

**Г. В. ТКАЧУК, Д. В. БІБІК, О. В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, С. О. КРАВЧЕНКО, С. І. МАРУСЕНКО,
В. В. СУББОТІНА, В. І. АЛЬОХІН, Н. А. ДЬОМІНА, В. І. СЕРИКОВ, Т. О. ПРОТАСЕНКО,
І. П. ГРЕЧКА, О. С. ЛЬОЗНИЙ**

**МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАДЛЯ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СВІТОВОГО РІВНЯ ТЕХНІЧНИХ І ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МАШИН ЦИВІЛЬНОГО ТА ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Сучасні машини цивільного та військового призначення експлуатуються в режимах інтенсивних навантажень, у тому числі - при контактній взаємодії. Це спричиняє проблеми із їх міцністю та довговічністю. Зокрема, це елементи турбодетандерних установок, трансмісій транспортних засобів, тепловозних і танкових двигунів, рушіїв, систем підресорювання, наземних роботизованих комплексів, а також – технологічних систем для їх виробництва. Відповідно, з'являються нові проєктні та технологічні рішення щодо цих та інших елементів конструкцій. У свою чергу, виникає необхідність у розвитку нових моделей і методів дослідження їх напружено-деформованого стану із урахуванням контактної взаємодії. Оскільки у цих випадках необхідно враховувати низку нових чинників (шорсткість, напилення, термообробка та зміцнення поверхонь деталей), то постає проблема адекватності, точності та ефективності дослідження напружено-деформованого стану, у тому числі із урахуванням контактної взаємодії таких складнопрофільних відповідальних елементів конструкцій. Задля цього у роботі розробляється та застосовується розрахунково-експериментальний метод, що поєднує, з одного боку, аналіз напружено-деформованого стану різними експериментальними методами, а з іншого – чисельно-аналітичними засобами. У результаті різко підвищується, по-перше, достовірність результатів такого аналізу, а по-друге – ефективність проєктно-технологічних рішень. Своєю чергою, таке дослідження забезпечує принципові переваги при створенні цивільної та військової техніки із основними технічними і тактико-технічними характеристиками на світовому рівні, у т. ч. – міцність та довговічність. Зокрема, мова йде про підвищення ККД, довговічності та навантажувальної здатності машин, агрегатів та обладнання. Можливості розробленої методології проілюстровані на прикладі елементів двигунів, радіальної гідрооб'ємної передачі, а також силових гідроциліндрів. Результати здійснених досліджень покладені в основу при обґрунтуванні прогресивних технічних рішень об'єктів подібного типу.

Ключові слова: метод розрахунково-експериментального дослідження; міцність; довговічність; гідрооб'ємна передача; дискретно-континуальне зміцнення; гідроциліндр

**H. TKACHUK, D. BIBIK, O. VERETELNYK, S. KRAVCHENKO, S. MARUSENKO, V. SUBBOTINA,
V. ALOKHIN, N. DOMINA, V. SIERYKOV, T. PROTASENKO, I. HRECHKA, O. LOZNYI**

**METHODOLOGY OF COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE STRESS-
STRAIN STATE OF HIGHLY LOADED ELEMENTS TO ENSURE WORLD-CLASS TECHNICAL
AND TACTICAL-TECHNICAL CHARACTERISTICS OF CIVILIAN AND MILITARY VEHICLES**

Modern civil and military vehicles are operated under intensive load conditions, including contact interaction. This causes problems with their strength and durability. In particular, these are elements of turboexpander units, vehicle transmissions, diesel locomotive and tank engines, engines, suspension systems, ground robotic complexes, as well as technological systems for their production. Accordingly, new design and technological solutions for these and other structural elements appear. In turn, there is a need to develop new models and methods for studying their stress-strain state taking into account contact interaction. Since in these cases it is necessary to take into account a number of new factors (roughness, spraying, heat treatment and hardening of the surfaces of parts), the problem arises of the adequacy, accuracy and efficiency of the study of the stress-strain state, including taking into account the contact interaction of such complex-profile critical structural elements. For this purpose, a computational-experimental method is developed and applied in the work, which combines, on the one hand, the analysis of the stress-strain state by various experimental methods, and on the other – by numerical-analytical means. As a result, firstly, the reliability of the results of such analysis sharply increases, and secondly, the effectiveness of design and technological solutions. In turn, such research provides fundamental advantages in the creation of civil and military equipment with basic technical and tactical and technical characteristics at the world level, including strength and durability. In particular, we are talking about increasing the efficiency, durability and load capacity of machines, units and equipment. The capabilities of the developed methodology are illustrated by the example of elements of diesel locomotive engines, radial hydrodynamic transmission, and power hydraulic cylinders. The results of the research are used as a basis for substantiating progressive technical solutions for objects of this type.

Keywords: computational-experimental research method; strength; durability; hydrovolumetric transmission; discrete-continuous hardening; hydraulic cylinder

Вступ. Як свідчить аналіз стану сучасного машинобудування, транспортної та енергетичної галузі, з одного боку, для цивільних галузей значну увагу привертають такі нові технічні рішення машин, агрегатів та обладнання, які вбудовуються в концепцію стійкого розвитку матеріальної сфери діяльності людства. При цьому акценти зміщуються на характеристики економічності, довговічності, екологічності тощо. Своєю чергою, це призводить до необхідності широкого обсягу проєктних досліджень задля забезпечення обґрунтування прогресивних технічних рішень зазначених технічних засобів.

З іншого боку, практика бойових дій у су-

часних умовах різко змінює умови застосування військової техніки: танків, БМП, БТР тощо. Зокрема, це – нові чинники ураження, інтенсифікація навантажень та режимів роботи основних систем і агрегатів. Серед елементів, що визначають рухливість, захищеність, вогневу міць елементів бойових броньованих машин, у першу чергу – високонавантажені, у т. ч. – контактуючі деталі двигунів, трансмісій, озброєння, систем підресорювання тощо. Саме вони обмежують форсування режимів

© Г. В.Ткачук, Д. В. Бібік, О. В. Веретельник,
С. О. Кравченко, С. І. Марусенко, В. В. Субботіна,
В. І. Альохін, Н. А. Дьоміна, В. І. Сериков,
Т. О. Протасенко, І. П. Гречка, О. С. Льозний, 2026

роботи, визначають міцність, довговічність та надійність роботи основних елементів. Задля задоволення підвищених вимог, що постали перед сучасною військовою технікою, теж потрібні глибокі проектні дослідження, які першочергово за мету мають підвищення тактико-технічних характеристик (ТТХ) військової техніки.

Незважаючи на різну спрямованість, і у першому, і у другому із зазначених вище напрямків постають ідентичні проблеми – глибокий науковий супровід нових технічних рішень складних машинобудівних конструкцій із підвищеними характеристиками.

Таким чином, така сформована нагальна проблема трансформується у зазначеному аспекті у розробку та застосування удосконалених методів дослідження напружено-деформованого стану (НДС) та контактної взаємодії досліджуваних елементів конструкцій цих машин задля обґрунтування їхніх прогресивних технічних рішень, зокрема, за критеріями міцності та довговічності. Оскільки розрахункові моделі цих елементів містять багато нових чинників (застосування новітніх, композитних, нетрадиційних мережевих, керамічних, пінних матеріалів, невраховувані раніше повною мірою властивості шорсткості поверхневих шарів, наплення, покриття, поверхневе пластичне деформування тощо), які діють у сукупності та взаємовпливі, то побудувати адекватну розрахункову модель без експериментальних досліджень неможливо. Разом із тим послідовне здійснення розрахункових та експериментальних досліджень тягне за собою значне збільшення термінів проєктних досліджень.

Отже, підхід, що пропонується та який передбачає паралельне взаємозв'язане здійснення розрахунково-експериментальних досліджень у єдиному процесі, забезпечує вирішення нагальних потреб наукового супроводу новітніх розробок у машинобудуванні.

Аналіз проблем при зміцненні сучасних машинобудівних конструкцій та методів їх досліджень. Як зазначено у [1], натеper необхідний критичний аналіз існуючих підходів у реалізації технологій Industry 4.0 та 5.0 як парадигми мейнстрімного напрямку світового розвитку. Зокрема, привертається увага до необхідності зміни акцентів у взаємодії реального сектору економіки, наукової компоненти та інформаційних технологій. При цьому слід відзначити провідну роль саме потреб реального сектору економіки у розвитку наукових досліджень та цифрових технологій задля забезпечення сталого розвитку суспільства. У цій роботі, яка є зведеним аналітичним оглядом дослідження і розкриття теми сталого дизайну і виробництва елементів транспорту на прикладі деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) із оцінкою екологічного впливу на всіх етапах життєвого циклу та впровадження технологій Індустрії 4.0, 5.0 для підвищення сталості, відзначається, що «стале виробництво, зокрема, деталей ДВЗ, стає дедалі важливішою темою у контексті сучасної промисловості. Зважаючи на глобальні екологічні виклики,

зменшення викидів вуглецю та споживання природних ресурсів є критичними завданнями для всіх виробничих галузей, включаючи транспортну інфраструктуру та транспортне машинобудування. Зокрема, ДВЗ є основою сучасної автомобільної промисловості, яка продовжує відігравати важливу роль у глобальній економіці. Незважаючи на тенденцію до електрифікації транспорту, зокрема зростання популярності електромобілів, ДВЗ залишаються широко використовуваними, особливо в комерційному транспорті, важких і військових машинах та інших спеціалізованих засобах. Проте, зростаюча увага до екологічних викликів, зокрема зміни клімату, зумовлює необхідність переосмислення підходів до виробництва цих двигунів. Виробництво деталей для ДВЗ традиційно пов'язане з високим рівнем споживання енергії, використанням великих обсягів природних ресурсів, а також значними викидами парникових газів і відходами. Зміна цих підходів на більш сталий спосіб є необхідною умовою для забезпечення довгострокового розвитку галузі, що поєднує економічну ефективність із соціальною відповідальністю та екологічною стійкістю. Тому стале виробництво охоплює комплекс заходів, спрямованих на мінімізацію негативного впливу на довкілля та зменшення споживання ресурсів при збереженні високої продуктивності та якості продукції» [1].

У контексті виробництва деталей ДВЗ це означає оптимізацію процесів, впровадження новітніх технологій і матеріалів, а також перехід до циклічних виробничих моделей, що зменшують відходи. Оптимізація виробничих процесів є ключовим аспектом сталого виробництва. Зменшення споживання енергії, води, сировини та інших ресурсів є важливим кроком на шляху до зниження екологічного сліду виробництва. Це можна досягти через [1]: *енергоефективність; ... зменшення відходів; упровадження нових матеріалів; ... застосування композитів та легких сплавів тощо* [1].

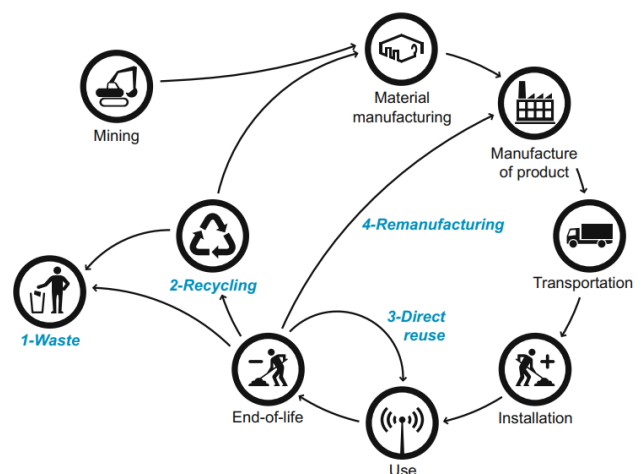


Рисунок 1 – Чотири стратегії завершення життєвого циклу технологічної продукції [2]

Тут слід згадати чотири стратегії завершення життєвого циклу технологічної продукції [2] (рис. 1). Крім того, вирізняються інші аспекти сучасних підходів [1–6].

Із зазначених нових та перехідних технологій

(рис. 2) [1, 3, 4] можна виділити наступні головні сегменти: промисловий інтернет речей (The Industrial Internet of Things – IIoT); великі дані та їх аналіз (Big Data and Analytics); автономні роботи (Autonomous Robots); адитивне виробництво

(Additive Manufacturing); моделювання (Simulation); хмарні технології (The Cloud Technology); віртуальна (доповнена) реальність (Augmented Reality).

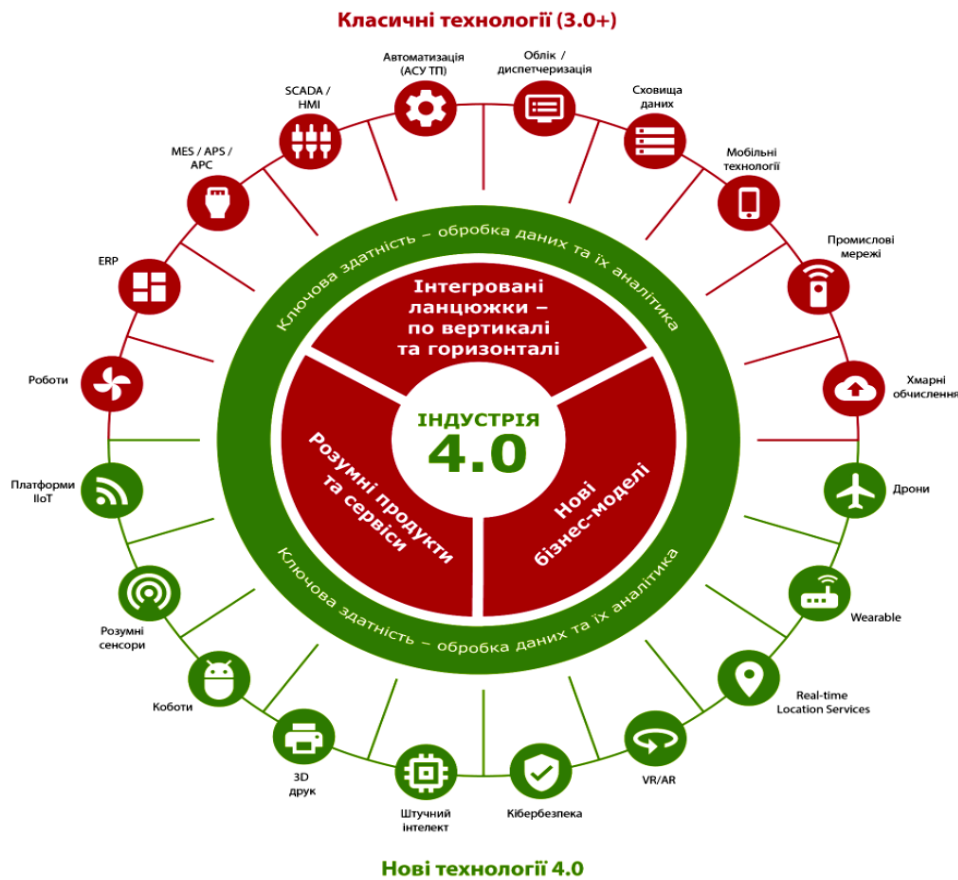


Рисунок 2 – Перехідні та нові технології, які використовуються в Індустрії 4.0 [1]

Також у [1] зазначено, що важливо для забезпечення сталого розвитку об'єктів реального сектору економіки виокремити різні аспекти проблеми, які у розрізі об'єктів транспорту мають такі складові:

1) суспільні потреби → логістичні схеми → транспортна інфраструктура → комп'ютерне моделювання етапів розробки вимог до технічних характеристик транспортних засобів → проектування інфраструктури та алгоритмів управління транспортними потоками;

2) вихідні вимоги до транспортних засобів → моделі аналізу та синтезу → чисельні моделі → комп'ютерні засоби → технічні рішення реальних об'єктів;

3) транспортний засіб → системний підхід → математичне моделювання процесів і станів у окремих елементах → чисельне моделювання → закономірності впливу варійованих параметрів та технічних характеристик → рекомендації стосовно прогресивних технічних рішень.

Також, як відзначається у [1], важливо співставити реальні об'єкти, їхні математичні та комп'ютерні моделі. Важливими є також питання залучення до вирішення сучасних проблем штучного інтелекту, хмарних ресурсів, суперкомп'ютерів тощо...

Крім того, важливо привернути увагу до відносин у трикутнику «реальний сектор економіки – наука – інформаційні технології». Відзначається [1], для того, щоби при цьому визначити існуючі закономірності та тенденції, слід звернутися до реального сектору економіки. Дійсно, саме цей сектор залишається провідним у парі із інформаційним сектором. Це викликано тим, що первинним мотивом розвитку інформаційних технологій є потреби саме реального сектору економіки.

Ще один важливий чинник – роль науки у трикутнику «реальний сектор – наука – інформаційні технології». Тут слід зазначити, що тут теж існує декілька тенденцій.

Зокрема, це двоспрямований інтенсивний обмін між складовими цього згаданого «трикутника». Так, наука «запозичує» інструментальні засоби інформаційних технологій у своїй діяльності. Дійсно, наукова діяльність потребує інтенсифікації як діяльності окремих вчених, так і співпраці всередині наукових колективів, а також – між науковими групами. Окрім того, відбувається формування не тільки «баз даних», але і «баз знань». У цих базах знань концентруються продукти інтелектуальної діяльності. Ці продукти починають оброблятися засобами «штучного інтелекту», із залученням хмарних ресурсів та

суперкомп'ютерів. З іншого боку, інформаційні технології створюють «мову взаємодії» із реальним сектором економіки. Тобто – це і формати, і канали обміну інформацією між наукою та реальним сектором економіки.

При цьому розвиток інформаційних технологій значною мірою вичерпав можливості розвитку на традиційній базі. Сформувався не тільки «стеля можливостей», але й «стіна прогресу». Ця «стіна» полягає у тому, що із-за незадоволених потреб інформаційних технологій стимулюється розвиток самої наукової парадигми.

Тут виникають взаємно конкуруючі тенденції.

Перша із них полягає у прагненні швидкого розвитку інформаційних технологій на базі найновіших розділів математики. Інша із тенденцій стосується поглиблення пізнання об'єктивних законів всесвіту, які є предметом вивчення природничих наук.

Перша із зазначених тенденцій в основному впливає на розвиток програмно-алгоритмічних засобів оброблення інформації. Друга тенденція більшою мірою стосується відповідних апаратних засобів.

Тут також слід зазначити, що завершеним інструментом діяльності як науки, так і реального сектору економіки є не окремо взяті програмні чи апаратні засоби, а збалансовані програмно-апаратні комплекси. Отже, це передбачає розвиток наукових напрямків, які «відповідають» за обидва зазначені напрямки [1].

Як один із висновків [1], зазначається, що інформаційні технології не здатні тільки за рахунок власних можливостей вирішувати усю множину проблем, що виникають. Тому доцільно ту частину проблем, яка не формалізується на сучасному етапі, доручити експерту. І тоді синергія у парі «експерт – інформаційна система» продукує і розв'язки задач реального сектору, і формування нових проблем науки, а також тенденцій розвитку суспільства.

Слід зауважити, що зв'язка «експерт – інформаційна система» потребує підтвердження «третього судді», а саме – експерименту, стендових, полігонних випробувань чи даних із експлуатації.

Отже, можна зазначити, що процес проектних досліджень дедалі усе більш акцентовано вимагає засобів об'єктивного підтвердження достовірності, адекватності, коректності і моделей, і методів, і засобів дослідження, а також – їх результатів та рекомендацій, що сформовані на такій основі.

Із огляду на актуальні стратегії суспільної діяльності і, в першу чергу, науково-технічної [7], сучасний етап полягає у тому, що різко інтенсифікувалися та взаємно інтегрувалися процеси у різних сферах. Зокрема, для реального сектору економіки характерним є тренд до зростання вимог, які пред'являються стосовно визначальних характеристик машин різного призначення. У першу чергу це стосується технічних та тактико-технічних характеристик обладнання енергетичної галузі, військових і транспортних машин тощо. Відповідно, традиційні підходи, які застосовувалися (рис. 3), натеper не задовольняють чинним вимогам.

Вони передбачають поступовий лінійний «конвейєр». На кожному етапі береться до уваги

якийсь чинник Φ_i . За рахунок створення математичної та чисельної моделей того чи іншого процесу або стану стає можливим здійснювати дослідження цих процесів і станів, а також розробляти відповідні рекомендації за критерієм $p_i : T(p) \rightarrow \max$. Далі цей набір стає стартовим для наступного $(i+1)$ етапу.

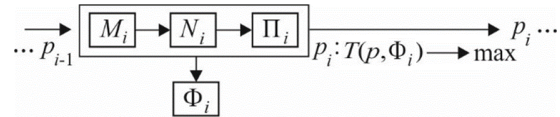


Рисунок 3 – Традиційний підхід до пошуку раціональних проектно-технологічних рішень елементів машин: M_i, N_i – математична і чисельна моделі процесів Π_i та факторів Φ_i [7]

Важливим аспектом традиційного підходу (рис. 3) є те, що послідовність «оптимальних» рішень за частинними критеріями, чинниками, процесами і станами не завжди призводить до оптимального технічного рішення у цілому.

Таким чином, виникає потреба у розробленні нового, комплексного підходу (рис. 4).

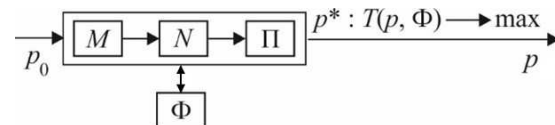


Рисунок 4 – Удосконалений підхід до пошуку раціональних проектно-технологічних рішень елементів машин: M, N – математична і чисельна моделі процесів Π та факторів Φ [7]

Тут передбачається, що пошук оптимальних рішень здійснюється на усьому комплексі параметрів p , чинників Φ та усієї множини процесів і станів.

Такий підхід (див. рис. 2) був реалізований, зокрема, стосовно розроблення нових методів зміцнення елементів машин на доповнення до описаних у [7–14].

Першочергове тут мова йде про метод дискретно-континуального зміцнення елементів машин. Тобто, одна із контактуючих деталей зміцнюється континуально (наприклад, за технологією мікродугового оксидування (МДО), а інша – дискретно (наприклад, шляхом електроіскрового лугування).

Тут важливо зазначити, що пошуку підлягають не тільки конструктивні схеми, але й також параметри технологічних операцій зміцнення.

Разом із тим і у випадку пошуку раціональних конструктивних, і – технологічних рішень математичні та чисельні методи, що створюються чи застосовуються, потребують, як уже зазначалося вище, об'єктивного підтвердження у ході експериментальних досліджень.

Якщо звернутися до проблеми створення озброєння та військової техніки із високими тактико-

технічними характеристиками, то вона формує напрямки та зміст досліджень та розробок багатьох дослідників [15, 16]. Особливу увагу привертають питання НДС при контактній взаємодії елементів конструкцій. Контактна механіка на теперішній час набула значного розвитку [17]. Серед інших особливо слід відзначити варіаційні формулювання на основі теорії варіаційних нерівностей та принципу Кальєра тощо [18, 19]. Із їх залученням удосконалено підходи методу скінченних елементів та методу граничних елементів [17–20]. Також суттєве просування спостерігається у мікроструктурних моделях поверхневих шарів контактуючих тіл (шорсткість, адгезія) [20–22]. Разом із тим існують певні проблеми при аналітичному, чисельному та експериментальному вивченні контактної взаємодії тіл [15–24]. Це викликано тим, що: для аналітичних досліджень доступним є дуже обмежений клас об'єктів [17]; чисельні методи [15–22] привносять певну, почасти неконтрольовану, похибку моделювання; при експериментальному ж визначенні [23, 24] контактного тиску області контакту важкодоступні, а привнесення будь-яких реєструючих середовищ чи давачів спотворює розподіл контактних сил.

Ще однією проблемою є непрогнозованість залежностей характеристик міцності контактуючих елементів конструкцій машин військового призначення від варіюваних проектних та технологічних чинників, а, отже, і недостатня обґрунтованість прогресивних технічних рішень при розробці нових та модернізації існуючих машин військового призначення. Слід підкреслити, що незважаючи на широкий спектр чинників, які враховуються при аналізі НДС та контактної взаємодії, розроблені нині методи і моделі не охоплюють одночасно такі важливі чинники, як реальна мікро- та макрогеометрія, а також відсутнє експериментальне підтвердження залежностей реальних властивостей поверхневих шарів матеріалів від технологічних прийомів їх модифікації. Ще одним негативним чинником є відсутність експериментального обґрунтування застосовності сучасних чисельних методів до розв'язання задач аналізу НДС, синтезу геометричної форми і параметрів технологій зміцнення із урахуванням особливостей контактних задач.

Усе це стоїть на заваді розв'язання широкої множини прикладних задач для реальних конструкцій. Особливі перепони виникають на шляху розв'язання подібних задач для контактуючих елементів військових машин, адже в силу конфіденційності такі об'єкти зазвичай не фігурують у відкритих публікаціях.

На відміну від попередників [15–24], у роботах [25–30] здійснено низку проривних розробок у розвитку чисельних та експериментальних методів:

1) створено нову методологію побудови розрахункових моделей елементів складних машинобудівних конструкцій, зокрема, контактуючих деталей на основі поетапного поширення множини чинників, які приймаються до уваги;

2) стосовно чисельних методів аналізу НДС контактуючих тіл отримали розвиток методи граничних та скінченних елементів у частині урахування

макро- та мікроструктурних чинників;

3) стосовно експериментальної фіксації розподілу компонентів НДС, контактних областей і контактного тиску модифіковані підходи за допомогою різних методів.

І, нарешті, усі ці розробки об'єднуються у єдиному комплексі досліджень.

Таким чином, розробки, описані у [25–30], порівняно із попередниками створюють потенційні методологічні переваги при дослідженні НДС та контактної взаємодії тіл складної форми. Особливо рельєфно ці переваги проявляються при їх сумісному комплексному застосуванні:

1) як основа для розрахунково-експериментального дослідження НДС складнопрофільних тіл;

2) як можливість обґрунтовувати прогресивні технічні рішення елементів машин цивільного та військового призначення із технічними і тактико-технічними характеристиками на світовому рівні.

За напрямом досліджень розроблено та у роботах [25–30] описано теоретичні основи методу розрахунково-експериментальних досліджень процесів і станів складних механічних систем. За тематикою досліджень удосконалено варіаційні постановки і створено напіваналітичні варіанти методів граничних та скінченних елементів та алгоритми перебудови скінченно-елементних моделей контактуючих складнопрофільних тіл. За об'єктом досліджень створені нові методи розв'язання систем нелінійних рівнянь і нерівностей типу методів додаткових зазорів [29]. За предметом досліджень із їх застосуванням установлені закономірності НДС контактуючих елементів гідроредукцій для танкових трансмісій, поршнів двигунів для тепловозів і бронетехніки та елементів технологічних систем для їх виготовлення тощо. На цій основі обґрунтовані прогресивні технічні рішення елементів машин цивільного та військового призначення із високими технічними і тактико-технічними характеристиками. Це свідчить про перспективність прикладних досліджень за цим напрямком.

Незважаючи на значне просування за напрямками дослідження, залишилася поза увагою низка проблем стосовно важливих чинників:

1. Експериментальне установлення закономірностей сукупного впливу макровідхилень геометричної форми та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів на контактну взаємодію елементів конструкцій.

2. Визначення залежності міцності контактуючих тіл від варіюваних проектно-технологічних параметрів.

3. Обґрунтування прогресивних технічних рішень задля забезпечення технічних і тактико-технічних характеристик машин цивільного та військового призначення на світовому рівні.

Це свідчить не тільки про перспективність та необхідність, але й про доцільність продовження та розвитку досліджень за вищезазначеним напрямком розрахунково-експериментальних досліджень.

Мета роботи – розрахунково-експериментальне забезпечення на світовому рівні технічних і тактико-технічних характеристик вітчиз-

няних машин цивільного та військового призначення шляхом аналізу НДС та контактної взаємодії елементів досліджуваних конструкцій, обґрунтування їх прогресивних технічних рішень і технологічних засобів при проектуванні та виготовленні за критеріями міцності та довговічності.

Завдання дослідження:

1. Розвиток методу розрахунково-експериментальних досліджень НДС контактуючих тіл на основі поєднання методу скінченних елементів та методу граничних елементів, з одного боку, та тензометрії, голографії та чутливих до тиску плівок – з іншого.

2. Удосконалення методу вимірювань контактного тиску із урахуванням впливу властивостей шару вимірювальних плівок.

3. Розрахунково-експериментальне дослідження НДС контактуючих елементів машин цивільного та військового призначення за варіювання конструктивних та технологічних параметрів.

4. Розв'язання прикладних задач аналізу контактної взаємодії та НДС елементів машин цивільного та військового призначення.

5. Розроблення на основі результатів розрахунково-експериментальних досліджень рекомендацій щодо обґрунтування технічних рішень елементів машин цивільного та військового призначення, а також технологічних засобів зміцнення, що забезпечують підвищення їх ТТХ до світового рівня та його перевершення за окремими складовими.

У цілому у ході досліджень розробляються рекомендації стосовно технічних рішень елементів цивільної та військової техніки, які підвищують їхні службові властивості і ТТХ зразків.

Зокрема:

1) за рахунок обґрунтування раціонального профілю бігової доріжки гідропередачі перспективної танкової трансмісії знижується рівень контактних напружень у спряженні із кульковим пошнем, а, отже, відповідно підвищується їх міцність; шляхом підвищення рівня пропускної потужності танкових бортових коробок передач створюється основа для підвищення потужності основного двигуна шляхом його форсування, а у підсумку – до відповідного зростання рухливості та, попутно, – захищеності;

2) за рахунок обґрунтування раціональних технологічних режимів підвищується коефіцієнт використання матеріалу при виготовленні силових гідроциліндрів;

3) шляхом обґрунтування форми зон дискретного зміцнення та властивостей шару корундової кераміки (при МДО) підвищується міцність та довговічність пари дискретно-континуально зміцнених деталей.

Базовий підхід до організації розрахунково-експериментальних досліджень елементів цивільних та військових машин. Основною складовою новизни пропонованого у роботі підходу є його комплексний характер, що полягає в урахуванні при аналізі контактної взаємодії тіл складної форми не окремих чинників, як у традиційних дослідженнях, а їх розширеної множини у взаємодії та

взаємовпливі. Для цього розглядаються дві підгрупи таких чинників: на мікро- та макрорівні. Перша підгрупа формується, наприклад, властивостями мікрогеометрії та матеріалів поверхневих шарів контактуючих тіл, а також технологій їхнього зміцнення. Друга – макрогеометричною формою їхніх поверхонь, які виконуються зближеними. За цих обставин мікро- та макромасштабні чинники неможливо розділити. А тому їх необхідно поєднувати у єдиних моделях. Крім того, задля досягнення варіативності досліджуваних елементів конструкцій машин військового призначення, усі значущі чинники, властивості, критерії та обмеження об'єднуються у єдиному параметричному просторі. Отже, вдається на єдиній методологічній основі сформувати загальну варіативну модель досліджуваної системи контактуючих тіл із урахуванням усіх важливих чинників. До того ж, у цей єдиний узагальнений простір залучаються параметри експериментальних моделей досліджуваних об'єктів.

На першому етапі єдина система розв'язувальних співвідношень формується застосуванням та розвитком варіаційних формулювань типу принципу Калькера або варіаційних нерівностей. Розвиток цих принципів полягає у такому: 1) єдиний підхід до покомпонентного формування енергетичних адитивних функціоналів; 2) усі ці чинники можуть бути варійованими (тобто розглядаються як збурювані) або шуканими (такими, що забезпечують певні службові характеристики машин цивільного та військового призначення).

На другому етапі із застосуванням методів скінченних та граничних елементів формується дискретизована система рівнянь та нерівностей. Її відмінністю від традиційних систем характерною особливістю є застосовність до розв'язань як задач аналізу, так і синтезу.

На третьому етапі для дослідження напружено-деформованого стану та контактної взаємодії складнопрофільних тіл залучаються експериментальні моделі та методи.

Таким чином, у теоретичному аспекті формується єдиний удосконалений розрахунково-експериментальний комплексний підхід до досліджень НДС контактуючих тіл складної форми. На завершальному етапі із застосуванням розроблених моделей здійснюються дослідження НДС контактуючих елементів реальних конструкцій машин цивільного та військового призначення. Перевагою та прикладною новизною підходу, що пропонується, є те, що вперше забезпечується достовірне та оперативне обґрунтування рекомендацій стосовно прогресивних технічних рішень цих машин зі світовим рівнем технічних і тактико-технічних характеристик.

У ході досліджень оновлено та розвинено методи параметричного моделювання складних механічних систем. Цей метод розширено на множини мікро- та макромасштабних чинників, які чинять прямий вплив на міцність контактуючих елементів машин військового та цивільного призначення. Крім того, розвинено розрахунково-експериментальний метод досліджень контактної взаємодії складнопрофільних тіл на основі поєднання теорії варіаційних

нерівностей, принципу Калькера, методу скінченних елементів, методу граничних елементів, з одного боку, та тензометрії, голографії та чутливих плівок – з іншого. Ці методи розвинені у напрямку підвищення збіжності за збереження точності розв'язків. Також ці методи втілені у вигляді комп'ютерних моделей, які становлять засоби досліджень.

Робочі гіпотези, на яких базуються описані у роботі дослідження: про можливість різкого підвищення адекватності та точності досліджень напружено-деформованого стану і контактної взаємодії шляхом поєднання розрахункових та експериментальних методів у єдиному комплексі; про можливість підвищення точності вимірювання контактної тиску завдяки урахуванню властивостей проміжних вимірювальних плівок, які розміщуються між тілами; про суттєву нелінійність впливу проектно-технологічних чинників на розподіл компонент напружено-деформованого стану, контактних областей і контактної тиску між тілами із поверхнями близької форми.

Ілюстрації застосування розробленої методології до розрахунково-експериментального дослідження елементів цивільних та військових машин та обладнання. Як ілюстрація застосування розробленої методології до розрахунково-експериментального дослідження елементів цивільних та військових машин та обладнання:

1) дослідження напружено-деформованого стану та контактної взаємодії елементів гідروпередач для перспективних танкових трансмісій;

2) обґрунтування схеми та параметрів технологічних операцій дискретно-континуального зміцнення деталей у рухомому контакті;

3) визначення впливу технологічних параметрів на міцність силових гідроциліндрів для механізації та автоматизації технологічного оснащення.

1) *Дослідження напружено-деформованого стану та контактної взаємодії елементів гідропередач для перспективних танкових трансмісій.* Для радіальних гідроб'ємних передач типу ГОП-900 (рис. 5, 6) для оснащення перспективних танкових трансмісій важливе значення мають: 1) НДС блоку циліндрів (корпусів насоса та гідромотора); 2) контактна взаємодія кулькового порня із біго-

вою доріжкою статорного кільця.



Рисунок 5 – Радіальна гідропередача ГОП-900 [31]

Відповідно, були здійснені розрахунково-експериментальні дослідження за пп. 1), 2). Нижче наведені отримані результати.

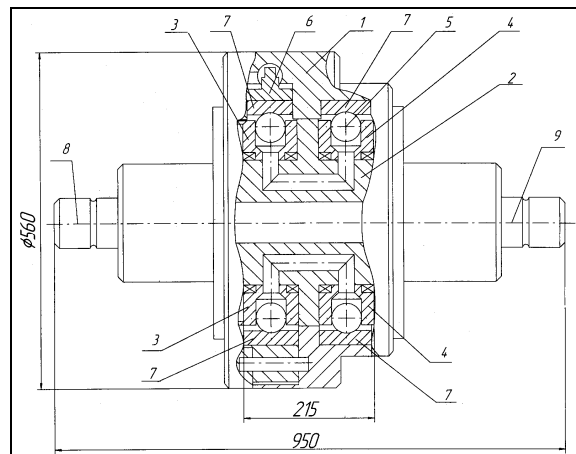
Напружено-деформований стан блоку циліндрів (корпусів насоса та гідромотора). Досліджується НДС циклічної частини блоку циліндрів (1/9 частина – за кількістю циліндрів) методами скінченних елементів та голографічної інтерферометрії.

На рис. 7 наведена модель фрагмента із оргскла, а на рис. 8 – розподіл прогинів точок його поверхні, отриманих чисельно. На рис. 9 – робочі моменти випробувань дії внутрішнього тиску на фрагмент блоку циліндрів. На рис. 10 – інтерферограма бокової поверхні. На рис. 11 – порівняльні розподіли прогинів (чисельно та експериментально визначені) уздовж середньої радіальної лінії бокової поверхні (чисельно – суцільна тонка лінія без маркерів – та експериментально визначені – суцільна товста лінія із маркерами) уздовж середньої радіальної лінії бокової поверхні (на множині рівномірно розташованих точок 1–11).

Видно, що отримані результати практично співпадають. Похибка – не вище 5%.

Рисунок 6 – Гідропередача ГОП-900 з кульковими поршнями [31]:

- 1 – корпус; 2 – блок цапфових розподільників;
- 3 – блок циліндрів насоса (ротор);
- 4 – блок циліндрів гідромотора (ротор);
- 5 – кулька-поршень; 6 – статор насоса;
- 7 – обойми (бігові доріжки) насоса і гідромотора;
- 8 і 9 – вхідний і вихідний вали гідропередачі



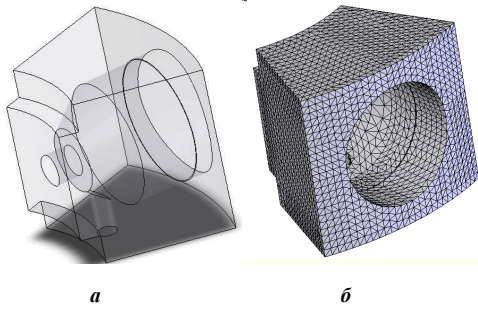


Рисунок 7 – Геометрична (а) і скінечно-елементна (б) моделі фрагмента блока циліндрів

Отримані результати підтвердили точність побудованої чисельної моделі, а на її основі побудована модель реального блока циліндрів зі сталі,

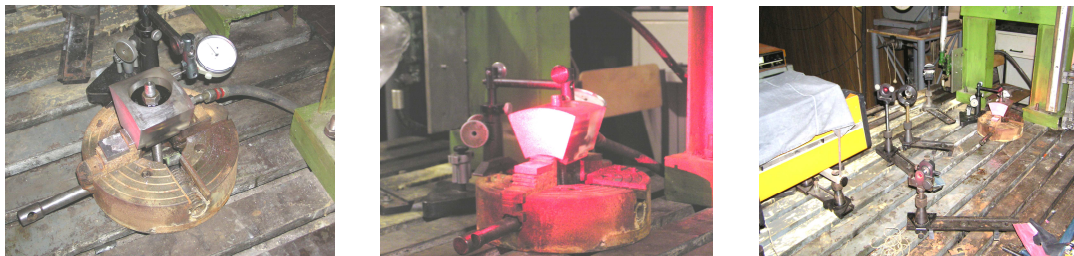


Рисунок 9 – Робочі моменти випробувань моделі фрагменту блока циліндрів ГОП-900

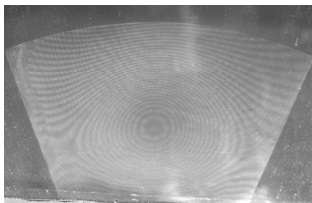


Рисунок 10 – Інтерфераційна картина досліджуваної поверхні моделі фрагмента блока циліндрів ГОП-900

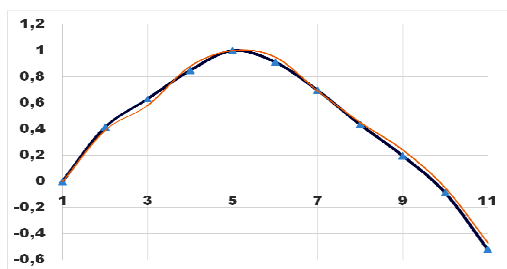


Рисунок 11 – Порівняльні розподіли відносних до максимальних значень прогинів

Контактна взаємодія кулькового поршня із біговою доріжкою статорного кільця. Досліджується контактна взаємодія кулькового поршня гідропередачі ГОП-900 із макетом фрагмента статорного кільця (рис. 12).

Експериментальна установка (рис. 13), де вони застосовуються, забезпечує притискання кулькового поршня до бігової доріжки. Блок, на якому вони розташовані, фіксується на спеціально зібраному пристосуванні з елементів комплексу універсальних складальних пристроїв. Зусилля прикладається за допомогою гвинтової пари, вимірюється за допомогою наклеєних на шток гвинта тензодатчиків, які приєднуються до тензOMETричного набору ІСД-3, показники якого

яка використана у подальших дослідженнях.

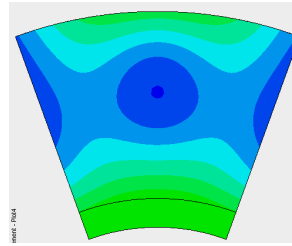


Рисунок 8 – Розподіл прогинів фрагмента блока циліндрів

протаровані (із застосуванням динамометра) для вимірювання сил, і передається через спеціальний вкладиш, який виключає прокручування поршня.

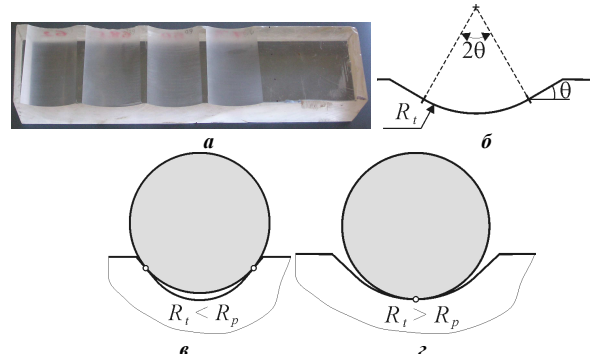


Рисунок 12 – Кульковий поршень гідропередачі ГОП-900 із макетом фрагмента статорного кільця:

а – блок із плексигласу з прямими біговими доріжками різних радіусів; б – загальний вигляд профілю бігової доріжки; в – характер її першопочаткового контакту з кульковим поршнем при значеннях радіусу її центральної частини меншого радіуса поршня; г – характер її першопочаткового контакту з кульковим поршнем при значеннях радіусу її центральної частини, більшого радіуса поршня

На рис. 14–16 наведені результати, отримані з одного блоку, експериментально із застосуванням чутливих до тиску плівок та чисельно, – з іншого, а на рис. 17 – розподіли контактного тиску, отримані чисельно та експериментально, для одного із варіантів профілю бігової доріжки статорного кільця. Видно повне співпадіння характеру цих розподілів та задовільна (похибка – до 5%) кількісна відповідність.

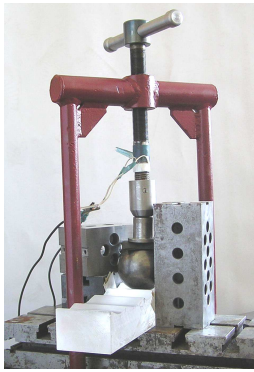


Рисунок 13 – Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження контактної взаємодії кулькового поршня радіальної ГОП із біговими доріжками різної форми



Рисунок 14 – Контактні відбитки у спряженні кулькового поршня з біговою доріжкою радіуса 34,25 мм при дії різних притискових сил: *a* – 1000 Н; *б* – 5000 Н; *в* – 6000 Н

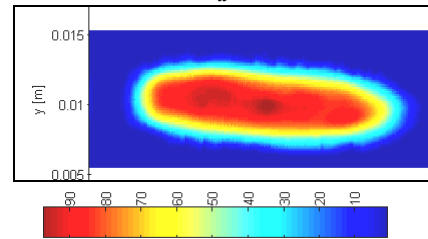
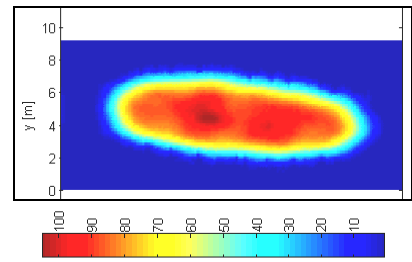


Рисунок 15 – Результати аналізу контактних відбитків на чутливих плівках Fuji при дії різних притискових сил: *a* – 5000 Н; *б* – 6000 Н

Це дало підставу використати побудовані гранично-елементні моделі для дослідження контактної взаємодії поршня зі статорним кільцем реальної гідропередачі.

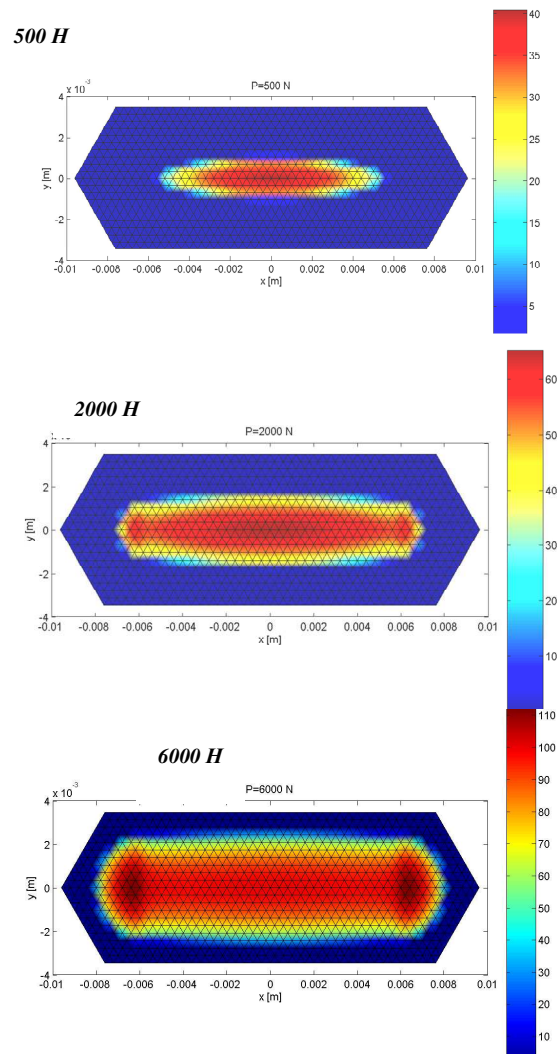
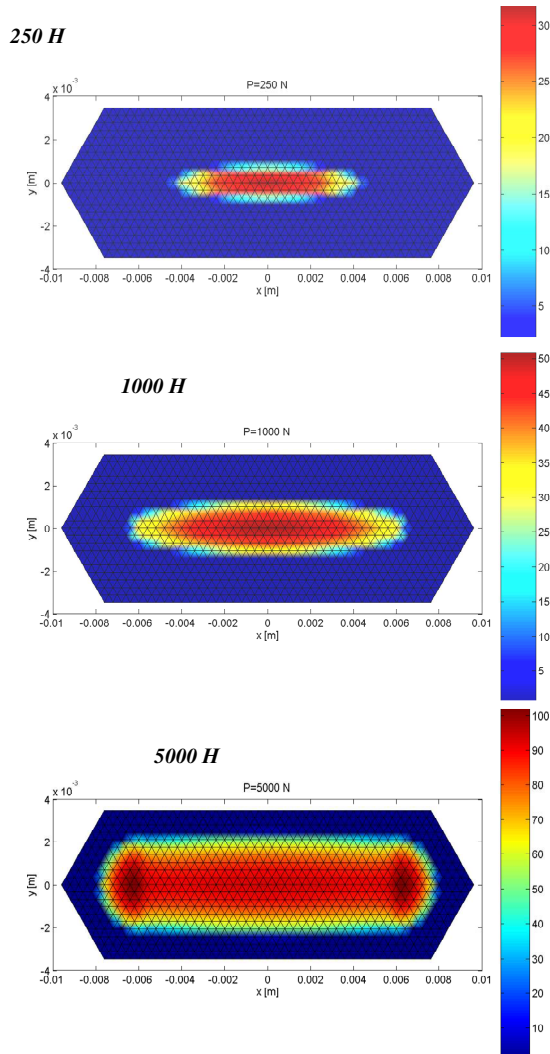


Рисунок 16 – Чисельні результати для макета бігової доріжки з радіусом 34,25 мм

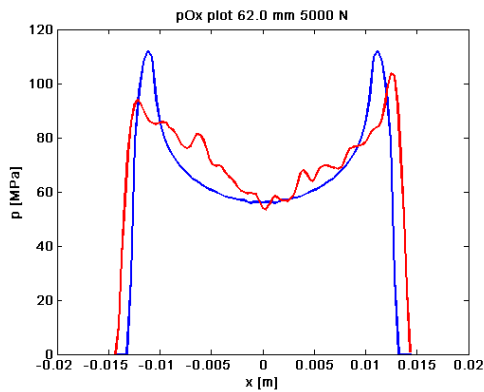


Рисунок 17 – Розподіли контактного тиску, отримані чисельно та експериментально, для одного із варіантів профілю бігової доріжки статорного кільця

2) *Обґрунтування схеми та параметрів технологічних операцій дискретно-континуального зміцнення деталей у рухомому контакті.* Однією з основних задач машинобудування, зокрема, двигунобудування, є вирішення проблеми подовження роботи високонавантажених пар тертя, – зазначено у [30]. Відмови деталей транспортної техніки за нормальних умов експлуатації відбуваються внаслідок різних видів корозії, ерозії, кавітації, старіння матеріалу тощо. У той же час практика експлуатації машин свідчить про те, що у багатьох випадках вони виходять з ладу з причини відмов вузлів тертя у результаті зношування робочих поверхонь або поломок, викликаних їх спрацюванням.

У двигунах внутрішнього згоряння ця проблема має першочергове значення, тому подовженню ресурсу важконавантажених вузлів тертя приділяється багато уваги.

Аналіз різних шляхів досягнення високих показників зносостійкості робочих поверхонь деталей пар тертя засвідчив, що поліпшення триботехнічних властивостей дасть змогу суттєво підвищити їх ресурс.

Нарівні з проблемою підвищення ресурсу вузлів тертя, велике значення має зменшення витрат потужності на подолання тертя у машинобудівних конструкціях, зокрема, в самому двигуні. При експлуатації двигуна частина потужності витрачається на внутрішні механічні процеси, зокрема, на подолання тертя у всіх трибосистемах, однією з яких є пара «шийка колінчастого вала – вкладиш підшипника ковзання». У цьому з'єднанні втрачається біля 16–19 % потужності. Надійність роботи деталей кривошипно-шатунного механізму у багатьох випадках залежить, також, від якості їх виготовлення. Зміцнення робочої поверхні шийки колінчастого вала, підвищення якості її обробки сприяє зменшенню втрат на тертя в парі "шийка колінчастого вала – вкладиш підшипника ковзання" і підвищує ресурсу її роботи.

Відомо багато способів зміцнення робочих поверхонь деталей, але всі вони мають недоліки, які суттєво впливають на виготовлення та надійність роботи пар тертя.

Альтернативою існуючим технологіям виро-

ництва деталей двигунів внутрішнього згоряння є розробка нових енергозберігаючих технологій дискретно-континуального зміцнення робочих поверхонь високонавантажених пар тертя, спроможних зменшити термін виготовлення деталей, суттєво підвищити їх ресурс та знизити енергетичні витрати.

Метою описаних нижче робіт є дослідження впливу на вузли тертя комбінованого використання технологій континуального та дискретного континуального зміцнення. Визначення науково обґрунтованих рекомендацій щодо застосування технологічних режимів зміцнення робочих поверхонь деталей на основі багатоваріантних комп'ютерних та експериментальних досліджень напружено-деформованого стану дискретно зміцнених поверхонь деталей двигунів, розробка і впровадження у виробництво нових технологій зміцнення із обґрунтованими таким шляхом схемами та параметрами, а також розробка нових вузлів тертя, що дасть змогу суттєво підвищити надійність та ресурс роботи ДВЗ, покращити їх виробничі, економічні та екологічні показники.

Для досягнення зазначеної мети поставлені такі теоретичні й практичні завдання [30]:

1. Розробити, сформулювати та систематизувати комплекс методів дослідження для вдосконалення існуючих методів зміцнення поверхонь тертя навантажених деталей ДВЗ.

2. Розробити комплекс математичних моделей взаємодії поверхонь тертя навантажених деталей, необхідних для проектування й дослідження.

3. Адаптувати концепцію узагальненого параметричного моделювання складних механічних систем, методи аналізу фізико-механічних процесів і синтезу конструктивних параметрів та нових технологій зміцнення для забезпечення підвищеного ресурсу роботи високофорсованих двигунів.

4. Обґрунтувати методику синтезу раціональних конструктивних параметрів і нових технологій для зміцнення приповерхневих шарів високо-навантажених деталей двигунів при нечітких множинних критеріях, обмеженнях і умовах експлуатації.

5. Розробити метод розрахунково-експериментального обґрунтування параметрів зон дискретного зміцнення поверхонь чавунних і сталевих деталей на основі результатів лабораторних досліджень мікроструктури металу, мікротвердості, жорсткості, триботехнічних параметрів і втомної міцності.

6. На базі цих питань запропонувати і обґрунтувати новий комплексний метод обробки поверхонь тертя високо навантажених деталей двигунів, одна з яких зміцнюється методом дискретного зміцнення, інша – континуального зміцнення.

7. Запропонувати нову пару тертя на базі нових методів зміцнення на основі високо інтенсивного пластичного деформування поверхневих шарів металу.

Останніми роками активний розвиток отримали процеси дискретної обробки поверхонь, які дають можливість отримати на них чередування в

заданій послідовності (дискретно) високоміцних і пластичних мікроділянок, аналогічно до природних композиційних матеріалів, армованих твердими та міцними фазами. Як відомо, така структура забезпечує високу конструкційну міцність матеріалу, тобто дає змогу одночасно отримати високі показники міцності, пластичності, в'язкості руйнування. Для пар тертя завдання значно ускладнюється, оскільки необхідно не просто підвищити конструкційну міцність матеріалу вала, а й забезпечити високі трибологічні характеристики поверхонь (шийок), що працюють у контакті з контртілом (вкладишем), і при цьому не збільшити зношувальної здатності матеріалу шийки, тобто не призвести до прискореного зносу вкладиша.

Дослідження Інституту проблем міцності ім. С. Писаренка НАН України в області адгезійного та когезійного зношування поклали початок розвитку нових технологій нанесення дискретних зносостійких покриттів на деталі електроіскровим легуванням. Основна суть створення зносостійких дискретних покриттів полягала в нанесенні на робочу поверхню деталі дискретного (острівкового) покриття та його подальшому пластичному деформуванню.

Протягом останніх десятиліть у різних галузях науки і техніки робилися спроби розробки нових нетрадиційних способів зміцнення деталей, які були би позбавлені багатьох недоліків класичних технологій. Таким новим процесом може стати спосіб формування зносостійкого шару робочої поверхні деталі, в основі якого лежить дискретне зміцнення електроіскровим методом [30].

Виходячи із зазначеного, розробка науково-технологічних основ підвищення ресурсу двигунів і відповідальних деталей силових вузлів за рахунок використання дискретного зміцнення і споріднених технологій є перспективним напрямком підвищення їх триботехнічних характеристик.

В основі метода дискретного зміцнення поверхонь сталевих і чавунних деталей взято метод електроіскрового легування [30]. Спочатку цей метод технологічно був дуже складний у використанні, мав складне обладнання. Він використовувався не тільки для легування поверхонь, а і для нанесення антикорозійних покриттів. Процес електроіскрового легування має ряд особливостей, які сприяють його поширенню [30]: перенесення матеріалу залежить від ерозійної стійкості анода і катода; можливість формування покриттів з характеристиками широкого діапазону значень; висока адгезія електроіскрового покриття з основним матеріалом; відсутність нагріву і деформації деталі в процесі обробки; товщина шару, що наноситься, і глибина легування обмежені; поверхня має велику шорсткість; продуктивність процесу невисока; на поверхні можливе формування каверн.

Розвиток цього напрямку було продовжено з метою розробки технології зміцнення поверхонь сталевих і чавунних деталей. Такий спосіб формування зносостійкої поверхні деталі описано у [30]. Суть його полягає у конфігурації нанесення зміцнених зон при перенесенні металу з анода на ка-

тод у момент іскрового розряду між ними на великогабаритних деталях. Одночасно з цим перенесенням відбувається зміцнення та мікролегування приповерхневої зони деталі, що призводить до зміни хімічного складу і фізико-механічних властивостей матеріалу основи у плямі контакту з електродом.

Окрім того, знайшли широке застосування технології мікродугового оксидування при зміцненні робочих поверхонь алюмінієвих деталей ДВЗ. Зокрема, на поршнях з алюмінієвих сплавів знаходить застосування технологія оксидокерамічних покриттів [10–14]. У цьому випадку формування покриття відбувається за рахунок мікродугового оксидування алюмінієвої поверхні самої деталі, а покриття має більш високу адгезію з алюмінієвою основою. Це вже не покриття, а керамічний шар. Його одержують у гальваностатичному і потенціостатичному режимах методом анодного мікродугового оксидування (АМДО). Такий керамічний шар одержують за допомогою установки, що є трифазним джерелом живлення, яке формує імпульси спрямованої напруги 450 В частотою 150 Гц із амплітудою в багатокомпонентному лужному електроліті складу $KOH + NaSi + SiO_nHO$ з добавками фосфорутиримуючих інгредієнтів у гальваностатичному і потенціостатичному режимах методом АМДО [30].

Керамічний шар в основному складається з твердофазних розчинів окислів $\alpha-Al_2O_3$ і $\gamma-Al_2O_3$, які складають (60–70) %, та інших окисних сполук елементів, які входять до складу сплаву й електроліту. Відомо, що структура $\alpha-Al_2O_3$ має більш високу твердість, ніж структура $\gamma-Al_2O_3$, і більш високу зносостійкість.

В НТУ «ХПІ» розроблена експериментальна установка, яка дає можливість вести корундування при анодно-катодній напрузі 1000–1200В із щільністю струму біля $(1-1,3) \cdot 10^4$ А/м², забезпечити високу швидкість утворення корундового шару, а спеціальні форми анодного й катодного напівперіодів напруги дають можливість очистити корундову поверхню від окислів з малою адгезією до основного металу [30].

У цілому заявлені дослідження мають такі складові. Спочатку виконуються теоретичні дослідження. Для виконання цього етапу розробляється теоретична основа, математичний апарат для багатоваріантного дослідження та оптимізації характеристик стану поверхневого шару в поєднанні із станом матеріалу на глибині, здійснюється аналіз елементів механічної системи взаємодіючих тіл, поведінка якої (математична модель) описана в загальному вигляді. Для дослідження реакції складних механічних систем на зовнішні впливи застосовується метод скінченних елементів (МСЕ), який реалізовано у вигляді сучасних програмних пакетів (ANSYS, NASTRAN). Крім того, засоби скінченно-елементного моделювання інтегруються в системи автоматизованого проектування (Creo, SolidWorks). Розв'язання цієї задачі здійснюється з використанням програмного комплексу для аналізу фізико-механічних процесів із

використанням потужних сучасних розрахункових систем CAD/CAM/CAE. Створений унікальний потужний інструмент комп'ютерного моделювання використовується для розв'язання багатьох прикладних задач, у тому числі – для різних методів зміцнення.

Потім виконуються експериментально-дослідні роботи, розробляються програми досліджень, здійснюються випробування дослідних зразків елементів пари тертя на машинах тертя СМЦ-2 лабораторії механічних досліджень та зносостійкості [30]. Після отримання результатів попередніх досліджень подальші роботи проводяться на моторних стендах з дизельним двигуном 4ЧН 12/14 в машиному залі кафедри «ДВЗ» НТУ «ХП». Після закінчення випробувань здійснюється аналіз отриманих результатів.

Фізико-хімічна сутність процесу дискретного зміцнення. Суть методу ЕЮ полягає в перенесенні металу з анода на катод (оброблювану поверхню деталі) в момент іскрового розряду між ними.

Спосіб дискретного електроіскрового зміцнення (ДЕЗ), що розглядається, відрізняється від описаної вище ЕЮ тим, що електророзряд здійснюється при зіткненні анода з деталлю в навколишньому середовищі. Іншими словами, процес включає елементи точкового зварювання. У результаті забезпечується зміцнення поверхонь тертя і поліпшення триботехнічних характеристик [30]. Анод виконаний у вигляді диска певної товщини. Переміщуючи його відносно оброблюваної поверхні, отримують зміцнені ділянки у вигляді розташованих на певній відстані островців або ліній довільної конфігурації (рис. 18).

У цій роботі використана схема островцевого зміцнення. Дискретне покриття складається з двох частин: верхній прирослений шар, який знаходиться над поверхнею деталі, і шар, розташований під її поверхнею.

Перенесений матеріал перемішується з основним. У процесі наступного охолодження в більшості випадків (якщо анодом являється метал) формуються пересичені тверді розчини із вкрапленнями дрібнодисперсних надлишкових фаз. Природно, що ці зони відрізняються за механічними властивостями, зокрема, твердістю, від металу основи [30]. При цьому поверхня приросеної зони – нерівна, є гострі виступи, що чергуються з западинами (каверни), які є концентраторами напружень. Після завершення нанесення дискретного покриття визначають максимальний приріст над поверхнею Δ_{\max} , максимальну глибину каверн C_{\max} і розраховують припуск h з умови видалення каверн. На рис. 19, *a* наведена схема шліфування поверхні, а на рис. 19, *б* – її вигляд до і після ДЕЗ [30].

Виходячи з мети досліджень і з урахування результатів попередніх робіт для отримання необхідних властивостей зміцнених поверхонь елементів колінчастого валу (типовий приклад зміцнюваних деталей) були обрані електроди із легованих сталей 08X18H10T, P6M5 і ШХ15 [30]. Ці сталі відносяться до різних структурних класів (перша – до аустенітного, друга – до ледебуритного, третя – до мартенси-

тного), істотно відрізняються вмістом вуглецю і легуючих елементів, що дало можливість об'єктивніше оцінити їх вплив на оброблені поверхні і вибрати той електрод, який би найбільшою мірою забезпечував необхідні властивості. Окрім сталі 42ХМФА, використовуваний для виготовлення валів, ДЕЗ піддавали Сталь 45, яка була вибрана як основа. Вона не містить легуючих елементів, що спрощувало аналіз їх розподілу в плямі при перенесенні з анода під час електророзряду.

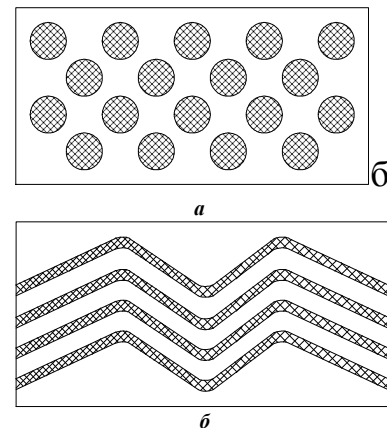


Рисунок 18 – Різновиди дискретних покриттів (схема): *a* – островцеве; *б* – лінійне [30]

Описаний спосіб ДЕЗ має досить високу продуктивність, забезпечує стабільність процесу, не знижує втомну міцність та дає можливість управляти величиною дискретності [30].

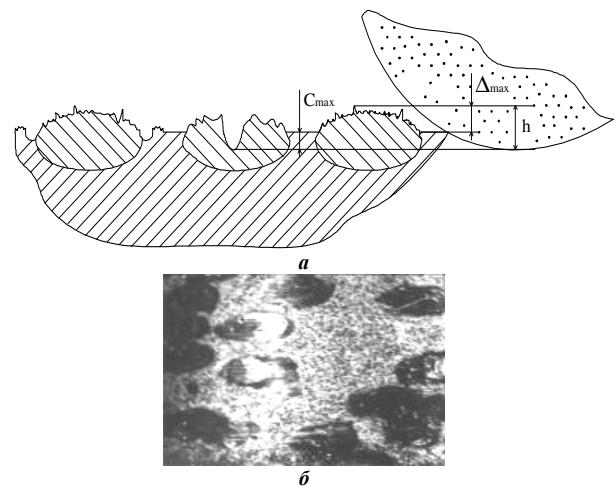


Рисунок 19 – Формування поверхні при шліфуванні: *a* – схема, *б* – розташування дискретних зміцнених областей; $\times 10$ [30]

Характер поверхні, що формується при дії дискретних розрядів, показаний на рис. 20.

Мікроструктура в зоні розряду на поперечних шліфах при обробці аустенітним електродом (08X18H10T) для зразків з чавуну наведена на рис. 21, *a*, із сталі 42ХМФА – на рис. 21, *б* [30].

Перенесений з анода матеріал має вигляд білого шару, що особливо чітко видно на рис. 21, *a*. Межа між «білим» шаром і розташованим під ним металом різко виражена, лінія сплавлення суцільна, несплавлень, розшарувань, зашлакування, раковин на границі

не спостерігалось.

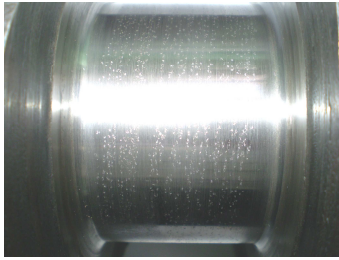


Рисунок 20 – Зовнішній вигляд шийки колінчастого валу після ДЕЗ до полірування

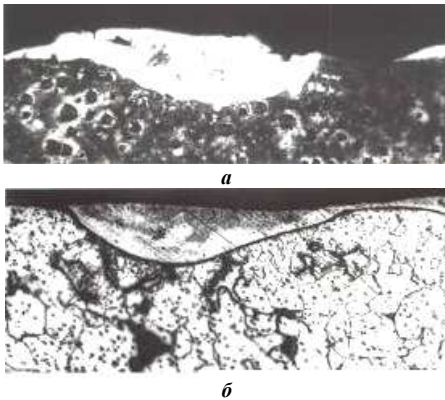


Рисунок 21 – Мікроструктура поперечного шліфа зразків високоміцного чавуна (а) і сталі 42ХМФА (б) в зоні розряду; $\times 100$; електрод – сталь 08Х18Н10Т



Рисунок 22 – Мікроструктура поперечного шліфа зразка сталі 45 в зоні розряду; $\times 100$; електрод – сталь 08Х18Н10Т

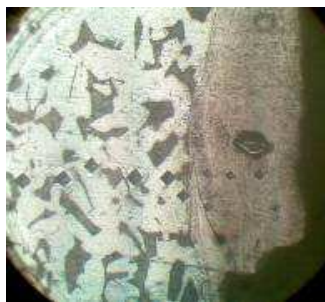


Рисунок 23 – Структура сталі 45 в зоні розряду; $\times 500$; електрод – сталь 08Х18Н10Т

При більшому збільшенні під «білим» шаром можна побачити перехідну зону (підшар). Його глибина змінюється в межах 25–70 мкм. На рис. 22 та рис. 23 наведена мікроструктура зони розряду з відбитками твердості, розмір яких дає якісне уявлення про зміцнення поверхневого шару. Як видно з рисунка, в ньому виявляється мікроструктура, і він вже не виглядає білим [30].

Схематично будову зони дискретного зміцнення представлено на рис. 24 [30].

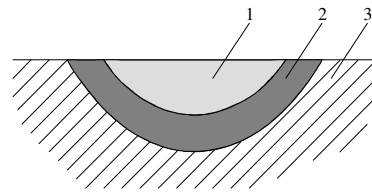


Рисунок 24 – Схематичне зображення зони дискретного зміцнення після шліфування:

1 – «білий» шар; 2 – підшар; 3 – основний метал

Попередні дослідження [30] засвідчили, що після ДЕЗ твердість зразків зі сталі та чавуну у зонах дискретного зміцнення суттєво зростає, а в основному матеріалі – не зменшується. Також встановлено різке зниження коефіцієнту тертя та зношування. Таким чином, досягається різке підвищення трибomeханічних характеристик деталей у парі тертя.

Створення мета-моделей для аналізу модельованих процесів і синтезу конструкторсько-технологічних параметрів зміцнених поверхонь деталей ДВЗ. В узагальненому параметричному просторі будується база даних, у якій сконцентровані результати проведених досліджень. Це дає змогу будувати мета-системи, які є поверхнями відгуку. У них містяться залежності контрольованих характеристик від варійованих параметрів. Ці залежності є основою для побудови мета-моделей, які по суті є апроксимаційними поверхнями відгуку. При цьому можливо зчитувати створювану базу даних (БД), обробляти отримуваний масив інформації та будувати актуальну для тієї чи іншої задачі апроксимаційну поверхню. Також можлива побудова таких поверхонь на різних множинах варійованих параметрів, як звужених, так і розширюваних.

Однією із принципових відмінностей та переваг створюваної мета-моделі, яка може бути реалізована у різноманітних форматах, є її «динамічність». Ця риса дає змогу, на відміну від традиційних «статичних» баз даних, постійно поповнювати масив інформації, яка надходить із аналізу результатів чисельних досліджень. Надалі уже на розширеній базі даних апроксимаційні поверхні уточнюються та модифікуються. При цьому як базові можуть бути використані множини параметрів, вплив варіювання яких на ті чи інші технічні характеристики досліджуваних об'єктів є найбільш вагомим. Ця обставина досліджується шляхом визначення чутливості контрольованих величин до варіювання різних параметрів.

Таким чином, відштовхуючись від початкового варіанту мета-моделі, її можна удосконалити, розширювати, поповнювати (рис. 25).

Створювана та змінювана метамодель надає принципово нові можливості для розробки спеціалізованих баз знань. Підхід, який був запропонований, уможливило оперативність при розв'язанні задачі параметричного аналізу та синтезу раціональних технічних рішень за окремими критеріями

чи їх множиною.

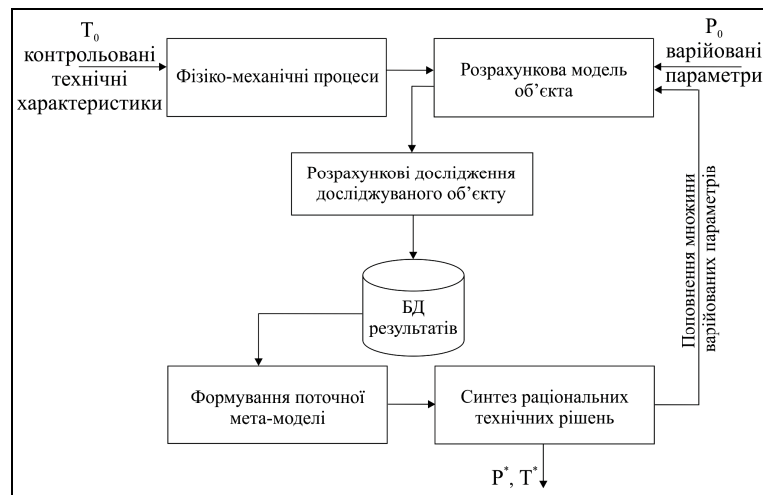


Рисунок 25 – Структура функціонування мета-моделі для визначення раціональних технічних рішень P^* , що дають змогу досягати технічних характеристик T^*

Створювана та змінювана метамодель надає принципово нові можливості для розробки спеціалізованих баз знань. Підхід, який був запропонований, уможливує оперативність при розв'язанні задачі параметричного аналізу та синтезу раціональних технічних рішень за окремими критеріями чи їх множиною.

Здійснені чисельні дослідження дозволили виявити два ефекти, названі « Δ -ефект» та « σ -ефект». Перший з них полягає у позитивному характері зміни деформованого профілю у контакті зміцнюваного елемента машини зі спряженими елементами. Другий ефект полягає у створенні сприятливого залишкового напруженого стану після зміцнення досліджуваного об'єкту із застосуванням нової дискретно-континуальної технології. Після накладення на розподіл робочих напружень створюється результуючий напружений стан, значно віддалений від небезпечного рівня, у порівнянні з незміцненими деталями машин.

На рівні мікроструктури встановлено, що контактна взаємодія здійснюється по всій площі спряження деталей, однак нормальні зусилля передаються в основному через зони дискретного зміцнення. Внаслідок взаємного руху контактуючих деталей в зоні їх спряження виникають зусилля тертя, які розподіляються в цій зоні нерівномірно. У свою чергу, нерівномірним буде і зношування.

Перелічені фактори створюють позитивні тенденції у всьому комплексі трибомеханічних характеристик у зоні взаємодії деталей, одна з яких піддана дискретному зміцненню.

Запропоновано і доведено ефективність комбінованого використання технологій дискретного зміцнення робочих поверхонь сталевих та чавунних деталей і технології гальвано-плазмового перетворення робочих поверхонь алюмінієвих деталей. Такий спосіб виготовлення пар тертя дає можливість суттєво покращити умови їх роботи та підвищити надійність і довговічність.

Результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану пари дискретно-

континуально зміцнених деталей. Для остаточного визначення науково обґрунтованих рекомендацій щодо комбінованого застосування технологій дискретного зміцнення та гальвано-плазмового перетворення алюмінієвих поверхонь при виготовленні важкоавантажених пар тертя, розроблення технологічних режимів та підбір обладнання і технологічних приладів із метою забезпечення ресурсу ДВЗ, була проведена низка лабораторних досліджень та додаткових багатоваріантних комп'ютерних розрахунків із використанням розроблених програм.

У ході досліджень проведено аналіз впливу на дискретно зміцнений шар режимів обробки, сили струму та хімічного складу електроду зміцнення та розраховані і вивчені варіювання коефіцієнту дискретності зміцненої поверхні (тобто відношення площі зміцнених зон до загальної площі поверхні деталі). Це відбувається за рахунок зростання розмірів деталі за межами зони дискретного зміцнення.

На даний час відсутні дослідження контактної-фрикційної взаємодії у сполученнях, що містять, з одного боку, деталі, оброблені за технологією дискретного зміцнення, а з іншого, – оброблені за технологією гальвано-плазмового перетворення поверхні («корундування»). Це призводить до необхідності вирішення декількох нових актуальних і важливих питань. Зокрема, це – числове дослідження НДС в зоні контактного сполучення таких деталей, аналіз зношування і втрат на тертя. Наступний етап досліджень – експериментальні дослідження на лабораторних зразках. Нижче представлені результати даних досліджень.

При числовому дослідженні НДС отриманої системи деталей, зміцнених методами дискретного зміцнення і корундування, використовувався підхід і математична модель, запропоновані раніше. На цій основі для механічної системи, представленої на рис. 26, розроблена скінченно-елементна модель, яка містить представницький об'єм (рис. 27). Даний об'єм (комірка) дає можливість на мікрорівні промоделювати НДС взаємодіючих

тіл, розподіл контактного тиску, оцінити тертя і зношування в сполученні деталей, перевівши дослідження на реальний макромасштаб.

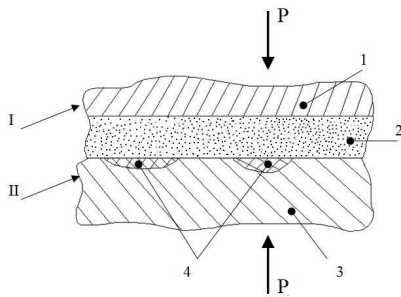


Рисунок 26 – Схема контактної взаємодії деталей:
I – деталь з алюмінієвого сплаву АМО20-1 (1), зміцнена шляхом гальвано-плазмового перетворення поверхні зі створенням корундового шару (2), II – деталь (основний матеріал – сталь, чавун (3)), зміцнена методом дискретного зміцнення (ДЗЗ – дискретно-зміцнена зона (4))

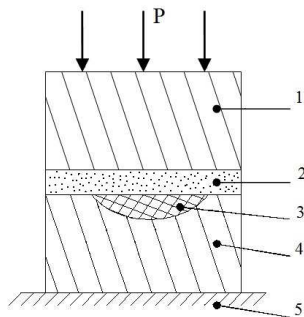


Рисунок 27 – Схема моделі представницької ґратки механічної системи: 1 – алюмінієвий сплав АМО20-1, 2 – шар Al_2O_3 , 3 – ДЗЗ, 4 – основний матеріал, 5 – основа (жорстка основа)

При завданні механічних властивостей корундового шару враховувався вплив двох факторів: мікрогеометрія виступів-западин на поверхні шару і його пористість. Залежно від режимів технологічного процесу ці величини можуть змінюватися в досить широких межах. Для розрахункових досліджень використовуваним матеріалам присвоїли модулі пружності $E_2 = 3,45 \cdot 10^{11}$ Па, інші матеріали мали властивості $E_1 = 7 \cdot 10^{10}$ Па, $E_3 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па (високолегована сталь), $E_4 = 1,1 \cdot 10^{11}$ Па (чавун), жорстка основа – моделювалася як жорстке закріплення [30].

На рис. 28 представлені геометрична і скінченно-елементна моделі представницької ґратки механічної системи, а також геометрична модель із доданими зовнішніми навантаженнями. При цьому на вертикальні стінки моделі накладалися умови симетрії таким чином, щоб геометрична модель являла собою деяку внутрішню частину загальної моделі. Скінченно-елементна модель налічувала 200 тис. гексагональних елементів. Прикладається навантаження 100 МПа.

За підсумками розрахунків визначалися поля

розподілу компонент НДС. На рис. 29 представлені розподіли максимальних еквівалентних напружень для елементів системи.

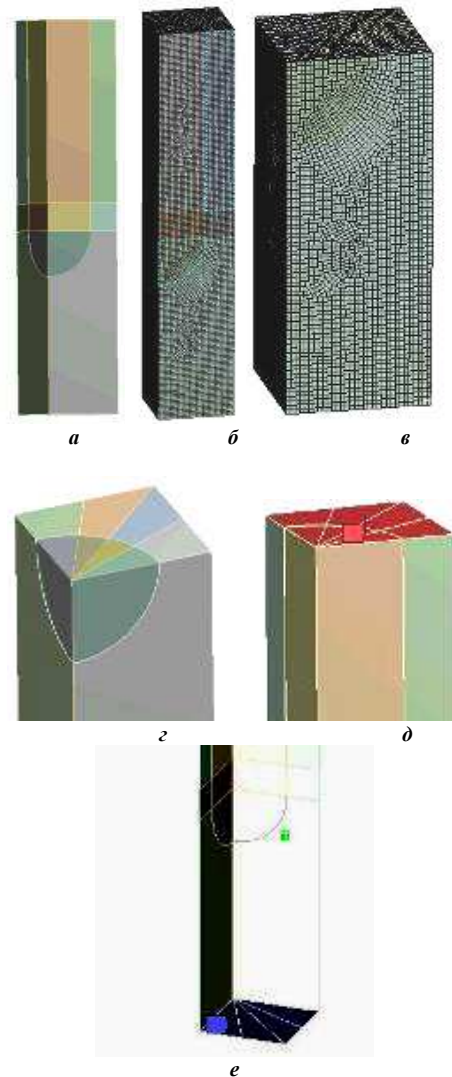


Рисунок 28 – Геометрична (а) і скінченно-елементна моделі (б), у т.ч. нижньої частини (ДЗЗ і основний матеріал) (в), нижня частина моделі (ДЗЗ і основний матеріал), зовнішні навантаження: тиск, що прикладається (д) і закріплення (е)

На рис. 30 представлений контактний тиск в області контактної взаємодії елементів системи, що розглядається. Також за результатами проведених розрахунків були визначені переміщення уздовж осьової координати по шляху, який проходить через діагональ моделі, на рис. 31 представлені шлях і переміщення (уздовж вертикальної осі відкладені значення переміщень в м, а уздовж горизонтальної – довжина шляху, тобто довжина уздовж діагоналі моделі, в м).

З аналізу представлених даних видно, що в області ДЗЗ (див. рис. 26) спостерігається більш високий рівень контактного тиску, ніж в області контактування з основним матеріалом деталі II. Відповідно, якщо в парі «корундовий шар – сталь» коефіцієнт тертя нижче, ніж у парі «корундовий шар – основний матеріал деталі II», то при їх вза-

емному русі виникає два ефекти.

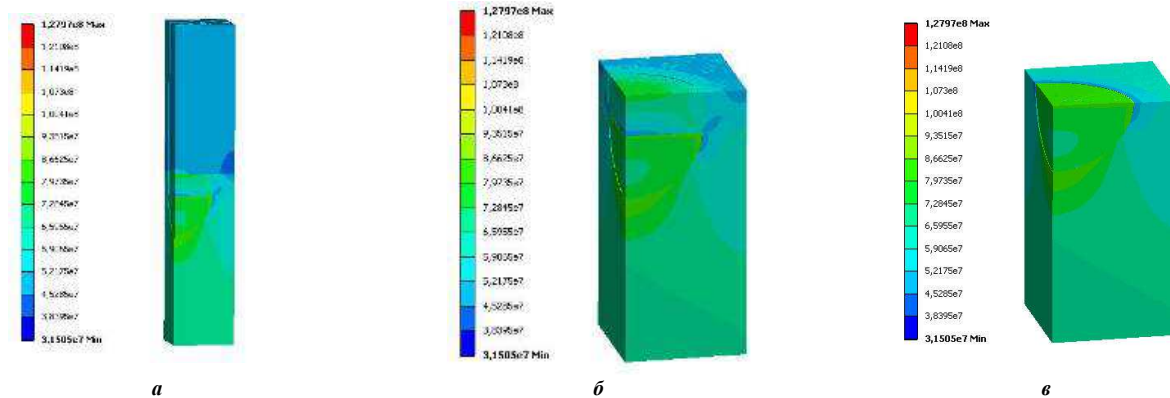


Рисунок 29 – Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом: *a* – максимальні еквівалентні напруження в усій моделі; *б* – максимальні еквівалентні напруження (шар Al_2O_3 , ДЗЗ, основний матеріал); *в* – максимальні еквівалентні напруження (шар Al_2O_3 , ДУЗ, основний матеріал)

Перший пов'язаний зі зменшенням сумарної величини тертя у сполученні деталей *I* і *II* (оціночно – в 1,2–1,8 рази). Другий визначає зниження зношування, що пояснюється більш низькою інтенсивністю зношування високолегованої сталі порівняно з чавуном.

У результаті за рахунок раціональної організації обчислювальних робіт вдалося оперативно провести розв'язання десятків варіантів задач, а також провести аналіз та узагальнення результатів. Вони є основою спеціалізованої бази даних, яка містить основні результати проведених досліджень.

У результаті проведених досліджень встановлено: 1) зони дискретного зміцнення при прикладанні навантаження дещо виступають над номінальним рівнем поверхні дискретно зміцненої деталі; таким чином, більш інтенсивна взаємодія між контактуючими тілами здійснюється переважно через зони дискретного зміцнення; цей ефект, названий « Δ -ефект», підтвердився; він створює сприятливі умови для роботи контактуючих деталей; 2) підтвердився також раніше виявлений « σ -ефект», який полягає у підвищенні загального запасу міцності за рахунок перерозподілу контактного тиску на зони дискретного зміцнення, матеріал яких має значно вищі механічні властивості порівняно із основним матеріалом деталі; 3) побудовані та застосовані скінченно-елементні моделі продемонстрували вирівнювання характеру розподілу компонент НДС порівняно із тими, що були отримані із використанням більш простих моделей; 4) встановлено, що раціонально коефіцієнт дискретності слід забезпечувати на рівні $\phi = 0,6 \div 0,75$.

На основі проведених досліджень вдалося перейти до аналізу ефективності роботи контактуючих пар із дискретно зміцненими робочими поверхнями деталей. Для цього було визначено зведений коефіцієнт тертя із урахуванням нерівномірності розподілу контактного тиску, а також сил тертя, причому для випадку також комбінованих методів зміцнення. Отже, розрахунковим

шляхом спрогнозовано значне зростання енергоефективності застосування дискретно зміцнених деталей на етапі експлуатації за рахунок зниження сил тертя.

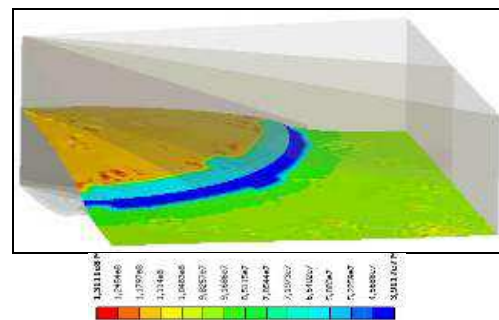


Рисунок 30 – Розподіл контактного тиску

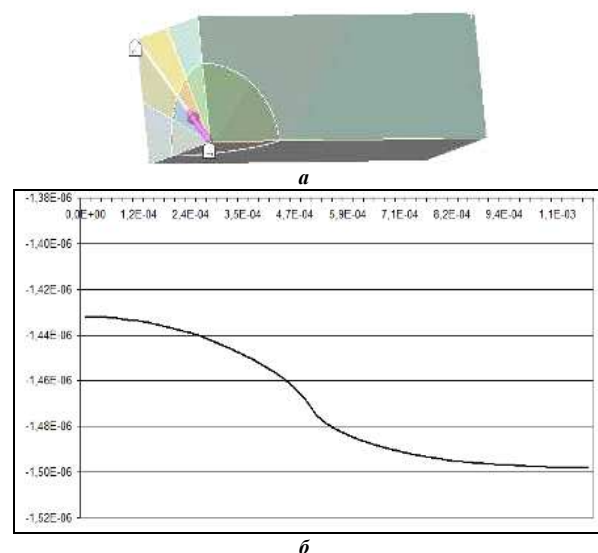


Рисунок 31 – Шлях для визначення переміщень (*a*) і графік переміщень (уздовж вертикальної осі відкладені значення переміщень в М, а уздовж горизонтальної – довжина шляху, тобто довжина уздовж діагоналі моделі, в М) (*б*)

Таким чином, проведений комплекс досліджень із застосуванням комп'ютерного моделю-

вання є достатньо суттєвим підґрунтям для забезпечення ефективних технологічних рішень при проектуванні та виготовленні вузлів тертя з використанням технологій дискретного зміцнення та мікро дугового оксидування.

Запропоновано і доведено ефективність комбінованого використання технологій дискретного зміцнення робочих поверхонь сталевих та чавунних деталей і технології гальвані–плазмового перетворення робочих поверхонь алюмінієвих деталей в важконапружених вузлах тертя. Такий спосіб виготовлення пар тертя дає можливість суттєво покращити умови їх роботи та підвищити надійність і довговічність.

Зони дискретного зміцнення при прикладанні навантаження дещо виступають над номінальним рівнем поверхні дискретно зміцненої деталі; таким чином, більш інтенсивна взаємодія між контактуючими тілами здійснюється переважно через зони дискретного зміцнення; цей ефект, названий раніше « Δ -ефект», підтвердився; він створює сприятливі умови для роботи контактуючих деталей;

Підтвердився також раніше виявлений « σ -ефект», який полягає у підвищенні загального запасу міцності за рахунок перерозподілу контактного тиску на зони дискретного зміцнення, матеріал яких має значно вищі механічні властивості порівняно із основним матеріалом деталі;

Побудовані та застосовані скінченно-елементні моделі продемонстрували вивірнювання характеру розподілу компонент НДС порівняно із тими, що були отримані із використанням більш простих моделей. Установлено, що раціонально коефіцієнт дискретності слід забезпечувати на рівні $\phi = 0,6 \div 0,75$.

У результаті за рахунок раціональної організації обчислювальних робіт вдалося оперативно провести розв'язання десятків варіантів задач, а також провести аналіз та узагальнення результатів.

Таким чином, проведений комплекс досліджень із застосуванням комп'ютерного моделювання є достатньо суттєвим підґрунтям для забезпечення ефективних технологічних рішень технології дискретного зміцнення.

На основі проведених досліджень вдалося перейти до аналізу ефективності роботи контактуючих пар із дискретно зміцненими деталями. Для цього було визначено зведений коефіцієнт тертя із урахуванням нерівномірності розподілу контактного тиску, а також сил тертя, причому для випадку також комбінованих методів зміцнення. Отже, розрахунковим шляхом спрогнозовано значне зростання енергоефективності застосування дискретно зміцнених деталей на етапі експлуатації за рахунок зниження сил тертя.

Стендові випробування дискретно-континуально зміцнених пар пар тертя. Для підвищення ресурсу роботи високофорсованих двигунів було запропоновано нову конструкцію вузла тертя з використанням допрацьованих технологій дискретного зміцнення та мікродугового оксидування.

Взаємодія двох зміцнених поверхонь, одна з яких зміцнена дискретно–континуально, а інша

континуально при взаємному контакті виникають зовсім інші процеси приробітку та зношування, що потребує додаткового аналізу залежності критеріальних величин від варіюємих конструкторсько–технологічних параметрів процесів зміцнення.

Крім впливу на міцність, при дискретному зміцненні змінюються також і трибологічні характеристики. Це викликано тим, що внаслідок дискретного зміцнення змінюються контактний тиск, розподіл коефіцієнту тертя, а, відповідно, й інтенсивність зношування.

З аналізу отриманих у ході досліджень даних (див. рис. 30), що в області ДЕЗ спостерігається більш високий рівень контактного тиску, ніж в області контактування з основним матеріалом деталі II. Відповідно, якщо в парі «корундовий шар – сталь» коефіцієнт тертя нижче, ніж у парі «корундовий шар – основний матеріал деталі II», то при їх взаємному русі виникає два ефекту. Перший пов'язаний із зменшенням сумарної величини тертя у сполученні деталей I і II (оціночно – в 1,2–1,8 рази). Другий визначає зниження зношування, що пояснюється більш низькою інтенсивністю зношування високолегованої сталі порівняно з високоміцним чавуном. Продовження цих робіт було на ДП «Завод ім. В.О. Малишева» на машинах тертя 2070 СМТ-1 за схемою яка зображена на рис. 32, але для досліджень використовувались дослідні зразки виготовлені із високоміцного чавуну, робочі поверхні яких для «диска» було зміцнено методом дискретного зміцнення, а робоча поверхня «колодки» була виготовлена з заготовки сталевалюмінієвого вкладишу з робочим антифрикційним сплавом АМО1-20.

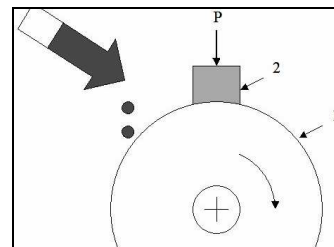


Рисунок 32 – Схема випробувань на машині тертя 2070 СМТ-1: 1 – рухливий зразок «диск», 2 – нерухомий зразок «колодка»

У першому випадку використовувалась пара «диск» – «колодка» з робочим антифрикційним сплавом АМО1-20, а у другому випадку пара «диск» – «колодка» де антифрикційний сплав АМО1-20 було перетворено методом мікро дугового оксидування на глибину 20–50 мкм. Результати випробувань за визначенням величина та швидкість зносу робочих поверхонь пар тертя наведено у табл. 1 та відображено на рис. 33.

Таблиця 1 – Результати випробувань по визначенню вагового зносу в парі тертя «диск» – «колодка»

Робоча поверхня колодки	Зношування, см $\times 10^4$	
	«колодки»	«диска»
АМО1-20	7,5 (2,5 мкм/час)	0,07(0,023 мкм/час)
АМО1-20+МДО	3,4 (1,1 мкм/час)	0,20(0,07 мкм/час)

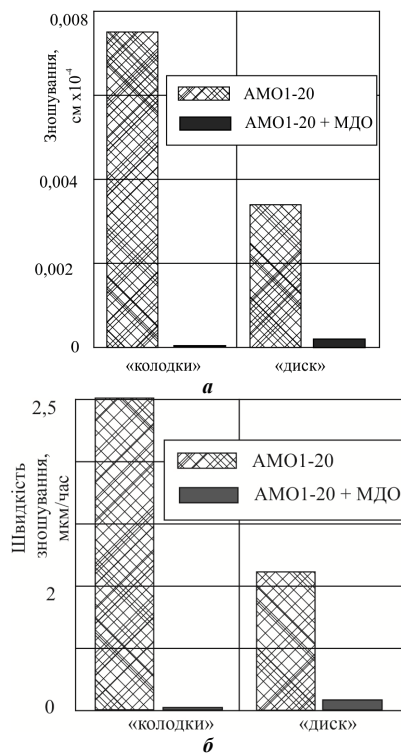


Рисунок 33 – Величина (мм) (а) та швидкість (мкм/час) (б) зношування колодки та диска

Як видно з аналізу результатів випробування, у парі тертя «диск» – «колодка» змінився характер процесів припрацювання в результаті суттєвого зміння властивостей при поверхневих робочих шарів поверхонь тертя досліджуваних зразків сталевалюмінієвих вкладишів. Як відомо, їх припрацювання складається в перенесенні м'якої структури складової антифрикційного шару АМО1-20 (олова) на контактуючу поверхню валу, що не виправляє його макрогеометрію в процесі припрацювання.

При наявності на робочій поверхні вкладиша твердого «корундового» шару, утвореного при гальвано-плазмовій обробки, у процесі припрацювання пари шийка колінчастого валу – сталевалюмінієвий вкладиш насамперед виправляється макрогеометрія робочої поверхні шийки колінчастого валу. При цьому також відбувається поліровка та процеси мікроприробітку з утворенням аморфізованих приповерхневих робочих шарів, які забезпечують високі антифрикційні властивості. Наявність тонкого оксидно-корундового шару на антифрикційному шарі сталевалюмінієвого вкладишу у процесі приробітку за рахунок зниженої теплопровідності корундового шару дає можливість зменшити відносно великі зазори на мастило між шийкою колінчастого валу та сталевалюмінієвим вкладишем, прийнятих при монтажу [30]. Зменшення величини гарантованого зазору збільшує тиск у змащувальній системі двигуна, знижує витрати на тертя, знижує температуру головки поршня, шум при роботі двигуна та сприяє збільшенню ресурсу пари «колінчастий вал – сталевалюмінієвий вкладиш» до капітального ремонту.

Ще однією важливою обставиною є механізм

забезпечення сталого сприятливого комплексного ефекту від взаємодії чинників «розподіл контактної тиску – тертя – зношування». У традиційних технологіях ця лінійна послідовність чинників знаходиться в «позитивному» зворотному зв'язку: наявність значного контактної тиску у сполученні взаємно рухомих деталей призводить до дотичних сил тертя, які викликають зношування; при зношуванні, як зазначалося вище, зростають навантаження, що, у свою чергу, призводить до зростання контактної тиску тощо. У результаті отримуємо циклічно прогресуючий процес по «спіралі» P (рис. 34, А), який віддаляється від номінального (вихідного циклу) в процесі експлуатації. На протипагу цій тенденції, для запропонованої технології реалізується також інша, конкуруюча тенденція (див. рис. 34, В).

У цьому випадку дія зусиль тертя викликає зростання зношування основного матеріалу порівняно з зношуванням матеріалу ДНЗ. При цьому матеріал корундового шару при досягненні припрацювальної межі надалі зношується слабо. У цих умовах відбувається перерозподіл контактної тиску переважно на область ДЗ, загальна сила тертя зростає повільніше, сила тертя в зоні сполучення з основним матеріалом зменшується, що призводить до зменшення його зношування. Таким чином, реалізується сценарій «негативного» зворотного зв'язку, і розвиток процесів йде по лінії S , яка віддаляється від лінії N повільніше, ніж P (див. рис. 34). У певних умовах це може призводити до перетворення S у практично стабільне коло, що означає реалізацію сталих процесів «контактна взаємодія – тертя – зношування».

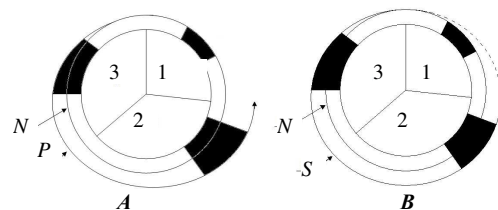


Рисунок 34 – Механізми розвитку процесів контактної взаємодії (КВ), тертя (Т) і зношування (З):

А – традиційні технології,
В – запропонована технологія.
1 – контактна взаємодія, 2 – зношування, 3 – тертя

Природно, що у реальних умовах дійсні процеси поєднують тенденції А і В (див. рис. 34). Однак важливий сам механізм стабілізації В, оскільки він характеризує тенденцію до сталого самоповторення досліджуваних процесів, а не їх інтенсифікації (що характерно для традиційних процесів обробки поверхневих шарів деталей пар тертя ДВЗ).

Первинні оцінки матеріалів отриманих результатів дають рекомендації щодо вибору параметрів технологічного процесу: відносна площа ДЗ – 65–75%, товщина корундового шару до 0,1 мм; пористість – 10–20%.

Також була проведена кількісна оцінка зусиль тертя для опису змін зусиль тертя. У резуль-

тагі змін коефіцієнта тертя з вирішення контактної задачі була знайдена функція $q(r)$, яка описує розподіл контактної тиску (рис. 35).

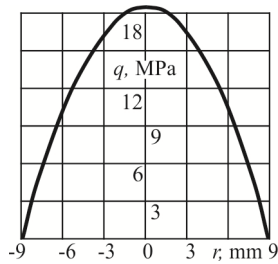


Рисунок 35 – Розподіл контактної тиску (МПа) уздовж діаметра плями контакту (мм)

Інтегральна радіальна сила на стінки гільзи знаходиться з рівняння:

$$N = \int q(x, y) dx dy = \int_0^R \int_0^{2\pi} q(r) r dr d\Theta. \quad (1)$$

Загальна сила тертя визначається з інтеграла:

$$T = \int_0^R \int_0^{2\pi} q(r) k(q) r dr d\Theta. \quad (2)$$

Розподілена сила тертя описується виразом:

$$\tau(r) = q(r)k(q), \quad (3)$$

де $k(q)$ – коефіцієнт тертя, що залежить (в загальному випадку) від контактної тиску.

На рис. 36 представлені пробні залежності коефіцієнта тертя від тиску, що діє.

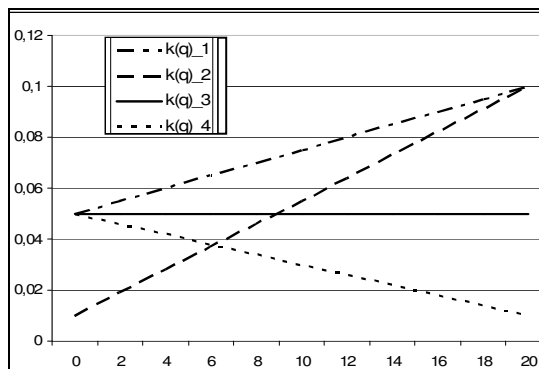


Рисунок 36 – Пробні криві, що описують зміну коефіцієнта тертя залежно від діючого контактної тиску, МПа

Отримані криві розподілу, що описують дотичні поверхневі напруження, обчислені за різних коефіцієнтів тертя. На рис. 37 і 38 – двовимірне і тривимірне їх подання.

Ввівши у розгляд величину, яка характеризує інтегрально середній коефіцієнт тертя для випадків, представлених на рис. 36, отримуємо діаграму (рис. 39) відносної величини середнього коефіцієнта тертя для випадків 1–4, що характеризує втрати на тертя порівняно з випадком 3 (прийнятий як базовий):

$$k_i = k_i / k_3. \quad (4)$$

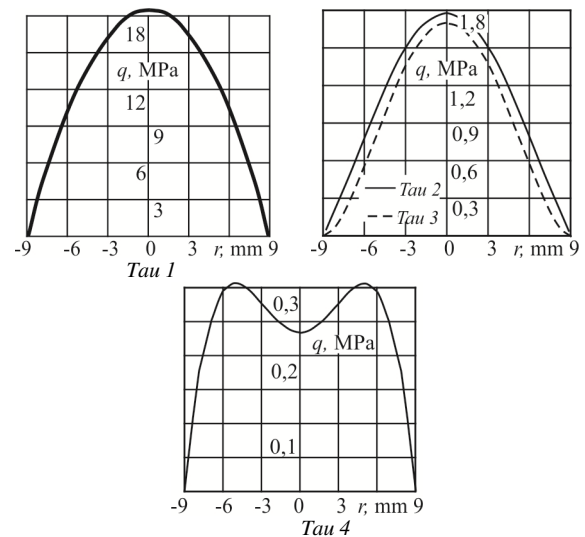


Рисунок 37 – Пробні розподіли дотичних напружень

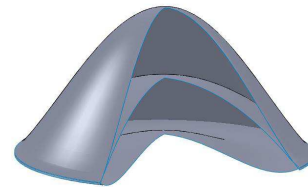


Рисунок 38 – Перетини поверхонь розподілу контактних зусиль тертя при різних коефіцієнтах тертя

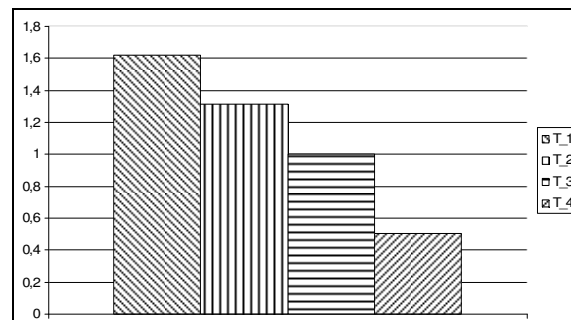


Рисунок 39 – Відносна величина середнього коефіцієнта тертя для випадків 1–4 (див. рис. 36)

З діаграми відносної зміни сил тертя порівняно з випадком 3 (див. рис. 36) видно, що найкращим є випадок 4. Він дає можливість знизити втрати на тертя до 50% порівняно з базовим варіантом.

Як наочний приклад підтвердження прогнозованих, на основі розрахункових досліджень, результатів на рис. 40 наведені експериментально одержані результати відносно впливу коефіцієнту тертя на інтенсивність зношування дискретно зміцнених поверхонь тертя важконавантажених деталей [30].

Як видно із наведених результатів, спостерігається явне тяжіння усіх характеристик до величини коефіцієнта щільності дискретного зміцнення до діапазону 0,6–0,75. У цьому діапазоні поєднуються позитивні ефекти щодо підвищення міцності зниження тертя та зменшення зношування.

Виходячи з отриманих матеріалів на прикладі досліджень режимів експлуатації та ремонту двигунів внутрішнього згоряння, запропоновані нові

технологічні рішення, фізичні та математичні моделі фізико-механічних процесів у сполученнях із деталей і розв'язання їх із використанням потужного комп'ютерного програмного комплексу та проведення експерименту з використанням лабораторних машинах тертя.

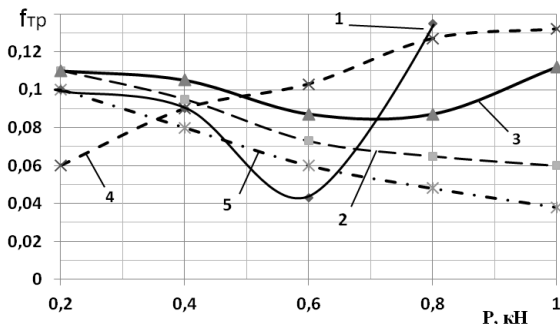


Рисунок 40 – Залежність коефіцієнта тертя від навантаження матеріала АМО1-20 по чавуну з глобулярним графітом ВЧГГ:

1 – АМО1-20 по ВЧГГ (нормаліз.); 2 – АМО1-20 (ГПО) по ВЧГГ (нормаліз.); 3 – АМО1-20 (ГПО) по ВЧГГ (нормаліз.) с пропиткою маслом М14В₂; 4 – АМО1-20 (ГПО) по ВЧГГ (ЕИУ) без пропитки; 5 – АМО1-20 (ГПО) по ВЧГГ (ЕИУ) с пропиткою маслом М14В₂ з добавкою MgO [30]

Для остаточного визначення запропонованих науково обґрунтованих рекомендацій щодо розробки та виготовленню вузлів тертя із застосуванням комбінованого використання технологій континуального та дискретно-континуального зміцнення із метою забезпечення та подовження експлуатаційного ресурсу двигунів внутрішнього згоряння, виникає необхідність проведення розгорнутих стендових випробувань на моторних стендах. За основу було обрано стендовий дизельний двигун 4ЧН 12/14, на якому було встановлено сталевий колінчастий вал, корінні та шатунні шийки якого були зміцнені методом дискретного зміцнення по рекомендованому технологічному процесу з щільністю дискретності покриття зміцненої поверхні $55 \div 75\%$ від загальної площі шийки. Загальний вигляд експериментального колінчастого валу приведено на рис. 41.

При зборі двигуна в парі тертя кривошипно-шатунного механізму були застосовані корінні та шатунні вкладиші, виготовлені із сталеалюмінієвої смуги з антифрикційним покриттям зі сплаву АМО1-20, робочі поверхні яких було перетворено методом мікро-дугового оксидування по технології, розробленій в НТУ «ХПІ». Загальний вигляд зміцненої цим методом поверхні шатунного вкладиша зображено на рис. 42, а корінного вкладиша – на рис. 43.

Випробування проводились відповідно з розробленою програмою випробувань обсягом $30+50 = 80$ годин.

Згідно з метою та задачами роботи на основі розроблених виробничих програм та технічних умов [30] і доведених у роботі рекомендацій щодо обладнання та режимів здійснення технологій

континуального та дискретно-континуального зміцнення, були зміцнені шийки сталевого колінчастого валу дизельного двигуна 4ЧН 12/14, загальний вигляд якого до зміцнення приведено на рис. 41. Перед операцією дискретного зміцнення шийки колінчастого валу були прошліфовані. Загальний вид шийок колінчастого валу до зміцнення зображено на рис. 42. Загальний вид зміцнених корінних та шатунних шийок після полірування приведено на рис. 43.



Рисунок 41 – Експериментальний колінчастий вал дизельного двигуна 4ЧН 12/14

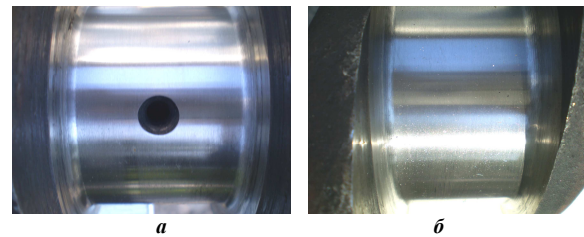


Рисунок 42 – Загальний вид робочої поверхні корінної та шатунної шийки сталевого колінчастого валу двигуна 4ЧН 12/14 до зміцнення:

a – корінна шийка; *б* – шатунна шийка

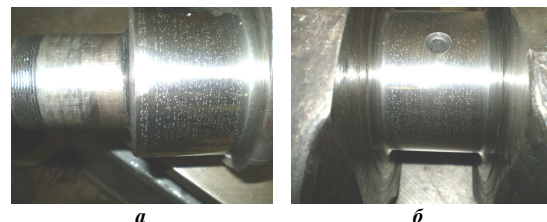


Рисунок 43 – Загальний вид робочої поверхні корінної та шатунної шийки сталевого колінчастого валу двигуна 4ЧН 12/14 після зміцнення:

a – корінна шийка; *б* – шатунна шийка

При виконанні робіт було здійснено замір твердості робочої поверхні корінних та шатунних шийок до і після дискретного зміцнення. Результати замірів зведено в табл. 2, 3. Заміри твердості проводились із використанням ультразвукового приладу ТКМ-459, який зображено на рис. 44.

На дизельний двигун 4ЧН 12/14 встановлено сталеалюмінієві вкладиші з антифрикційним шаром АМО1-20, робоча поверхня яких зміцнена методом мікро-дугового оксидування. Загальний вигляд корінного та шатунного вкладишів зображено на рис. 45. При збиранні кривошипно-шатунного механізму двигуна 4ЧН 12/14, який зображено на рис. 46, було виконано обмір корінних та шатун-

них шийок колінчастого валу, результати яких наведено у табл. 4, 5.



Рисунок 44 – Ультразвуковий прилад ТКМ – 459

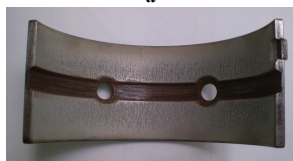


Рисунок 45 – Шатунний та корінний вкладиші робоча поверхня яких зміцнена методом мікро дугового оксидування: а – шатунний вкладиш; б – корінний вкладиш

Обмір діаметрів корінних та шатунних сталє-алюмінієвих вкладишів обтягнутих в місцях монтажу. Результати обміру вкладишів зведено у табл. 6 та 7.



Рисунок 46 – Зборка кривошипно-шатунного механізму стенового двигуна 4ЧН 12/14

Стенові випробування проводились на стеновому дизельному двигуні 4ЧН 12/14, який укомплектований деталями й вузлами, виготовленими згідно з запропонованими технологіями. Стенд був обладнаний виміральною апаратурою та іншим додатковим обладнанням, що фіксують умови протікання робочого процесу при зміні режимів роботи двигуна.

Загальний вигляд випробувального стенду зображено на рис. 47. Дослідження проводились згідно розробленої програми по визначенню зносостійкості, задиростійкості і приробітки корінних та шатунних вкладишів дизеля 4ЧН 12/14.

Під час проведення випробувань здійснювався узагальнений контроль показників робочого процесу при роботі двигуна на частковій та повній потужності (рис. 48).

Таблиця 2 – Забір твердості корінних шийок до і після дискретного зміцнення по Віккерсу HV

Точка заміру	Корінна шийка									
	1		2		3		4		5	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	I-II
до зміцнення	580	543	487	561	492	471	568	563	555	500
після зміцнення	601	621	627	640	661	627	611	620	618	645

Таблиця 3 – Забір твердості шатунних шийок до і після зміцнення методом дискретного зміцнення по Віккерсу HV

Точка заміру	Шатунна шийка							
	1		2		3		4	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II
до зміцнення	452	476	466	532	450	430	326	295
після зміцнення	630	635	601	602	652	676	595	605

Таблиця 4 – Результати обміру корінних шийок колінчастого валу двигуна 4ЧН 12/14

Точка заміру	Корінна шийка									
	1		2		3		4		5	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II
А*	90 _{-0,015}		90 _{-0,01}		90 _{-0,01}		90 _{-0,01}		90 _{-0,015}	
Б**		90 _{-0,02}		90 _{-0,015}		90 _{-0,02}		90 _{-0,02}		90 _{-0,02}

Примітка: * – обмір А по перетину I – I по осі циліндра; ** – обмір Б по перетину II – II з поворотом 90° від осі циліндра

Таблиця 5 – Результати обміру шатунних шийок колінчастого валу двигуна 4ЧН 12/14

Точка заміру	Шатунна шийка							
	1		2		3		4	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II
А	74,91		74,90		74,91		74,91	
Б		74,91		74,91		74,91		74,91

Примітка: * – обмір А по перетину I – I по осі циліндра; ** – обмір Б по перетину II – II з поворотом 90° від осі циліндра

Таблиця 6 – Результати обміру корінних сталелюмінієвих вкладишів двигуна 4ЧН 12/14

Точка заміру	Корінна шийка									
	1		2		3		4		4	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II
А	89,88		89,89		89,91		89,92		89,91	
Б		89,89		89,90		89,89		89,92		89,90

Примітка: * – обмір А – по перетину I-I по осі циліндра; ** – обмір Б – по перетину II-II з поворотом 45° від осі циліндра в бік обертання колінчастого валу

Таблиця 7 – Результати обміру шатунних сталелюмінієвих вкладишів двигуна 4ЧН 12/14

Точка заміру	Шатунна шийка							
	1		2		3		4	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II
А	74,94		74,97		74,98		74,97	
Б		74,95		74,96		74,97		74,97

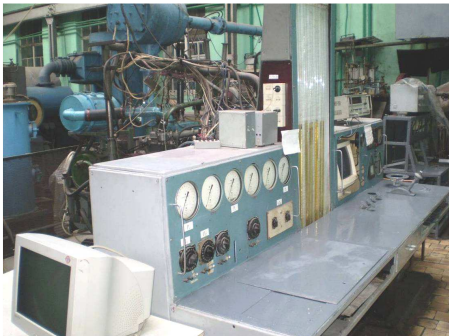


Рисунок 47 – Загальний вигляд експериментального стану на базі дизельного двигуна 4ЧН 12/14

Вигляд поверхонь корінної і шатунної шийок колінчастого валу та корінних і шатунних вкладишів дизеля 4ЧН 12/14 після 80 годин роботи зображено на рис. 49, 50.

Результати обмірів корінних та шатунних шийок колінчастого валу наведено у табл. 8, 9 (а також обмір діаметрів корінних та шатунних сталелюмінієвих вкладишів обтягнутих в містах монтажу). Результати обміру вкладишів зведено у табл. 10, 11.



Рисунок 48 – Розміщення приборів та вимірювальних пристроїв на експериментальному станді

Таблиця 8 – Результати обміру корінних шийок колінчастого валу дизеля 4ЧН 12/14 після 80 годин роботи

Точка заміру	Корінна шийка									
	1		2		3		4		5	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II
А	90 _{-0,01}		90 _{-0,05}		90 _{-0,01}		90 _{-0,015}		90 _{-0,01}	
Б		90 _{-0,01}		90 _{-0,05}		90 _{-0,01}		90 _{-0,015}		90 _{-0,01}

Примітка: * – обмір А по перетину I-I по осі циліндра; ** – обмір Б по перетину II-II з поворотом 90° від осі циліндра

Таблиця 9 – Результати обміру шатунних шийок колінчастого валу дизеля 4ЧН 12/14 після 80 годин роботи

Точка заміру	Шатунна шийка							
	1		2		3		4	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II
А	74,91		74,91		74,90		74,91	
Б		74,92		74,91		74,91		74,91

За період стендових випробувань показники роботи двигуна залишались незмінними. Тиск

мастила та його температура відповідали умовам випробувань. Після проведення стендових випро-

бувань при візуальному огляді контактуючих поверхонь тертя встановлено, що робочі поверхні шийок колінчастого валу не мають задирів або ризик.

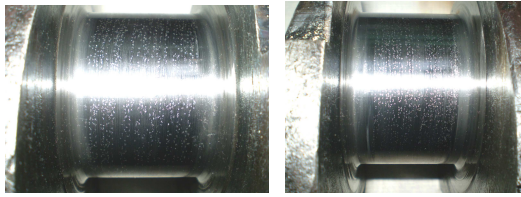


Рисунок 49 – Вигляд поверхонь корінної та шатунної шийок дизеля 4ЧН 12/14 після 80 годин роботи
а – корінна шийка; б – шатунна шийка

Робочі поверхні корінних вкладишів мають рівномірний знос по всій поверхні (див. рис. 50). Це свідчить про те, що вкладиші працювали в умовах згідно з вимогами технічної документації. Робочі поверхні шатунних вкладишів мають більш виражену площу контакту і теж не мають задирів або явно виражених ризик. Що підтверджує те, що

вони працюють у більш важких умовах експлуатації і мають більші навантаження, ніж корінні вкладиші.

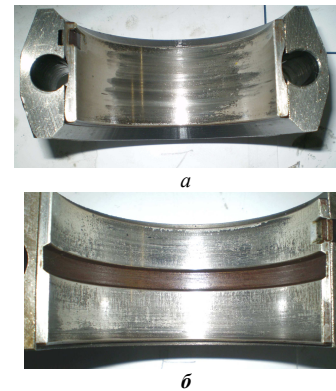


Рисунок 50 – Вигляд поверхонь шатунного та корінного сталєалюмінієвих вкладишів дизеля 4ЧН 12/14 після 80 годин роботи:
а – шатунний вкладиш; б – корінний вкладиш

Таблиця 10 – Результати обміру корінних сталєалюмінієвих вкладишів дизеля 4ЧН 12/14 після 80 годин роботи

Точка заміру	Корінна шийка									
	1		2		3		4		5	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II
А	90,21		90,18		90,19		90,17		90,19	
Б		90,21		90,18		90,21		90,18		90,21

Примітка: * – обмір А по перетину I – I по осі циліндра; ** – обмір Б по перетину II – II з поворотом 45° від осі циліндра в бік обертання колінчастого валу

Таблиця 11 – Результати обміру шатунних сталє-алюмінієвих вкладишів дизеля 4ЧН 12/14 після 80 годин роботи

Точка заміру	Шатунна шийка							
	1		2		3		4	
	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II	I-I	II-II
А	75,09		75,07		75,11		75,08	
Б		75,09		75,06		75,10		75,07

Примітка: * – обмір А по перетину I – I по осі циліндра; ** – обмір Б по перетину II – II з поворотом 45° від осі циліндра в бік обертання колінчастого валу

При аналізі результатів обміру (див. табл. 4, 5, 8 та 9) корінних та шатунних шийок колінчастого валу після 80 годин роботи згідно з режимами програми випробувань та з порівнянням їх з обмірами до випробувань видно, що розмір їх діаметрів не змінився, але явно видно сліди приробітку і покращення якості поверхні. Це свідчить про те, що двигун пройшов здаточні випробування, пари тертя роботоздатні але ця робота потребує більшого часу наробітку двигуна і проведення більш тривалих експлуатаційних випробувань.

При аналізі результатів обміру (табл. 6, 7, 10 та 11) діаметрів корінних та шатунних вкла-

дишів в обтягнутому становищі встановлено, що знос вкладишів, робочі поверхні яких перетворені методом мікродугового оксидування, є більшим, ніж знос шийок колінчастого валу. Такі ж результати були отримані і на зразках, які проходили випробування на машинах тертя. Це свідчить про те, що «корундовий» шар є шаром припрацювання. Він у процесі роботи зношується, але при цьому суттєво покращується якість поверхні вала і умови роботи вузла тертя в цілому.

У табл. 12 наведені дані по зміні величини зазору в парі «колінчастий вал – вкладиш» [30].

Таблиця 12 – Зміна величини зазору в парі «колінчастий вал – вкладиш»

Межі зміни зазору корінних вкладишів		Межі зміни зазору шатунних вкладишів	
Зазор в корінній парі по кресленню	0.10 ÷ 0.156	Зазор в шатунній парі по кресленню	0.085 ÷ 0.140
Зазор в корінній парі до випробувань	- 0.09 ÷ -0.1	Зазор в шатунній парі до випробувань	0.03 ÷ 0.07
Зазор в корінній парі після випробувань	0.18 ÷ 0.23	Зазор в шатунній парі після випробувань	0.15 ÷ 0.2

При аналізі результатів табл. 12 видно, що масляний зазор у парі «корінна шийка – корінний вкладиш» майже відсутній. Це пояснюється тим,

що при мікродуговому оксидуванні відбувається збільшення діаметру вкладиша, тобто, на поверхні шару приробітку утворюється шар більш м'який,

але маслоємний. Він легко видається механічним способом [30]. Після проведення випробувань зазор в парі «корінна шийка – корінний вкладиш» збільшився більше допустимих меж. Подібний результат одержано і для пари «шатунна шийка – шатунний вкладиш».

Розглянувши результати досліджень у цій галузі зрозуміло, що характеристики «корундового» шару суттєво залежать від щільності струму.

При щільностях струму до 30 A/дм^2 температура в каналі пробою становить близько $1000 \text{ }^\circ\text{K}$ і при цьому відбувається більшою мірою утворення структури $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. При більших щільностях струму температура в каналі пробою може досягати $2500\text{--}3000 \text{ }^\circ\text{K}$ і при цьому переважно утвориться структура $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ з підвищеною твердістю (рис. 51), зносостійкістю й теплостійкістю [30].

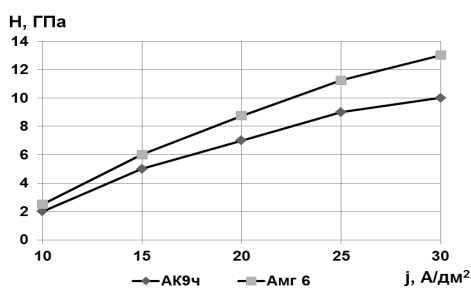


Рисунок 51 – Зміна твердості поверхні залежно від щільності струму [30]

Розподіл твердості корундового шару за глибиною нерівномірний. На зовнішній поверхні твердість менша, а в міру наближення до основного металу твердість зростає. І тільки на відстані $5\text{--}10 \text{ мкм}$ від основного металу вона різко знижується до твердості основного металу (рис. 52).

На рис. 53 наведений характер зміни пористості шару за глибиною. Пористість на зовнішній поверхні досягає $25\text{--}30 \%$, а з глибиною знижується й у робочому шарі становить $8\text{--}12 \%$.

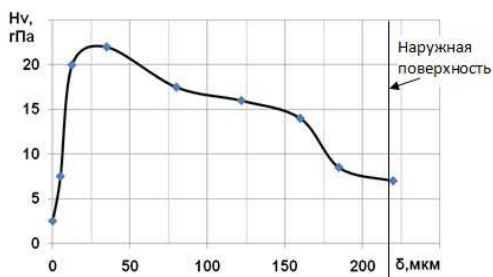


Рисунок 52 – Зміна твердості корундового шару за глибиною

Технологічний шар швидко зношується, і тому його потрібно позбутися. Він легко знімається дрібною наждаковою шкуркою. Товщина цього шару $30\text{--}50 \text{ мкм}$ (рис. 54). Робочий шар зношується набагато повільніше. Навіть при терті абразивним колом швидкість зношування становить $10\text{--}20 \text{ мкм/хв}$.

Це свідчить про те, що незважаючи на те, що глибина «корундового» шару складала до 100

мкм. В процесі приробітки цей шар було стерто якраз на глибину «корундового» шару. Тому треба враховувати величину перетвореного шару, його структуру, вона повинна бути близько $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і мати підвищену твердість, зносостійкість та теплостійкість [30].

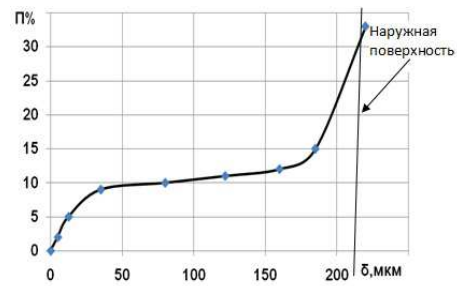


Рисунок 53 – Зміна пористості корундового шару за глибиною [30]

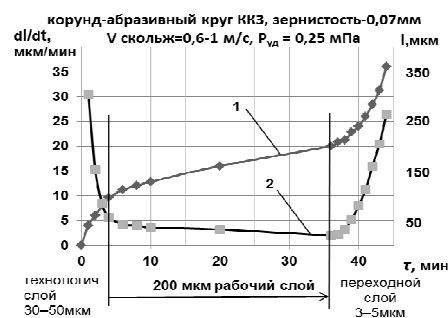


Рисунок 54 – Характеристики зношування:
1 – величина зношування керамічного шару;
2 – швидкість зношування керамічного шару [30]

При виготовленні пари тертя «колінчастий вал – вкладиш» доцільно зниження первинних зазорів, що дасть змогу поліпшити якість роботи пари тертя та збільшити її ресурс в експлуатації.

Здійснений комплекс розрахунково-експериментальних досліджень дав можливість розробити нову технологію дискретно-континуального зміцнення на прикладі елементів двигунів внутрішнього згоряння.

3) *Визначення впливу технологічних параметрів на міцність силових гідроциліндрів для механізації та автоматизації технологічного оснащення.* Предметом дослідження є напружено-деформований стан корпусів силових гідроциліндрів для закріплення деталей, що обробляються.

При виготовленні елементів озброєння і військової техніки застосовуються матеріали із високими механічними і фізико-механічними властивостями. Таким чином, при технологічних операціях точіння, свердління, фрезерування виникають більш інтенсивні умови різання. Це вимагає значних зусиль закріплення заготовок в оснащенні, а, це означає, – високого тиску у силових гідроциліндрах, які ці зусилля створюють. З іншого боку, прагнення до більшої технологічності виробництва самих гідроциліндрів змушує виготовляти їх паяними.

Природним чином при дослідженні напружено-деформованого стану паяного корпусу гідроцилінд-

ра виникає низка допоміжних задач. Розв'язання допоміжних задач дає можливість розібратися і зрозуміти суть впливу окремих чинників, а також – виявити основні чинники, які впливають на зміни, які відбуваються в НДС при варіюванні конструктивних параметрів або фізико-механічних властивостей матеріалів, з яких складається корпус гідроциліндра. Нижче розглянута низка допоміжних задач, наприклад, таких як: зміна довжини паяного шва і вибір матеріалу припою у з'єднувальному шві, вплив габаритних розмірів на НДС, застосування футерувального шару і вибір різних матеріалів для цього шару тощо.

У роботі описано дослідження НДС паяних корпусів гідроциліндра, і вона розділена на 2 частини:

- 1) чисельне дослідження методом скінченних елементів;
- 2) експериментальне – на макеті із застосуванням датчиків переміщень.

Зокрема, досліджено вплив довжини паяного шва на НДС корпусу гідроциліндра. Дослідження НДС гідроциліндрів призвело до появи нових конструктивних і технологічних рішень, таких як паяні корпуси силових гідроциліндрів.

Довжина шва є технологічним параметром, який впливає на сам процес пайки. У цей самий час вона очевидним чином впливає на НДС корпусу в цілому і самого шва. У зв'язку з цим необхідно досліджувати вплив цього параметра на НДС корпусу гідроциліндра.

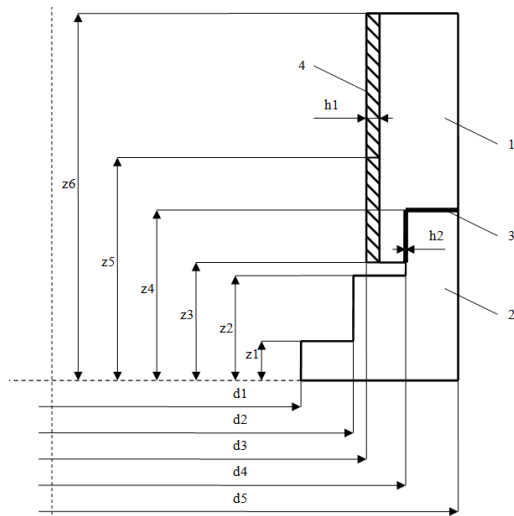


Рисунок 55 – Схема поперечного перерізу паяного корпусу гідроциліндра:

- 1 – труба заготовка (гільза), 2 – донна заготовка (днище, кришка), 3 – з'єднувальний шов (шар припою), 4 – футерувальний шар

Вплив довжини паяного шва з'єднання гільзи і кришки в корпусі гідроциліндра на його НДС розглядався при фіксованих параметрах, які визначають габаритні розміри корпусу. Схема поперечного перерізу даної моделі приведена на рис. 55, значення параметрів наведені у табл. 13.

Набір параметрів d_i, z_i, h_i повністю визначає геометрію корпусу циліндра. Тут d_i – діаметри,

z_i – висоти, h_i – товщини, футерувального шару і з'єднувального шва пайки.

При цьому параметр z_4 , який визначає довжину шва уздовж корпусу циліндра, набував наступних значень $z_4 = 14,5; 14,65; 20; 25; 40$ мм.

Зовнішнє навантаження було здійснено шляхом прикладання внутрішнього тиску, що дорівнює 10 МПа, і жорсткого затискання нижньої грані при $z = 0$. На рис. 56 представлений переріз корпусу гідроциліндра із зовнішніми навантаженнями.

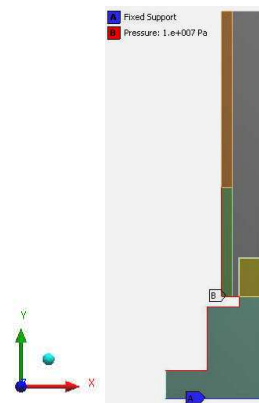


Рисунок 56 – Переріз корпусу гідроциліндра із зовнішніми навантаженнями

Таблиця 13 – Конструктивні параметри корпусу гідроциліндра

i	d_i , мм	z_i , мм	h_i , мм
1	16	4	1,5
2	28	13	0,1
3	32	14,5	-
4	37	var	-
5	44	30	-
6	-	55	-

Фізико-механічні характеристики матеріалів, використовуваних у розрахунках НДС елементів корпусів гідроциліндрів, наведені в табл. 14.

Таблиця 14 – Фізико-механічні характеристики матеріалів

Область корпусу гідроциліндра	Модуль пружності E , МПа	Коефіцієнт Пуассона ν
Сталь (область 1, 2, див. рис. 55)	$2 \cdot 10^5$	0.29
Мідь (область 3, див. рис. 55)	$1,1 \cdot 10^5$	0.32
Акрил (область 4, див. рис. 55)	$3 \cdot 10^3$	0.39

Для проведення розрахунків були побудовані скінченно-елементні моделі, які налічували, залежно від довжини шва, від 63 до 90 тис. елементів (задачі розглядалися в осесиметричній постановці). На рис. 57 представлені фрагменти скінченно-елементних сіток для моделей з різними значеннями z_4 (14,5 мм і 14,65 мм) поблизу з'єднувального шва.

У результаті проведення низки досліджень із

варіювання довжини з'єднувального шва були отримані максимальні еквівалентні напруження за von Mises ($\sigma_{\text{екв,max}}$) і переміщення в елементах корпусу гідроциліндра.

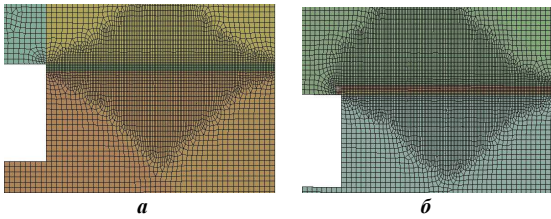


Рисунок 57 – Скінченно-елементна сітка поблизу шва:
а – при $z_4 = 14,5$ мм; б – при $z_4 = 14,65$ мм

У табл. 15 і на рис. 58 наведені значення потрібних величин, максимальних еквівалентних напружень за von Mises (у МПа) в елементах корпусу гідроциліндра і характер зміни максимальних

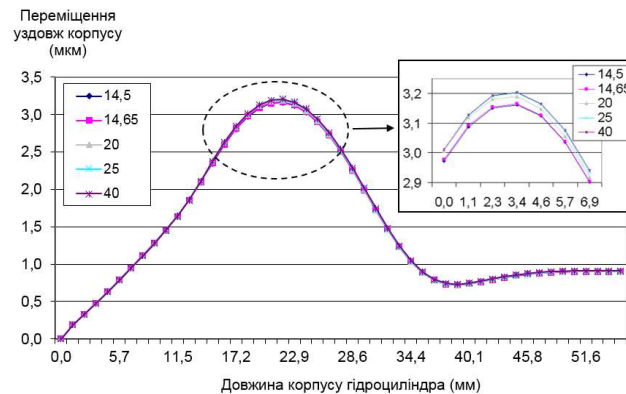


Рисунок 58 – Повні переміщення уздовж зовнішньої кромки корпусу (у мкм)

Отримані значення напружень були узяті з основної частини матеріалу елементів корпусів гідроциліндра, оскільки в силу геометричної форми корпусу в результаті прикладання навантаження виникають концентратори напружень, значення в яких перевищують у рази, а то і на порядки номінальні. Концентратори напружень для деяких розрахункових схем представлені на рис. 59. Розгляд напружень у місцях концентрації вимагає проведення додаткових досліджень; так, варіювання розміром скінченного елемента може привести до істотних змін рівня отримуваних у розрахунках напружень.

З розгляду отриманих напружень видно, що в елементах корпусу гільзи та у футерувальному шарі вони практично однакові для усіх розрахункових моделей. Проте, з аналізу отриманих напружень, які виникають у з'єднувальному шві, видно, що для першої розрахункової схеми (при $z_4 = 14,5$ мм) напруження найбільші, а для другої (при $z_4 = 14,65$ мм) – найменші, для інших же моделей напруження показали мінімальний розкид між собою. З аналізу отриманих переміщень можна зробити висновок, що переміщення уздовж зовнішньої кромки корпусу практично однакові для усіх розрахункових схем.

Аналіз отриманих результатів дослідження паяних корпусів гідроциліндрів при різних дов-

повних переміщень уздовж зовнішньої кромки стінки корпусу гідроциліндра, в мкм, відповідно.

Таблиця 15 – Визначені розрахунковим шляхом значення еквівалентних напружень за von Mises, $\sigma_{\text{екв,max}}$, МПа, в елементах корпусу гідроциліндра

№ розр. схеми	Значення z_4 , мм	$\sigma_{\text{екв,max}}$, МПа		
		в з'єд. шві	у футерувальному шарі	в гільзі, МПа
1	14,5	28,6	4,779	45,64
2	14,65	17,1	4,780	45,69
3	20	22,8	4,783	46,09
4	25	23,1	4,784	46,31
5	40	23,2	4,782	46,31

жинах паяного з'єднувального шва кришки і гільзи дає можливість зробити висновок: довжина шва практично не впливає на характер переміщень, які виникають в усьому корпусі гідроциліндра, а також на напружений стан корпусу в цілому. Аналогічні висновки відносно НДС корпусів гідроциліндра були отримані іншими авторами.

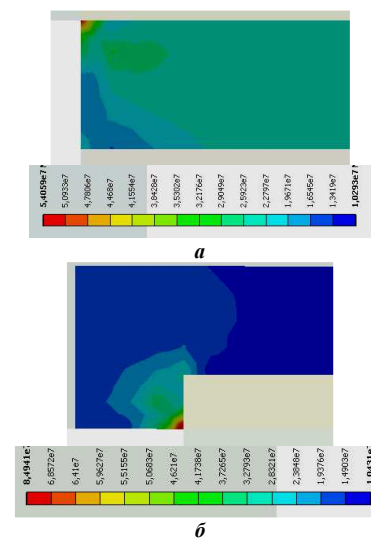


Рисунок 59 – Розподіл еквівалентних напружень у районі концентратора: а – перша розрахункова схема; б – друга розрахункова схема

Також здійснене розрахунково-експериментальні дослідження корпусів гідроциліндра. Для цього дослідження було залучено результати сторонніх досліджень інших авторів, у ході яких розглядалися переміщення корпусу гідроциліндра під дією навантаження і напруження на його поверхні. У ході проведення експериментальних досліджень для побудови моделі корпусу гідроциліндра використовувався метод розширеної подоби. Цей метод полягає в побудові досліджуваної моделі з іншого матеріала, але при цьому виготовлена модель повинна залишатись геометрично подібною натуральній.

Основні вимоги, що пред'являються до матеріалу, полягають в тому, що при заданих умовах навантаження характеристики не виходять за межі пружної поведінки, оскільки моделювання непружної поведінки матеріалу призводить до певних труднощів. Далі були введені коефіцієнти подібності, які дали можливість провести зв'язок між натурним об'єктом і макетом. На рис. 60 представлені гідроциліндри і елементи системи механізації.

Для проведення експерименту був побудований макет у повній відповідності з існуючою натуральною конструкцією корпусу гідроциліндра в масштабі 2:1.

Як матеріал було вибрано оргскло, вибір даного матеріалу дав змогу забезпечити лінійну залежність напружень в досліджуваному діапазоні внутрішнього тиску повітря (характеристики ма-

теріалу $E = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0,35$).

Навантаження здійснювалося шляхом подачі повітря під тиском у робочу порожнину корпусу гідроциліндра. Переміщення деяких точок на поверхні корпусу гідроциліндра вимірювалося за допомогою індикаторів переміщення стрілочного типу 1МІГ.

Для порівняння отриманих експериментальних даних, які описують радіальні переміщення уздовж твірної корпусу гідроциліндра, були проведені чисельні дослідження моделі, яка описує макет корпусу гідроциліндра в експериментальному дослідженні. На рис. 61 представлені радіальні переміщення за підсумками експериментальних і чисельних досліджень, перелічені на натуру, при різноманітному тиску $2 \div 10$ МПа (з кроком 2 МПа).



Рисунок 60 – Гідроциліндри і елементи системи механізації

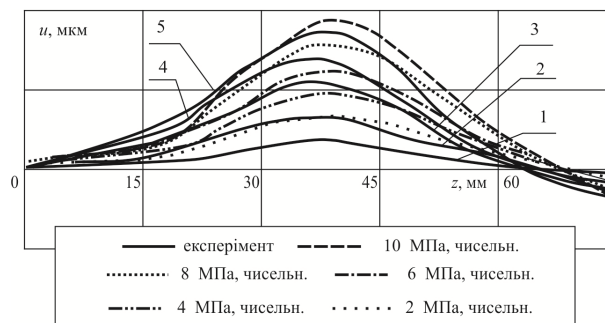


Рисунок 61 – Переміщення уздовж твірної корпусу гідроциліндра

Видно, що результати знаходяться у задовільній відповідності за характером розподілу і за величинами. Так, максимальні значення за даними, з одного боку, експерименту, а з іншого боку, – чисельних досліджень, різняться на величину $3 \div 5\%$.

Важливо, що відмітні риси, експериментально виявлені в розподілах переміщень (зокрема, хвилеподібний характер зростання з єдиним максимумом, наявність від'ємних радіальних переміщень на незакріпленому краю корпусу), присутні також і в даних, отриманих чисельно. Це свідчить про адекватність математичної моделі, оскільки результати, одержані за її допомогою, збігаються не тільки за величинами, але і за розподілами, а також, що особливо важливо, – за тенденціями зміни розв'язків при варіюванні тих чи інших параметрів.

Висновки.

1. У роботі описано методологію розрахунково-експериментального аналізу напружено-

деформованого стану високонавантажених елементів задля забезпечення світового рівня технічних і тактико-технічних характеристик машин цивільного та військового призначення. Вона поєднує, з одного боку, аналіз НДС різними експериментальними методами, а з іншого – чисельно-аналітичними засобами. У результаті різко підвищується, по-перше, достовірність результатів такого аналізу, а по-друге – ефективність проектно-технологічних рішень.

2. Організоване згідно розробленої методології дослідження забезпечує принципові переваги при створенні цивільної та військової техніки із основними технічними і тактико-технічними характеристиками на світовому рівні, у т. ч. – міцність та довговічність.

3. Можливості розробленої методології проілюстровані на прикладі елементів двигунів, радіальної гідрооб'ємної передачі, а також силових

гідроциліндрів. Результати здійснених досліджень покладені в основу при обґрунтуванні прогресивних технічних рішень об'єктів подібного типу.

Список літератури

1. Tkachuk M.M., Grabovskiy A., Alokhin V., Tkachuk M.A., Vasiliev A. Sustainable Development of Transport Objects Through the Implementation of Industry 4.0 and Industry 5.0 Technologies. Pages 95-116. In: Marchenko, A., Koruba, Z. (eds) Decarbonization of Transport Energy Installations in the Context of Sustainable Development Strategies. Studies in Systems, Decision and Control. Springer. Cham. 2025. Vol 635. https://doi.org/10.1007/978-3-032-05884-3_6
2. Stark R., Seliger G., Jé. Bonvoisin. Sustainable Manufacturing: Challenges, Solutions and Implementation Perspectives. Springer. 2017. P. 283. DOI 10.1007/978-3-319-48514-0
3. *Електронний ресурс*. <https://www.gm.com/commitments/sustainability>
4. Bhamra, T. and Hernandez, R.J. Thirty years of design for sustainability: an evolution of research, policy and practice. *Design Science*. 2021. 7. p. e2. DOI 10.1017/dsj.2021.2.
5. Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid. Mariia Golovianko et al. *Procedia Computer Science* 217. 2023. P. 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.206https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922022840>
6. From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology. M. Crnjac Zizic, M. Mladineo, N. Gjeldum, L. Celent. *Energies*. 2022. 15(14), 5221. <https://doi.org/10.3390/en15145221>
7. Tkachuk, M.A., Kravchenko, S. O., Grabovskiy, A., Tkachuk, M. M., Vasiliev, A., Novikov, M. & Subbotina, V. Complex Technologies for Reinforcing Stressed Machine Components. Pages 183-203. In: Marchenko, A., Koruba, Z. (eds) Decarbonization of Transport Energy Installations in the Context of Sustainable Development Strategies. Studies in Systems, Decision and Control. 2025. – Vol 635. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-05884-3_10
8. Ткачук М. А., Новіков М. К., Ткачук М. М., Грабовський А. В., Паккі Г. В., Ткачук Г. В., Подрза С. М., Дерев'янкін П. П. Напрямки та етапи проєктно-технологічного забезпечення підвищених характеристик турбодетандерних електростанцій. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Машинознавство та САПР: зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ". 2023. – № 2. – С. 106–112.* <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/72438>.
9. Postelnyk, H. O., Pinchuk, N. V., Meylekhov, A. A., Zhadko, M. A., Andreev, A. A., & Stolbovoy, V. A. Influence of Bias Potential Magnitude on Structural Engineering of ZrN-Based Vacuum-Arc Coatings. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2021. 22(1). 66-72. DOI: 10.15330/PCSS.22.1.66-72.
10. Sobol', O., Dur, O. Structural Engineering of Nanocomposite Coatings Based on Tungsten and Titanium Carbides. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds). *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020.* DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_54.
11. Bourebia M., Laouar L., Hamadache H., Dominiak S. Improvement of surface finish by ball burnishing: approach by fractal dimension. *Surface Engineering*. – 2017. – 33(4). 255-262. DOI: 10.1080/02670844.2016.1232778.
12. Schalk, N., Tkadletz, M., Mitterer, C. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapordeposition and future challenges for the coatings community. *Surface and Coatings Technology*. 2022. – 429. – 27949. DOI:10.1016/j.surfcoat.2021.127949
13. Maksakova, O., Pogrebnyak and others. Study of advanced nanoscale ZrN/CrN multilayer coatings. *East European Journal of Physics*. 2019. – № 2. – P. 27–32. DOI:10.26565/2312-4334-2019-2-04
14. Martin, J., Leone, P., Nomine, A., Veys-Renaux, D., Henrion, G., Belmonte, T. Influence of electrolyte ageing on the plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Surf Coat Technol*. 2015. 269. 36–46. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.001.
15. Чепков І.Б., Олійник І.І., Коробченко С.О. Процесний підхід в управлінні повним життєвим циклом озброєння та військової техніки на засадах програмно-проєктного менеджменту. *Озброєння та військова техніка*. 2021. №4. С. 3–1
16. Бісик С. Експериментальні дослідження вибухового навантаження макета корпусу бойової броньованої машини. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*, (August 12, 2022; Zurich, Switzerland). P.78–83.
17. Barber J.R. Contact Mechanics. *Solid Mechanics and Its Applications #250*. Springer International Publishing, – 2019. – 585 p.
18. Berge R. L., Berre I., Keilegavlen E., Nordbotten J. M., Wohlmuth B. Finite volume discretization for poroelastic media with fractures modeled by contact mechanics. *Journal for Numerical Methods in Engineering*. Feb 2020. Vol. 121. Issue 4. P. 571-777. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.11916>
19. Serednytska Kh.I., Martynyak R.M. Contact of the Faces of an Interface Thermally Insulated Crack Under Thermomechanical Loading. *Materials Science*. 2021. 57. Pages173–179. DOI:10.1007/s11003-021-00528-z
20. Li Q., Pohrt R., Lyashenko I. A., Popov V. L. Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proc. Inst.Mech. Eng.* 2019. J 234. P. 73–83. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.01885>
21. Ciavarella, M., Joe, J., Papangelo, A., Barber, J. R. The role of adhesion in contact mechanics. *Journal of the Royal Society Interface*. 2019. 16(151). DOI:10.1098/rsif.2018.0738
22. Joe, J., Thouless, M. D., Barber, J. R. (2018). Effect of roughness on the adhesive tractions between contacting bodies. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1. 18. P. 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.06.005>
23. Pandey S., Muniyappa A. Experimental Investigations to Analyze Surface Contact Fatigue Wear by Using a Dynamic Response of the Roller Bearing System. *Research Square*. –2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-219458/v1
24. Geffroy S., Wegner S., Gels S., Schmitz K. Experimental Investigation of New Design Concepts for the Tribological Contact between the Valve Plate and the Cylinder Block in Axial Piston Machines. *Proc. of the 17-th Scand. Int. Conf. on Fluid Power, SICFP'21, Linköping, Sweden*. DOI: <https://doi.org/10.3384/ecp182p104>
25. Tkachuk, M., Lvov, G., Kravchenko, S., Moiseiev, S., Novikov, M., Bumiashev, A., Pakki, G., Podrieza, S. Substantiating promising technical solutions for turbo- expander power plants based on the research into working processes and states. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4, 7(124). P. 98–105. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.28586>
26. Marchenko A., Tkachuk M.A., Kravchenko S., Tkachuk M.M., Parsadanov I. Experimental Tests of Discrete Strengthened Elements of Machine-Building Structures. In: Tonkonogiy V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham*. 2020. P. 559-569. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-40724-7_57
27. Грабовський А. В., Ткачук М. А., Дьоміна Н. А., Ткачук Г. В., Іщенко О. А., Волошина І. О., Третяк В. В. Розрахунково-експериментальне дослідження контактної взаємодії тіл із поверхнями близької форми. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Машинознавство та САПР*. 2021. №1. С. 23–32. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/232447>
28. Кравченко С. О., Ткачук М. А., Грабовський А. В., Веретельник О. В., Ткачук М. М., Гречка І. П., Васильєв А. Ю., Льюзний О. С., Чала Ю. С. Теоретико-експериментальне обґрунтування дискретно-континуальних методів змичнення на основі аналізу контактної взаємодії елементів машин військового та цивільного призначення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Машинознавство та САПР*. –2021. № 1. С. 53–63. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/230116>
29. Ткачук М. М., Гречка І. П., Ткачук М. А., Сериков В. І., Грабовський А. В., Пінчук Н. В., [та ін.] Інтегрована розрахунково-експериментальна технологія аналізу контактної взаємодії з урахуванням пружного проміжного шару. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР*. 2023. № 1. С. 131–151. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/273735>
30. Кравченко С. О. *Забезпечення ресурсу ДВЗ шляхом застосу-*

вання дискретно-континуальних технологій зміцнення робочих поверхонь. Дис. д-ра техн. наук за спеціальністю 05.05.03 Двигуни та енергетичні установки. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2018.

31. Аврунин Г.А., Кабаненко И.В., Хавиль В.В., Истратов А.В. и др. Объемная гидроредукция с шариковыми поршнями ГОИ-900: характеристики и технический уровень. *Механика та машинобудування*. 2004. №1. С.14–21.

References (transliterated)

1. Tkachuk, M.M., Grabovskiy, A., Alokhin, V., Tkachuk, M.A., Vasiliev, A. (2025). Sustainable Development of Transport Objects Through the Implementation of Industry 4.0 and Industry 5.0 Technologies. P. 95-116. In: Marchenko, A., Koruba, Z. (eds) Decarbonization of Transport Energy Installations in the Context of Sustainable Development Strategies. Studies in Systems, Decision and Control. Springer, Cham, vol 635. https://doi.org/10.1007/978-3-032-05884-3_6
2. Rainer Stark, Günther Seliger, Jérémy Bonvoisin. (2017). Sustainable Manufacturing: Challenges, Solutions and Implementation Perspectives. Springer, p. 283. DOI 10.1007/978-3-319-48514-0
3. *Elektronnyi resurs*: <https://www.gm.com/commitments/sustainability>
4. Bhamra, T. and Hernandez, R.J. (2021). Thirty years of design for sustainability: an evolution of research, policy and practice. *Design Science*, 7, pp. e2. DOI 10.1017/dsj.2021.2.
5. Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid. Mariia Golovianko et al. *Procedia Computer Science* 217, 2023, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.206>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922022840>
6. Crnjac Zizic M., Mladineo M., Gjeldum N., Celent L. (2022). From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology. *Energies*, 15(14), pp. 5221. <https://doi.org/10.3390/en15145221>
7. Tkachuk, M.A., Kravchenko, S. O., Grabovskiy, A., Tkachuk, M. M., Vasiliev, A., Novikov, M. & Subbotina, V. (2025). Complex Technologies for Reinforcing Stressed Machine Components. P. 183-203. In: Marchenko, A., Koruba, Z. (eds) Decarbonization of Transport Energy Installations in the Context of Sustainable Development Strategies. Studies in Systems, Decision and Control, vol 635. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-05884-3_10
8. Tkachuk M. A., Novikov M. K., Tkachuk M. M., Hrabovskiy A. V., Pakki H. V., Tkachuk H. V., Podrieza S. M., Dereviankin R. P. (2023). Napriamky ta etapy proiektno-tekhnologichnogo zabezpechennia pidvyshchenykh kharakterystyk turbodetandernykh elektrostansii [Directions and stages of design and technological support for increased characteristics of turboexpander power plants]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «KhPI», seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, No 2, pp. 106-112. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/72438>.
9. Postelnyk H. O., Pinchuk N. V., Meylekhov A. A., Zhadko M. A., Andreev A. A., Stolbovoy V. A. (2021). Influence of Bias Potential Magnitude on Structural Engineering of ZrN-Based Vacuum-Arc Coatings. *Physics and Chemistry of Solid State*, 22(1), pp. 66-72. DOI: 10.15330/PCSS.22.1.66-72.
10. Sobol' O., Dur O. (2020). Structural Engineering of Nanocomposite Coatings Based on Tungsten and Titanium Carbides. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_54.
11. Bourebia M., Laouar L., Hamadache H., Dominiak S. (2017). Improvement of surface finish by ball burnishing: approach by fractal dimension. *Surface Engineering*; 33(4):255-262. DOI: 10.1080/02670844.2016.1232778.
12. Schalk N., Tkadletz M., Mitterer C. (2022). Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapordeposition and future challenges for the coatings community. *Surface and Coatings Technology*, 429, 27949. DOI:10.1016/j.surfcoat.2021.127949
13. Maksakova O., Pogrebnyak and others. (2019). Study of advanced nanoscale ZrN/CrN multilayer coatings. *East European Journal of Physics*, 2, pp. 27–32. DOI:10.26565/2312-4334-2019-2-04
14. Martin J., Leone P., Nomine A., Veys-Renaux D., Henrion G., Belmonte T. (2015). Influence of electrolyte ageing on the plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Surf Coat Technol.*, 269, 36–46. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.001.
15. Chepkov I .B., Oliinyk I. I., Korobchenko S. O. (2021). Protseynyi pidkhid v upravlinni povnym zhyttievym tsyklom ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki na zasadakh prohramno-proiektnoho menedzhmentu [Process approach to managing the life cycle of production and military equipment in the areas of software and project management]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, no. 4. С. 3-11.
16. Bisys S. (2022). Eksperymentalni doslidzhennia vybukhovoho navantazhennia maketa korpusu boiovoi bronovanoi mashyny [Experimental investigation of vibukhovoyvantazheniya model of the hull of an armored combat vehicle]. *Collection of Scientific Papers «АЛОГОΣ»*, (August 12, 2022; Zurich, Switzerland), p.78–83.
17. Barber J.R. *Contact Mechanics. Solid Mechanics and Its Applications #250*. Springer International Publishing, 2019. 585 p.
18. Berge R. L., Berre I., Keilegavlen E., Nordbotten J. M., Wohlmuth B. (2020). Finite volume discretization for poroelastic media with fractures modeled by contact mechanics. *Journal for Numerical Methods in Engineering*, Feb 2020, vol. 121, iss. 4, pp. 571-777. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.11916>
19. Serednytska Kh.I., Martynyak R.M. (2021). Contact of the Faces of an Interface Thermally Insulated Crack Under Thermomechanical Loading. *Materials Science*, vol. 57, pp. 173–179. DOI:10.1007/s11003-021-00528-z
20. Li Q., Pohrt R., Lyashenko I. A., Popov V. L. Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proc. Inst.Mech. Eng.* 2019, J 234, 73–83. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.01885>
21. Ciavarella M., Joe J., Papangelo A., Barber J. R. (2019). The role of adhesion in contact mechanics. *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 16(151). DOI:10.1098/rsif.2018.0738
22. Joe J., Thouless M. D., Barber J. R. (2018). Effect of roughness on the adhesive tractions between contacting bodies. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, (1), vol. 118, pp. 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.06.005>
23. Pandey S., Muniyappa A. (2021). Experimental Investigations to Analyze Surface Contact Fatigue Wear by Using a Dynamic Response of the Roller Bearing System. *Research Square*, DOI: 10.21203/rs.3.rs-219458/v1
24. Geffroy S., Wegner S., Gels S., Schmitz K. (2021). Experimental Investigation of New Design Concepts for the Tribological Contact between the Valve Plate and the Cylinder Block in Axial Piston Machines. *Proc. of the 17:th Scand. Int. Conf. on Fluid Power, SICFP'21*, Linköping, Sweden. DOI: <https://doi.org/10.3384/ecp182p104>
25. Tkachuk M., Lvov G., Kravchenko S., Moiseiev S., Novikov M., Burniashev A., Pakki G., Podrieza S. (2023). Substantiating promising technical solutions for turboexpander power plants based on the research into working processes and states. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, 7(124), pp. 98–105. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.28586>
26. Marchenko A., Tkachuk M.A., Kravchenko S., Tkachuk M.M., Parsadanov I. (2020). Experimental Tests of Discrete Strengthened Elements of Machine-Building Structures. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 559-569. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-40724-7_57
27. Hrabovskiy A. V., Tkachuk M. A., Domina N. A., Tkachuk H. V., Ishchenko O. A., Voloshyna I. O., Tretiak V. V. (2021). Rozrakhunkovo-eksperymentalne doslidzhennia kontaktnoi vzaiemodii til iz poverkhniami blyzkoi formy

- [Rosarchunkovo-experimental investigation of the contact interaction of bodies with surfaces of similar shape]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 23-32. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/232447>
28. Kravchenko S. O., Tkachuk M. A., Hrabovskiy A. V., Veretelnyk O. V., Tkachuk M. M., Hrechka I. P., Vasylyev A. Yu., Loznyi O. S., Chala Yu. C. (2021). Teoretyko-eksperymentalne obgruntuvannya dyskretno-kontynualnykh metodiv zmitsnennia na osnovi analizu kontaktnoi vzaiemodii elementiv mashyn viiskovoho ta tsyvilnoho pryznachennia [Theoretical and experimental substantiation of discrete-continuous strengthening methods based on the analysis of contact interaction of elements of military and civil vehicles]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 53-63. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/230116>
29. Tkachuk M. M., Hrechka I. P., Tkachuk M. A., Sierykov V. I., Hrabovskiy A. V., Pinchuk N. V., [ta in.] (2023). Intehrovana rozrakhunkova-eksperymentalna tekhnolohiia analizu kontaktnoi vzaiemodii z urakhuvanniam pruzhnogo promizhnogo sharu [Integrated computational-experimental technology for analyzing contact interaction taking into account the elastic intermediate layer]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 131-151. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/273735>
30. Kravchenko S. O. *Zabezpechennia resursu DVZ shliakhom zastosuvannia dyskretno-kontynualnykh tekhnolohii zmitsnennia robochykh poverkhon* [Ensuring the service life of internal combustion engines by applying discrete-continuous technologies for strengthening working surfaces]. *Dys. d-ra tekhn. nauk za spetsialnistiu 05.05.03 Dvyhuny ta enerhetychni ustanovy. Natsionalnyi tekhnichni universytet «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut», Kharkiv, 2018.*
31. Avrunyn H.A., Kabanenko Y.V., Khavyl V.V., Ystratov A.V. y dr. (2004). Ob'ємnaia hydroperedacha s sharykovym porshniamy НОР-900: kharakterystyky u tekhnicheskoy uroven. *Mekhanika ta mashynobuduvannia*, no. 1, pp.14–21.

Надійшла (received) 20.12.2026
Стаття прийнята до друку 20.04.2026
Опублікована 28.04.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Ткачук Ганна Володимирівна / Tkachuk Ganna – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології та системи колісних і гусеничних машин ім. О. О. Морозова», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: TkachuckAV@tmm-sapr.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0435-1847>.

Бібік Дмитро Вікторович / Bibik Dmytro – кандидат технічних наук, науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3896-699X>.

Веретельник Олег Вікторович / Veretelnyk Oleg – кандидат технічних наук, науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: veretelnyk.oleg@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4174-8213>

Кравченко Сергій Олександрович / Kravchenko Sergiy – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2882-7814>, e-mail: dvs.khpi2016@gmail.com ID Scopus: 57281194900

Марусенко Світлана Іванівна / Marusenko Svitlana – науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: svivmar@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1340-5491>

Субботіна Валерія Валеріївна / Subbotina Valeria – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувачка кафедри «Матеріалознавство»; м. Харків, Україна; тел.: 067-933-20-68; e-mail: subbotina.valeri@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3882-0368>

Альошін Віталій Ігорович / Alyohin Vitalii – канд. техн. наук, докторант кафедри «Двигуни та гібридні енергетичні установки», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6290-5994>

Дьоміна Наталя Анатоліївна / Domina Natalia – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри вищої математики і фізики, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: natalia.domina@tsatu.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1118-1834>

Сериков Володимир Іванович / Sierykov Volodymyr – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, 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/0000-0002-5295-3925>; e-mail: SerikovVI@tmm-sapr.org

Протасенко Тетяна Олександрівна / Protasenko Tetiana – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5207-7478, e-mail: Tetiana.Protasenko@khpi.edu.ua

Гречка Ірина Павлівна / Hrechka Iryna – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4907-9170>; e-mail: girinap7@gmail.com

Льозний Олег Сергійович / Loznyi Oleg – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID : <https://orcid.org/0009-0001-1122-9068> e-mail: s1708@tmm-sapr.org