

М. А. ТКАЧУК, М. К. НОВІКОВ, М. М. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, Г. В. ПАККІ, Г. В. ТКАЧУК, С. М. ПОДРЕЗА, Р. П. ДЕРЕВ'ЯНКІН

НАПРЯМКИ ТА ЕТАПИ ПРОЄКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБОДЕТАНДЕРНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Робота містить опис інтегрованого підходу до проєктно-технологічного забезпечення підвищених характеристик турбодетандерних електростанцій. Аналіз сучасного стану розроблення турбодетандерних електростанцій дав підстави установити, що натеper традиційні підходи значною мірою вичерпали можливості підвищення їх технічних характеристик. Більш того, складається ситуація, коли для забезпечення підвищення таких характеристик потрібне залучення не ізольованих проєктних чи технологічних, а сумісних проєктно-технологічних заходів. Для реалізації такого підходу застосовано метод узагальненого параметричного моделювання. При цьому за рахунок об'єднання проєктних і технологічних параметрів розширюється параметричний простір, у якому здійснюється пошук раціональних технічних рішень турбодетандерних електростанцій. Саме завдяки такому розширенню параметричного простору вдається підвищити ефективність кінцевого рішення. Таке рішення неможливо досягнути тільки за рахунок проєктних чи тільки технологічних заходів. Розроблений підхід реалізовано у вигляді послідовності розв'язаних етапів. По-перше, це дослідження робочих процесів газодинаміки, тепломасопереносу та енергогенерування у турбодетандерних електростанціях. По-друге, це оптимізація технологічних операцій зміцнення елементів цих установок. По-третє, це розроблення реальних зразків турбодетандерних електростанцій із підвищеними технічними характеристиками. У цілому зазначені етапи, які здійснюються взаємоузгоджено на основі розробленого узагальненого параметричного підходу, дали можливість на 25 – 40 % підвищити довговічність елементів турбодетандерних електростанцій та забезпечити ККД за детандером на рівні 86 %.

Ключові слова: турбодетандерна електростанція; турбоустановка; дискретно-континуальне зміцнення, узагальнений параметр, проєктно-технологічне забезпечення; технічна характеристика

М. А. ТКАЧУК, М. NOVIKOV, М. М. ТКАЧУК, А. GRABOVSKIY, G. PAKKI, G. TKACHUK, S. PODRIEZA, R. DEREVIANKIN

AREAS AND STAGES OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR ENHANCED PERFORMANCE OF TURBO-EXPANDER POWER PLANTS

The paper describes an integrated approach to the design and technological support of enhanced performance of turbo-expander power plants. An analysis of the current state of development of turboexpander power plants has made it possible to establish that traditional approaches have largely exhausted the possibilities of improving their technical characteristics. Moreover, a situation is emerging where, in order to ensure the improvement of such characteristics, it is necessary to involve not isolated design or technological measures, but joint design and technological measures. To implement this approach, the method of generalized parametric modeling is used. At the same time, by combining design and technological parameters, the parametric space in which to search for rational technical solutions for turbo-expander power plants is expanded. This expansion of the parametric space makes it possible to increase the efficiency of the final solution. Such a solution cannot be achieved through design or technological measures alone. The developed approach is implemented in the form of a sequence of solved stages. First, it is a study of the working processes of gas dynamics, heat and mass transfer, and power generation in turboexpander power plants. Secondly, it is the optimization of technological operations for strengthening the elements of these plants. Thirdly, it is the development of real samples of turbo-expander power plants with improved technical characteristics. In general, these stages, which are carried out in a coordinated manner on the basis of the developed generalized parametric approach, made it possible to increase the durability of turboexpander elements by 25-40 % and ensure the efficiency of the detander at the level of 86 %.

Keywords: turbo-expander power plant; turbine installation; discrete-continuous strengthening, generalized parameter, design and technological support; technical characteristics

Вступ. Підвищена увага до розроблення високоефективних турбодетандерних електростанцій (ТдЕС) та інших типів турбодетандерних установок [1] зумовлена об'єктивними обставинами, які склалися в енергетичній галузі. Серед цих обставин – зростання чинників енергобезпеки, автономності, енергоефективності та диверсифікації джерел енергопостачання. Таким чином, ТдЕС набувають застосування не тільки як засіб утилізації енергії, але і як чинник безпеки та стабільності. При цьому природньо очікувати від розроблюваних ТдЕС підвищених технічних характеристик (ТХ), зокрема, довговічності роботи та ККД. У свою чергу, традиційні підходи до вирішення цих проблемних питань досягли певної «стелі можливостей». Тобто, окремі частинні напрямки (оптимізація робочих процесів, конструктивне втілення, технологічні засоби), задіяні кожний окремо та не зв'язано з іншими, не дають відчутного просування у підвищенні окремих компонент ТХ, а тим більше – повного їх набору. Задля досягнення бажаного ефекту необхідне розроблення альтернативних підходів. У першу чергу привертає увагу комплексність, охоплення та взаємозв'язаність окремих напрямків, етапів, моделей, методів та засобів

забезпечення підвищених ТХ ТдЕС. А це потребує створення нової парадигми організації життєвого циклу розроблення ТдЕС, удосконалення підходів та методологічної бази обґрунтування їх технічних рішень із підвищеними ТХ. Це сформувало тематику розробок та досліджень, які охоплені увагою у цій роботі.

Аналіз існуючих методів і засобів забезпечення технічних характеристик турбодетандерних електростанцій. ТдЕС як складний технічний об'єкт має різні аспекти, які необхідно враховувати при аналізі їх функціонування, з одного боку, та при обґрунтуванні прогресивних технічних рішень, – з іншого. Тому у цьому розрізі привертають увагу декілька напрямків, важливих для досягнення кінцевих бажаних результатів.

1. *Методи аналізу робочих процесів у турбодетандерних електростанціях*

Як зазначено у роботі [1], різні фізико-механічні процеси, які визначають технічні характеристики турбодетандерних установок, привертають увагу

© М. А. Ткачук, М. К. Новіков, М.М. Ткачук, А. В. Грабовський, Г. В. Паккі, Г. В. Ткачук, С. М. Подреза, Р. П. Дерев'янкін, 2023

різних дослідників. Це, зокрема, питання моделювання процесів гідрогазодинаміки [2–6]. Разом із тим, враховуючи різноаспектність цих досліджень, створюються певні проблеми для об'єднання різних частинних результатів задля досягнення єдиного комплексного результату.

2. Методи зміцнення елементів машин

Елементи ТдЕС працюють у достатньо важких умовах експлуатації. Тому для них актуальними є питання їх зміцнення. При цьому, наприклад, застосовуються методи континуального [7–13] та дискретного [14] зміцнення. Вони полягають, відповідно, у створенні неперервно та мозаїчно розташованих зон покриттів робочих поверхонь оксидами та високолегованими матеріалами. Разом із тим ці методи мають «вроджені» вади, притаманні їм у силу їхньої природи. Тому видається доцільним розширити множину способів зміцнення елементів конструкцій задля підвищення ТХ, зокрема, ТдЕС.

3. Конструктивні рішення елементів турбодетандерних електростанцій

В силу зазначених вище аспектів традиційні підходи до обґрунтування технічних рішень ТдЕС [16–19] та відомі їх варіанти [20, 21] потребують розвитку та поліпшення відповідно.

4. Методологічна основа сучасних технологій розроблення турбодетандерних установок та інших конструкцій

Враховуючи, що проблема підвищення технічних характеристик ТдЕС є різноплановою, виникає проблема загальнометодологічної основи комплексних багатопланових досліджень задля поліпшення технічних рішень на основі багатоваріантних розрахунків процесів і станів досліджуваних варіантів їх конструкцій. Для цієї мети, зокрема, підходить метод узагальненого параметричного моделювання [15].

5. Чисельні методи аналізу процесів і станів у складних системах

Окрім методів зміцнення та варіювання поточних технічних рішень ТдЕС, потребують розвитку та інтеграції у весь цикл проєктних досліджень методи аналізу процесів і станів при дії експлуатаційних навантажень. У першу чергу це стосується моделей та методів аналізу контактної взаємодії [22–26]. При цьому слід звернути увагу на розвиток методів визначення контактної взаємодії та напружено-деформованого стану на основі скінченно- та гранично-елементного моделювання [27–30]. Результати аналізу сучасного стану досліджень елементів ТдЕС наштовхують на висновок про те, що розвитку та адаптації потребують усі проаналізовані аспекти. Якраз це і сформулово напрямки досліджень, описані у роботі.

Мета роботи – розроблення нового підходу до забезпечення підвищення технічних характеристик турбодетандерних електростанцій на основі комплексного урахування взаємозв'язаних проєктно-технологічних чинників.

Основи комплексного підходу до аналізу фізико-механічних процесів і станів та обґрунтування прогресивних технічних рішень турбодетандерних електростанцій. Із метою вирішення сформованих проблем пропонується

залучити та адаптувати метод узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних системах [15]. Відповідно, формується узагальнений параметричний простір зі складовими:

$$P = P_E \cup P_T \cup P_C, \quad (1)$$

де P_E, P_T, P_C – підмножини параметрів, які описують робочі процеси E , технологічні T та конструктивні C рішення ТдЕС, відповідно.

Тобто, уже на цьому етапі закладається єдина методологічна база опису об'єкта досліджень як цілісного.

Якщо записати в операторному вигляді різні процеси і стани, які описуються змінними станів

$$U = U_E \cup U_T, U_C. \quad (2)$$

$$L_E(P_E, P_T, P_C) = 0, \quad (3)$$

$$L_T(P_E, P_T, P_C) = 0, \quad (4)$$

$$L_C(P_E, P_T, P_C) = 0, \quad (5)$$

то уже на рівні моделювання робочих процесів (L_E), технологій (L_T) та конструктивів (L_C) співвідношення (3)–(5) формально взаємоув'язують, з одного боку, різні процеси і стани (описувані відповідними змінними стану $E-U_E, T-U_T, C-U_C$), а, з іншого, різні типи узагальнених параметрів. Отже, співвідношення (1)–(5) формують єдину комплексну модель аналізу фізико-механічних процесів і станів у ТдЕС.

Окрім задач аналізу (1)–(5), привертають увагу і задачі синтезу. Формально їх можна подати у вигляді

$$I(u(P), P) \rightarrow \text{extr}, \quad (6)$$

$$H(u(P), P) \rightarrow [H], \quad (7)$$

де I – певні критеріальні функції (маса, потужність, довговічність, ККД тощо), H – певні характеристики, на які накладаються деякі обмеження $[H]$.

Знову ж таки, формально співвідношення (6), (7) відрізняються від традиційних оптимізаційних постановок саме комплексністю опису самого об'єкта (1) та його поведінки (2)–(5). В силу цього розв'язок P^* задачі (6), (7), побудований у розширеному просторі (1), більш ефективний, ніж набір розв'язків P_k^{**} ($k = 1, 2, \dots$) за частинними критеріями та обмеженнями. Разом із тим слід зазначити, що таке підвищення ефективності такого розв'язку досягається за рахунок зростання громіздкості та складності комплексних моделей (1)–(5). Ілюстрація застосовності розробленого підходу – на прикладі окремих етапів моделювання життєвого циклу ТдЕС.

Аналіз робочих процесів у турбодетандерних електростанціях. Першочерговим етапом проєктних досліджень є аналіз робочих процесів у елементах ТдЕС. Зокрема, це процеси газодинаміки, тепломасопереносу та енергогенерування. Ці процеси моделюються відповідними системами рівнянь [2–6, 18–21]. У ході розв'язання цих систем рівнянь

визначаються просторово-часові розподіли змінних, які описують усі зазначені процеси. Так, на рис. 1–3

наведені ілюстрації таких розподілів.

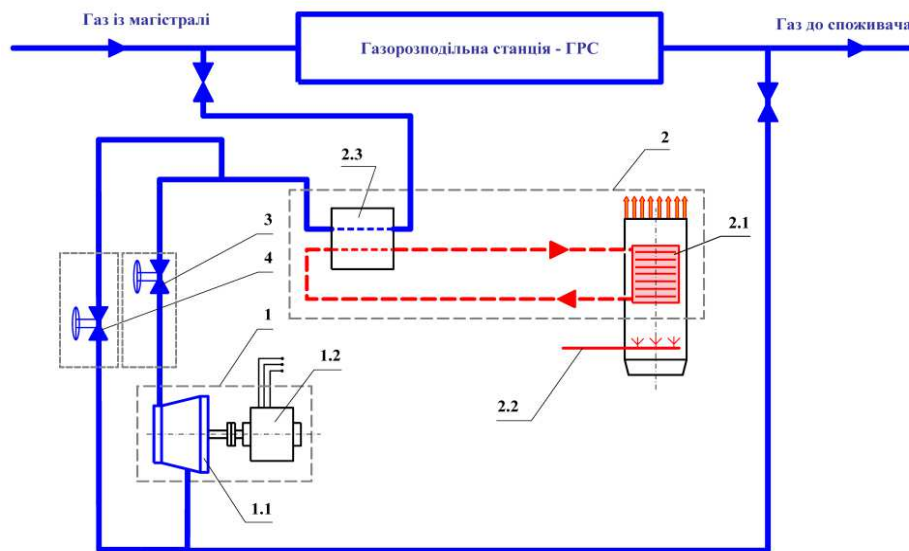


Рисунок 1 – Схема прив'язки ТДЕС до газорозподільної станції [10]:

- 1 – турбодетандерний агрегат; 1.1 – турбодетандер; 1.2 – генератор; 2 – теплообмінне обладнання; 2.1 – теплообмінник (котел водоогрійний); 2.2 – пристрій допалюючий; 2.3 – підігрівач «газ-вода»; 3 – блок клапана стопорно-дозуючого; 4 – блок клапана байпасно-регулюючого [1]

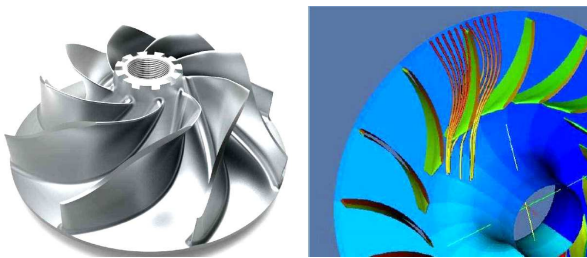


Рисунок 2 – Модель робочого колеса та картина течії газу в міжлопаткових каналах

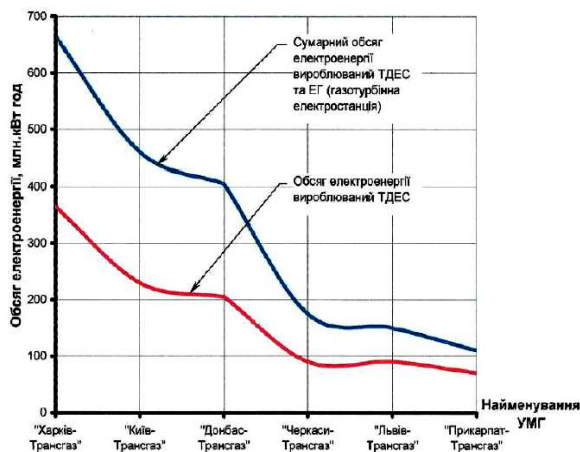


Рисунок 3 – Обсяг електроенергії, що виробляється ТДЕС та ТДЕС+ЕГ (електротурбогенератори) різними управліннями магістральних газопроводів (УМГ)

Слід прийняти до уваги, що усі процеси і стани, що моделюються, є залежними від усієї множини параметрів P . Тобто існує параметрична залежність параметрів і процесів від P . Вона доповнюється також залежністю від P критеріальних і обмежувальних

характеристик I, H .

Аналіз та удосконалення методів зміцнення елементів турбодетандерних електростанцій. Одним із компонентів технологічного забезпечення довговічності ТДЕС є зміцнення їхніх найбільш навантажених та відповідальних елементів. При цьому привертають увагу два різних типи методів поверхневого зміцнення елементів конструкцій.

Перший із них – континуальні методи, які полягають у неперервному розподілі або додаткового зміцнюючого матеріалу (плівок, напилень покриттів тощо), або енергії, або силового впливу на поверхневі шари деталей ТДЕС. Серед таких методів, зокрема, ефективними є нанесення вакуумно-дугових нітридних покриттів, створення (вирощування) зміцненого шару методом мікродугового оксидування тощо [7–12]. Позитивними властивостями такого типу методів є саме суцільне зміцнення поверхні, відпрацьованість режимів та прогнозованість результатів застосування.

Інша група методів – дискретне зміцнення [14, 31, 32]. Воно полягає у формуванні не суцільного шару, а архіпелагу зміцнених острівців на поверхні зміцнюваної деталі. Відтак формується композиційна структура, яка складається із більш та менш міцних компонент, які між собою чергуються. Такий почерговий розподіл згідно принципу Шарпі [31, 32] є сприятливим із точки зору зниження зношування, зниження тертя та підвищення міцності створюваної композиції в цілому. Як один із методів – електроіскрове легування деталей конструкцій [31, 32].

До негативних сторін методів континуального зміцнення можна віднести різномірність властивостей матеріалів композиції (основного та зміцнювального), що спричиняє проблеми із відшаруванням, розтріскуванням, втомою тощо. Що стосується негативних властивостей методів дискретного

зміцнення, то однією із них є неврахування властивостей спряженої деталі. Тобто дискретно зміцнена деталь працює у контактному спряженні із іншою деталлю, і необхідно враховувати властивості не однієї цієї зміцненої деталі, а системи, у складі якої – також і дискретно зміцнена деталь.

Враховуючи наявність зазначених та незазначених вище переваг та недоліків методів дискретного та континуального зміцнення, природним видається розвиток цих методів та застосування у системі контактуючих деталей композиції «дискретно зміцнена деталь – континуально зміцнена деталь» [14, 31–33]. Цим самим розширюється простір технологічних режимів та параметрів, шляхом варіювання котрими можна досягти ефекту набагато вищого, ніж при застосування кожного із методів окремо. Принциповим якісним моментом є ефект синергії: досягається посилення позитивних та приглушення негативних якостей кожного із принципово різних методів зміцнення (див. вище).

Із точки зору кількісної оцінки створюється можливість підвищити не одну, а декілька характеристик системи зміцнюваних таким методом контактуючих деталей. Разом із тим ці позитивні тенденції супроводжуються тим недоліком, що у результаті синтезу визначається раціональний варіант режимів і параметрів дискретно-континуального зміцнення якраз під ті чи інші конкретні умови роботи. Це та «ціна», яку необхідно «заплатити» за підвищення ефективності цього методу зміцнення. Його ефективність висока, проте саме «під конкретні умови та вимоги».

Звернемося до конкретного тестового варіанту застосування дискретно-континуального методу зміцнення. Із контактуючих макродеталей виокремлено презентативний фрагмент (рис. 4).

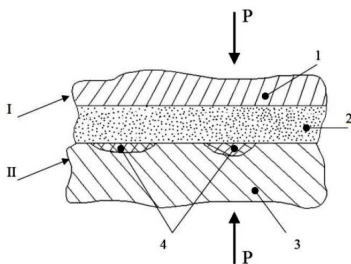


Рисунок 4 – Схема контактної взаємодії деталей:

I – деталь з алюмінієвого сплаву, зміцнена шляхом гальвано-плазмового перетворення поверхні зі створенням корундового шару (2), II – деталь (основний матеріал – сталь, чавун (3)), зміцнена методом дискретного зміцнення (дискретно-зміцнена зона (4)) [1, 14]

Цей фрагмент містить, з одного боку, алюмінієву деталь із вирощеним поверхневим шаром Al_2O_3 методом мікродугового оксидування. З іншого боку, у системі присутня деталь, зміцнена шляхом інденції в основний матеріал (сталь, чавун) високоміцних зон (високолегована сталь, твердий сплав тощо). На виокремлений фрагмент (зовнішня неконтактна поверхня) діє навантаження 100 МПа.

У зоні контактування відбувається нерівномірне деформування контактуючих поверхонь – т. з. « δ -

ефект» [1, 14, 31, 32].

Відповідно, між контактуючими деталями діє контактний тиск, розподілений суттєво нерівномірно (рис. 5). Тобто здійснюється перерозподіл навантажень на зони дискретного зміцнення (див. рис. 4). Ці зони мають підвищені трибомеханічні характеристики. Отже, це створює сприятливі умови із точки зору забезпечення підвищеної міцності, зниженого тертя та зношування. Це – т. з. « σ -ефект» [1, 14, 31, 32] (рис. 6).

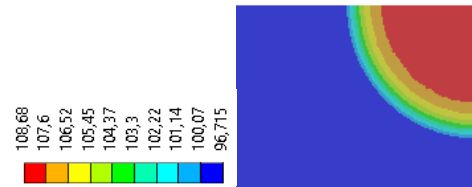


Рисунок 5 – Розподіл контактної тиску між дискретно-континуально зміцненими деталями, МПа, при дії на вільну поверхню контактної тиску 100 МПа

Зазначені ефекти мають місце і у випадку дискретного зміцнення, і дискретно-континуального. Проте кількісний прояв цих ефектів залежить від властивостей шару Al_2O_3 .

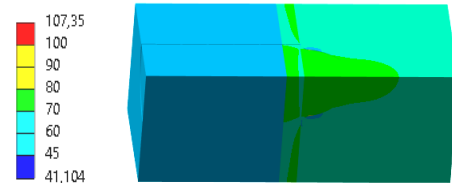


Рисунок 6 – Картини розподілу еквівалентних за Мізесом напружень у дослідженому представницькому фрагменті дискретно-континуально зміцнених тіл, МПа, при дії на вільну поверхню контактної тиску 100 МПа

Для оцінки кількісних залежностей характеристик міцності, тертя та зношуваності будують функції, які відображають зміну цих характеристик при варіюванні певних параметрів. При цьому можливо обрати варіант із більш високими службовими характеристиками.

Конструктивні рішення зразків турбодетандерних установок. На основі здійсненого комплексу досліджень здійснено формування низки варіантів зразків ТдЕС [turbogaz.com]. На рис. 7, 8 наведені приклади таких зразків. Вони характеризуються підвищеними на 25–40 % довговічністю та ККД за детандером на рівні 86 %.

Висновки. Здійснені розробки, дослідження та обґрунтовані на їх основі технічні рішення створили основу для таких висновків.

1. Розроблений підхід, який базується на розширеному параметричному моделюванні процесів і станів на різних напрямках та етапах розроблення турбодетандерних електростанцій, об'єднує різномірні сторони їх життєвого циклу. Відповідно, це створює переваги при обґрунтуванні прогресивних проектно-технологічних рішень турбодетандерних електростанцій із підвищеними технічними характеристиками.

2. Розроблена узагальнена математична модель аналізу робочих процесів і станів об'єднує усі параметри

та змінні стану (характеризують робочі процеси, технології та конструктиви), що об'єднує усі сторони функціонування турбодетандерних електростанцій. Ця властивість поширена також і на етапи синтезу. Відповідно, технічні рішення, що обґрунтовуються, є більш ефективними не тільки за окремими, а за цілим комплексом критеріїв та обмежень.

3. У розрізі застосування розробленого підходу здійснено дослідження робочих процесів газодинамічних потоків газу через лопатеві канали робочого колеса, тепломасопереносу у цих системах та енергогенерування. Це дало змогу обґрунтувати основні параметри та режими цих робочих процесів.

4. На противагу традиційним технологіям дискретного та континуального зміцнення, застосовуваним кожна окремо, розроблена комплексна технологія дискретно-континуального зміцнення. Ця технологія поєднує дискретне зміцнення однієї із контактуючих деталей та континуальне – іншої. Завдяки цьому створені потенціальні можливості посилити позитивні та заглушити негативні властивості дискретного та континуального методів зміцнення. Більш того, підбираються сумісно режими і дискретного, і континуального зміцнення контактуючих деталей, які найбільшою мірою задовольняють у тому чи іншому конкретному випадку комплексу критеріїв та обмежень, що пред'являються до елементів турбодетандерних електростанцій.



Рисунок 7 – Модельний ряд детандер-генераторів діапазону: потужності – від 3,5 кВт до 16,0 МВт, тиску газу – до 6,3 МПа, споживання газу – 0,05 млн. км³/добу



Рисунок 8 – Конструктивне виконання детандер-генераторних агрегатів: а – на підшипниках кочення; б – на підшипниках ковзання; в – з використанням активного магнітного підвісу

5. На завершальному етапі обґрунтовано конкретні варіанти конструктивних рішень зразків ТдЕС. Вони забезпечують на 25–40 % підвищення довговічності найбільш відповідальних та навантажених елементів турбодетандерних електростанцій, а також ККД на рівні 86 % за детандером.

Розроблений підхід та результати досліджень є основою для подальшого удосконалення турбодетандерних електростанцій та інших установок і машин.

Список літератури

1. Tkachuk M., Lvov G., Kravchenko S., Moiseiev S., Novikov M., Burniashev A., Pakki G., Podrieza S. (2023) Substantiating promising technical solutions for turbo- expander power plants based on the research into working processes and states. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied mechanics*. Vol. 4. No. 7 (124)
2. Dixon, S.L., Hall, C.A. (2010). *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. UK : Elsevier, 459. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20205-4>
3. Simms, J. (2009). *Fundamentals of Turboexpanders*. Available at: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=5236f8abd039b1146f66ab16&assetKey=AS%3A272141839208458%401441895078987>
4. Saravanamuttoo, H. I. H., Rogers, G. F. C., Cohen, H. et al. (2008). *Gas Turbine Theory*. Pearson College Div., 608. <https://soaneemrana.org/onewebmedia/GAS%20TURBINE%20THEORY%20BY%20НИН%20SARAVANAMUTTOO,%20H.%20COHEN%20&%20GFC%20ROGERS.pdf>
5. White, F. (2008). *Fluid Mechanics*. New York : McGraw-Hill, 885. http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/White_2011_7ed_Fluid-Mechanics.pdf
6. Kundu, P., Cohen, I., Dowling, D. (2012). *Fluid mechanics*. UK : Academic Press, 920
7. Subbotina, V., Sobol, O. (2020). Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials*, 14, 6, 247–250. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2020/6/247>
8. Subbotina, V., Sobol, O., Belozarov, V., Subbotin, A., Smyrnova, Y. (2020). A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on d16 alloy during microarc oxidation in electrolytes of different types. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 12(106), 14–23. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209722 <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/209722/210868>
9. Subbotina, V. V., Sobol, O. V., Belozarov, V. V., Schneider, V. V., UF Al-Qawabeha, Tabaza, T. A., SM Al-Qawabah (2019). Increase of the a-Al2O3 phase content in MAO-coating by optimizing the composition of oxidated aluminum alloy. *Functional materials*, 26 (4), 752–758. <https://doi.org/10.15407/>

- fm26.04.752
10. Субботін, О. В., Білозеров, В. В., Волков, О. О., Субботіна, В. В., Шевцов, В. М. (2022). Фрикційні властивості МДО–покриттів на алюмінієвих сплавах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*, 2, 59–63. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2022.2.07>
 11. Asquith, D., Yerokhin, A., James, N., Yates, J., & Matthews, A. (2013). Evaluation of residual stress development at the interface of plasma electrolytically oxidized and cold-worked aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 44(10), 4461–4465. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1854-0>
 12. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A. (2017). Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 27, 1439–1454. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60166-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60166-3)
 13. 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. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.001>
 14. Marchenko, A., Tkachuk, M. A., Kravchenko, S., Tkachuk, M. M., Parsadanov, I. (2020). Experimental Tests of Discrete Strengthened Elements of Machine-Building Structures. InterPartner 2019. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 559–569. doi: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-40724-7_57
 15. Ткачук Н.А., Грищенко Г.Д., Чепурной А.Д. [и др.] Конечные элементные модели элементов сложных механических систем: технология генерации и параметризованного описания. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2006. № 1. С. 57–79.
 16. Avetian, T. and Rodriguez, L. (2020). *Fundamentals of turboexpander design and operation*. Available at: <https://fliphtml5.com/gktj/sepi/basic>.
 17. Logan Jr., E. (2003). *Handbook of Turbomachinery*. New York : Marcel Dekker, 880. <https://doi.org/10.1201/9780203911990>.
 18. Korpela, S. A. (2011). *Principles of Turbomachinery*. Canada : John Wiley & Sons, 467
 19. Khan, Rama S. R. Gorla & Aijaz A. (2003). *Turbomachinery Design and Theory*. New York : Marcel Dekker, 397
 20. *Детандер генератор*. Available at: https://turbogaz.com.ua/uk/equipment/dgu_ua
 21. Моисеев А. Н. (2015). Энергоэффективная турбоэлектро-механическая система для газораспределительных станций. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 12 (1121), 356–359. http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2015_12_0.pdf
 22. Paggi, M., Barber, JR (2011). Contact conductance of rough surfaces composed of modified rmd patches. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(21), 4664–4672. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06.011>
 23. Zavarise, G., Borri-Brunetto, M., Paggi, M. (2007). On the resolution dependence of micromechanical contact models. *Wear*, 262(1), 42–54. doi:10.1016/j.wear.2006.03.044
 24. Pohrt, R., Popov, V. L. (2013). Contact mechanics of rough spheres: Crossover from fractal to hertzian behavior. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Tribology*, 2013, Article ID 974178, 4 p. doi:10.1155/2013/974178
 25. Liu, J., Ke, L., Zhang, C. (2021). Axisymmetric thermoelastic contact of an FGM-coated half-space under a rotating punch. *ActaMechanica*, 232(6), 2361–2378. DOI:10.1007/s00707-021-02940-7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00707-021-02940-7>
 26. Martynyak, R. M., Prokopyshyn, I. A., Prokopyshyn, I. I. (2015). Contact of elastic bodies with nonlinear Winkler surface layers. *Journal of Mathematical Sciences*. Springer US, 205 (4), 535–553. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10958-015-2265-0>
 27. Tkachuk, M. (2018). A Numerical Method for Axisymmetric Adhesive Contact Based on Kalker’s Variational Principle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/7(93), 34–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132076>
 28. Tkachuk, M., Grabovskiy, A., Tkachuk, M., Hrechka, I., Sierykov, V. (2021). Contact Interaction of a Ball Piston and a Running Track in a Hydrovolumetric Transmission. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV (DSMIE 2021)*, Lviv, Ukraine. *Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME)*, 195–203. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-77823-1_20
 29. Vollebregt, E.A.H. (2012). 100-fold speed-up of the normal contact problem and other recent developments in «CONTACT». *Proceedings of the 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*. China, 96, 201–209
 30. Li, J., E., J. (2003). Berger A semi-analytical approach to three-dimensional normal contact problems with friction. *Computational Mechanics*, 30, 310–322. doi:10.1007/s00466-002-0407-y
 31. Ткачук, Н. А., Кравченко, С. А., Пылев, В. А., Парсаданов, И. В., Грабовский, А. В., Веретельник, О. В. (2019). Дискретно-континуальное упрочнение контактирующих элементов конструкций: концепция, математическое и численное моделирование. *Наука и техника*, 18(3), 240–247. <https://sat.bntu.by/jour/article/view/1980/1794>
 32. Ткачук Н.А., Дьяченко С.С., Посвятенко Э.К., Кравченко С.А. [и др.] *Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография*. Харків: «Планета-Прінт», 2018. 259 с.
 33. Моисеев С. В., Новиков М. К., Бурняшев А. В., Пакки Г. В., Ткачук М. А. [та інші]. Розроблення проривних технологій зміцнення елементів турбодетандерних установок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2023. № 1. С. 53–67.

References

1. Tkachuk M., Lvov G., Kravchenko S., Moiseiev S., Novikov M., Burniashev A., Pakki G., Podrieza S. (2023) Substantiating promising technical solutions for turbo- expander power plants based on the research into working processes and states. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied mechanics*, vol. 4, no. 7 (124).
2. Dixon, S.L., Hall, C.A. (2010). *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. UK : Elsevier, 459. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20205-4>
3. Simms, J.(2009). *Fundamentals of Turboexpanders*. Available at: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=5236f8abd039b1146f66ab16&assetKey=AS%3A272141839208458%401441895078987>
4. Saravanamuttoo, H. I. H., Rogers, G. F. C., Cohen, H. et al. (2008). *Gas Turbine Theory*. Pearson College Div., 608. <https://soaneemrana.org/onewebmedia/GAS%20TURBINE%20THEORY%20BY%20HIH%20SARAVANAMUTTOO,%20H.%20COHEN%20&%20GFC%20ROGERS.pdf>
5. White, F. (2008). *Fluid Mechanics*. NewYork : McGraw-Hill, 885. http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/White_2011_7ed_Fluid-Mechanics.pdf
6. Kundu, P., Cohen, I., Dowling, D. (2012). *Fluid mechanics*. UK : Academic Press, 920
7. Subbotina, V., Sobol, O. (2020). Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials*, 14, 6, 247–250. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2020/6/247>
8. Subbotina, V., Sobol, O., Belozero, V., Subbotin, A., Smyrnova, Y. (2020). A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on d16 alloy during microarc oxidation in electrolytes of different types. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 12(106), 14–23. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209722http://journals.uran.ua/eejet/article/view/209722/210868
9. Subbotina, V. V., Sobol, O.V., Belozero, V. V., Schneider, V. V., UF Al-Qawabeha, Tabaza, T. A., SM Al-Qawabah (2019). Increase of the a-Al2O3 phase content in MAO-coating by optimizing the composition of oxidated aluminum alloy. *Functional materials*, 26 (4), 752–758. <https://doi.org/10.15407/fm26.04.752>
10. Subbotin, O. V., Bilozero, V. V., Volkov, O. O., Subbotina, V. V., Shevtsov, V. M. (2022). Fryktsiyini vlastyosti MDO–pokryttiv na alyuminiyevykh splavakh. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. Seriya: *Mashynoznavstvo ta SAPR*, 2, 59–63.
11. Asquith, D., Yerokhin, A., James, N., Yates, J., & Matthews, A. (2013). Evaluation of residual stress development at the interface of plasma electrolytically oxidized and cold-worked aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 44(10), 4461–4465. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1854-0>
12. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A. (2017). Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys. *Transactions of nonferrous*

- metals society of China, 27, 1439–1454. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60166-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60166-3)
13. 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. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.001>
 14. Marchenko, A., Tkachuk, M. A., Kravchenko, S., Tkachuk, M. M., Parsadanov, I. (2020). Experimental Tests of Discrete Strengthened Elements of Machine-Building Structures. InterPartner 2019. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 559-569. doi: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-40724-7_57
 15. Tkachuk N.A., Gritsenko G.D., Chepurnoy A.D. [i dr.] Konechno-elementnyye modeli slozhnykh mekhanicheskikh sistem: tekhnologiya generatsii i parametrizovannogo opisaniya. *Mekhanika i mashinostroyeniye*. Khar'kov: NTU "KHPI", 2006, no. 1, pp. 57-79.
 16. Avetian, T. and Rodriguez, L.(2020). *Fundamentals of turboexpander design and operation*. Available at: <https://fliphtml5.com/gktj/sepi/basic>
 17. Logan Jr., E. (2003). *Handbook of Turbomachinery*. New York : Marcel Dekker, 880. <https://doi.org/10.1201/9780203911990>
 18. Korpela, S. A. (2011). *Principles of Turbomachinery*. Canada : John Wiley & Sons, 467
 19. Khan, Rama S. R. Gorla & Aijaz A. (2003). *Turbomachinery Design and Theory*. New York : Marcel Dekker, 397
 20. *Detander henerator*. Available at: https://turbogaz.com.ua/uk/equipment/dgu_ua
 21. Moiseyev A. N. (2015). Energoeffektivnaya turboelektromekhanicheskaya sistema dlya gazoraspredivitel'nykh stantsiy. *Vestnik NTU «KHPI»*. 12 (1121), 356-359. http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2015_12_0.pdf
 22. Paggi, M., Barber, JR (2011). Contact conductance of rough surfaces composed of modified rmd patches. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(21), 4664–4672. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06.011>
 23. Zavarise, G., Borri-Brunetto, M., Paggi, M. (2007). On the resolution dependence of micromechanical contact models. *Wear*, 262(1), 42–54. doi:10.1016/j.wear.2006.03.044
 24. Pohrt, R., Popov, V. L. (2013). Contact mechanics of rough spheres: Crossover from fractal to hertzian behavior. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Tribology*, 2013, Article ID 974178, 4 p. doi:10.1155/2013/974178
 25. Liu, J., Ke, L., Zhang, C. (2021). Axisymmetric thermoelastic contact of an FGM-coated half-space under a rotating punch. *ActaMechanica*, 232(6), 2361–2378. DOI:10.1007/s00707-021-02940-7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00707-021-02940-7>
 26. Martynyak, R. M., Prokopyshyn, I. A., Prokopyshyn, I. I. (2015). Contact of elastic bodies with nonlinear Winkler surface layers. *Journal of Mathematical Sciences*. Springer US, 205 (4), 535–553. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10958-015-2265-0>
 27. Tkachuk, M. (2018). A Numerical Method for Axisymmetric Adhesive Contact Based on Kalker's Variational Principle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7/93), 34–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132076>
 28. Tkachuk, M., Grabovskiy, A., Tkachuk, M., Hrechka, I., Sierykov, V. (2021). Contact Interaction of a Ball Piston and a Running Track in a Hydrovolumetric Transmission. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV (DSMIE 2021)*, Lviv, Ukraine. *Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME)*, 195–203. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-77823-1_20
 29. Vollebregt, E.A.H. (2012). 100-fold speed-up of the normal contact problem and other recent developments in «CONTACT». *Proceedings of the 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*. China, 96, 201–209
 30. Li, J., E., J. (2003). Berger A semi-analytical approach to tree-dimensional normal contact problems with friction. *Computational Mechanics*, 30, 310–322. doi:10.1007/s00466-002-0407-y
 31. Tkachuk, N. A., Kravchenko, S. A., Pylev, V. A., Parsadanov, I. V., Grabovskiy, A. V., Veretel'nik, O. V. (2019). Diskretno-kontinual'noye uprocheniye kontaktiruyushchikh chastey konstruksiy: kontseptsiya, matematicheskoye i besschetnoye modelirovaniye. *Nauka i tekhnika*, 18(3), 240-247. <https://sat.bntu.by/jour/article/view/1980/1794>
 32. Tkachuk N.A., S.S. D'yachenko, É.K. Posvyatenko, S.A. Kravchenko [y dr.] *Kontynual'naya y dyskretno-kontynual'naya modelyatsyya poverkhnostey detaley: monohrafyya*. Kharkiv: «Planeta-Print», 2018. 259 s.
 33. Moiseyev S. V., Novikov M. K., Burnyashev A. V., Pakki H. V., Tkachuk M. A. [ta insh.] *Rozroblennyya proryvnykh tekhnolohiy zmitsnennyya elementiv turbodetandernykh ustanovok*. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. Seriya: *Mashynoznavstvo ta SAPR*. 2023, no. 1, pp. 53-67

Надійшла (received). 12.09.2023

Відомості про авторів / About the Authors

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

Новіков Максим Костянтинович / Novikov Maksym – ПрАТ «ТУРБОГАЗ», заступник Голови Правління, головний інженер, м. Харків, Україна; e-mail: novikovmaxim1980@ukr.net

Ткачук Миколайович / Tkachuk Mykola M. – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>, тел.: (057)7076902, e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org.

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

Паккі Гліб Вікторович / Pakki Glib – ПрАТ «ТУРБОГАЗ», начальник розрахунково-конструкторського відділу, м. Харків, Україна; e-mail: glibpakki@gmail.com

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

Подреза Сергій Михайлович / Podrieza Sergii – доктор економічних наук, «Український центр сертифікації та експертизи авіаційної техніки», голова ради директорів, м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2396-9570>, тел.: +380503103447, e-mail: sergey.m410@gmail.com

Дерев'янкін Роман Павлович / Dereviankin Roman – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент гр. МІТ-220м, м Харків, Україна; e-mail: romanderevyankin@ukr.net