТВ систем підресорювання ЛБМ, зачіпає також і фізико-механічні властивості матеріалів, із яких складаються досліджувані об'єкти. Тоді постає питання про такий спосіб імплементації цього чинника у математичну модель НДС торсіонних валів, щоби ця модель, по-перше, не порушувала цілісність загальної постановки задачі, по-друге, забезпечувала варіативність цих властивостей, а, по-третє, природнім чином вбудовувалася у процес цілеспрямованого поліпшення технічного рішення ТВ за критеріями їх міцності та довговічності (див. рис. 5).

У розрізі, що заявлений, варто відштовхуватися від загальної постановки визначення пружно-пластичного НДС торсіонних валів у прирошеннях [44, 45], тому що на кожному кроці прирошення навантаження діють співвідношення теорії пластичної течії [46]. Це співвідношення у прирошеннях:

- умови рівноваги:

$$d\sigma_{ij,j} = 0; i, j = 1, 2, 3; \quad (1)$$

- геометричні співвідношення:

$$2d\epsilon_{ij} = du_{i,j} + du_{j,i}; i, j = 1, 2, 3; \quad (2)$$

- зв'язок між напруженнями та деформаціями:

$$d\sigma_{ij} = A_{ijkl} \cdot d\epsilon_{kl}; i, j, k, l = 1, 2, 3; \quad (3)$$

- граничні умови:

$$d\sigma_{ij} n_j = dF_i^* \text{ на } S_\sigma; du_i = du_i^* \text{ на } S_u,$$

$$du_i^+ \cdot n_i^+ + du_j^- \cdot n_j^- \leq d\delta^{+-} \text{ на } S_C, i, j = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Тут $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$ – компоненти тензорів напружень та деформацій відповідно, u_i – компоненти вектору переміщень, n_j – компоненти вектору нормалі до поверхні тіла, F_i^*, u_i^* – компоненти векторів заданих навантажень та переміщень, S_u, S_σ – частини поверхні тіла із заданими переміщеннями та навантаженнями, «+» та «-» – індекси, що ідентифікують кожне з пари контактуючих на частині поверхонь S_C тіл із зазором δ^{+-} між ними.

Особливу увагу слід звернути на формування тензора пружних модулів A_{ijkl} , що описує властивості неоднорідного анізотропного пружного тіла, яке на поточному кроці моделює тіло при пружно-пластичній деформації. У роботі [46] описане класичне формулювання відносно визначення A_{ijkl} . З цією метою залучаються обернені співвідношення:

$$d\epsilon_{ij} = A_{ijkl}^{-1} \cdot d\sigma_{kl}. \quad (5)$$

При цьому прирошення тензора деформацій подаються у вигляді суми прирошень пружних та пластичних складових відповідно:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p, \quad (6)$$

$$d\epsilon_{ij}^e = \frac{1-2\nu}{E} d\sigma \cdot \delta_{ij} + \frac{d\sigma_{ij}^l}{2G}, \quad (7)$$

$$d\epsilon_{ij}^p = \alpha^{**} \cdot h \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} df, \quad (8)$$

де E, G, ν – модулі Юнга I та II роду і коефіцієнт Пуассона матеріала, $d\sigma, d\sigma_{ij}^l$ – прирошення гідростатичної (кульової) та девіаторної частини напружень:

$$d\sigma = d\sigma_{ii} / 3; d\sigma_{ij}^l = d\sigma_{ij} - d\sigma \cdot \delta_{ij}, \quad (9)$$

де h – додатньо визначена форма компонент σ_{ij} .

Функція $f(\sigma_{ij})$ – умова течії, а поверхня

$$f = C \quad (10)$$

– поверхня течії.

Згідно із традиційним підходом [46], розглядаються випадки:

- активне навантаження

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} > 0, \quad (11)$$

- нейтральне навантаження

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} = 0, \quad (12)$$

- розвантаження

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} < 0. \quad (13)$$

Параметр α^{**} у (8) визначається так:

$$\alpha^{**} = 1, \text{ якщо } f(\sigma_{ij}) = C \text{ і } df \geq 0, \quad (14)$$

$$\alpha^{**} = 0, \text{ якщо } f(\sigma_{ij}) < C \\ \text{або } f(\sigma_{ij}) = C \text{ і } df < 0. \quad (15)$$

Параметр C може бути заданий як монотонно зростаюча додатня функція F повної пластичної роботи

$$C = F\left(\int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p\right), \quad (16)$$

де інтегрування здійснюється уздовж шляху навантаження.

Із (6) із урахуванням (7)–(16) можна сформува-ти систему співвідношень (3) у вигляді

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{1-2\nu} d\varepsilon_{ij} + 2G\varepsilon_{ij}' - \\ - \alpha^* \frac{2G \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} d\varepsilon_{kl} \right)}{1 + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (17)$$

$$\text{де } de = \frac{\varepsilon_{ii}}{3}, d\varepsilon_{ij}' = d\varepsilon_{ij} - de \cdot \delta_{ij}, \quad (18)$$

а параметр α^* визначається як $\alpha^* = 1$, якщо $f(\sigma_{ij}) = C$ і $\frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \cdot d\varepsilon_{kl} \geq 0$; $\alpha^* = 0$, якщо $f(\sigma_{ij}) < C$,

або якщо $f(\sigma_{ij}) = C$ і $\frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \cdot d\varepsilon_{kl} < 0$.

Таким чином, маємо можливість за даною поверхнею текучості (10) однозначно ідентифікувати процес пружно-пластичного деформування матеріалу досліджуваного об'єкту, у цьому випадку – ТВ систем підресорювання ЛБМ. Разом із тим ця поверхня може бути шуканою за певними критеріями, наприклад, міцності чи довговічності. У всякому разі, ця поверхня, яка визначає властивості або цілої множини матеріалів, або одного й того ж матеріалу, проте підданого різному технологічному обробленню, є варіативною.

Отже, необхідно, як зазначалося вище, запропонувати механізм імплементації у створювану математичну модель саме варійованої, а не жорстко постульованої функції (10). Задля цього цю функцію можна розглядати як ще один узагальнений параметр із їх множини, який ідентифікує досліджуваний об'єкт. У цьому сенсі можна досліджувати різні моделі поведінки поверхні текучості, різні види діаграми деформування матеріалу, різні види термомеханічного оброблення тощо на НДС торсіонних валів

систем підресорювання ЛБМ. Більш того, можлива постановка та розв'язання задачі обґрунтування таких властивостей матеріалу ТВ, який би дав можливість збільшення їх міцності та довговічності.

Таким чином, у аспекті урахування пластичних деформацій забезпечуються нові можливості, які створюють переваги при обґрунтуванні прогресивних технічних рішень торсіонних валів СП легких броньованих машин. При цьому ураховується залежність їх НДС від властивостей матеріалу та від історії навантаження. Застосування ж теорії пластичної течії дає коректну модель для здійснення повного моделювання життєвого циклу ТВ. Наприклад, мова може йти про технологічні операції подвійного заневолювання та наступне експлуатаційне навантаження.

Незважаючи на просунуте математичне моделювання пружно-пластичного деформування, слід урахувати також і дію контактування умов (див. рис. 5). Ці умови типу (4), що мають вигляд нерівностей, перетворюють навіть фізично лінійну пружну задачу визначення НДС того чи іншого тіла у структурно нелінійну. А тим більші складнощі виникають у випадку пружно-пластичного деформування. Саме тому виникає проблема не просто урахування контактної взаємодії досліджуваних елементів конструкцій, а ще і збурення, варіювання та пошуку раціонального варіанту поверхні контакту S_c .

Із цією метою форма поверхонь контактуючих тіл інтегрується у комплексну модель контактної взаємодії цих тіл у вигляді узагальненого параметру S_c . Наприклад, це – розподіл початкового зазору δ^{+-} між тілами. Описаний у роботі підхід таку можливість забезпечує.

Важливою особливістю запропонованого розширення математичної моделі напружено-деформованого стану ТВ систем підресорювання ЛБМ є методологічна незалежність операцій щодо урахування пружно-пластичного деформування матеріалу та контактної взаємодії, з одного боку, проте взаємовплив на фізичному та математичному рівнях – з іншого. Задача аналізу НДС стає зв'язаною, а також структурно та фізично нелінійною. А задача синтезу прогресивних технічних рішень – багатофакторною. При цьому чинники, що враховуються, мають різну природу та походження. Фізико-механічні властивості диктуються, як уже зазначалося, матеріалом та способами оброблення, а форма контактуючих поверхонь – геометрією та способом виготовлення деталей.

У підсумку удосконалена математична модель НДС торсіонних валів СП ЛБМ є основою обґрунтування їх прогресивних технічних рішень за методологією, наведеною на рис. 5. При цьому множина узагальнених параметрів p формально містить і властивості матеріалу, і форму контактуючих поверхонь.

Отже, запропонована у [44, 45] методологія досліджень напружено-деформованого стану ТВ систем підресорювання ЛБМ розширена на новий клас узагальнених параметрів. У прикладному аспекті це дає можливість здійснити проєкцію обґрунтованого таким чином раціонального технічного рішення на, так би мовити, «проєктно-технологічну» площину. Тобто,

призначити такі матеріали, види та режими технологічного оброблення, які дадуть бажаний результат.

Крім того, слід зазначити, що базова математична модель напружено-деформованого стану ТВ систем підресорювання ЛБМ та чисельна його модель не зазнають кардинальних змін у структурі та реалізації порівняно із [44, 45]. Проте їх можливості принципово поглиблюються. Отже, нашаровуючи запропоновану методологію, можна розширити існуючі можливості порівняно із [44, 45], а тим більшою мірою – порівняно із традиційними підходами та методиками. Про важливість такого розширення та поглиблення свідчать результати тестових досліджень, описані у [44, 45].

Висновки. Таким чином, розроблена модель напружено-деформованого стану торсіонних валів. Здійснена варіаційна постановка задачі на основі теорії варіаційних нерівностей. Чисельне моделювання НДС здійснено із залученням методу скінченних елементів. У модель НДС торсіонних валів інтегровано його узагальнений параметричний опис. Він містить варіювані значущі проєктно-технологічні чинники. Зокрема, це конструктивне виконання головки торсіона, галтельного переходу та діаметр стебла торсіонного валу. Крім того, він містить параметри технологічного процесу подвійного заневолування: кути закрутки та властивості матеріалу вала.

Створений удосконалений підхід до розв'язання поставленої задачі, здійснені завдяки йому дослідження та аналіз отриманих результатів стали основою для таких висновків:

1) запропонована у роботі удосконалена методологія досліджень напружено-деформованого стану торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин суттєво поширює множину чинників, що враховуються;

2) у математичній моделі напружено-деформованого стану ТВ систем підресорювання транспортних засобів урахується, зокрема, пружно-пластичний характер деформування матеріалу та контактна взаємодія, причому у взаємовпливі;

3) орієнтація на традиційні методики, які не враховують реальні умови контактної взаємодії тіл за деформування їх матеріалів, може призводити до грубих похибок при визначенні міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання транспортних засобів.

У подальшому розроблена методологія буде застосована до дослідження напружено-деформованого стану торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин.

Список літератури

- Гравовський А. В. [та ін.] Забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проєктних досліджень. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях.* Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 18 (1190). С. 22–29.
- Ткачук Н. Н. [та ін.] Расчетно-экспериментальное исследование элементов механических систем. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування.* Харків: НТУ «ХПІ». 2018. № 29 (1305). С. 129–156.
- Ткачук М. М. Теоретичні основи забезпечення високих технічних характеристик машин військового та цивільного призначення на основі дослідження міцності складнопрофільних деталей. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР.* Харків: НТУ «ХПІ». 2017. № 12. С. 86–95.
- Vakis A. I. [et al.] Modeling and simulation in tribology across scales: An overview. *Tribology International.* 2018, vol. 125, pp. 169–199.
- Григорьев А. Я. Приборы и методы исследований контактного взаимодействия твердых тел. *Весті Національної академії наук Белорусі. Серія фізико-технічних наук.* 2018. Т. 63. № 1. С. 53–67.
- Kragelsky I. V., Dobychin M. N., Komalov V. S. Friction and wear: calculation methods. *Elsevier.* 2013. 150 p.
- Bowden F. P., Tabor D. *The friction and lubrication of Solids.* Oxford university press, 2001. 185 p.
- Grützmacher P. G. [et al.] The influence of centrifugal forces on friction and wear in rotational sliding. *Tribology International.* 2017, vol. 116, pp. 256–263.
- Roters F. [et al.] Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications. *Acta Mater.* 2010, vol. 58, pp. 1152–1211.
- Stephan E. P., Tran T. FEM–BEM Coupling. *Schwarz Methods and Multilevel Preconditioners for Boundary Element Methods.* Springer, Cham, 2021, pp. 331–366.
- Kato K. Classification of wear mechanisms/models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* 2002, vol. 216, no. 6, pp. 349–355.
- Nagaraj M. H. [et al.] Nonlinear analysis of compact and thin-walled metallic structures including localized plasticity under contact conditions. *Engineering Structures.* 2020, vol. 203, 109819.
- Paganiand A., Carrera E. Unified formulation of geometrically nonlinear refined beam theories. *Mechanics of Advanced Materials and Structures.* 2018, vol. 25(1), pp. 15–31.
- Petrolo M. [et al.] A global-local approach for the elastoplastic analysis of compact and thin-walled structures via refined models. *Computers & Structures.* 2018, vol. 206, pp. 54–65.
- De Miguel A. G. [et al.] Accurate evaluation of failure indices of composite layered structures via various FE models. *Composites Science and Technology.* 2018, vol. 167, pp. 174–189.
- Savinkin V. V. [et al.] Investigation of the Strength Parameters of Drilling Pumps during the Formation of Contact Stresses in Gears. *Applied Sciences.* 2021, vol. 11, no. 15, pp. 70–76.
- Kyznetsova V. [et al.] Study of the Spatial Distribution of Forces and Stresses on Wear Surfaces at Optimization of the Excavating Part of an Earthmoving Machine Transverse Profile. *Coatings.* 2021, vol. 11, no. 2, pp. 11–16.
- Furch J. [et al.] Simulation of failure in gearbox using MSC. ADAMS. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis.* 2017, vol. 65, no. 2, pp. 419–428.
- Furch J., Glos J., Nguyen T. T. Vibration analysis of manual transmission using physical simulation. *Deterioration Dependability Diagnostics.* 2016, pp. 57–68.
- Zheng H. [et al.] Research on allowable contact stress of tumtable bearing materials based on elastoplastic finite element method. *Bearing.* 2016, no. 1, pp. 36–39.
- Toselli A., Widlund O. *Domain decomposition methods-algorithms and theory.* Springer Science & Business Media, 2004. 450 p.
- Прокопишин І. Контактна взаємодія пружних тіл, одне з яких має покриття, з'єднане з основою через вінклерівський прошарок. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології.* 2016. № 23. С. 144–160.
- Мартыняк Р. М. Взаимодействие упругих полуплоскостей при неполном механическом контакте. *Математичні методи та фізико-механічні поля.* 2019. Т. 22. С. 89–92.
- Ткачук М. М. [та ін.] Розрахунково-експериментальне дослідження впливу профілю і жорсткості проміжного шару на розподіл контактної тиску між складнопрофільними тілами. *Механіка та машинобудування.* 2019. № 1. С. 36–50.
- Ткачук М. М. [та ін.] Методи, моделі та результати досліджень контактної взаємодії складнопрофільних тіл із урахуванням залежності характеристик матеріалу проміжних шарів від історії навантаження. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР.* Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 1. С. 119–142.
- Ткачук М. М. Мікромеханічні моделі та методи осереднення властивостей матеріалів мережевої структури та проміжних шарів контактуючих тіл: дис... доктора технічних наук: 05.03.20 / Ткачук Микола Миколайович. Харків, 2020. 464 с.
- Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. *Математическая теория пластичности.* М.: Физматлит, 2001. 704 с.
- Chakrabarty J. *Theory of Plasticity.* Elsevier, 2012. 882 p.
- Шаповалова М. І., Водка О. О. Дворівневі математичні моделі визначення напруженого стану та ресурсу пластини з отвором.

- Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин. Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1. С. 55–60.
30. Segal V. Equal-channel angular extrusion (ECAE): from a laboratory curiosity to an industrial technology. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 2, pp. 244–273.
 31. Segal V. [et al.] *Fabrication of High-Strength Lightweight Metals for Armor Applications*. CCDC Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground United States, 2019. 46 p.
 32. Cao Y. [et al.] Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2018, vol. 133, pp. 1–59.
 33. ASTM Standard E1820-17. Standard test method for measurement of fracture toughness. *ASTM International*. West Conshohocken, 2017. 53 p.
 34. Зайдеc С. А., Фам Дак Фьонг Поверхностное пластическое деформирование цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами. *Технология металлов*. 2017. № 6. С. 8–16.
 35. Blumenstein V. Y. [et al.] Finite element modeling of strengthening process by means of surface plastic deformation using a multiradius tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2017, vol. 253, no. 1, pp. 012–017.
 36. Rybak P. [et al.] Numerical and experimental research on the dynamic loads in military vehicles. *Journal of KONES*. 2016, vol. 23, pp. 435–441.
 37. Горелов В. А. [та ін.] Методика прогнозування ресурса торсіонних валов систем піддресоривання транспортних машин. *Труди НГТУ ім. П. Е. Алексєєва*. 2019. № 4 (127). С. 125–137.
 38. Жилейкин М. М., Котиев Г. О., Сарач Е. Б. *Математические модели систем транспортных средств*. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 207 с.
 39. Горелов В. А., Анкинович Г. Г., Чудаков О. И. Математическая модель прямолинейной динамики по недеформируемому опорному основанию седельного автопоезда с активным полуприцепом. *Вестник Машиностроения*. 2017. № 3. С. 37–42.
 40. Gagneza G. P. S., Chandramohan S. Estimation of Road Loads and Vibration Transmissibility of Torsion Bar Suspension System in a Tracked Vehicle. *Journal of The Institution of Engineers: Series C*. 2019, vol. 100, no. 5, pp. 747–761.
 41. Дубин Д. А. [та ін.] Оценка влияния отказов подвесок индивидуальной системы поддресоривания на среднюю скорость движения быстроходной гусеничной машины. *Труды НГТУ им. П. Е. Алексєєва*. 2019. № 1 (124). С. 37–42.
 42. Ince A. Numerical validation of computational stress and strain analysis model for notched components subject to non-proportional loadings. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2016, vol. 84, pp. 26–37.
 43. Агасьянц Г. А. [и др.] Разработка технологии высокотемпературной термомеханической обработки с деформацией кручением торсионных валов. *Металлообработка*. 2017. № 3 (99). С. 28–43.
 44. Грабовський А.В., Ткачук М.М., Заворотній А.В. [та ін.] Контактна взаємодія торсіонного вала із шліцевою втулкою при пружно-пластичних деформаціях. *Вісник НТУ «ХПІ». Машинознавство та САПР*. 2021. № 1. С. 34–46.
 45. Ткачук М.М., Грабовський А.В., Заворотній А.В. [та ін.] Чисельне моделювання пружно-пластичного деформування торсіонних валів систем піддресоривання транспортних засобів із урахуванням контактної взаємодії. *Вісник НТУ «ХПІ». Машинознавство та САПР*. 2022. № 1. С.91–114.
 46. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 542 с.
- References (transliterated):**
1. Hrabovskyi A. V. [et al.] (2016). Zabezpechennia taktyko-tekhnichnykh kharakterystyk viiskovykh husenychnykh i kolisnykh mashyn na etapi proektnykh doslidzhen. [Ensuring the tactical and technical characteristics of military tracked and wheeled vehicles at the stage of design studies]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiakh*. Kharkiv: NTU «KhPI», no. 18 (1190), pp. 22–29.
 2. Tkachuk N. N. [et al.] (2018) Raschetno-eksperymentalnoe yssledovanye elementov mekhanicheskoykh system [Computational and experimental study of elements of mechanical systems]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Transportne mashynobuduvannia*. Kharkiv: NTU «KhPI», no. 29 (1305), pp. 129–156.
 3. Tkachuk M. M. (2017). Teoretychni osnovy zabezpechennia vysokykh tekhnichnykh kharakterystyk mashyn viiskovoho ta tsyvilnoho pryznachennia na osnovi doslidzhenia mihtnosti skladnoprofilnykh detalei [Theoretical foundations of ensuring high technical characteristics of military and civilian machines based on the study of the strength of complex profile parts]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI», no.12, pp. 86–95.
 4. Vakis A. I. [et al.] (2018). Modeling and simulation in tribology across scales: An overview. *Tribology International*, vol. 125, pp. 169–199.
 5. Hryhorev A. Ya. (2018). Prybory y metody yssledovanyi kontaktnoho vzaymodeistviya tverdykh tel. *Vesti Natsyianalnai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh navuk*, vol. 63, no. 1, pp. 53–67.
 6. Kragelsky I. V., Dobychin M. N., Kambalov V. S. (2013). Friction and wear: calculation methods. *Elsevier*, 150 p.
 7. Bowden F. P., Tabor D. (2001). *The friction and lubrication of Solids*. Oxford university press, 185 p.
 8. Grützmacher P. G. [et al.] (2017). The influence of centrifugal forces on friction and wear in rotational sliding. *Tribology International*, vol. 116, pp. 256–263.
 9. Roters F. [et al.] (2010). Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite-element modeling: Theory, experiments, applications. *Acta Mater*, vol. 58, pp. 1152–1211.
 10. Stephan E. P., Tran T. FEM–BEM Coupling. *Schwarz Methods and Multilevel Preconditioners for Boundary Element Methods*. Springer, Cham, 2021, pp. 331–366.
 11. Kato K. (2002). Classification of wear mechanisms/models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 216, no. 6, pp. 349–355.
 12. Nagaraj M. H. [et al.] (2020). Nonlinear analysis of compact and thin-walled metallic structures including localized plasticity under contact conditions. *Engineering Structures*, vol. 203, 109819.
 13. Paganianand A., Carrera E. (2018). Unified formulation of geometrically nonlinear refined beam theories. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 25(1), pp. 15–31.
 14. Petrolo M. [et al.] (2018). A global-local approach for the elastoplastic analysis of compact and thin-walled structures via refined models. *Computers & Structures*, vol. 206, pp. 54–65.
 15. De Miguel A. G. [et al.] (2018). Accurate evaluation of failure indices of composite layered structures via various FE models. *Composites Science and Technology*, vol. 167, pp. 174–189.
 16. Savinkin V. V. [et al.] (2021). Investigation of the Strength Parameters of Drilling Pumps during the Formation of Contact Stresses in Gears. *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, pp. 70–76.
 17. Kyznetsova V. [et al.] (2021). Study of the Spatial Distribution of Forces and Stresses on Wear Surfaces at Optimization of the Excavating Part of an Earthmoving Machine Transverse Profile. *Coatings*, vol. 11, no. 2, pp. 11–16.
 18. Furch J. [et al.] (2017). Simulation of failure in gearbox using MSC. ADAMS. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, vol. 65, no. 2, pp. 419–428.
 19. Furch J., Glos J., Nguyen T. T. (2016). Vibration analysis of manual transmission using physical simulation. *Deterioration Dependability Diagnostics*, pp. 57–68.
 20. Zheng H. [et al.] (2016). Research on allowable contact stress of turntable bearing materials based on elastoplastic finite element method. *Bearing*, no. 1, pp. 36–39.
 21. Toselli A., Widlund O. (2004). *Domain decomposition methods-algorithms and theory*. Springer Science & Business Media, 450 p.
 22. Prokopyshyn I. (2016). Kontaktna vzaiemodiia pruzhnykh til, odne z yakykh maie pokryttia, z'iednane z osnovoiu cherez vinklerivskyi prosharok [Contact interaction of elastic bodies, one of which has a coating connected to the base through a Winkler interlayer]. *Fizyko-matematychni modelivannia ta informatsiini tekhnolohii*, no. 23, pp. 144–160.
 23. Martyniak R. M. (2019). Vzaymodeistviye upruhykh poluplosko-stei pry nepolnom mekhanicheskom kontakte [Interaction of elastic half-planes with incomplete mechanical contact]. *Matematychni metody ta fizyko-mekhanichni polia*, vol. 22, pp. 89–92.
 24. Tkachuk M. M. [et al.] (2019). Rozrakhunkovo-eksperymentalne dosli-dzhennia vplyvu profilu i zhorstkosti promizhnoho sharu na rozpodil kontaktnoho tysku mizh skladnoprofilnymy tilamy [Computational and experimental study of the influence of the profile and stiffness of the intermediate layer on the distribution of contact pressure between bodies with a complex profile]. *Mekhanika ta mashynobuduvannia*, no. 1, pp. 36–50.
 25. Tkachuk M. M. [et al.] (2020). Metody, modeli ta rezultaty doslidzhen kontaktnoi vzaiemodii skladnoprofilnykh til iz urakhuvanniam zalezhnosti kharakterystyk materialu promizhnykh shariv vid istorii navantazhennia [Methods, models and results of research on the contact interaction of complex-profile bodies, taking into account the dependence of the material characteristics of the intermediate layers on

- the load history]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI», no. 1, pp. 119–142.
26. Tkachuk M. M. (2020). *Mikromekhanichni modeli ta metody osередnennia vlastyvoitei materialiv mrezhevoi struktury ta promizhnykh shariv kontaktuiuchykh til [Micromechanical models and methods of averaging the properties of materials of the network structure and intermediate layers of contacting bodies]: dys... doktora tekhnichnykh nauk: 05.03.20 / Tkachuk Mykola Mykolaiovych*. Kharkiv, 464 p.
 27. Yshlynskyi A. Yu., Yvlev D. D. (2001). *Matematycheskaia teoriya plastychnosti [Mathematical theory of plasticity]*. M.: Fyzmatlyt, 704 p.
 28. Chakrabarty J. *Theory of Plasticity*. Elsevier, 2012. 882 p.
 29. Shapovalova M. I., Vodka O. O. (2021). Dvornivevi matematychni modeli vyznachennia napruzhenoho stanu ta resursu plastyny z otvorom [Two-level mathematical models for determining the stress state and resource of a plate with a hole]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Dynamika ta mitsnist mashyn*. Kharkiv: NTU «KhPI», no. 1, pp. 55–60.
 30. Segal V. (2020). Equal-channel angular extrusion (ECAE): from a laboratory curiosity to an industrial technology. *Metals*, vol. 10, no. 2, pp. 244–273.
 31. Segal V. [et al.] (2019). *Fabrication of High-Strength Lightweight Metals for Armor Applications*. CCDC Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground United States, 46 p.
 32. Cao Y. [et al.] (2018). Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 133, pp. 1–59.
 33. ASTM Standard E1820-17 (2017). Standard test method for measurement of fracture toughness. *ASTM International*. West Conshohocken, 53 p.
 34. Zaides S. A., Fam Dak Fyonh (2017). Poverkhnostnoe plastycheskoe deformyrovanye tsylindrycheskykh detalei poperechnoi obkatkoi ploskomyu plytamy. *Tekhnolohiya metallov*, no. 6, pp. 8–16.
 35. Blumenstein V. Y. [et al.] (2017). Finite element modeling of strengthening process by means of surface plastic deformation using a multiradius tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, vol. 253, no. 1, pp. 012–017.
 36. Rybak P. [et al.] (2016). Numerical and experimental research on the dynamic loads in military vehicles. *Journal of KONES*, vol. 23, pp. 435–441.
 37. Horelov V. A. [et al.] (2019). Metodyka prohnozyrovannya resursa torsyonnykh valov system podressoryvannya transportnykh mashyn [Method for predicting the resource of torsion shafts of suspension systems for transport vehicles]. *Trudy NHTU im. R. E. Alekseeva*, no. 4 (127), pp. 125–137.
 38. Zhyleikyn M. M., Kotyev H. O., Sarah E. B. (2018). *Matematycheskye modeli system transportnykh sredstv [Mathematical models of vehicle systems]*. M.: Yzdatelstvo MHTU im. N. E. Baumana, 207 p.
 39. Horelov V. A., Ankyonovych H. H., Chudakov O. Y. (2017). Matematycheskaia model priamolyneinoi dynamyky po nedeformyruemomu opomomu osnovanyiu sedelnoho avtopozezda s aktyvnym poluprytsepom [Mathematical model of rectilinear dynamics on a non-deformable support base of a semi-trailer truck with an active semi-trailer]. *Vestnyk Mashynostroenyia*, no. 3, pp. 37–42.
 40. Gagneza G. P. S., Chandramohan S. (2019). Estimation of Road Loads and Vibration Transmissibility of Torsion Bar Suspension System in a Tracked Vehicle. *Journal of The Institution of Engineers: Series C*, vol. 100, no. 5, pp. 747–761.
 41. Dubyn D. A. [ta in.] (2019). Otsenka vliyaniya otkazov podvesok yndyvudualnoi systemy podressoryvannya na sredniuu skorost dyvzhenyia bystrokhodnoi husenychnoi mashyny [Evaluation of the influence of suspension failures of an individual suspension system on the average speed of a high-speed tracked vehicle]. *Trudy NHTU im. R. E. Alekseeva*, no.1 (124), pp. 37–42.
 42. Ince A. (2016). Numerical validation of computational stress and strain analysis model for notched components subject to non-proportional loadings. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 84, pp. 26–37.
 43. Ahasiants H. A. [et al.] (2017). Razrabotka tekhnolohyy vysokotemperaturnoi termomekhanicheskoi obrabotky s deformatsyei kruchenyem torsyonnykh valov [Development of technology for high-temperature thermomechanical processing with torsion deformation of torsion shafts]. *Metallobrabotka*, no. 3 (99), pp. 28–43.
 44. Hrabovskiy A. V., Tkachuk M. M., Zavorotnii A. V. [et al.] (2021). Kontaktna vzaiemodiia torsionnoho vala iz shlitsevoiu vtukoiu pry pruzhno-plastychnykh deformatsiyakh [contact interaction of a torsion shaft with a splined sleeve during elastic-plastic deformations]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 34–46.
 45. Tkachuk M. M., Hrabovskiy A. V., Zavorotnii A. V. [et al.] (2022). Chyselne modeliuвання pruzhno-plastychnoho deformuvannya torsionnykh valiv system pidressoryvannya transportnykh zasobiv iz urakhuvanniam kontaktnoi vzaiemodii [Numerical modeling of elastic-plastic deformation of torsion shafts of vehicle suspension systems taking into account contact interaction]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no.1, pp. 91–114.
 46. Vasiltsu K. *Variational methods in the theory of elasticity and plasticity*. Per. from English. [Variatsionnyye metody v teorii uprugosti i plastychnosti]. M.: Mir, 1987. 542 p.

Nadiiushla (received) 22.06.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola M. – доктор технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри інформаційних технологій та систем колісних і гусеничних машин імені О.О. Морозова; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org.

Заворотній Антон Валерійович / Zavorotnii Anton – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна.

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

Грабовацький Андрій Володимирович / Grabovskiy Andrey – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A. – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Пінчук Наталія Володимирівна / Pinchuk Nataliya – кандидат фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0954-2266>; тел.: (057) 707-64-35; e-mail: spiritnata@gmail.com.

Шевченко Андрій Валерійович / Shevchenko Andriy – 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.

Цендра Георгій Вікторович / Tsendra Heorgii – 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;