

*М. М. ТКАЧУК, М. К. НОВІКОВ, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, С. О. КРАВЧЕНКО, М. А. ТКАЧУК,  
С. М. ПОДРЕЗА*

## СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОНОМНИХ ТУРБОДЕТАНДЕРНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У роботі описано комплекс досліджень та розробок створення технології дискретно-континуального зміцнення елементів автономних турбодетандерних електростанцій. Із цією метою пропонується дослідження напружено-деформованого стану системи контактуючих дискретно та континуально зміцнених тіл. При цьому використовується поєднання позитивних ефектів, які спостерігаються при застосуванні кожного із видів зміцнення. Сукупний ефект від такого синтетичного методу зміцнення перевищує суму ефектів від застосування кожного із складових методів. Задля досягнення високих технічних характеристик елементів та у цілому турбодетандерних електростанцій розроблено підхід, який базується на параметричному моделюванні конструкцій та технологій. Шляхом цілеспрямованого поліпшення цих параметрів підвищується міцність, коефіцієнт корисної дії і довговічність. А також знижується зношуваність найбільш навантажених та відповідальних елементів турбодетандерних електростанцій. Основною особливістю розроблених підходів до створення технології дискретно-континуального зміцнення елементів автономних турбодетандерних електростанцій є розвиток та застосування узагальненої параметричної моделі турбодетандерних електростанцій як цілісного системного об'єкту. При цьому і проєктні, і технологічні рішення є варіюваними та шуканими за критеріями міцності, довговічності та ККД.

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

*М. М. ТКАЧУК, М. НОВИКОВ, А. ГРАБОВСКИЙ, С. КРАВЧЕНКО, М. А. ТКАЧУК, С. ПОДРИЕЗА*

## DEVELOPMENT OF DISCRETE-CONTINUOUS STRENGTHENING TECHNOLOGY OF AUTONOMOUS TURBOEXPANDER POWER PLANTS ELEMENTS

This paper describes a set of research and development activities to create a technology for discrete-continuous strengthening of autonomous turbo-expander power plants elements. With this purpose, it is proposed to study the stress-strain state of the system of discretely and continuously strengthened bodies in contact. This is done by combining the positive effects observed when using each type of strengthening. The combined effect of this synthetic strengthening method exceeds the sum of the effects of each of the component methods. In order to achieve high technical characteristics of the elements and turboexpander power plants as a whole, an approach based on parametric modelling of structures and technologies has been developed. By targeted improvement of these parameters, strength, efficiency and durability are increased. It also reduces the wear and tear of the most stressed and critical elements of turboexpander power plants. The main feature of the developed approaches to the creation of the discrete-continuous strengthening technology of the elements of autonomous turboexpander power plants is the development and application of a generalized parametric model of turboexpander power plants as a complete system object. At the same time, both design and technological solutions are varied and sought after by the criteria of strength, durability and efficiency..

**Keywords:** turboexpander power plant; turbine installation; discrete and continuous strengthening, generalized parameter, design and technological support; technical characteristics

**Вступ.** Сучасні турбодетандерні установки, зокрема, турбодетандерні електростанції (ТдЕС) [1, 2], піддаються значним експлуатаційним навантаженням. Тому конструктивні та технологічні рішення їхніх елементів становлять строго конфіденційну інформацію, оскільки такі установки є запорукою роботи стратегічних об'єктів, і будь-які відомості про технічні рішення є занадто чутливими із огляду на національну безпеку тих чи інших країн. Це першочергово стосується також і технологій зміцнення основних елементів конструкцій, про що свідчить аналіз напрацювань вітчизняних та зарубіжних вчених за відповідною тематикою.

Зокрема, існує, серед іншого, дві широкі групи зміцнення за рахунок індентації, нанесення та генерування покриттів.

Перша група – континуальне зміцнення, серед яких слід виокремити мікродугове оксидування та вакуумно-дугове покриття [3–5].

Друга група – технології дискретного нанесення, у т.ч. – електроіскрове легування [6–8].

І перша, і друга групи характеризуються певними перевагами та недоліками. Для «континуальних» технологій недоліки – це проблеми із адгезією покриттів із основним матеріалом, розтріскування, крихкість, низька втомна міцність, температурні і залишкові деформації та напруження тощо. Для «дискретних» технологій – висока неоднорідність фізико-механічних властивостей матеріалів основи та індентованого, несприятливі залишкові напруження, температурні деформації

тощо. Перевагами ж кожної із груп є відсутність певних недоліків, властивих іншій групі. Відповідно, на усунення недоліків існуючих технологій було запропоновано спосіб, який поєднує переваги та позбавлений недоліків обох способів зміцнення [7, 8]. Уже навіть початкові дослідження доводять переваги цього способу перед попередніми відомими аналогами. Мова йде про підвищення міцності та довговічності роботи зміцнених елементів конструкцій на десятки відсотків, а в окремих випадках – кратно. Серед основних галузей застосування технології дискретно-континуального зміцнення – машинобудування, у т.ч. – спеціальне, транспорт і енергетика, зокрема, турбодетандерні установки.

Відповідно, створення технології дискретно-континуального зміцнення елементів автономних турбодетандерних електростанцій становить актуальну проблему.

Зазначена проблема склала зміст роботи.

**Аналіз існуючих методів зміцнення та дослідження міцності елементів конструкцій.** Як уже зазначалося, серед сучасних машинобудівних конструкцій привертають увагу ті, що містять елементи із високою інтенсивністю навантажень. Зокрема, мова йде про турбодетандерні установки [9–15]. У публікаціях [9–15] основна увага концентрується на ефективності робочого процесу та на конкретних

© М.М. Ткачук, М.К. Новіков, А.В. Грабовський,  
С.О. Кравченко, М.А. Ткачук, С.М. Подреза, 2023

технічних рішеннях [16–19].

Разом із тим для роторних машин властиві проблеми із міцністю та стійкістю руху [20–22], що не знайшли свого вирішення. При цьому, як зазначено вище, існують різні сучасні розробки у напрямках континуального [3–5, 23–26] (мікродугове оксидування) та дискретного [6–8] (електроіскрове легування) зміцнення.

Що стосується чисельних методів аналізу процесів і станів у складних системах, то, як зазначено у [2], окрім методів зміцнення та варіювання поточних технічних рішень ТДЕС, потребують розвитку та інтеграції у весь цикл проектних досліджень методи аналізу процесів і станів при дії експлуатаційних навантажень. У першу чергу це стосується моделей та методів аналізу контактної взаємодії [27–31]. При цьому слід звернути увагу на розвиток методів визначення контактної взаємодії та напружено-деформованого стану на основі скінченно- та гранично-елементного моделювання [32–35]. Результати аналізу сучасного стану досліджень елементів ТДЕС наштовкують на висновок про те, що розвитку та адаптації потребують усі проаналізовані аспекти.

Здійснений аналіз літературних джерел свідчить про те, що у проблемі створення технології дискретно-континуального зміцнення елементів автономних турбодетандерних електростанцій є низка нерозв'язаних задач.

Зважаючи на значні потенційні можливості методів дискретного та континуального зміцнення, які були визначені у попередніх дослідженнях [1, 2], заявлений напрямок потребує продовження.

Оскільки умови контактування у парі дискретно та континуально зміцнених деталей різко відрізняються від аналогічних при застосуванні окремих технологій, необхідне доповнення попередніх досліджень цих принципово нових об'єктів.

При цьому попередні напрацювання потребують вдосконалення у частині визначення раціональних поєднань технологічних режимів дискретно-континуального зміцнення та адаптації стосовно елементів турбодетандерних установок.

*Мета роботи* – розроблення загальних підходів до створення та ілюстрація застосування технології дискретно-континуальної технології зміцнення як основи обґрунтування прогресивних проєктно-технологічних рішень елементів автономних турбодетандерних електростанцій задля досягнення їх енергоефективності.

Ця мета передбачає для виконання такі завдання.

1. Розроблення елементів конструкцій автономних турбодетандерних електростанцій та технології формування зносостійких поверхонь металевих виробів – дискретно-континуального зміцнення (ДКЗ).

2. Визначення впливу режимів мікродугового оксидування та вакуумно-дугових технологій на властивості покриттів зміцнюваних елементів конструкцій. Установлення на основі чисельних досліджень закономірностей дискретно-континуально зміцнених деталей напружено-деформованого стану при контактній взаємодії.

3. Визначення загальних рекомендацій стосовно прогресивних проєктно-технологічних рішень дискретно-континуального зміцнення елементів конструкцій автономних турбодетандерних електростанцій.

**Основні підходи до вирішення поставленої проблеми.** Підхід, що пропонується, передбачає розроблення технології дискретно-континуального зміцнення елементів турбодетандерних автономних електростанцій задля підвищення їх ресурсу та забезпечення енергоефективності та енергонезалежності країни.

Задля цього поєднуються технології дискретного електроіскрового легування, з одного боку, та континуальних покриттів, – з іншого [1, 2, 6 – 8, 36].

Основна ідея підходу, що пропонується до втілення, полягає у тому, що таким шляхом досягається зниження негативних властивостей дискретного та континуального способів зміцнення, а натомість – підвищення позитивних.

Слід зазначити, що при застосуванні обох цих методів сумісно різко змінюються умови контактної взаємодії порівняно із застосуванням тільки однієї технології. Відповідно, виникає необхідність визначення впливу параметрів технологічних процесів на службові властивості зміцнюваних елементів задля обґрунтування їхніх прогресивних значень. Із цією метою передбачені розрахункові та лабораторні дослідження процесів нанесення покриттів та контактної взаємодії зміцнених деталей.

Крім того, на цій основі створюється початковий варіант технологічної інструкції на дискретно-континуальне зміцнення стосовно елементів турбодетандерних установок. При цьому, окрім фізичних, приймаються до уваги також і технічні аспекти. У результаті розробляється технологія дискретно-континуального зміцнення елементів турбодетандерних установок, що відповідає вимогам фізичних процесів та технічних умов застосування.

На завершальному етапі передбачається здійснення апробації розробленої технології в умовах стендових випробувань. Також будуть установлені основні показники службових властивостей, а також скориговані рекомендовані режими дискретно-континуального зміцнення стосовно елементів турбодетандерних установок. Крім того, буде здійснено дослідно-промислове випробування ефективності застосування розробленої технології. За результатами коригуватиметься технологічна інструкція на розроблену технологію зміцнення елементів турбодетандерних установок. На цьому етапі також, окрім фізичних та технічних, урахувуватимуться ще й економічні аспекти.

**Ілюстрація застосування розроблених підходів до проєктно-технологічного забезпечення підвищення технічних характеристик турбодетандерних електростанцій.**

1. *Розроблення елементів конструкцій автономних турбодетандерних електростанцій та технології формування зносостійких поверхонь металевих виробів – дискретно-континуального зміцнення.* На основі здійсненого комплексу досліджень здійснено формування низки варіантів

зразків ТдЕС [turbogaz.com]. На рис. 1, 2 наведені приклади таких зразків. Вони характеризуються підвищеними на 25–40 % довговічністю та ККД за детандером на рівні 86 %.

Одним із компонентів технологічного забезпечення довговічності ТдЕС є зміцнення їхніх найбільш навантажених та відповідальних елементів [1, 2]. При цьому привертають увагу два різних типи методів поверхневого зміцнення елементів конструкцій (див. вище).

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» [1, 2, 6–8, 36].

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).



Рисунок 1 – 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. км<sup>3</sup>/добу



Рисунок 2 – Конструктивне виконання детандер-генераторних агрегатів:

а – на підшипниках кочення; б – на підшипниках ковзання; в – з використанням активного магнітного підвісу

2. *Визначення впливу режимів мікродугового окисидування та вакуумно-дугових технологій на властивості покриттів зміцнюваних елементів конструкцій. Установлення на основі чисельних досліджень закономірностей дискретно-континуально зміцнених деталей напружено-деформованого стану при контактній взаємодії.* Звернемося, на розвиток [1, 2, 6–8, 36], до конкретного тестового варіанту застосування дискретно-континуального методу зміцнення. Із контактуючих макродеталей виокремлено презентативний фрагмент (рис. 3).

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

На рис. 4 наведено геометрію та характеристики матеріалів варіювався модуль пружності корунду  $E_k$ :

$E_k/E_{ал} = [0.5; 1; 2; 3; 4; 5] \Rightarrow E_k = [3.5; 7; 14; 21; 28; 35] \cdot 10^{10}$  Па (тут  $E_{ал} = 7 \cdot 10^{10}$  Па – модуль пружності алюмінієвого сплаву), ширина  $h = [0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1]$  мм, а на рис. 5 – розрахункові моделі досліджуваного фрагменту.

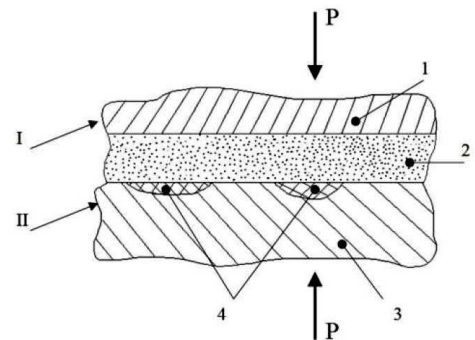


Рисунок 3 – Схема контактної взаємодії деталей:

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]

На рис. 6–15 – результати досліджень напружено-деформованого стану при варіюванні  $h$  та  $E_k$ . На ведені тільки окремі характерні розподіли

для певних варіантів.

1)  $h = 0.5$  мм,  $E_k = 3,5 \cdot 10^{10}$  Па.

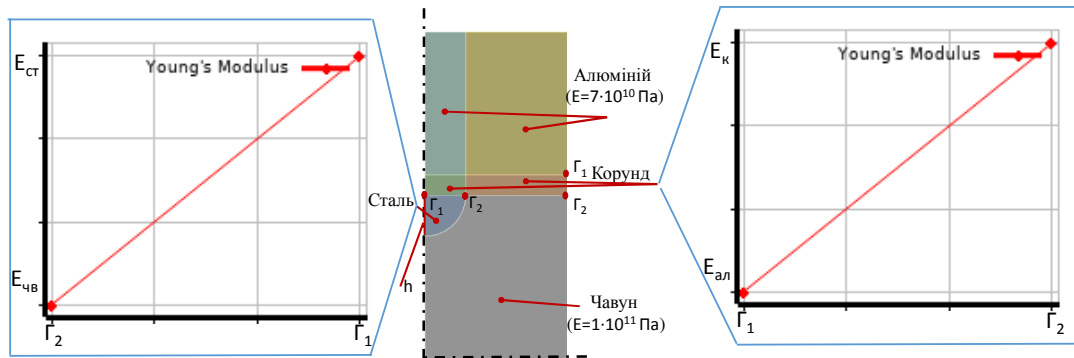


Рисунок 4 – Геометрія та характеристики матеріалів (модулі пружності  $E$ ) досліджуваного фрагменту дискретно-континуально зміцнених тіл

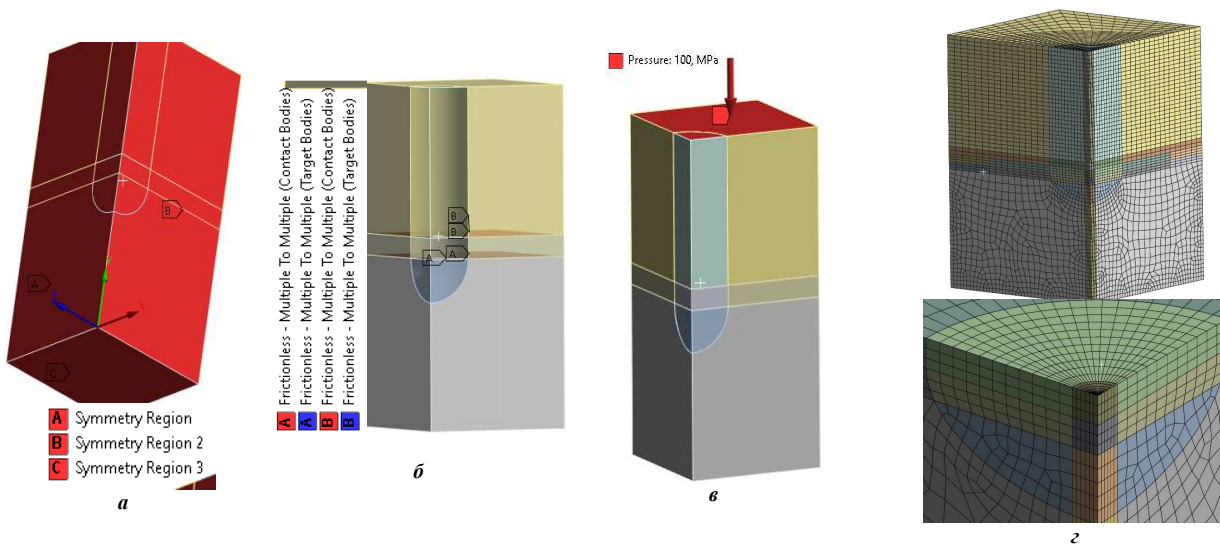


Рисунок 5 – Розрахункові моделі досліджуваного фрагменту:  
 а – 3 площини симетрії; б – 2 контактних пари (frictionless, жорсткість =  $10^{15}$  Н/м<sup>3</sup>);  
 в – навантаження; з – кінечно-елементна сетка

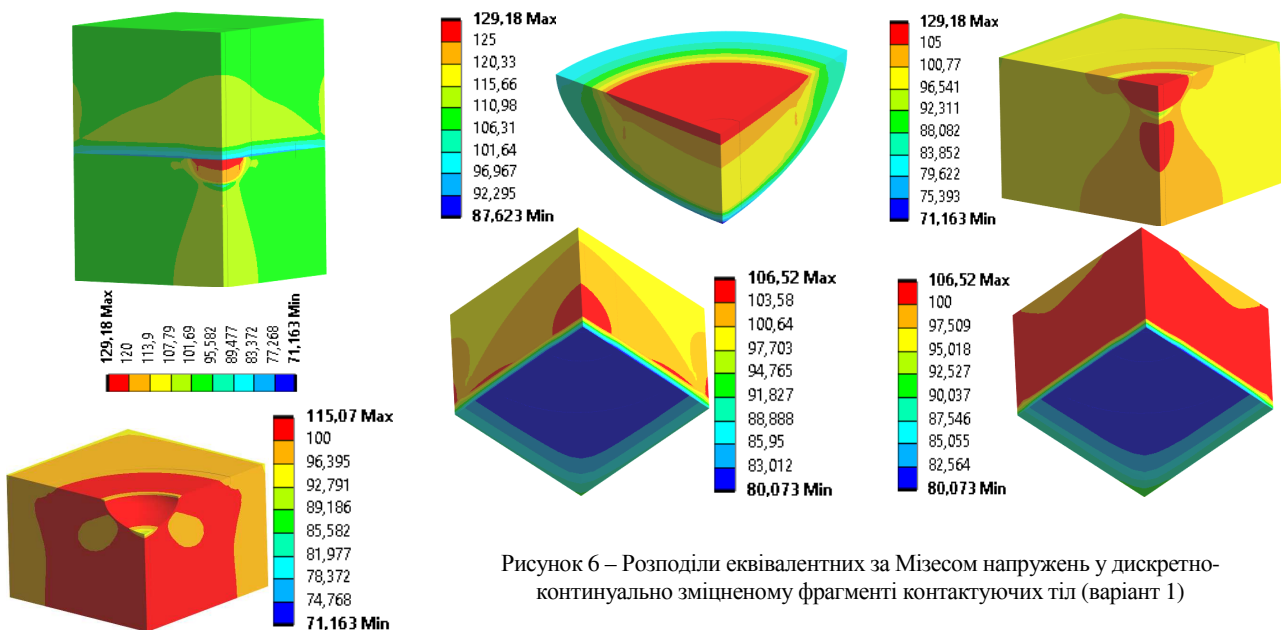


Рисунок 6 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 1)

2)  $h = 0.5$  мм,  $E_k = 21 \cdot 10^{10}$  Па

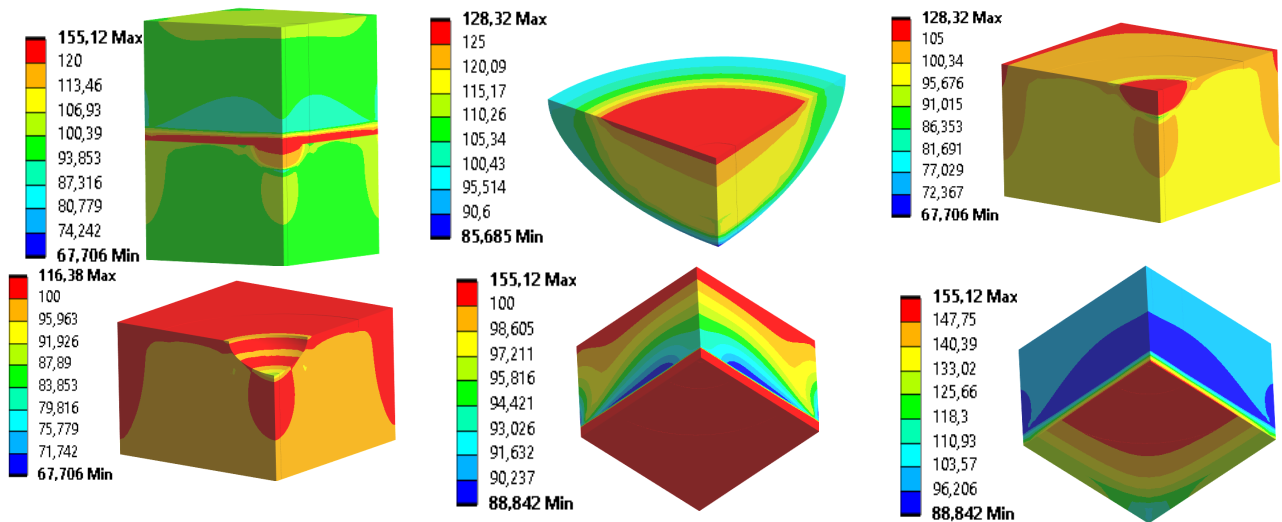


Рисунок 7 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 2)

3)  $h = 0.5$  мм,  $E_k = 35 \cdot 10^{10}$  Па

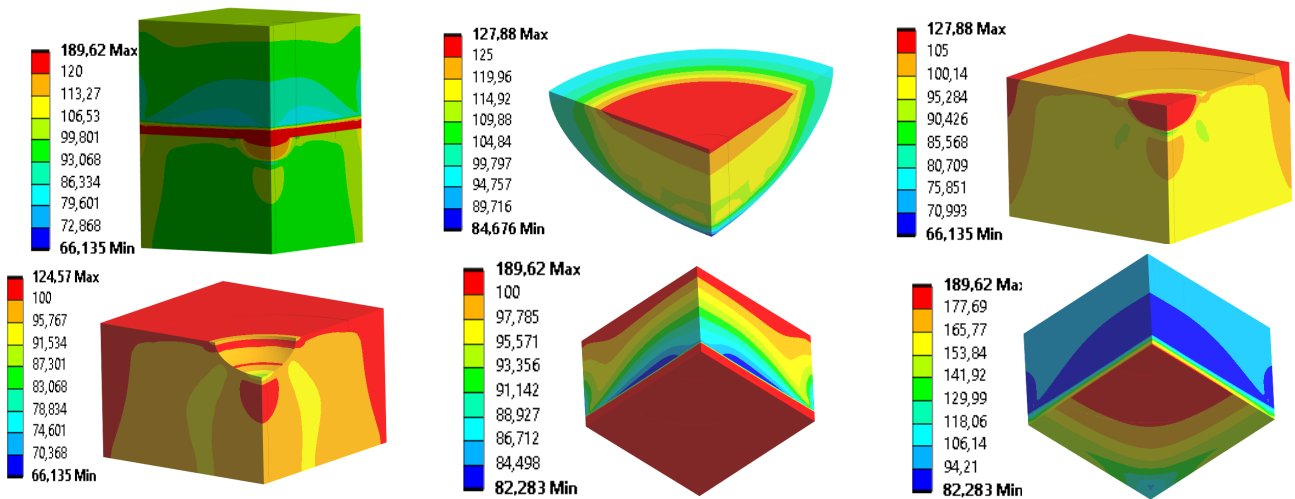


Рисунок 8 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 2)

4)  $h = 0.6$  мм,  $E_k = 28 \cdot 10^{10}$  Па

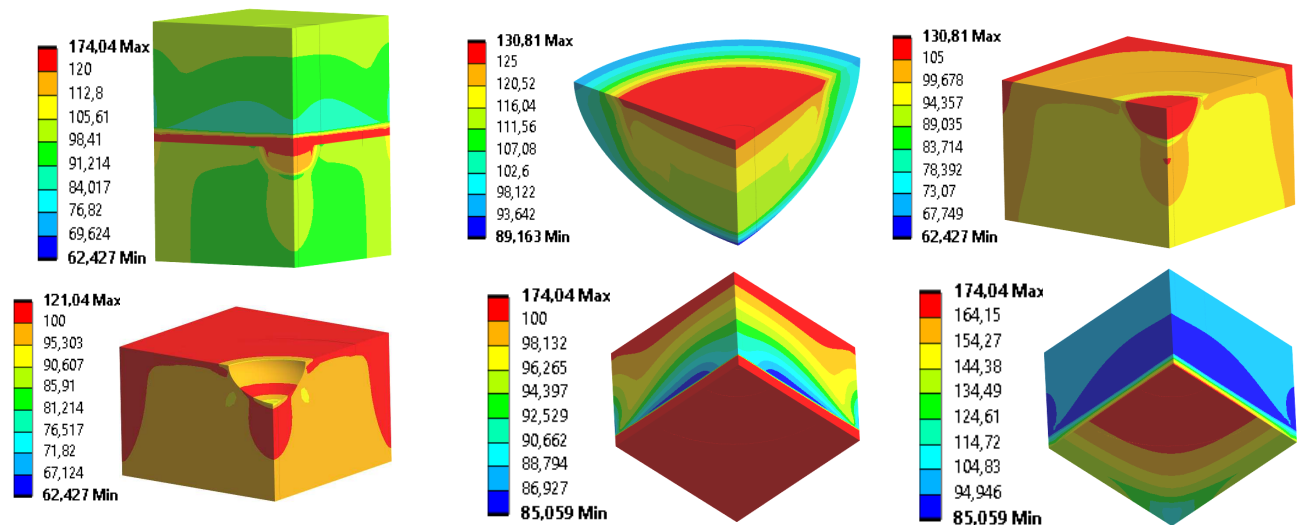


Рисунок 9 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 2)

5)  $h = 0.7$  мм,  $E_k = 3,5 \cdot 10^{10}$  Па

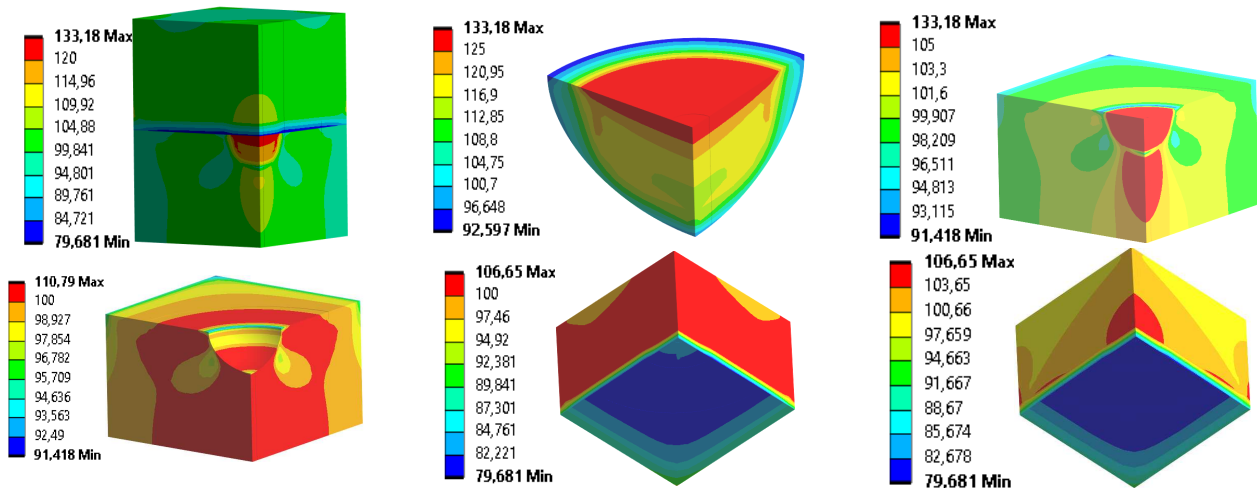


Рисунок 10 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 2)

6)  $h = 0.7$  мм,  $E_k = 21 \cdot 10^{10}$  Па

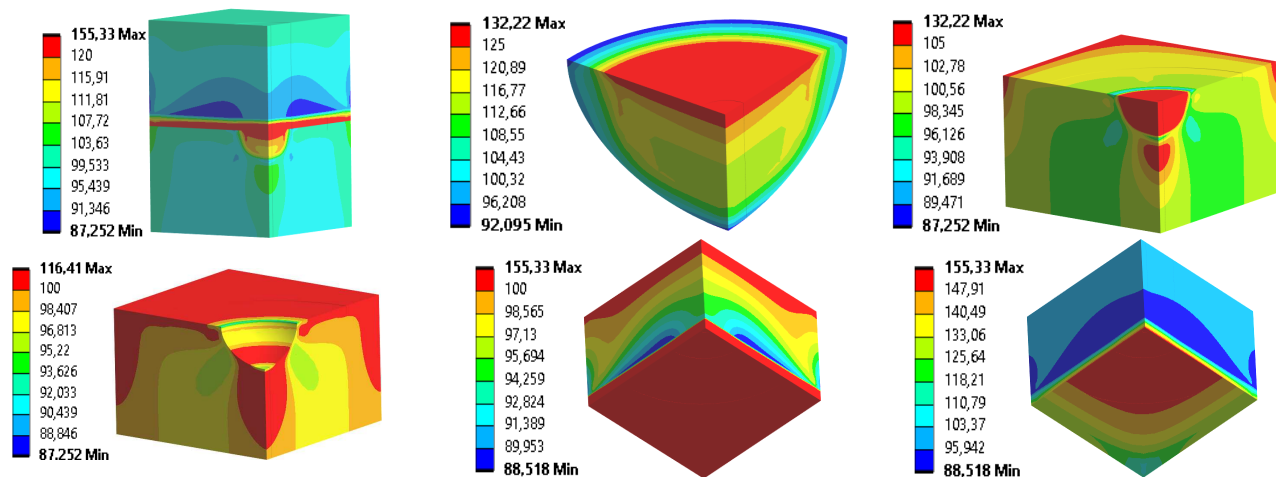


Рисунок 11 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 2)

7)  $h = 1$  мм,  $E_k = 3,5 \cdot 10^{10}$  Па

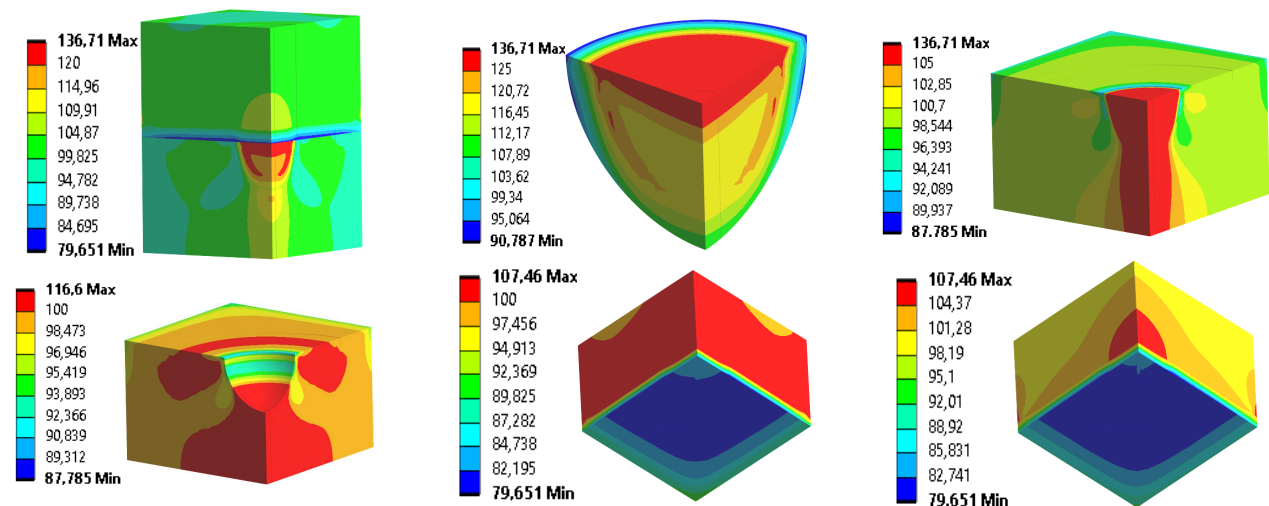


Рисунок 12 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 2)



8)  $h = 1 \text{ мм}, E_k = 14 \cdot 10^{10} \text{ Па}$

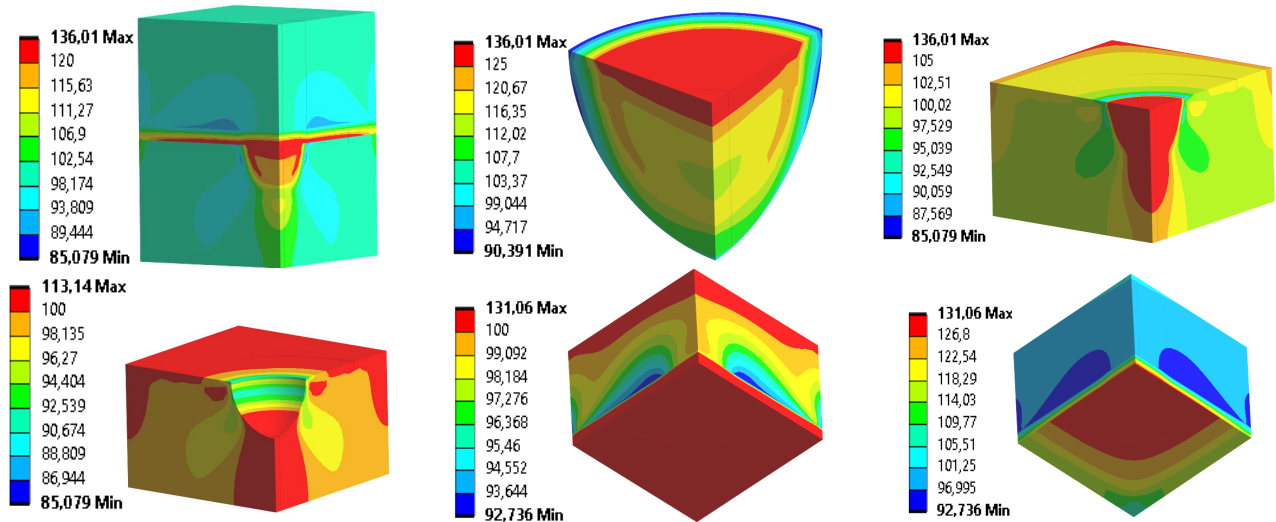


Рисунок 13 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 2)

9)  $h = 1 \text{ мм}, E_k = 21 \cdot 10^{10} \text{ Па}$

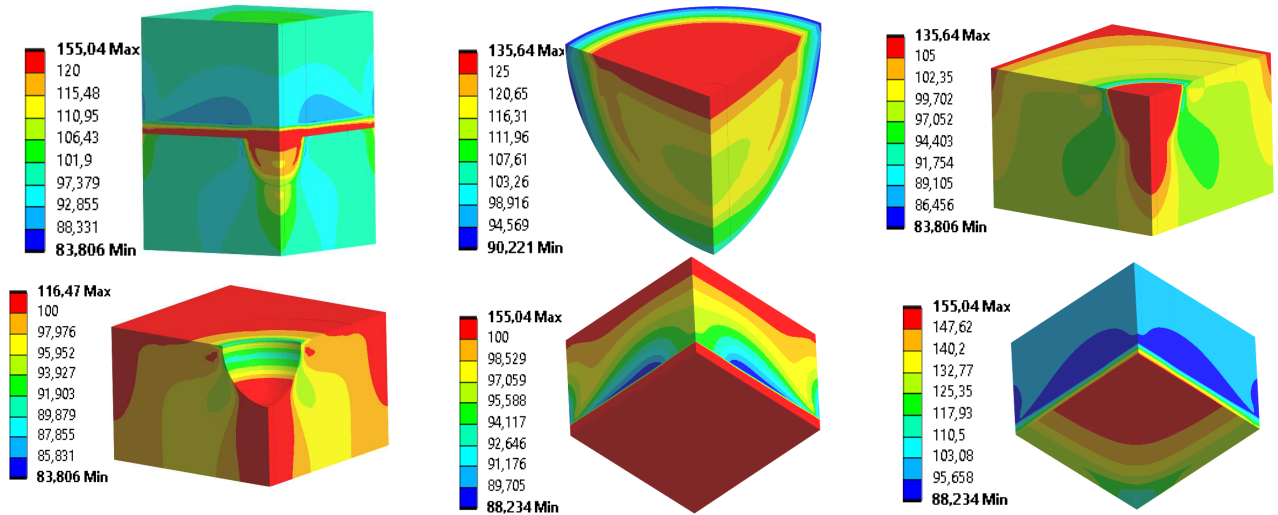


Рисунок 14 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 2)

10)  $h = 1 \text{ мм}, E_k = 35 \cdot 10^{10} \text{ Па}$

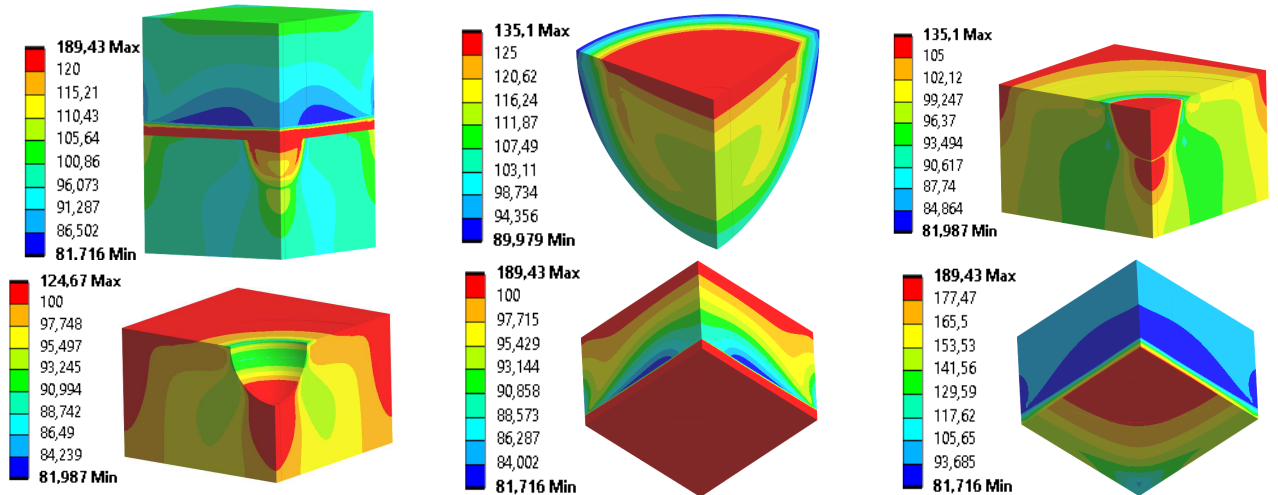


Рисунок 15 – Розподіли еквівалентних за Мізесом напружень у дискретно-континуально зміцненому фрагменті контактуючих тіл (варіант 2)

3. Визначення загальних рекомендацій стосовно прогресивних проектно-технологічних рішень дискретно-континуального зміцнення елементів конструкцій автономних турбодетандерних електростанцій. На рис. 16–20 наведені узагальнені результати досліджень напружено-деформованого стану фрагменту дискретно-континуально зміцнених тіл.

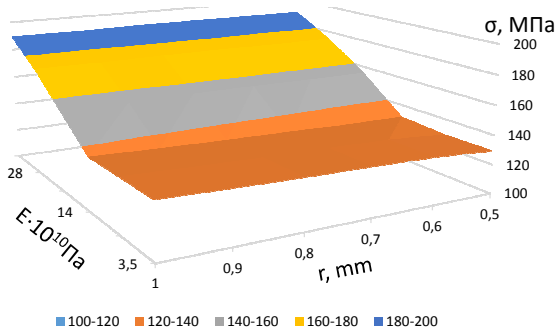


Рисунок 16 – Залежність зміни максимальних еквівалентних напружень  $\sigma$  в усій геометрії від глибини краплі зони дискретного зміцнення ( $r$ , мм) при радіусі 1 мм та модуля пружності корунду в нижній частині

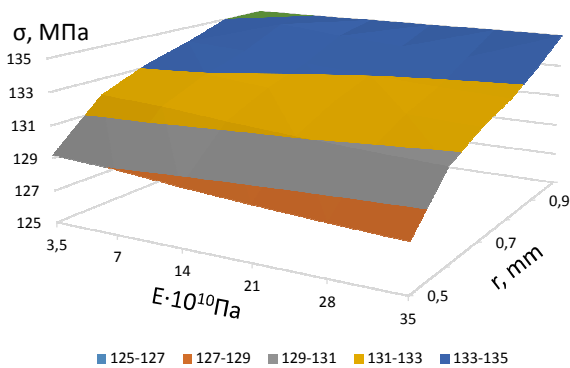


Рисунок 17 – Залежність зміни максимальних еквівалентних напружень  $\sigma$  в краплі зони дискретного зміцнення від глибини краплі ( $r$ , мм) при радіусі 1 мм та модуля пружності корунду в нижній частині

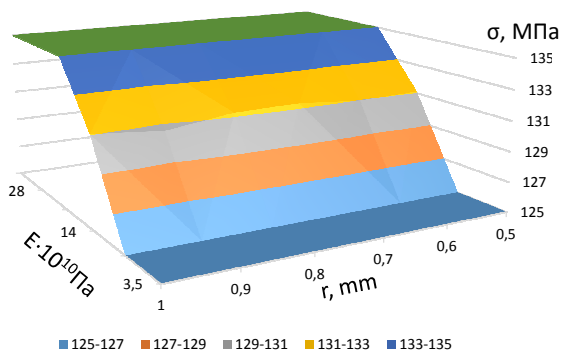


Рисунок 18 – Залежність зміни максимальних еквівалентних напружень  $\sigma$  в верхній частині геометрії (алюміній+корунд) від глибини краплі зони дискретного зміцнення ( $r$ , мм) при радіусі 1 мм та модуля пружності корунду в нижній частині

Наведені на рис. 16–20 залежності свідчать про можливість управління рівнем напружень у дослідженому фрагменті дискретно-континуально

зміцнених тіл. Це створює основу для формування у подальшому відповідної бази даних, а відтак – рекомендацій стосовно прогресивних проектно-технологічних рішень та режимів технологій зміцнення елементів ТдЕС із високими технологічними характеристиками.

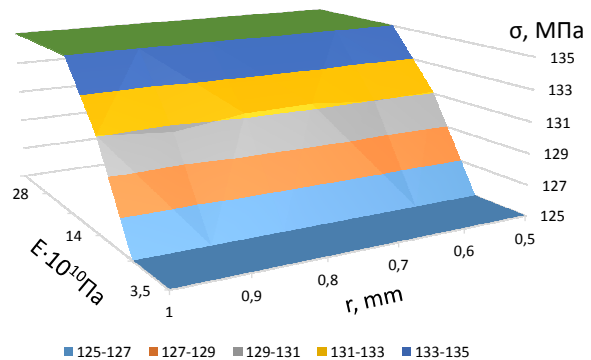


Рисунок 19 – Залежність зміни максимальних еквівалентних напружень  $\sigma$  в нижній частині геометрії (крапля+чавун) від глибини краплі зони дискретного зміцнення ( $r$ , мм) при радіусі 1 мм та модуля пружності корунду в нижній частині

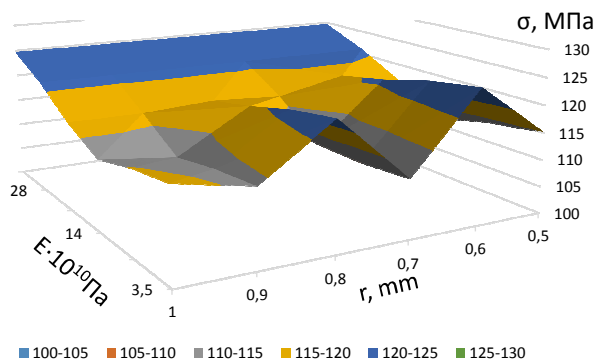


Рисунок 20 – Залежність зміни максимальних еквівалентних напружень  $\sigma$  в нижній частині геометрії без краплі (чавун) від глибини краплі ( $r$ , мм) при радіусі 1 мм та модуля пружності корунду в нижній частині

## Висновки.

Розроблені підходи та результати їх застосування дають основу для таких висновків.

1. Основною особливістю розроблених підходів до створення технології дискретно-континуального зміцнення елементів автономних турбодетандерних електростанцій є розвиток та застосування узагальненої параметричної моделі турбодетандерних електростанцій як цілісного системного об'єкту. При цьому і проектні, і технологічні рішення є варіюваними та шуканими за критеріями міцності, довговічності та ККД.

2. Метод дискретно-континуального зміцнення, що розроблено та удосконалено, дає можливість посилити позитивні та знизити негативні властивості дискретного та континуального методів зміцнення, застосовуваних кожний окремо. Тим самим різко підвищуються потенційні можливості в удосконаленні турбодетандерних електростанцій.

3. Практика засвідчує високу ефективність застосування здійснених розробок. Зокрема,



досягається підвищений на 25–40 % ресурс турбодетандерних електростанцій та ККД на рівні 86% за детандером.

Здійснені розробки та результати застосування створюють основу для подальшого розширення досліджень розробленого методу зміцнення елементів конструкцій машин різного призначення.

Робота виконана у рамках гранту STCU Project EU #3055 EURIZON «Combined technologies of metallic surface modification by micro-arc oxidation and boring for critical machine parts with high contact loads».

#### Список літератури

- Моїсєєв С. В., Новіков М. К., Бурняшев А. В., Паккі Г. В., Ткачук М. А., Львов Г. І., Кравченко С. О., Подреза С. М. (2023). Розроблення проривних технологій зміцнення елементів турбодетандерних установок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. № 1. С. 53–67. <http://misapr.khpi.edu.ua/issue/view/16561>
- Ткачук М. А., Новіков М. К., Ткачук М. М., Грабовський А. В., Паккі Г. В., Ткачук Г. В., Подреза С. М., Деревянкін Р. П. (2023). Напрямки та етапи проєктно-технологічного забезпечення підвищених характеристик турбодетандерних електростанцій. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. № 2. С. 106–112. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/290349>
- Subbotina, V., Sobol, O. (2020). Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines*. *Technologies*, 14, 6, 247–250.
- 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: 10.15587/1729-4061.2020.209722.
- 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-Al203 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>
- 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](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-40724-7_57)
- Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография / Н.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко, С.А. Кравченко, В.Г. Гончаров, В.В. Шпаковский, Н.Л. Белов, А.И. Шейко, А.К. Олейник, И. В. Пономаренко. – Х. : «Щедра садиба плюс», 2015. – 259 с
- 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.
- Avetian, T. and Rodriguez, L. (2020). *Fundamentals of turboexpander design and operation*. Available at: <https://fliphhtml5.com/gktj/sepi/basic>.
- 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>.
- Simms, J. (2009). *Fundamentals of Turboexpanders*. CALIFORNIA: SIMMS MACHINERY INTERNATIONAL, INC.,
- Earl Logan, Jr. (2003). *Handbook of Turbomachinery*. New York : Marcel Dekker, 880. <https://doi.org/10.1201/9780203911990>.
- Saravanamuttoo, H. I. H. (2008). *Gas Turbine Theory*. s.l. : Prentice Hall, 0132224372
- Korpela, Seppo A. (2011). *Principles of Turbomachinery*. Canada : John Wiley & Sons, 978-0-470-53672-8.
- Khan, Rama S. R. Gorla & Aijaz A. (2003). *Turbomachinery Design and Theory*. s.l. : Marcel Dekker, 0-8247-0980-2.
- Detander generator. Available at: [https://turbogaz.com.ua/uk/equipment/dgu\\_ua](https://turbogaz.com.ua/uk/equipment/dgu_ua).
- Моїсєєв А. Н. (2015). Энергоэффективная турбоэлектромеханическая система для газораспределительных станций. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. № 12 (1121). С. 356–359.
- Kuprygin, O., Moiseyev, S., Pastukhova, Ye., Polivanov, V. (2007). Utilizationsionnyye turbodetandernyye agregaty OAO «Turbogaz». *Energetica Moldovei. Aspecte regionale de dezvoltare*. Ediția I, 2005, 260-265.
- Fluitek sistemz. Available at: <http://fluitech.com.ua/>
- Marchenko, A., Grabovskiy, A., Tkachuk, M., Shut, O., Tkachuk, M. (2021) Detuning of a Supercharger Rotor from Critical Rotational Velocities. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE*, 137-145. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_14)
- Tkachuk, M., Shut, O., Marchenko, A., Grabovskiy, A. et. al. (2021). Strength and Stability Criteria Limiting Geometrical Dimensions of a Cantilever Impeller. *SAE Technical Paper*. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-01-5056>
- Tkachuk, M. M., Grabovskiy, A., Tkachuk, M. A., Zarubina, A., Lipeyko, A. (2021). Analysis of elastic supports and rotor flexibility for dynamics of a cantilever impeller. *Journal of Physics: Conference Series*, 1741, 012043. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012043>
- 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>.
- Dean, J., Gu, T., Clyne, T.W. (2015). Evaluation of residual stress levels in plasma electrolytic oxidation coatings using a curvature method. *Surface and coatings technology*, 269, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.006>.
- 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).
- 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>.
- 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>
- 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
- 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
- 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>
- 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>
- 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>
- 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](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-77823-1_20)
- 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
35. 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
36. Tkachuk, M., Lvov, G., Kravchenko, S., Moiseyev, S., Novikov, M., Burniashev, A., Pakki, G., Podryeza, 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*, vol. 4, 7(124), 98–105. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.28586>. <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/285865/280557>

## References (transliterated)

1. Moiseyev S. V., Novikov M. K., Burniashev A. V., Pakki G. V., Tkachuk M. A., Lvov G. I., Kravchenko S. O., Podryeza S. M. (2023). Rozroblennya proryvnykh tekhnologiy zmizchnennya elementiv turbodetandernyx ustanovok. *Visnyk Nacional'nogo tekhnichnogo universy'tetu «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 53–67. <http://misapr.khpi.edu.ua/issue/view/16561>
2. Tkachuk M. A., Novikov M. K., Tkachuk M. M., Grabovskiy A. V., Pakki G. V., Tkachuk G. V., Podryeza S. M., Derevyankin R. P. Napryamky ta etapy proektno-tekhnologichnogo zabezpechennya pidvyshhenykh xarakterystyk turbodetandernyx elektrostancij. *Visnyk Nacional'nogo tekhnichnogo universy'tetu «KhPI». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 2 (2023), pp. 106–112. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/290349>
3. Subbotina, V., Sobol, O. (2020). Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials*, 14, 6, 247–250.
4. 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: 10.15587/1729-4061.2020.209722.
5. 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-AI203 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>
6. 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](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-40724-7_57)
7. *Kontinualnaya i diskretno-kontinualnaya modifikatsiya poverhnostey detaley: monografiya* / N.A. Tkachuk, S.S. Dyachenko, E.K. Posvyatenko, S.A. Kravchenko, V.G. Goncharov, V.V. Shpakovskiy, N.L. Belov, A.I. Sheyko, A.K. Oleynik, I. V. Ponomarenko. – H. : «Schedra sadiba plyus», 2015. – 259 s
8. Tkachuk, N. A., Kravchenko, S. A., Pylev, V. A., Parsadanov, I. V., Grabovskiy, A. V., Veretel'nik, O. V. (2019). Diskretno-kontinual'noye uprochneniye kontaktiruyuschikh elementov konstruktiv: kontseptsiya, matematicheskoye i chislennoye modelirovaniye. *Nauka i tekhnika*, 18(3), 240-247
9. Avetian, T. and Rodriguez, L. (2020). *Fundamentals of turboexpander design and operation*. Available at: <https://fliphtml5.com/gkjt/sepi/basic>.
10. 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>.
11. Simms, J. (2009). *Fundamentals of Turboexpanders*. CALIFORNIA: SIMMS MACHINERY INTERNATIONAL, INC.
12. Earl Logan, Jr. (2003). *Handbook of Turbomachinery*. New York : Marcel Dekker, 880. <https://doi.org/10.1201/9780203911990>.
13. Saravanamuttoo, H. I. H. (2008). *Gas Turbine Theory*. s.l. : Prentice Hall., 0132224372
14. Korpela, Seppo A. (2011). *Principles of Turbomachinery*. Canada : John Wiley & Sons, 978-0-470-53672-8.
15. Khan, Rama S. R. Gorla & Aijaz A. (2003). *Turbomachinery Design and Theory*. s.l. : Marcel Dekker, 0-8247-0980-2.
16. Detander henerator. Available at: [https://turbogaz.com.ua/uk/equipment/dgu\\_ua](https://turbogaz.com.ua/uk/equipment/dgu_ua).
17. Moiseyev A. N. (2015). Energoeffektivnaya turboelektromekhanicheskaya sistema dlya gazoraspredelitelnykh stantsiy. *Visnyk Nacional'nogo tekhnichnogo universy'tetu «KhPI»*, 12 (1121), 356–359.
18. Kuprygin, O., Moiseyev, S., Pastukhova, Ye., Polivanov, V. (2007). Utilizatsionnye turbodetandernyye agregaty OAO «Turbogaz». *Energetica Moldovei. Aspecte regionale de dezvoltare*. Ediția I, 2005, 260-265.
19. *Fluitek sistemz*. Available at: <http://fluitech.com.ua/>
20. Marchenko, A., Grabovskiy, A., Tkachuk, M., Shut, O., Tkachuk, M. (2021) Detuning of a Supercharger Rotor from Critical Rotational Velocities. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE*, 137-145. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_14)
21. Tkachuk, M., Shut, O., Marchenko, A., Grabovskiy, A. et al. (2021). Strength and Stability Criteria Limiting Geometrical Dimensions of a Cantilever Impeller. *SAE Technical Paper*. doi: <https://doi.org/10.4271/2021-01-5056>
22. Tkachuk, M. M., Grabovskiy, A., Tkachuk, M. A., Zarubina, A., Lipeyko, A. (2021). Analysis of elastic supports and rotor flexibility for dynamics of a cantilever impeller. *Journal of Physics: Conference Series*, 1741, 012043. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012043>
23. 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>.
24. Dean, J., Gu, T., Clyne, T.W. (2015). Evaluation of residual stress levels in plasma electrolytic oxidation coatings using a curvature method. *Surface and coatings technology*, 269, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.006>.
25. Matyukina, 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).
26. 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>.
27. Paggi, M., Barber, JR (2011). Contact conductance of rough surfaces composed of modified rnd patches. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(21), 4664–4672. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06.011>
28. 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
29. 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
30. Liu, J., Ke, L., Zhang, C. (2021). Axisymmetric thermoelastic contact of an FGM-coated half-space under a rotating punch. *Acta Mechanica*, 232(6), 2361–2378. DOI:10.1007/s00707-021-02940-7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00707-021-02940-7>.
31. Martyniak, 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>
32. 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>
33. 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](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-77823-1_20)
34. 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

35. Li, J., E., J. Berger (2003). A semi-analytical approach to tree-dimensional normal contact problems with friction. *Computational Mechanics*, 30, 310–322. doi:10.1007/s00466-002-0407-y
36. 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*, vol. 4, 7(124), 98–105. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.28586>. <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/285865/280557>

Надійшла (received).12.04.2024

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola** – 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](mailto:m.tkachuk@tmm-sapr.org)

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

**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](mailto:andrej8383@gmail.com)

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

**Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola** – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>, тел.: +380667146697; e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@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](mailto:sergey.m410@gmail.com)