

**С. В. МОЙСЕЄВ, М. К. НОВІКОВ, А. В. БУРНЯШЕВ, Г. В. ПАККІ, М. А. ТКАЧУК,  
Г. І. ЛЬВОВ, С. О. КРАВЧЕНКО, С. М. ПОДРЕЗА**

## **РОЗРОБЛЕННЯ ПРОРИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТУРБОДЕТАНДЕРНИХ УСТАНОВОК**

Робота спрямована на розроблення проривних технологій зміцнення турбодетандерних установок. З цією метою запропоновані нові способи забезпечення міцності найбільш навантажених елементів турбодетандерних установок. Вони передбачають поєднання відомих способів дискретного та континуального зміцнення. Проте при цьому виникає проблема обґрунтування раціональних параметрів та режимів технологічних операцій. Ця проблема викликана тим, що такі комплексні методи зміцнення характеризуються суттєво розширеною множиною варіюваних параметрів. У цьому широкому параметричному просторі оптимальний їх набір відрізняється від оптимальних наборів у більш вузьких підпросторах. Для визначення впливу варіюваних параметрів на характеристики напружено-деформованого стану контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл здійснено низку досліджень. Варіюються форма області зміцнення та властивості матеріалу зміцнених зон. Установлено суттєвий вплив варіюваних параметрів на розподіл та рівень контактної тиску та еквівалентних напружень у системі контактуючих тіл. На основі аналізу результатів цих та інших досліджень розроблені рекомендації стосовно проєктно-технологічних рішень елементів турбодетандерних установок. На цій базі розроблено низку турбодетандерних установок із підвищеними технічними характеристиками. Забезпечено, зокрема, зростання їхнього ресурсу та ККД.

**Ключові слова:** турбодетандер, дискретно-континуальне зміцнення, контактна взаємодія, напружено-деформований стан, технічна характеристика.

**S. MOISEIEV, M. NOVIKOV, A. BURNIASHEV, G. PAKKI, M. A. TKACHUK, G. LVOV,  
S. KRAVCHENKO, S. PODRIEZA**

## **DEVELOPMENT OF BREAKTHROUGH TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING OF TURBO- EXPANSION INSTALLATIONS ELEMENTS**

The paper is aimed at the development of breakthrough technologies for the strengthening of turbo-expander installations. For this purpose, new ways proposed for ensuring the strength of the most hardly loaded elements of turbo-expander installations. They involve a combination of known methods of discrete and continuous strengthening. However, at the same time, the problem of justification of rational parameters and modes of technological operations arises. This problem is caused by the fact that such complex strengthening methods are characterized by a significantly expanded set of varied parameters. In this wide parametric space, their optimal set differs from the optimal sets in narrower subspaces. To determine the influence of varied parameters on the characteristics of the stress-strain state of contacting discretely-continuously strengthened bodies, a number of studies were carried out. The shape of the strengthening area and the material properties of the strengthened zones are varied. A significant influence of varied parameters on the distribution and level of contact pressure and equivalent stresses in the system of contacting bodies has been established. Based on the analysis of the results of these and a number of other studies, recommendations have been developed regarding the design and technological solutions of elements of turbo-expander installations. On this base, a number of turbo-expander units with improved technical characteristics have been developed. In particular, the growth of their resource and efficiency have been ensured.

**Keywords:** turbo-expander, discrete and continuous strengthening, contact interaction, stress-strain state, technical characteristics.

**Вступ.** Проблема забезпечення національної безпеки та енергонезалежності на тепер є однією із наймасштабніших та невідкладних для України. Один із шляхів її вирішення – створення та використання автономних турбодетандерних електричних станцій (ТдЕС) у газотранспортній системі країни, що складає зміст роботи.

Призначення ТдЕС – генерування потужності шляхом утилізації енергії стисненого газу, що не використовується під час редукування на побутових газорозподільних пунктах (ГРП) і промислових газорозподільних станціях (ГРС), що уможливило триєдиний ефект:

1. Корисне використання надлишкового тиску газу шляхом заміни дроселюючих пристроїв на турбодетандери для приводу електрогенераторів дає можливість отримати в Україні значну кількість електричної енергії, тобто – підвищити енергоефективність.

2. Проривні прогресивні проєктно-технологічні рішення ТдЕС дають можливість підвищувати у 1,2÷1,5 рази ресурс, надійність та ККД, визначаючи їх світовий рівень.

3. З огляду на проблему національної безпеки в силу автономності ТдЕС забезпечують енергобезпеку та енергонезалежність країни. За принципом функціонування ТдЕС диверсифікують джерела енергопостачання та видачі енергії автономному споживачу або в загальну

електромережу.

При цьому слід зазначити, що існуючі технічні рішення, так-би мовити, досягли певної «стелі» у зростанні технічних характеристик (ТХ). Тому подальше поліпшення ТХ ТдЕС потребує комплексу, а не одиничних досліджень, оскільки вузькоспрямовані дослідження не призводять до відчутного прогресу. Зокрема, серед значущих чинників для ТдЕС можна вичленити:

- робочий процес газодинамічних потоків на робочому колесі;
- конструктивне виконання основних елементів ТдЕС;
- технологія виготовлення та зміцнення елементів установок.

Якраз перелічені напрямки є найбільш перспективними, і тому вони склали напрямок досліджень, описаних у статті.

**Аналіз існуючих моделей та методів досліджень процесів і станів у турбодетандерних установках.** Сучасні турбодетандерні установки та робочі процеси у них привертають увагу багатьох дослідників [1-10]. У цих роботах досліджуються конструкції та процеси і стани у турбодетандерних установках. Разом з тим слід зазначити, що повного,

© С. В. Моїсеєв, М. К. Новіков, А. В. Бурняшев,  
Г. В. Паккі, М. А. Ткачук, Г. І. Львов,  
С. О. Кравченко, С. М. Подреза, 2023

а головне – комплексного вирішення, усі проблемні питання не знайшли. Це пов'язано з тим, що відсутня методологія досліджень, яка охоплює, з одного боку, усі етапи життєвого циклу, а з іншого – різні процеси і стани, які супроводжують виготовлення та експлуатацію існуючих установок.

На противагу цьому, для подібних конструкцій розроблені методи комплексного узагальненого параметричного моделювання робочих процесів і станів [10–12].

Проте у цих дослідженнях охоплюються не усі значущі складові життєвого циклу, а тільки окремі [11–17]. Тому потрібен розвиток цієї методології досліджень.

Окрім цього, потрібні також нові моделі та методи досліджень процесів і станів елементів конструкцій при різних способах зміцнення [18–27]. Зокрема, серед цих методів привертають увагу мікродугове окиснення – МДО [19–26]. Також перспективним є метод дискретного зміцнення [18]. Ще більш перспективним є поєднання цих методів [27].

У результаті зміцнення на поверхні елементів конструкцій створюється тонкий шар покриття. Властивості матеріалу цього шару різко відрізняються від властивостей основного матеріалу. Для аналізу напружено-деформованого стану (НДС) такої композиції можуть застосовуватися різні моделі [28–33]. Для математичного та чисельного моделювання НДС таких контактуючих елементів конструкцій розроблені удосконалені моделі та методи [34–36]. Вони базуються, з одного боку, на варіаційних принципах, а з іншого – на чисельних методах граничних та скінченних елементів [34–39]. Попри значне просування, для дослідження НДС нового класу елементів турбомашин необхідний розвиток цих методів та моделей.

У кінцевому підсумку можна зробити висновок про те, що натепер склалася нагальна потреба у розробленні концепції дослідження процесів і станів, а також синтезу прогресивних технічних рішень елементів турбодетандерних установок.

У підсумку можна зробити висновок, що «вузьке» місце у розробленні ТдЕС – технології виготовлення та зміцнення їхніх елементів.

Результати здійсненого аналізу досліджень процесів і станів у турбодетандерних установках дають підстави для формування мети роботи.

Мета роботи – розроблення та удосконалення проектно-технологічних засобів підвищення технічних характеристик турбодетандерних установок шляхом обґрунтування раціональних параметрів та режимів дискретно-континуального зміцнення їх найбільш навантажених елементів.

**1. Метод дискретно-континуального зміцнення елементів турбодетандерних електричних станцій.** Метод дискретно-континуального зміцнення розроблено для зміцнення елементів машин різного призначення, у тому числі – ТдЕС. Натепер вони працюють в умовах, що мають стійкі тенденції до інтенсифікації навантажень. При цьому необхідно забезпечувати невідне зростання їхніх технічних характеристик. На теперішній час особливу актуальність набула

проблема підвищення технічних характеристик турбоагрегатів, двигунів внутрішнього згоряння та транспортних, технологічних і енергогенеруючих засобів різного призначення. Відповідно, натепер склалася ситуація, для якої характерним є те, що традиційні технічні рішення не дають можливості відчутного поліпшення ТХ машин військового та цивільного призначення. Тому без розроблення нових проривних проектно-технологічних методів зміцнення неможливо вирішити актуальні і важливі проблеми, що сформовані у машинобудуванні, механіці, матеріалознавстві, озброєнні та військової техніці.

Зокрема, для ТдЕС актуальними і важливими є дослідження результатів застосування методів дискретно-континуального зміцнення, які дають можливість проривних проектно-технологічних рішень у напрямку підвищення їх технічних характеристик до світового рівня та понад нього.

Однією з основних задач енергетичного машинобудування є вирішення проблеми подовження роботи високонавантажених пар у вузлах машин. Відмови деталей, наприклад, ТдЕС, за нормальних умов експлуатації відбуваються внаслідок різних видів корозії, ерозії, зношування, 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 у результаті зношування робочих поверхонь або поломок, викликаних їх спрацюванням. Тому подовження ресурсу цих важкоавантажених вузлів приділяється багато уваги.

Нарівні з проблемою підвищення ресурсу вузлів машин, велике значення має зменшення витрат потужності на подолання тертя в ТдЕС. При експлуатації частина їх потужності витрачається на внутрішні механічні процеси, зокрема, на подолання тертя у всіх трибосистемах. Надійність роботи їхніх деталей у багатьох випадках залежить також від якості їх виготовлення.

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 виробництва елементів машин є розробка нових енергозберігаючих технологій зміцнення робочих поверхонь високонавантажених пар деталей, спроможних зменшити термін їх виготовлення, суттєво підвищити ресурс та знизити енергетичні витрати.

У попередніх роботах [14–18, 27, 40–46] обґрунтовано концепцію удосконалення можливостей існуючих технологій зміцнення, надання їм нових можливостей, які дають змогу використовувати їх не тільки при виготовленні високонавантажених деталей машин, але й при їх ремонті та модернізації. Також обґрунтовано можливість комбінованого використання технологій зміцнення алюмінієвих поверхонь методом мікродугового окиснення разом із технологією дискретного зміцнення сталей для поліпшення припрацювання пар у складі конструкції ТдЕС.

Одна із складових розробленого методу – дискретне зміцнення деталей машин. Його фізико-хімічна сутність полягає у електроіскровому легуванні поверхневих шарів сталей та чавунних деталей.

Розглянутий у роботі спосіб дискретного зміцнення відрізняється від відомих тим, що електророзряд здійснюється при зіткненні анода з поверхнею деталі, іншими словами, процес містить елементи точкового зварювання. У результаті зміцнюються поверхні тертя та відбувається поліпшення триботехнічних характеристик пари.

Для зміцнення поверхонь чавунних та сталевих деталей велике значення має правильний вибір електрода зміцнення [40]. Від цього залежать характеристики зміцненого шару, його мікроструктура та хімічний склад [40–46].

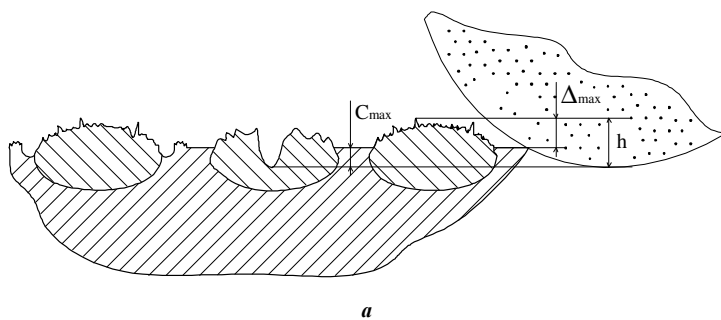
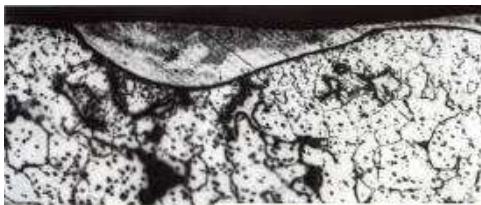


Рисунок 1 – Формування поверхні при шліфуванні [40–46]:  
а – схема, б – розташування дискретних зміцнених областей;  $\times 10$

Перенесений з анода матеріал чітко виділяється від основного металу. Це пояснюється тим, що межа між «білим» шаром та розташованим біля та під ним металом основи різко виражена, лінія сплавлення суцільна, несплавлень, розшарувань, зашлакування, раковин на границі не спостерігалось.



а



б

Рисунок 2 – Мікроструктура поперечного шліфа зразків [40]: а – високоміцний чавун; б – сталь 42ХМФА в зоні розряду;  $\times 100$ ; електрод – сталь 08Х18Н10Т

Мікроструктура поперечного шліфа чавунних та сталевих зразків зображена на рис. 2 [40–46].

Установлено, що приріст (нарощування) матеріалу катода у плямі розряду визначається кількістю перенесеного матеріалу анода. Глибина зміцненого шару залежить від розчинності матеріалу анода в матеріалі катода. Тому у загальному випадку чим вища розчинність, тим більша глибина легованого шару, хоча на цей параметр дуже суттєво впливає режим обробки.

Досліджено формування структури зміцненої поверхні, визначено максимальний приріст металу  $\Delta_{\max}$ , та максимальну глибину каверн  $C_{\max}$ , що дає змогу розрахувати  $h$  припуск обробки для їх видалення:

$$h \geq C_{\max} + \Delta_{\max}.$$

На рис. 1 наведена схема формування зміцненої поверхні та розташування зміцнених областей [40].



б

Для континуального зміцнення поверхонь алюмінієвих деталей застосовано метод мікродугового оксидування (МДО) [40–46]. Розглянемо процес роботи елементів МВЦП, один із яких зміцнено МДО. Технологія МДО призводить до формування на поверхні алюмінієвої деталі шару із суміші різних фаз окислів алюмінію ( $\alpha$ - та  $\gamma$ -).

Схематично побудову зони дискретного зміцнення зображено на рис. 2, 3 [40].

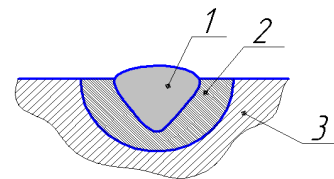


Рисунок 3 – Схематичне зображення зони дискретного зміцнення після шліфування [40]:  
1 – «білий» шар; 2 – підшар; 3 – основний метал

**2. Процеси у дискретно-континуально зміцнених деталях.** За наявності на робочій поверхні вкладиша твердого «корундового» шару, утвореного при гальваноплазмовій обробці, у процесі припрацювання пари деталей насамперед виправляється макрогеометрія робочої поверхні однієї із деталей. При цьому також відбувається поліровка та процеси мікроприпрацювання з утворенням аморфізованих приповерхневих робочих шарів, які забезпечують високі антифрикційні властивості. Наявність тонкого оксидно-

корундового шару на антифрикційному шарі сталалюмінієвої деталі у процесі припрацювання за рахунок зниженої теплопровідності корундового шару дає можливість зменшити відносно великі зазори на мастило між деталями, прийняті при монтажі. Зменшення величини гарантованого зазору збільшує тиск у змащувальній системі машин, знижує витрати на тертя, знижує температуру, шум при роботі та сприяє збільшенню ресурсу досліджуваної пари до капітального ремонту.

Поєднання дискретного та континуального методів зміцнення призводить до ефекту синергії. Тобто відбувається примноження комбінованого ефекту порівняно зі складовими. У макромасштабі це викликає різний характер процесів контактної взаємодії (КВ), тертя (Т) та зношування (З) для традиційних технологій (випадок А) та із застосуванням розробленої технології (випадок В) – рис. 4 [27, 40–46].

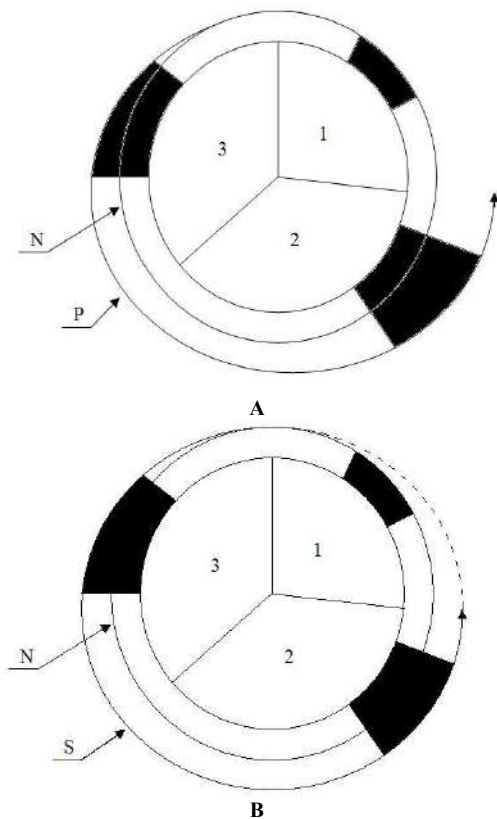


Рисунок 4 – Механізми розвитку процесів контактної взаємодії, тертя і зношування [27]:

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

Природньо, що у реальних умовах дійсні процеси поєднують тенденції А і В. 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 вузлів машин).

Якщо звернутися до проблеми впливу легування на формування металічних сплавів, нітридних і оксидних покриттів [27, 40–46], то слід зазначити такі особливості:

1. Забезпечення фізико-механічних властивостей матеріалів металічних сплавів «у об'ємі» в основному визначається складом їх легування, у т. ч. – надстехіометричного. У цьому випадку досягається значне поліпшення службових характеристик, зокрема, міцності та довговічності (до десятків відсотків). Відповідно, потребує уваги аналіз впливу легуючих елементів на властивості сталей, чавунів та алюмінієвих сплавів у тому чи іншому випадку. Разом із тим ці властивості відіграють тільки фонову роль при аналізі трибомеханічних властивостей у спряженні дискретно-континуальних пар деталей, оскільки першорядне значення мають властивості поверхневих шарів спряжених деталей машин.

2. Серед широкого різноманіття методів зміцнення [27, 40–46] привертають увагу методи нанесення нітридних та оксидних покриттів. Перші широко застосовні для зміцнення сталей, другі – алюмінієвих деталей.

3. Нітридні покриття створюють континуальні моно- або багатошарові структури на поверхні деталей. Важливим аспектом у формуванні комплексу їхніх властивостей є структура, склад та режими формування цих покриттів, зокрема, легування. Ці питання розглядаються у низці робіт [16–27]. Зокрема, привертають увагу наноструктурні високоміцні та багатошарові покриття на основі нітридів титану та цирконію. Проте у багатьох випадках розглядається континуальне зміцнення не сталей, а алюмінієвих деталей. А для зміцнення алюмінієвих деталей розроблено метод мікродугового оксидування.

3. Для методу мікродугового оксидування [19–22] важливими чинниками є режими формування покриття. Вони впливають на співвідношення різних фаз оксиду алюмінію ( $\alpha$ - та  $\gamma$ -), які мають різні фізико-механічні властивості, у сформованих шарах. Крім того, відіграють роль товщина та пористість шару. У результаті реалізується багатofакторна залежність різних характеристик матеріалу шару (модуль пружності, характеристики міцності та довговічності) від режимів його формування [40].

Таким чином, для реалізації подальших досліджень були прийняті певні властивості самих матеріалів деталей ТдЕС, а також їхніх поверхневих покриттів. Проте ці властивості є параметризованими, тобто – варійованими. Отже, шляхом їх зміни можливо визначити властивості досліджуваних композицій, що складаються зі зміцнених деталей ТдЕС. Самі ж властивості, їх залежності від різних чинників та межі варіювання можуть визначитися із результатів різних досліджень.

Зокрема, у напрямку дискретних і континуальних методів зміцнення елементів машин залучаються, розширюються та розвиваються результати попередніх досліджень [14–18, 27, 40–46].

**3. Напружено-деформований стан дискретно-континуально зміцнених деталей.** На цій базі здійснено визначення впливу режимів і параметрів методу дискретно-континуального зміцнення системи контактуючих тіл на їх напружено-

деформований стан.

У попередніх роботах розроблено методологічні основи досліджень впливу режимів і параметрів методу дискретно-континуального зміцнення системи контактуючих тіл на їх НДС. Також здійснено розв'язання низки тестових задач. Це є методологічною основою досліджень НДС дискретно-континуально зміцнених деталей конструкцій, які описані нижче.

У рамках роботи на розвиток та розширення [40] було виконано чисельне дослідження представницького осередку з утвореними областями після дискретного зміцнення і корундування шляхом здійснення гальвано-плазмової обробки (ГПО). Моделювання представницького осередку дає можливість оцінити напружено-деформований стан і контактну взаємодію контактуючих тіл при варіюванні параметрами моделі.

Геометрична модель наведена на рис. 5 [40]. Для кожної області геометричної моделі є відповідний набір параметрів, який описує фізико-механічні властивості матеріалів.

Для цього дослідження було побудовано 8 розрахункових груп (А, В, С, D, E, F, G та H, відповідно), які налічували 6 розрахункових схем, відповідно. Відмінності у рамках однієї групи полягали у варіюванні розмірами дискретно зміцненої ділянки, а відмінності між розрахунковими групами полягали у фізико-механічних властивостях матеріалу відповідної області після корундування.

На рис. 6 наведена геометрична модель з

основними розмірами. Базова модель була побудована таким чином, щоби дискретно зміцнена ділянка мала вигляд частини сфери з радіусом 1 мм. У табл. 1 наведені значення параметрів, які описують дискретно зміцнену ділянку.

Таблиця 1 – Значення геометричних параметрів

Параметр	Розрахункові схеми					
	1	2	3	4	5	6
a, мм	1					
b, мм	1	2	4	6	8	10
c, мм	1					

На рис. 7 наведені геометричні моделі з урахуванням геометричних параметрів із табл. 1 для усіх розрахункових схем у рамках однієї групи.

У рамках дослідження був введений параметр  $\gamma$  ( $\gamma = E_5/E_6$ ). Цей параметр визначається як відношення модуля пружності області після корундування до модуля пружності основного матеріалу – чавуну. У табл. 2 зведені модулі пружності матеріалів.

Побудована скінченно-елементна модель (СЕМ), яка налічувала близько 300 тис. елементів, а також навантаження, закріплення та умови симетрії наведені на рис. 8.

У процесі дослідження була визначена контактна пара (без тертя) між елементами моделі: нижньою частиною, виконаною з чавуну із дискретно-зміцненої ділянкою, та верхньою, виконаною з АК4 з областю після ГПО. На рис. 8 наведена також контактна пара.

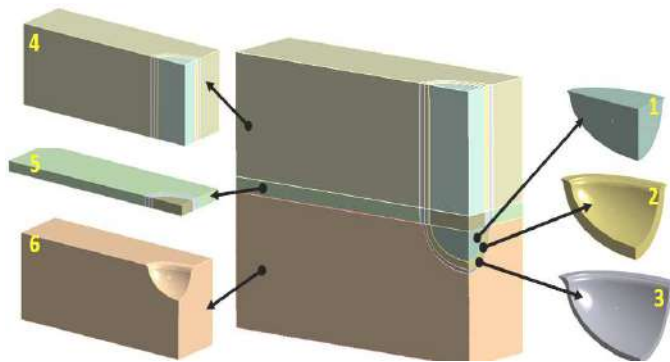


Рисунок 5 – Геометрична модель фрагмента дискретно-зміцнених деталей [40]:

1 – дискретно зміцнена область ( $E_1, \nu_1$ ), 2 – 1-й перехідний шар ( $E_2, \nu_2$ ), 3 – 2-й перехідний шар ( $E_3, \nu_3$ ), 4 – основний матеріал, сплав АКЧ ( $E_4, \nu_4$ ), 5 – шар з корундованим покриттям ( $E_5, \nu_5$ ), 6 – основний матеріал, чавун ( $E_6, \nu_6$ )

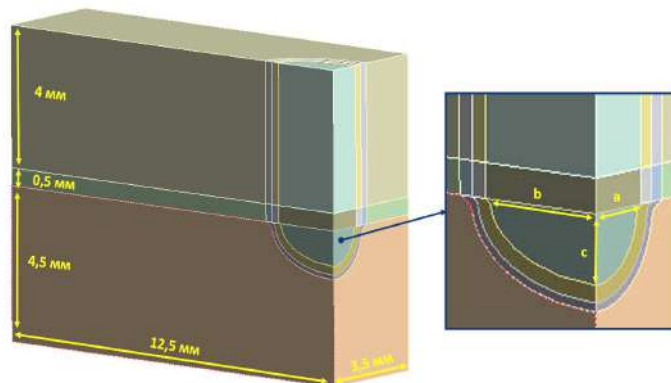


Рисунок 6 – Основні розміри моделі фрагмента дискретно-зміцнених деталей [40]

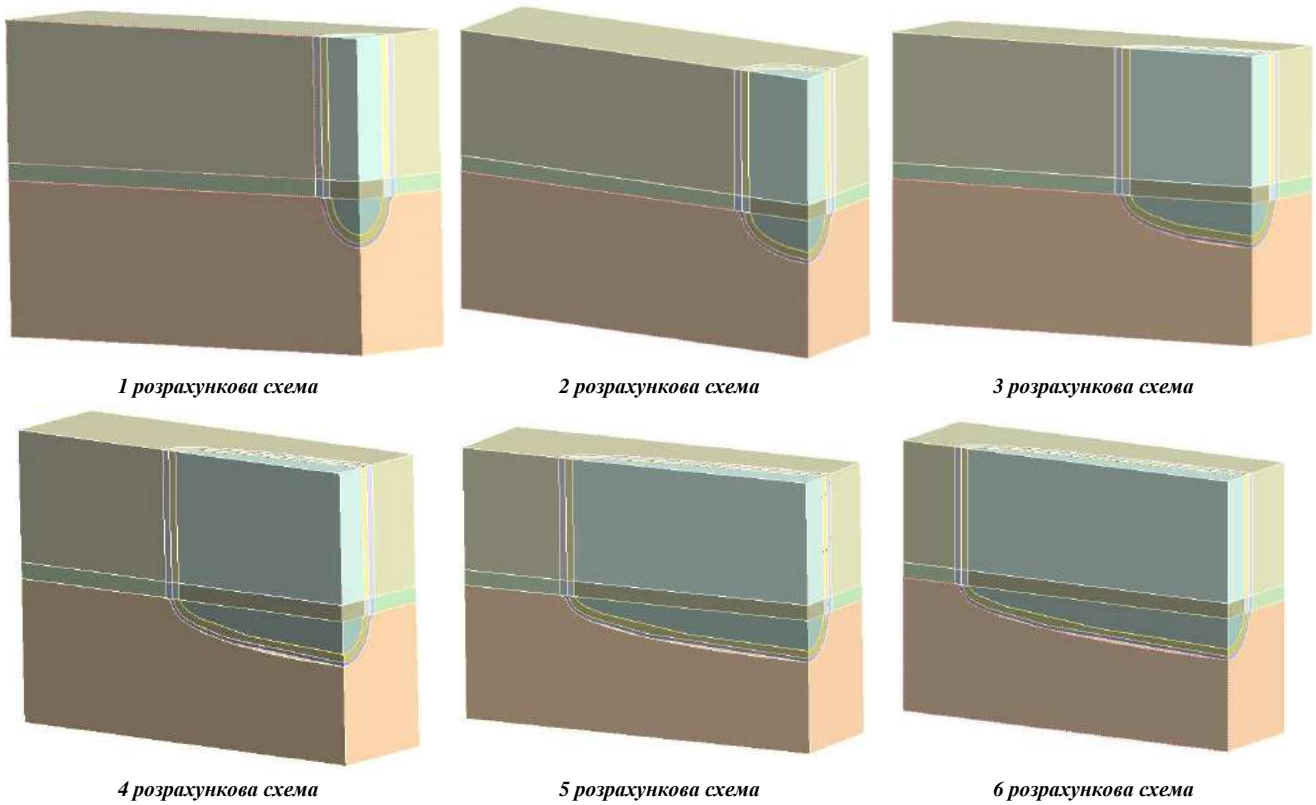
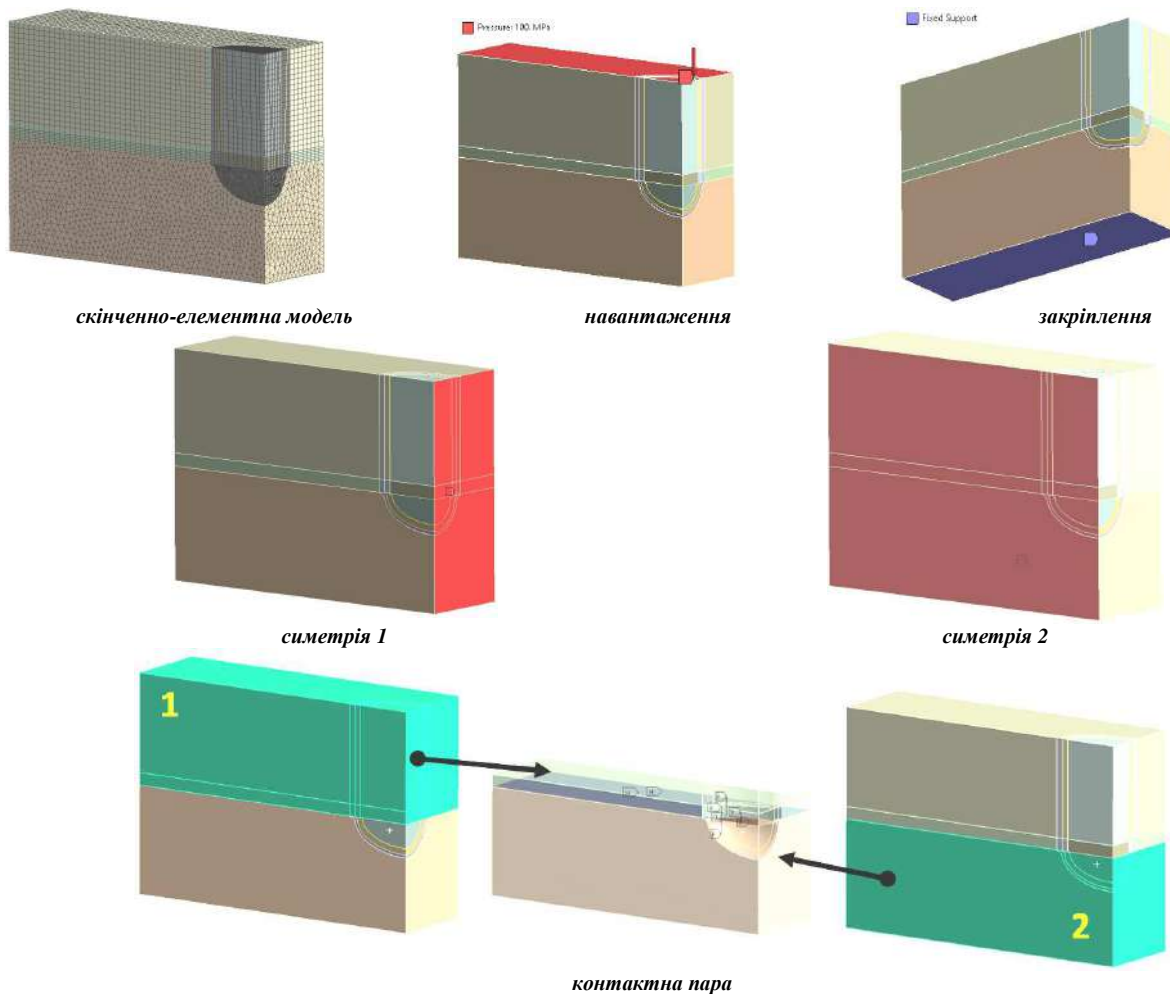


Рисунок 7 – Геометричні моделі для різних розрахункових схем

Рисунок 8 – Зовнішні навантаження (100 МПа), умови симетрії та контактна пара:  
1 – АК4 з областю після ГПО, 2 – чавун (з дискретно-зміцненою ділянкою)

Таблиця 2 – Модулі пружності розглянутих матеріалів, Па

	Розрахункові схеми							
	1 (A)	2 (B)	3 (C)	4 (D)	5 (E)	6 (F)	7 (G)	8 (H)
$\gamma$	0,01	0,05	0,1	0,5	1	2,5	5	10
$E_1$	$2,10 \cdot 10^{11}$							
$E_2$	$2,10 \cdot 10^{11}$							
$E_3$	$2,10 \cdot 10^{11}$							
$E_4$	$7,00 \cdot 10^{10}$							
$E_5$	$1,10 \cdot 10^9$	$5,50 \cdot 10^9$	$1,10 \cdot 10^{10}$	$5,50 \cdot 10^{10}$	$1,10 \cdot 10^{11}$	$2,75 \cdot 10^{11}$	$5,50 \cdot 10^{11}$	$1,01 \cdot 10^{12}$
$E_6$	$1,10 \cdot 10^{11}$							

Результати чисельних досліджень. У ході досліджень визначалися максимальні еквівалентні напруження, максимальні переміщення і максимальний контактний тиск для всіх розрахункових схем.

Нижче на рис. 9 наведені максимальні еквівалентні напруження для повної моделі, відповідно, для усіх розрахункових груп, а на рис. 10 – максимальний контактний тиск для усіх розрахункових груп.

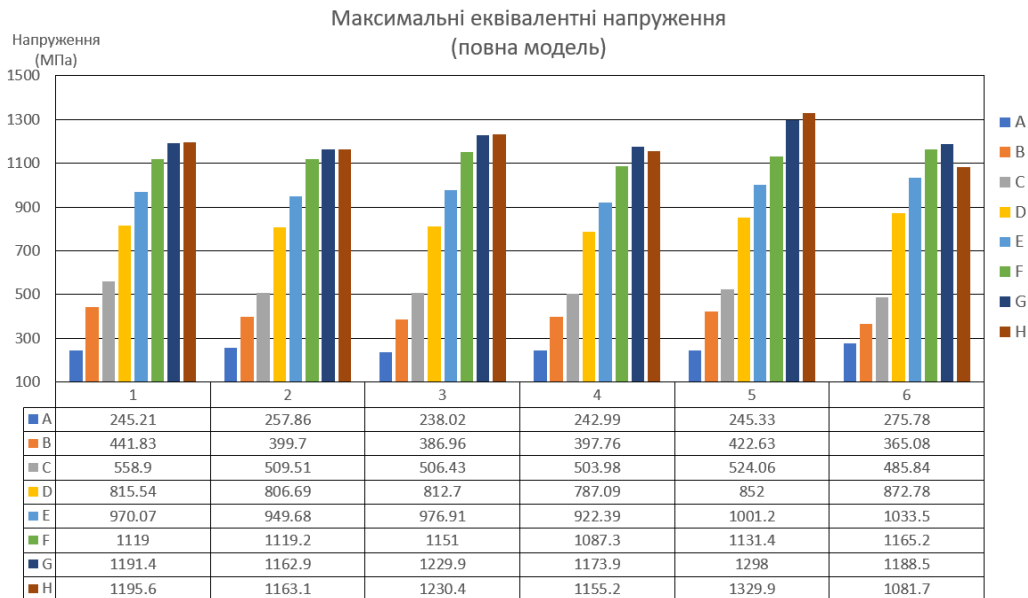


Рисунок 9 – Максимальні еквівалентні напруження (МПа) для усіх розрахункових схем

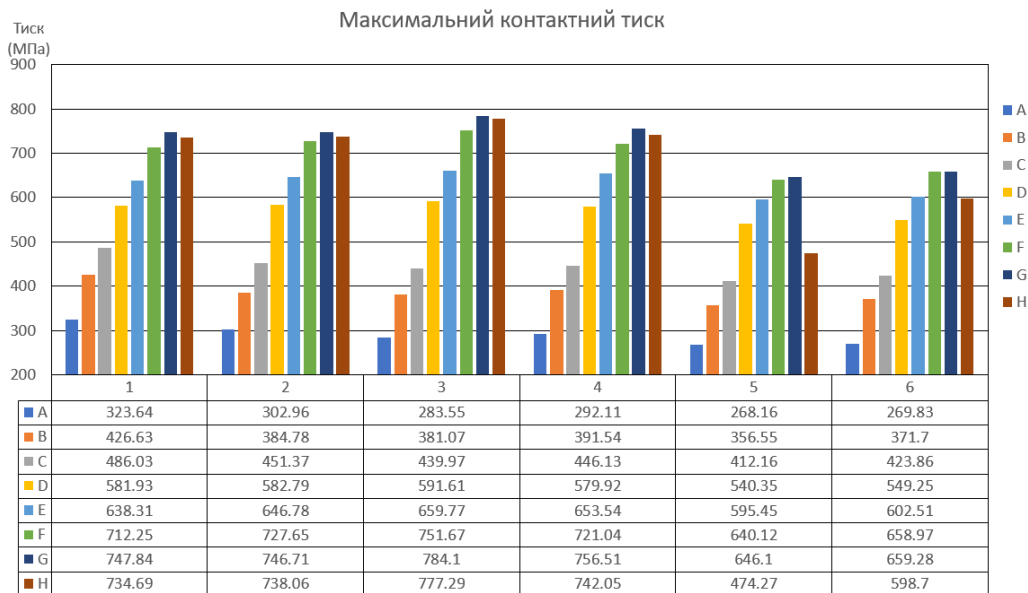
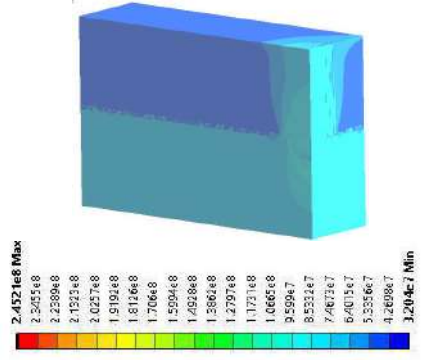
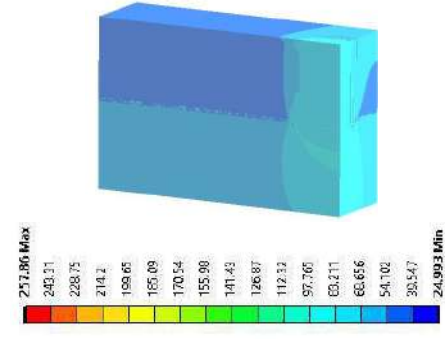
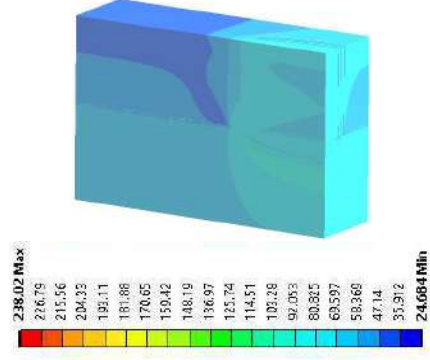
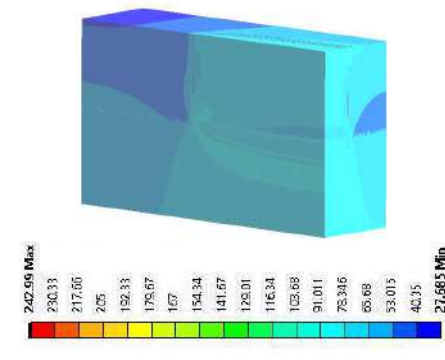
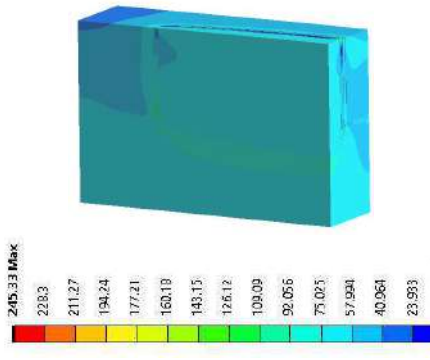
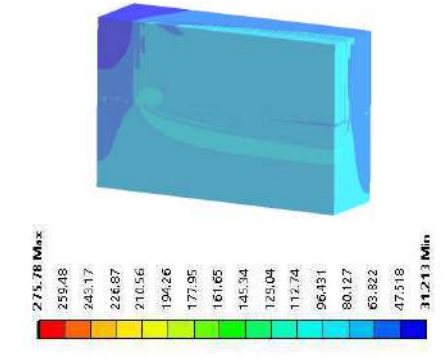
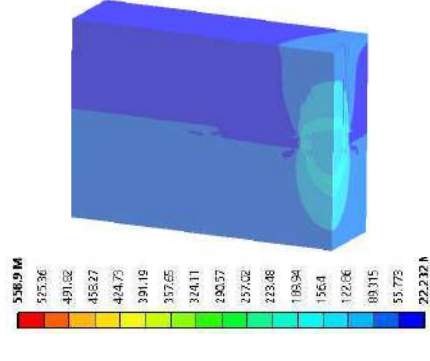
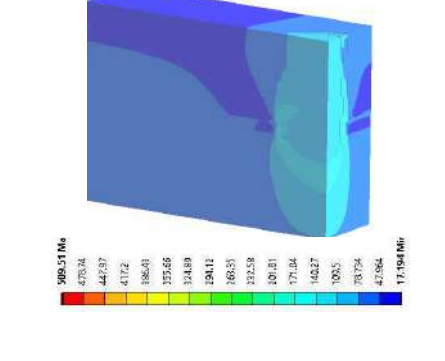


Рисунок 10 – Максимальний контактний тиск (МПа)

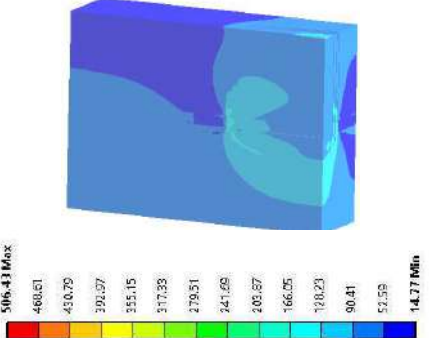
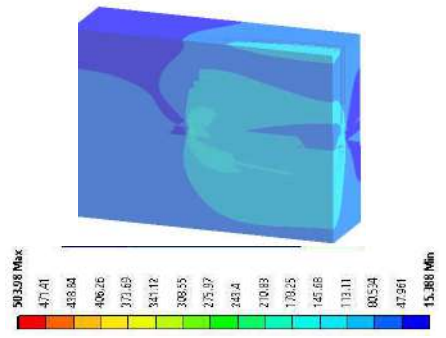
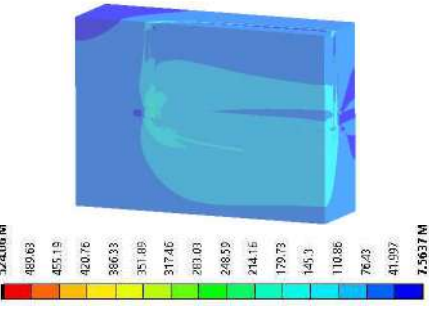
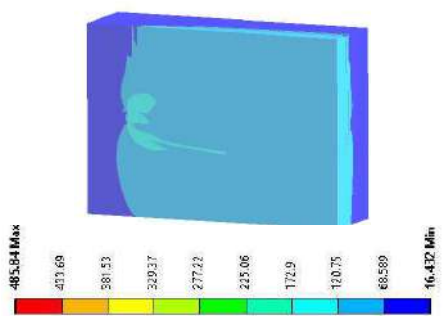
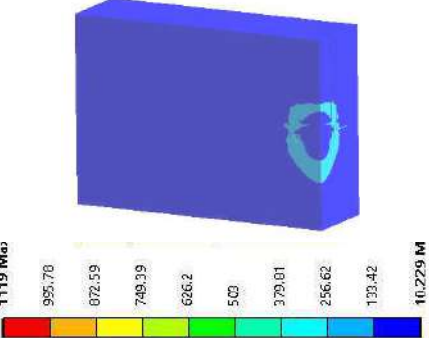
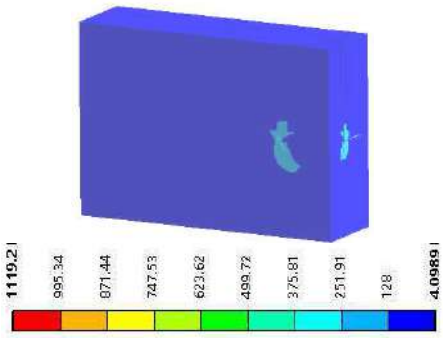
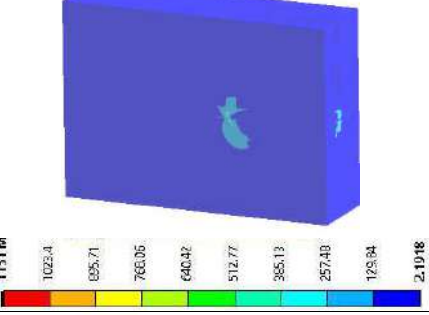
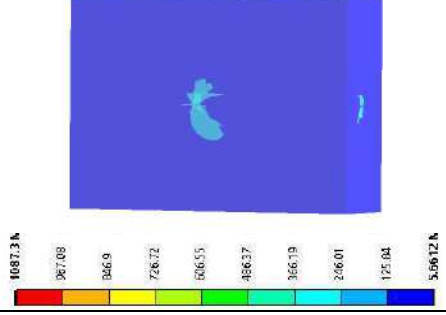
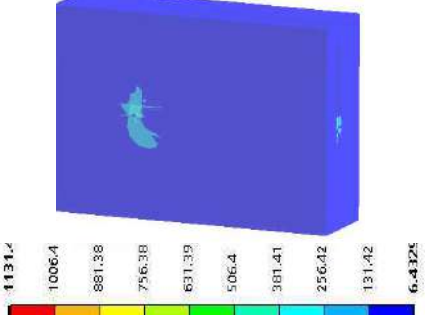
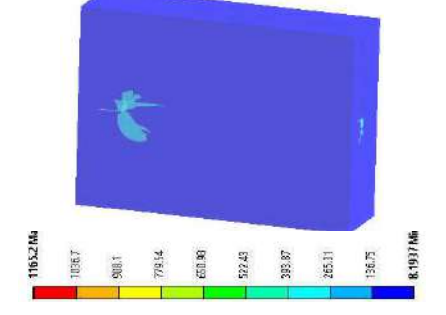
Із даних на рис. 9, 10 випливає, що рівні максимальних напружень за Мізесом та контактного тиску поведуться однотипно для різних груп, схем та елементів. За деякими винятками зі зростанням  $\gamma$  ці рівні зростають. Крім того, чим більша овальність області дискретного зміцнення, тим, як правило, вища тенденція до їх зростання.

У табл. 3 наведені поля розподілу еквівалентних напружень у повних моделях відповідно для певних розрахункових груп, а у табл. 4 – розподіли контактної тиску для окремих розрахункових схем.

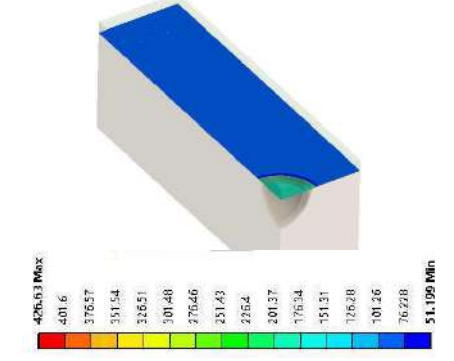
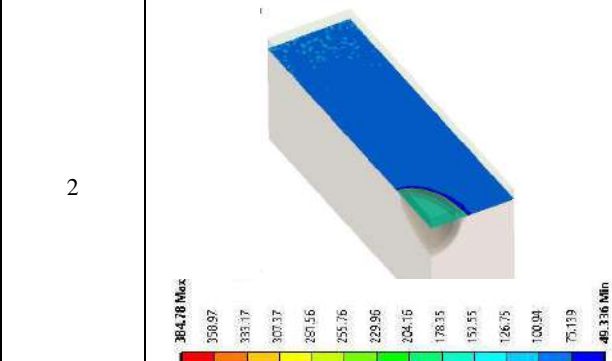
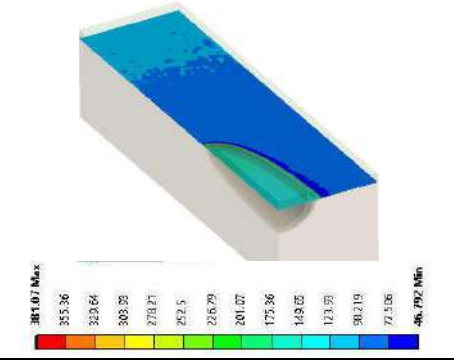
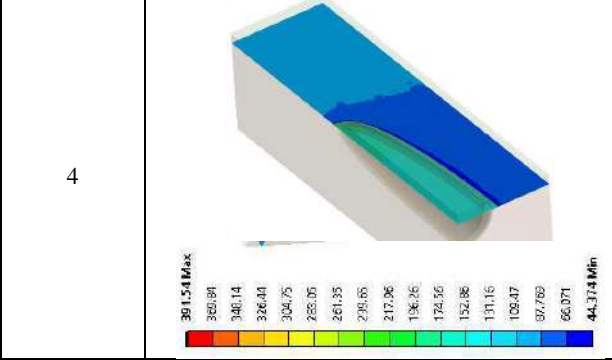
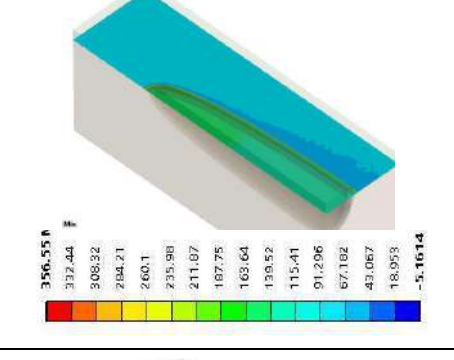
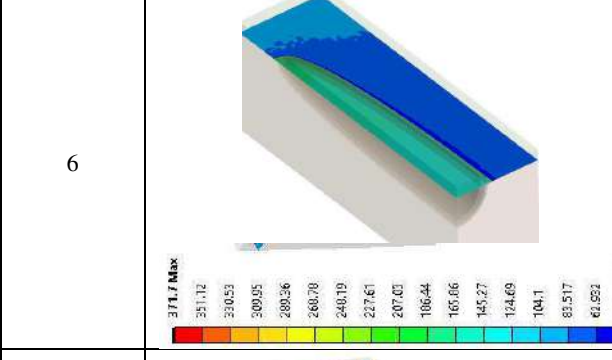
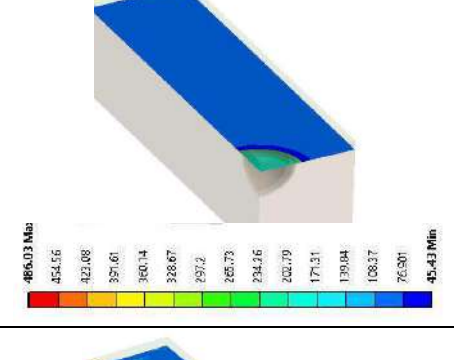
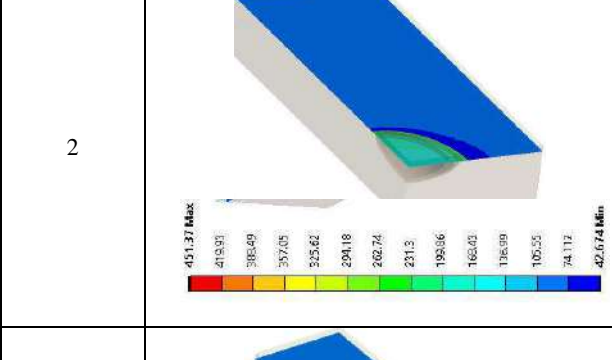
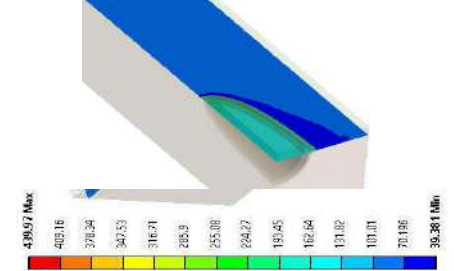
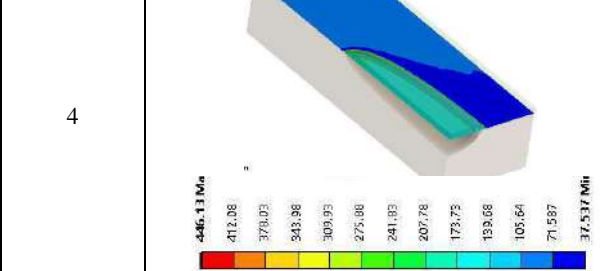
Таблиця 3 – Поля розподілу еквівалентних напружень, (МПа), (повна модель) для різних розрахункових груп

Розрахункові група	схема	Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа	Розрахункова схема	Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа
1	1		2	
	3		4	
	5		6	
3	1		2	



Розрахункові		Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа	Розрахункова схема	Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа
група	схема			
3	3		4	
	5		6	
6	1		2	
	3		4	
	5		6	

Таблиця 4 – Поля розподілу контактної тиску, (МПа), для окремих розрахункових груп

Розрахункові група	схема	Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа	Розрахункова схема	Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа
2	1		2	
	3		4	
	5		6	
3	1		2	
	3		4	

Розрахункові група		Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа		Розрахункова схема		Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа	
група	схема			схема			
3	5			6			
6	3			4			
8	1			2			

Розрахункові		Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа	Розрахун- кова схема	Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа
група	схема			
8	5		6	

Розподіли та рівні контактного тиску мають аналогічні до еквівалентних напружень тенденції до зміни при зміні досліджених груп та схем представницьких осередків зміцнених деталей.

Наведені ілюстрації відображають тенденції зміни НДС дискретно-континуально зміцнених тіл у представницьких осередках. Ці тенденції у цілому справедливі для різних властивостей основних матеріалів деталей машин.

Разом із тим для кожної конкретної конструкції можна будувати свою модель із урахуванням уточнених конструктивних і технологічних особливостей. При цьому важливо, що сама узагальнена параметрична модель уже побудована, і варто лише задати межі варіювання параметрів у тому чи іншому випадку. Крім того, слід зважати на фізико-механічні характеристики основних матеріалів та покриттів поверхонь контактуючих елементів систем, що досліджуються, у тому чи іншому конкретному випадку. Також певне значення має і макрогеометрія контактуючих елементів конструкцій.

Отже, здійснений аналіз впливу легування та покриттів підтверджує висновок про їх суттєвий вплив на фазово-структурний стан та службові характеристики матеріалів. Ці характеристики за різних режимів легування та нанесення мають тенденцію до розширення меж своїх значень. Якраз тому і задаються широкі діапазони варіювання фізико-механічних характеристик матеріалів та покриттів, що застосовуються та одержуються.

#### 4. Розроблення гами конструкцій

Таблиця 5 – Характеристики турбодетандерних електростанцій [10]

Стандартний розмір	Потужність, кВт	Потік газу, м <sup>3</sup> /год	Тиск газу, бар	Тип експандеру	Редуктор (так/ні)	Тип генератора
Малий	До 25	До 10000	До 63	Радіальний	Не використовується	Високошвидкісний
Середній	Від 100 до 500	До 50000	До 63	Радіальний		
Великий	Від 1000 до 6000	До 250000	До 160	Радіальний або аксіальний	Так	Синхронний або індукційний (1500 або 3000 об/хв)
Дуже великий	Від 8000 до 16000	До 800000	До 160			

На основі комплексу здійснених досліджень розроблені рекомендації стосовно раціональних конструктивних і технологічних рішень елементів турбодетандерних установок (див. рис. 11), які забезпечують характеристики, наведені у табл. 5.

**Висновки.** За результатами роботи на основі

турбодетандерних установок. На основі здійсненого комплексу досліджень робочих процесів і станів у елементах ТдЕС, зокрема, і зміцнених деталях і вузлах, розроблені технічні рішення гами установок (рис. 11, табл. 5).



Рисунок 11 – Турбодетандерні електростанції ПрАТ «Турбогаз» [10]

створеного теоретико-множинного підходу розроблені нові засоби генерування електроенергії у вигляді автономних ТдЕС із технічними характеристиками, які визначають світовий рівень такого типу обладнання, а також концепція, методи та засоби обґрунтування їх прогресивних проектно-

технологічних рішень. При цьому високоефективні проєктні рішення сформовані шляхом фундаментальних та прикладних досліджень та аналізу робочих процесів.

Задля обґрунтування проривних технологічних рішень установлені закономірності впливу мікроструктури макроелементів ТДЕС на нові фізичні наноефекти при дискретному й континуальному їх зміцненні.

У кінцевому підсумку синтезовані прогресивні технічні рішення у просторі варійованих проєктних та технологічних параметрів ТДЕС як унікального цілісного об'єкта.

Турбодетандерні установки розроблені, досліджені, виготовлені та впроваджені силами ПрАТ «ТУРБОГАЗ» при науковому супроводі НТУ «ХП» на 22 об'єктах в Україні та за кордоном. Зокрема, це установки серій УТДУ та УДЕУ, що введені в експлуатацію у регіональних газових компаніях в Україні (Севєродонецьк, Солоха, Запоріжжя, Дніпро) та в іноземних фірмах. При цьому розроблені унікальні ефективні робочі профілі, конструкції та технології виготовлення закритих робочих коліс турбодетандера із титанового сплаву, а також відкритого типу – з алюмінієвого сплаву, методи дискретного та континуального зміцнення елементів конструкцій, досягається підвищений на 25% ресурс та ККД на рівні 86% за детандером. У підсумку впровадження проривних технічних рішень дає можливість визначати створені турбодетандерні установки як економічні високотехнологічні унікальні виробы, що визначають світовий рівень у цій галузі.

#### Список літератури

- Avetian, T. and Rodriguez, L. (2020). *Fundamentals of turboexpander design and operation*. Available at: <https://fliphtml5.com/gkjt/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.
- M.White, Frank (2008). *Fluid Mechanics*. New York : McGraw-Hill, 978-0-07-352934-9.
- Kundu, Pijush K. (2012). *Fluid mechanics*. s.l. : ELSEVIER. 978-0-12-382100-3.
- 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.
- Детандер генератор*. Available at: [https://turbogaz.com.ua/uk/equipment/dgu\\_ua](https://turbogaz.com.ua/uk/equipment/dgu_ua).
- Моисеев А. Н. (2015). Энергоэффективная турбоэлектромеханическая система для газораспределительных станций. *Вісник Національного технічного університету «ХП»*, 12 (1121), 356-359.
- Купрыгин, О., Моисеев, С., Пастухова, Е., Поливанов, В. (2007). Утилизационные турбодетандерные агрегаты ОАО «Турбогаз». *Energetica Moldovei. Aspecte regionale de dezvoltare*. Ediția I, 2005, 260-265.
- Флуїтек Системз*. Available at: <http://fluitek.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>
- Marchenko, A., Pylyov, V., Linkov, O. (2021). Estimation of Strength of the Combustion Chamber of the ICE Piston with a TBC Layer. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 188, 415–426. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_35)
- 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>
- 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/10.1007/978-3-030-40724-7\\_57](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-40724-7_57)
- Subbotina, V., Sobol, O. (2020). Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials*, 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-Qawabab (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>
- 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 «ХП»*. Серія: *Машинознавство та САПР*, 2, 59-63. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2022.2.07>.
- 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>.
- 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.
- 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>.
- 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*, Article ID 974178, 4 p. doi:10.1155/2013/974178.
- Pohrt, R., Popov, V. L. (2013). Contact stiffness of randomly rough surfaces. *Scientific reports*, 3, 6 p. doi: 10.1038/srep03293.
- 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.
- Liu, T. J., Yang, F., Yu, H., Aizikovich, S. M. (2021). Axisymmetric adhesive contact problem for functionally graded materials coating based on the linear multi-layered model. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 49(1), 41–58. <https://doi.org/10.1080/15397734.2019.1666721>.

34. 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.
35. 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>.
36. Tkachuk, M., Grabovskiy, A., Tkachuk, M., Hrechka, I., Sierykov, V. (2021). Contact Interaction of a Ball Piston and a RunningTrack 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.
37. 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.
38. 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.
39. Motreanu, D. (2001). Eigenvalue problems for variational-hemivariational inequalities in the sense of P. D. Panagiotopoulos. *Nonlinear Analysis*, 47(8), 5101–5112. doi:10.1016/S0362-546X(01)00620-4.
40. Кравченко С. О. *Забезпечення ресурсу ДВЗ шляхом застосування дискретно-континуального зміцнення робочих поверхонь* [Електронний ресурс] : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.03 : галузь знань 14 / Сергій Олександрович Кравченко ; наук. консультант Марченко А. П. ; Нац. техн. ун-т «Харків. політех. ін-т». Харків, 2018. 315 с.
41. Ткачук М.А., Белов М.Л., Шейко О.І., Кравченко С.О. та інші. Методи, засоби та технології дискретно-континуального зміцнення поверхневих шарів деталей машин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Машинознавство та САПР» -Харьков: НТУ «ХПІ», 2015. № 31 (1140). С. 100–110.*
42. Andriy Marchenko, Mykola Tkachuk, Sergey Kravchenko, Oleg Veretelnik. (2018). Technological methods of strengthening elements of engines and aggregates for special equipment. *Simulation of the partially dynamic heat insulation phenomena in ice cylinder. Proceedings of the institute of vehicles*, 1(115), pp. 73–80.
43. Andriy Marchenko, Sergey Kravchenko, Mykola Tkachuk, Mykola Tkachuk, Mariia Saverska. (2018). Diskrete-continual strengthening of contacting structural elements: mathematical and numerical modeling. *Proceedings of the institute of vehicles*, 2(116), pp. 143–153.
44. Марченко А.П., Ткачук М.А., Кравченко С.А., Ткачук М.М., Грабовський А.В., Веретельник О.В. Аналіз напружено-деформованого стану дискретно зміцнених деталей машинобудівних конструкцій. *Науково-технічний журнал. Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. № 1. С. 144–125.
45. Ткачук М.А., Кравченко С.А., Грабовський А.В., Ткачук М.М., Веретельник О.В., Куденко С.В., Клочков І.С., Саверська М.С. Контактна взаємодія дискретно-континуально зміцнених деталей двигунів внутрішнього згорання. *Двигатели внутреннего сгорания*. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 2. С. 49–59.
46. Ткачук М.М., Марченко А.П., Кравченко С.О., Ткачук М.А., Веретельник О.В., Грабовський А.В., Веретельник В.В. Багатокритеріальна оцінка контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених деталей. *Двигатели внутреннего сгорания*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. № 1. С. 65–77.
9. Khan, Rama S. R. Gorla & Aijaz A. (2003). *Turbomachinery Design and Theory*. s.l. : Marcel Dekker, 0-8247-0980-2.
10. Detander henerator. Available at: <https://turbogaz.com.ua/uk/equipment/dgu.ua>.
11. Moiseyev A. N. (2015). Energoeffektivnaya turboelektromekhanicheskaya sistema dlya gazoraspredeletelnykh stantsiy. *Visnik NTU «KHPi»*, 12 (1121), 356-359.
12. Kuprygin, O., Moiseyev, S., Pastukhova, Ye., Polivanov, V. (2007). Utilizatsionnyye turbodetandernyye agregaty OAO «Turbogaz». *Energetica Moldovei. Aspecte regionale de dezvoltare*. Ediția I, 2005, 260-265.
13. Fluitek sistemz. Available at: <http://fluitech.com.ua/>
14. 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)
15. 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>
16. Marchenko, A., Pylyov, V., Linkov, O. (2021). Estimation of Strength of the Combustion Chamber of the ICE Piston with a TBC Layer. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 188, 415–426. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_35)
17. 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>
18. 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)
19. Subbotina, V., Sobol, O. (2020). Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials*, 14, 6, 247–250.
20. 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.
21. 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>
22. Subbotin, O. V., Bilozero, V. V., Volkov, O. O., Subbotina, V. V., Shevtsov, V. M. (2022). Fryktsiyni vlastyivosti MDO-pokryttiv na aluminiiyevykh splavakh. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPi». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*, 2, 59-63. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2022.2.07>
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. 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).
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. Tkachuk, N. A., Kravchenko, S. A., Pylev, V. A., Parsadanov, I. V., Grabovskiy, A. V., Veretelnik, O. V. (2019). Diskretno-kontinual'noye uprochneniye kontaktiruyushchikh elementov konstruktсий: kontseptsiya, matematicheskoye i chislennoye modelirovaniye. *Nauka i tekhnika*, 18(3), 240-247.
28. Paggi, M., Barber, JR (2011). Contact conductance of rough surfaces composed of modified rnd patches. *International Journal of Heat and*

#### References (transliterated)

1. Avetian, T. and Rodriguez, L. (2020). *Fundamentals of turboexpander design and operation*. Available at: <https://fliphtml5.com/gktj/sepi/basic>.
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*. CALIFORNIA: SIMMS MACHINERY INTERNATIONAL, INC.,
4. Earl Logan, Jr. (2003). *Handbook of Turbomachinery*. New York : Marcel Dekker, 880. <https://doi.org/10.1201/9780203911990>.
5. Saravanamuttoo, H. I. H. (2008). *Gas Turbine Theory*. s.l. : Prentice Hall., 0132224372.
6. M.White, Frank (2008). *Fluid Mechanics*. New York : McGraw-Hill., 978-0-07-352934-9.
7. Kundu, Pijush K. (2012). *Fluid mechanics*. s.l. : ELSEVIER. 978-0-12-382100-3.
8. Korpela, Seppo A. (2011). *Principles of Turbomachinery*. Canada :

- Mass Transfer*, 54(21), 4664–4672. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06.011>.
29. 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.
  30. Pohrt, R., Popov, V. L. (2013). Contact mechanics of rough spheres: Crossover from fractal to hertzian behavior. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Tribology*, Article ID 974178, 4 p. doi:10.1155/2013/974178.
  31. Pohrt, R., Popov, V. L. (2013). Contact stiffness of randomly rough surfaces. *Scientific reports*, 3, 6 p. doi: 10.1038/srep03293.
  32. 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.
  33. Liu, T. J., Yang, F., Yu, H., Aizikovich, S. M. (2021). Axisymmetric adhesive contact problem for functionally graded materials coating based on the linear multi-layered model. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 49(1), 41–58. <https://doi.org/10.1080/15397734.2019.1666721>.
  34. 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.
  35. Tkachuk, M. (2018). A Numerical Method for Axisymmetric Adhesive Contact Based on Kalker's Variational Principle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 37(93), 34–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132076>.
  36. 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.
  37. 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.
  38. 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.
  39. Motreanu, D. (2001). Eigenvalue problems for variational-hemivariational inequalities in the sense of P. D. Panagiotopoulos. *Nonlinear Analysis*, 47(8), 5101–5112. doi:10.1016/S0362-546X(01)00620-4.
  40. Kravchenko S. O. *Zabezpechennia resursu DVZ shliakhom zastosuvannia dyskret-no-kontynualnoho zmitsnennia robochykh poverkhon* [Elektronnyi resurs] : dys. ... d-ra tekhn. nauk : spets. 05.05.03 : haluz znan 14 / Serhii Oleksand-rovych Kravchenko ; nauk. konsultant Marchenko A. P. ; Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». Kharkiv, 2018. 315 p.
  41. Tkachuk M.A., Bielov M.L., Sheiko O.I., Kravchenko S.O. ta inshi. (2015). Metody, zasoby ta tekhnolohii dyskretno-kontynialnoho zmitsnennia poverkhnevyykh shariv detalei mashyn. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Kharkov: NTU «KhPI», № 31 (1140), pp. 100–110. ISSN 2079-0775.
  42. Andriy Marchenko, Mykola Tkachuk, Sergey Kravchenko, Oleg Veretelnik. (2018). Technological methods of strengthening elements of engines and aggregates for special equipment. *Simulation of the partially dynamic heat insulation phenomena in ice cylinder. Proceedings of the institute of vehicles*, 1(115), pp. 73–80.
  43. Andriy Marchenko, Sergey Kravchenko, Mykola Tkachuk, Mykola Tkachuk, Mariia Saverska. (2018). Diskrete-continual strengthening of contacting structural elements: mathematical and numerical modeling. *Proceedings of the institute of vehicles*, 2(116), pp. 143–153.
  44. Marchenko A.P., Tkachuk M.A., Kravchenko S.A., Tkachuk M.M., Hrabovskiy A.V., Veretelnik O.V. (2019). Analiz napruzhenno-deformovanoho stanu dyskretno zmitsnennykh detalei mashynobudivnykh konstruktiv. *Naukovo-tekhnichniy zhurnal. Mekhanika ta mashynobuduvannia*. Kharkiv: NTU «KhPI», no. 1, pp. 144–125.
  45. Tkachuk M.A., Kravchenko S.A., Hrabovskiy A.V., Tkachuk M.M., Veretelnik O.V., Kutsenko S.V., Klochkov I.I., Saverska M.S. (2021). Kontaktna vzaiemodiiia dyskretno-kontynualno zmitsnennykh detalei dvyhuniv vnutrishnho zghoriannia. *Vseukrainskyi nauchno-tekhnicheskyy zhurnal. Dvyhately vnutrenneho shoranyia*. Kharkiv: NTU «KhPI», no. 2, pp. 49–59.
  46. Tkachuk M.M., Marchenko A.P., Kravchenko S.O., Tkachuk M.A., Veretelnik O.V., Hrabovskiy A.V., Veretelnik V.V. (2022). Bahatokryterialna otsinka kontaktnoi vzaiemodii dyskretno-kontynualno zmitsnennykh detalei. *Vseukrainskyi nauchno-tekhnicheskyy zhurnal. Dvyhately vnutrenneho shoranyia*. Kharkiv: NTU «KhPI», no. 1, pp. 65–77.

Поступила (received) 01.02.2023

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Моїсєєв Сергій Вікторович / Moiseiev Sergiy** – ПрАТ «ТУРБОГАЗ», заступник Голови Наглядової Ради, м. Харків, Україна, e-mail: novikovmaxim1980@ukr.net

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

**Бурняшев Аркадій Васильович / Burniashev Arkadii** – ПрАТ «ТУРБОГАЗ», заступник головного інженера з концептуальних рішень та перспективних розробок, м. Харків, Україна, e-mail: novikovmaxim1980@ukr.net

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

**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

**Львов Геннадій Іванович / Lvov Gennadiy** – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0297-9227>, тел.: (057)7076343, e-mail: lvovdpm@ukr.net

**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 ID Scopus: 57281194900

**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