

**О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, М.М. ТКАЧУК, С.О. КРАВЧЕНКО, М.С. САВЕРСЬКА, С.В. КУЦЕНКО,
А.В. ГРАБОВСЬКИЙ, І.Є. КЛОЧКОВ, М.А. ТКАЧУК**

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНО ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

У роботі описано розроблені моделі та результати розрахунково-експериментальних досліджень напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених деталей машин. Особливістю таких способів зміцнення є те, що одна із контактуючих деталей оброблена шляхом індування у її поверхневі шари множини островків більш міцного матеріалу. Інша деталь оброблена шляхом корундування поверхневого шару. У результаті елементи контактної пари взаємодіють переважно по островках більш міцного матеріалу. Відповідно, між тілами виникає лабіринт мікроканалів для мастила. Крім того, контактні навантаження діють більш інтенсивно на більш міцний матеріал дискретних зон. Отже, відбувається підвищення міцності та довговічності деталей при навантаженні. На ці показники суттєво впливають режими технологічного процесу зміцнення. Зокрема, це форма зони дискретного зміцнення, а також властивості матеріалу корундового шару. Ці чинники були проварійовані у ході розрахунків напружено-деформованого стану фрагментів контактуючих тіл. Установлені залежності характеристик напружено-деформованого стану від варіюваних параметрів. Розроблені рекомендації стосовно обґрунтування параметрів технологічних процесів дискретно-континуального зміцнення деталей машин.

Ключові слова: напружено-деформований стан, дискретно-континуальне зміцнення, контактна взаємодія, метод скінченних елементів, контактний тиск, деталі машин

**О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, Н.Н. ТКАЧУК, С.А. КРАВЧЕНКО, М.С. САВЕРСКАЯ, С.В. КУЦЕНКО,
А.В. ГРАБОВСКИЙ, И.Е. КЛОЧКОВ, Н.А. ТКАЧУК**

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНО УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В работе описаны результаты расчетно-экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния дискретно-континуально упрочненных деталей машин. Особенностью таких способов упрочнения является то, что одна из контактирующих деталей обработана путем индентирования в ее поверхностные слои множества островков более прочного материала. Другая деталь обработана путем корундирования поверхностного слоя. В результате элементы контактной пары взаимодействуют преимущественно по островкам более прочного материала. Соответственно, между телами возникает лабиринт микроканалов для смазки. Кроме того, контактные нагрузки действуют более интенсивно на более прочный материал дискретных зон. Таким образом, происходит повышение прочности и долговечности деталей при нагружении. На эти показатели существенно влияют режимы технологического процесса упрочнения. В частности, это форма зоны дискретного упрочнения, а также свойства материала корундового слоя. Эти факторы были проварьированы в ходе расчетов напряженно-деформированного состояния фрагментов контактирующих тел. Установлены зависимости характеристик напряженно-деформированного состояния от варьируемых параметров. Разработаны рекомендации относительно обоснования параметров технологических процессов дискретно-континуального упрочнения деталей машин.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, дискретно-континуальное упрочнение, контактное взаимодействие, метод конечных элементов, контактное давление, детали машин

**O. VERETELNIK, M. M. TKACHUK, S. KRAVCHENKO, M. SAVERSKA, S. KUTSENKO, A. GRABOVSKIY,
I. KLOCHKOV, M. A. TKACHUK**

RESEARCH AND EXPERIMENTAL STUDIES OF STRESS-STRAIN STATE OF DISCRETE-CONTINUAL HARDENED MACHINE PARTS

Research and experimental studies of stress-strain state of discrete-continual hardened machine parts are presented in this work. This hardening method is distinguished by incorporation of numerous hard spots into the surface layer of one of the bodies. Meanwhile the other part is covered by a continuous corundum layer. Correspondingly, a network of microchannels for lubricant is formed between the bodies. Furthermore the contact loads are intensified in the vicinity of the harder material in the discrete zones. As a result the strength and durability of the loaded parts is increased. The technological parameters of the hardening process have great impact on the resulting characteristics. In particular, this concern the shape of the discrete hardening zones and the material properties of the corundum layer. These factors were varied in stress-strain analyses of the contacting bodies. The dependence of the stress-strain state characteristics on the varied parameters was established. The justified recommendations regarding the technological parameters of the discrete-continual hardening have been developed.

Keywords: stress-strain state, discrete-continual hardening, contact interaction, finite element method, contact pressure, machine parts

Вступ. Як зазначається у роботі [1], для сучасного машинобудування одним зі стратегічних напрямків підвищення міцності, коефіцієнта корисної дії (ККД) та довговічності найбільш відповідальних та навантажених елементів конструкцій є нові проривні проектно-технологічні засоби та методи. Це зумовлене тим, що традиційні підходи та засоби значною мірою вичерпали свої можливості та не мають ресурсів для суттєвого поліпшення технічних рішень. Особливо актуально це для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), які уже досягли високого рівня технічних характеристик, і подальший прогрес у цих напрямках упирається у принципи

складності. Тому особливої уваги заслуговують нові проривні методи і технології зміцнення елементів конструкцій. Серед останніх значної ефективності набувають методи, які поєднують дискретне і континуальне зміцнення (ДКЗ) [2].

На відміну від традиційних, ДКЗ поєднує переваги дискретного та континуального зміцнення і позбавлене їх недоліків. Для виявлення особливостей напружено-деформованого стану (НДС) деталей машин, що взаємодіють, необхідно здійснити аналіз

© О.В. Веретельник, М.М. Ткачук, С.О. Кравченко,
М.С. Саверська, С.В. Куценко, А.В. Грабовський,
І.Є. Клочков, М.А. Ткачук, 2021

контактної взаємодії представницьких структур контактуючих тіл на мікрорівні. Вони складаються із фрагментів контактуючих деталей, одна із яких зміцнена континуально, а інша – дискретно. При контактній взаємодії на мікрорівні проявляються, з одного боку, ефекти нанорівня, а з іншого – макрорівня. Наноефекти полягають у перерозподілі контактних зусиль між тілами: із плавних вони перетворюються в архіпелаг підвищень. Макроефекти полягають у адаптації форми контактуючих деталей під розподіл контактних зусиль, згладжуючи їх загальну нерівномірність. У підсумку досягається загальний ефект поліпшення показників зміцнення, підвищення міцності, навантажувальної здатності та ресурсу елементів різноманітних машин військового та цивільного призначення (МВЦП).

Відповідно, необхідне визначення ефектів, які супроводжують ДКЗ, задля обґрунтування раціональних технологічних режимів зміцнення.

Аналіз існуючих методів зміцнення та дослідження напружено-деформованого стану пружних тіл. Натепер проблемі підвищення міцності, зносостійкості, економічності та довговічності деталей машин приділяється значна увага. Як відзначається у низці робіт [3–11], на сьогодні одним із найбільш ефективних способів вирішення цієї проблеми є їх поверхневе зміцнення деталей. Поверхневе зміцнення деталей – це окрема область технологій, що інтенсивно розвиваються. На цей час існує близько 200 способів поверхневого зміцнення. Поряд із традиційними способами хіміко-термічної й термічної обробки, використанням електролітичних покриттів, різних видів наплавлень, розвиваються нові технології зміцнення із застосуванням джерел з високою концентрацією енергії – іонно-плазмова обробка, лазерне зміцнення, детонаційне зміцнення тощо [3–8].

У технічній літературі відомі способи зміцнення можна розділити на шість основних класів [4–11]: 1 – утворення плівок на поверхні; 2 – зміна хімічного складу поверхневого шару; 3 – зміна структури поверхневого шару при незмінному хімічному складі; 4 – зміна енергетичного стану поверхневого шару; 5 – зміна шорсткості поверхневого шару; 6 – зміна структури у всьому об'ємі металу.

Класи розділені на процеси, які можуть виконуватися в різних умовах: у газовому або рідкому середовищі, в порошках або пастах, без використання або з використанням теплоти, при нормальному, підвищеному або високому тиску, в низькому, середньому або глибокому вакуумі, в атмосфері водяної, водогазової чи іншої пари в контрольованих атмосферах екзогазу або ендозгазу, в електропровідному або діелектричному середовищі, в середовищі з поверхнево-активними або абразивними властивостями, в магнітному, електричному, гравітаційному або термічному полі. Зовнішні умови характеризують специфічні особливості технологічного процесу, за яких здійснюється певний метод зміцнення [10, 11].

Останніми роками значний розвиток отримали процеси дискретної обробки поверхонь [10, 11], які

дають можливість отримати на них чергування у заданій послідовності (дискретно) високоміцних і пластичних мікроділянок, аналогічно до природних композиційних матеріалів, армованих твердими та міцними фазами. Як відомо, така структура забезпечує високу конструкційну міцність матеріалу, тобто дає змогу одночасно отримати високі показники міцності, пластичності, в'язкості руйнування. Для пар тертя завдання значно ускладнюється, оскільки необхідно не просто підвищити конструкційну міцність деталей, а й забезпечити їх високі трибологічні характеристики поверхонь, що працюють у контакті з контрагентом, і при цьому не збільшити зношувальної здатності, тобто не призвести до прискореного зношування цих деталей [10, 11].

Останнім часом інтенсивне поширення набули кластерні покриття. Ефективне застосування в різних галузях техніки для підвищення зносостійкості деталей отримав також спосіб створення поверхонь з рівномірно розташованими мікрозаглибинами. Він досить успішно використовується в циліндрах двигунів, підшипниках, плунжерах тощо. Мікрозаглибини головним чином зумовлюють контактні здатності поверхні – покращують змащування, підвищують опір адгезії і корозії, скорочують період припрацювання. На відміну від термічного впливу на «шорсткість», для таких поверхонь введено поняття «мікрорельєф і макрорельєф» поверхні, що характеризує наявність у поверхневому шарі дискретних або неперервних заглиблень. До найбільш досліджених методів створення рельєфу належить вібраційне прокатування (пластична деформація). Мікро- та макрозаглибини на поверхні деталі можна розглядати як резервуари, де зосереджується мастило. Для порівняльної оцінки маслосатримувальної здатності поверхонь з рельєфом запропонований термін «маслоємність». Розвинена система заглиблень забезпечує можливість проникнення мастильного середовища в зону тертя, сприяє утворенню вторинних структур. Рівномірний мікро- та макрорельєф забезпечує локалізацію абразивних частинок середовища і продуктів зношування, знижує ймовірність заклинювання пари тертя. Циркулююча в заглибленнях олива поліпшує охолодження контактної поверхні [10, 11].

Протягом останніх десятиліть у різних галузях науки і техніки робилися спроби розробки нових нетрадиційних способів зміцнення деталей, які були би позбавлені багатьох недоліків класичних технологій. Таким новим процесом може стати спосіб формування зносостійкого шару робочої поверхні деталі, в основі якого лежить дискретне зміцнення електроіскровим методом [5–12].

Базуючись на відзначених моментах із відміченого розробка науково-технологічних основ підвищення ресурсу відповідальних деталей силових вузлів за рахунок використання дискретного зміцнення і споріднених технологій є перспективним напрямком підвищення їх триботехнічних характеристик.

В основі методу дискретного зміцнення поверхонь сталевих і чавунних деталей взято метод електроіскрового легування [5–12]. Процес електроіскрового легування має низку особливостей, які сприяють його поширенню: перенесення матеріалу залежить

від ерозійної стійкості анода і катода; можливість формування покриттів з характеристиками широкого діапазону значень; висока адгезія електроіскрового покриття з основним матеріалом; відсутність нагріву і деформації деталі в процесі обробки; товщина шару, що наноситься, і глибина легування – обмежені.

З іншого боку, широке застосування отримали технології мікродугового оксидування при зміцненні робочих поверхонь алюмінієвих деталей машин [13, 14]. При цьому формуються континуальні шари, отримані методом анодного мікродугового оксидування (АМДО). Ці шари, в основному складаються із твердофазних розчинів окислів $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, які складають (60–70) %, та інших окисних сполук елементів, які входять до складу сплаву й електроліту. Структура $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ має більше високу твердість, ніж структура $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, і більш високу зносостійкість [10, 11, 13, 14].

На розвиток двох типів методів зміцнення розроблено метод дискретно-континуального зміцнення [10, 11].

З іншого боку, необхідно здійснювати дослідження міцності зміцнених деталей машин із традиційних та нових матеріалів [15–23]. Зокрема, важливим є дослідження напружено-деформованого стану цих деталей із урахуванням контактної взаємодії [24–26]. Проте ці методи не спрямовані на моделювання напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених тіл із варіюванням проектно-технологічних параметрів та чинників, які впливають на роботу контактуючих деталей під навантаженням.

Мета роботи – розроблення моделей та здійснення досліджень задля обґрунтування раціональних проектно-технологічних рішень дискретно-континуального зміцнення контактуючих елементів машин.

Базові підходи, моделі та методи дослідження напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених деталей машин на прикладі двигунів внутрішнього згоряння В основі підходу до вирішення поставленої проблеми покладено метод узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних механічних системах, який розвинено та адаптовано до аналізу процесів зміцнення деталей машин, зокрема, ДВЗ [1, 2, 10, 11, 27, 28]. Відповідно, напружено-деформований стан описується у загальному вигляді в операторній формі

$$\bar{L}_M(u_M, P_M, f_M, t) = 0, \quad (1)$$

де \bar{L}_M – деякий оператор, структура і параметри якого залежать від типу досліджуваного явища, складу системи, граничних умов, навантаження і умов сполучення (структурно цей оператор містить опис усіх елементів системи і є узагальненням співвідношень механіки суцільного середовища);

u_M – масив змінних стану, щодо яких сформульовано задачу, що створюють простір розв'язків U_M ;

P_M – масив параметрів (характеристики фізико-механічних властивостей, розміри, режими технологічних процесів, величини приєднаних мас, жорсткості), які складають параметричний простір P_M ;

f_M – масив, що характеризує зовнішні навантаження (поверхневі, об'ємні, зосереджені, теплові навантаження), що діють на систему, які складають простір навантажень F_M ;

t – час або інший параметр, що характеризує досліджуване явище як процес.

При дискретизації задачі усі величини у рівнянні (1) змінюють індекс « M » (математична модель) на « N » (чисельна модель). Дискретизація може здійснюватися, наприклад, за допомогою методу скінченних елементів. При цьому заявлений підхід передбачає створення мета-моделей для аналізу досліджуваних процесів і синтезу конструкторсько-технологічних параметрів зміцнених поверхонь деталей машин [11].

Окрім чисельного, на створеній базі можливе також і експериментальне дослідження дискретно-континуально зміцнених деталей машин (тоді в (1) індекси « M » змінюються на « E »).

Поєднання етапів « N » та « E », порівняння їх результатів та коригування усіх типів моделей становить суть процесу розрахунково-експериментальних досліджень.

Результати чисельних досліджень системи фрагментів контактуючих тіл напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених деталей машин. Як зазначається в [1, 2, 10, 11, 27, 28], нагепер відсутні завершені дослідження контактно-фрикційної взаємодії у сполученнях, що містять, з одного боку, деталі, оброблені за технологією дискретного зміцнення, а з іншого, – оброблені за технологією гальвано-плазмового перетворення поверхні («корундування»). Це призводить до необхідності вирішення декількох нових актуальних і важливих питань. Зокрема, це – чисельне дослідження напружено-деформованого стану в зоні контактного сполучення таких деталей, аналіз зношування і втрат на тертя. Наступний етап досліджень – експериментальні дослідження на лабораторних зразках. Нижче наведені результати чисельних досліджень.

При чисельному дослідженні напружено-деформованого стану отриманої системи деталей, зміцнених методами дискретного зміцнення і корундування, використовувався підхід і математична модель, описані у [11, 27, 28]. На цій основі для механічної системи, наведеної на рис. 1, розроблена скінченно-елементна модель, яка містить представницький об'єм (рис. 2). Цей об'єм (комірка) дає можливість у мікрорівні промодельовати напружено-деформований стан взаємодіючих тіл, розподіл контактного тиску, оцінити тертя і зношування у сполученні деталей, перевіривши дослідження на реальний макромасштаб.

При формуванні механічних властивостей корундового шару враховувався вплив двох факторів: мікрогеометрія виступів-западин на поверхні шару і його пористість. Залежно від режимів технологічного процесу ці величини можуть змінюватися у досить

широких межах. Для розрахункових досліджень використовуваним матеріалам присвоїли модулі пружності $E_2 = 3,45 \cdot 10^{11}$ Па, інші матеріали мали властивості $E_1 = 7 \cdot 10^{10}$ Па, $E_3 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па (високолегована сталь), $E_4 = 1,1 \cdot 10^{11}$ Па (чавун), жорстка основа моделювалася як жорстке закріплення.

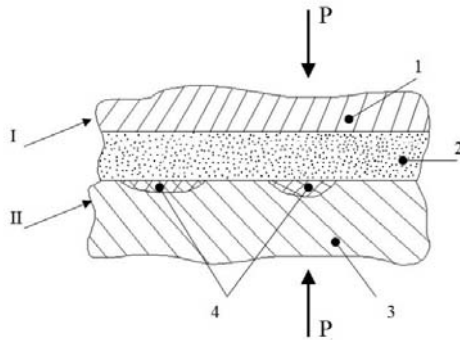


Рисунок 1 – Схема контактної взаємодії деталей [11, 27, 28]:

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

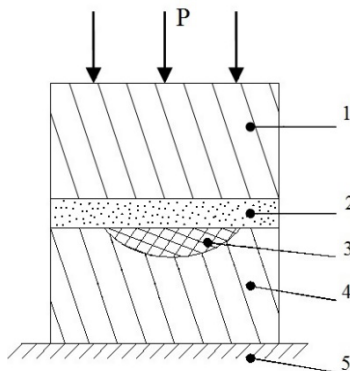


Рисунок 2 – Схема моделі представницької ґратки механічної системи [11, 27, 28]:

- 1 – алюмінієвий сплав, 2 – шар Al_2O_3 ,
 3 – дискретно-зміцнена зона, 4 – основний матеріал,
 5 – основа (жорстка основа)

У рамках роботи було чисельно досліджено НДС представницького осередку з утвореними областями після здійснення дискретного зміцнення однієї деталі та корундування шляхом проведення гальвано-плазмової обробки (ГПО) - іншої. Моделювання представницького осередку дає можливість оцінити НДС і контактну взаємодію тіл за варіювання параметрами моделі.

Геометрична модель представлена на рис. 3. Для кожної області геометричної моделі є відповідний набір параметрів (модуль пружності E та коефіцієнт Пуассона ν), який описує фізико-механічні властивості матеріалів.

Для запланованого дослідження було побудовано 8 розрахункових груп (А, В, С, D, E, F, G та H відповідно), які налічували 6 розрахункових схем

кожна. 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 5 (див. рис. 3) після операції корундування.

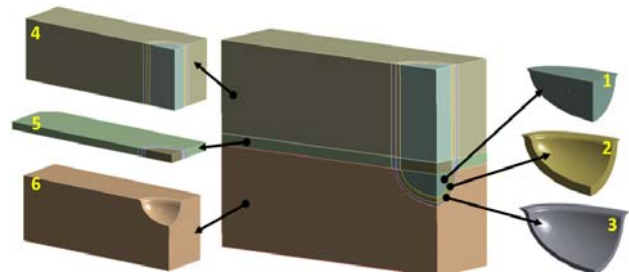


Рисунок 3 – Геометрична модель досліджуваного представницького осередку:

- 1 – дискретно зміцнена область (E_1, ν_1), 2 – 1-й перехідний шар (E_2, ν_2), 3 – 2-й перехідний шар (E_3, ν_3),
 4 – основний матеріал, сплав АК4 (E_4, ν_4),
 5 – шар із корундовим покриттям (E_5, ν_5),
 6 – основний матеріал, чавун (E_6, ν_6)

На рис. 4 наведена геометрична модель з основними розмірами. Базова модель була побудована таким чином, щоб дискретно зміцнена ділянка мала вигляд частини сфери з радіусом 1 мм. У табл. 1 наведені значення параметрів, які описують дискретно зміцнену ділянку.

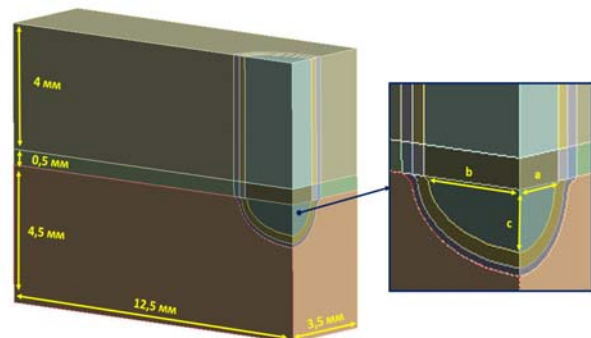


Рисунок 4 – Основні розміри моделі

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. 5 представлені геометричні моделі, з урахуванням геометричних параметрів з табл. 1, для усіх розрахункових схем у рамках однієї групи. У ході дослідження був введений параметр γ ($\gamma = E_5/E_6$). Цей параметр визначався як відношення модуля пружності області після корундування до модуля пружності основного матеріалу – чавуну. У табл. 2 наведені модулі пружності матеріалів, а на рис. 6 – навантаження, закріплення, а також умови симетрії, що використовувалися.

Побудована скінченно-елементна модель, яка

представлена на рис. 7, налічувала близько 300 тис. елементів.

У процесі дослідження було визначена контактна пара (без тертя) між елементами моделі: ниж-

ньою частиною, виконаною із чавуну з дискретно-зміцненою ділянкою, та верхньою, виконаною з алюмінієвого сплаву АК4 із областю після ГПО.

На рис. 8 наведена контактна пара.

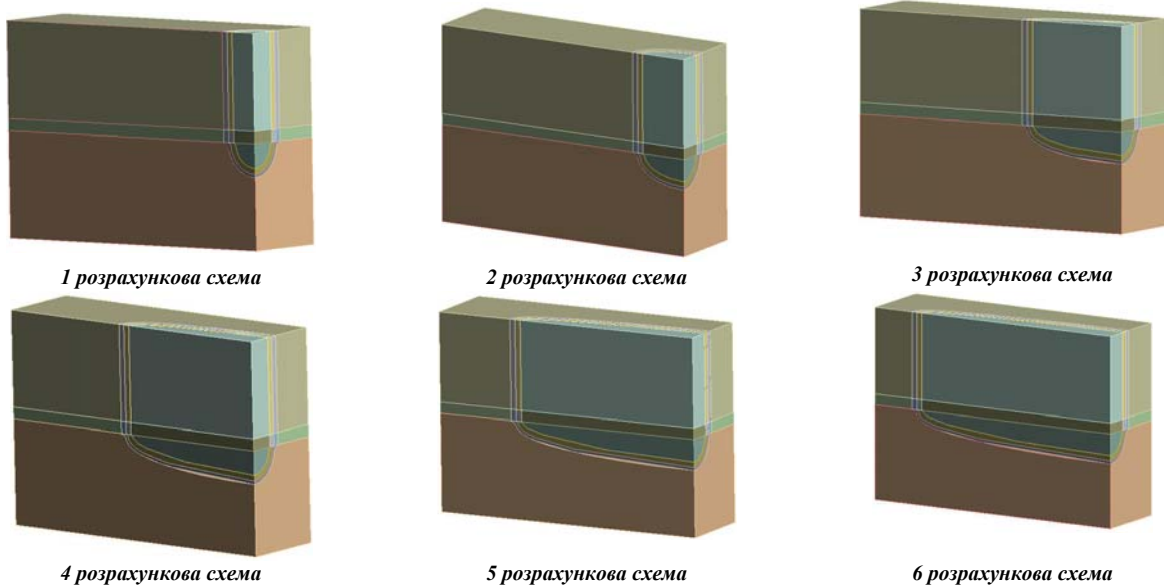


Рисунок 5 – Геометричні моделі для розрахункових схем

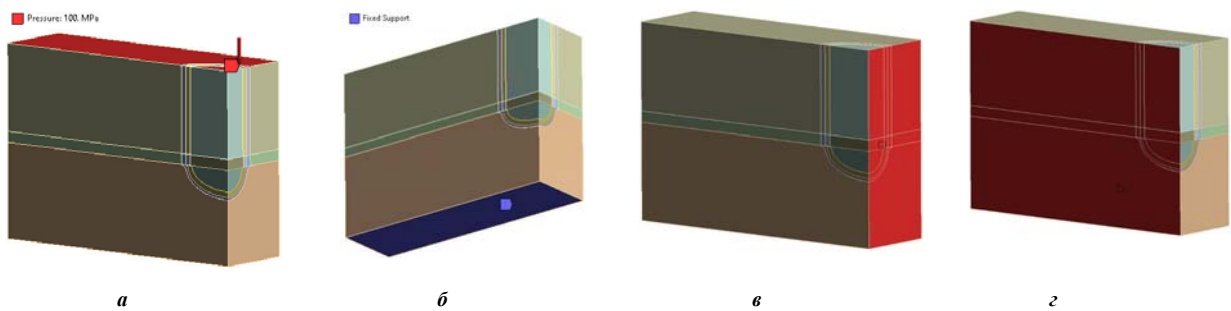


Рисунок 6 – Зовнішні навантаження та умови симетрії:
а – навантаження; б – умови закріплення; в, г – симетрія 1 та 2

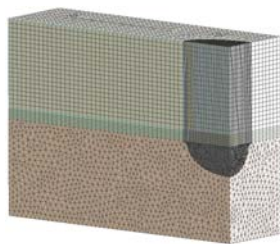


Рисунок 7 – Скінченно-елементна модель

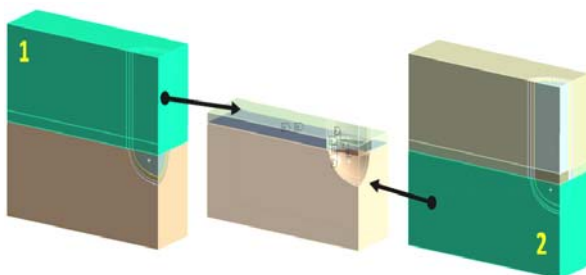


Рисунок 8 – Контактна пара:
1 – АК4 з областю після ГПО,
2 – чавун з дискретно-зміцненою ділянкою

Таблиця 2 – Модуль пружності розглянутих матеріалів, МПа

| Розрахункові схеми | γ | E_1 | E_2 | E_3 | E_4 | E_5 | E_6 |
|--------------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 0,01 | $2,10 \cdot 10^{11}$ | $2,10 \cdot 10^{11}$ | $2,10 \cdot 10^{11}$ | $7,00 \cdot 10^{10}$ | $1,10 \cdot 10^9$ | $1,10 \cdot 10^{11}$ |
| 2 | 0,05 | | | | | $5,50 \cdot 10^9$ | |
| 3 | 0,1 | | | | | $1,10 \cdot 10^{10}$ | |
| 4 | 0,5 | | | | | $5,50 \cdot 10^{10}$ | |
| 5 | 1,0 | | | | | $1,10 \cdot 10^{11}$ | |
| 6 | 2,5 | | | | | $2,75 \cdot 10^{11}$ | |
| 7 | 5 | | | | | $5,50 \cdot 10^{11}$ | |
| 8 | 10 | | | | | $1,01 \cdot 10^{12}$ | |

Результати чисельних досліджень. У ході досліджень визначалися максимальні еквівалентні напруження, максимальні переміщення і максимальний контактний тиск для усіх розрахункових схем. Нижче на рис. 9–12 наведені максимальні еквівалентні напруження за Мізесом для повної моделі та для певних елементів моделі окремо, відповідно для усіх розрахункових груп, а на рис. 13 – максимальний контактний тиск для усіх розрахункових груп.



Рисунок 9 – Максимальні еквівалентні напруження для усіх розрахункових схем

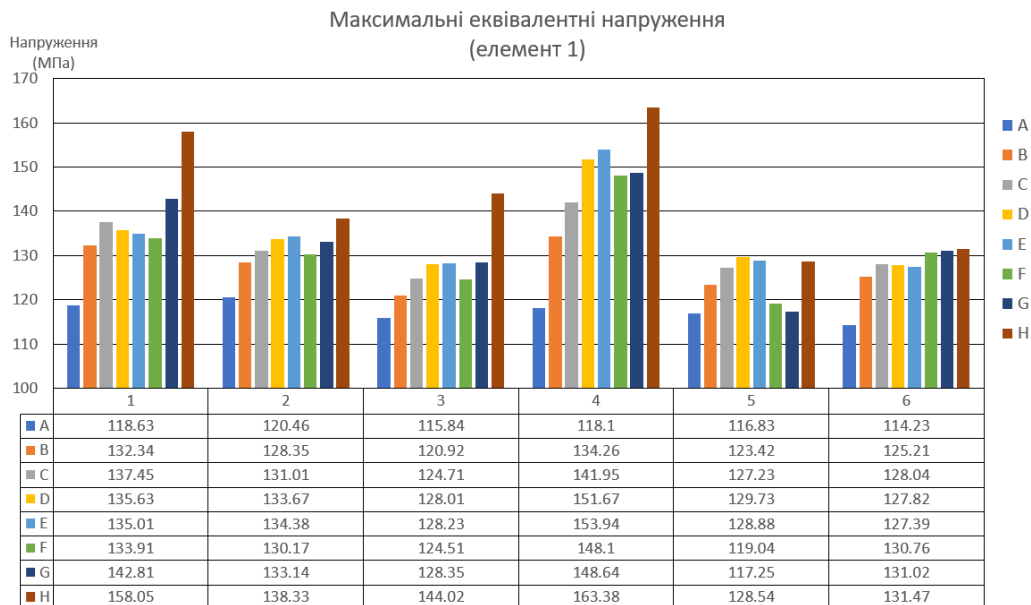


Рисунок 10 – Максимальні еквівалентні напруження (елемент 1)

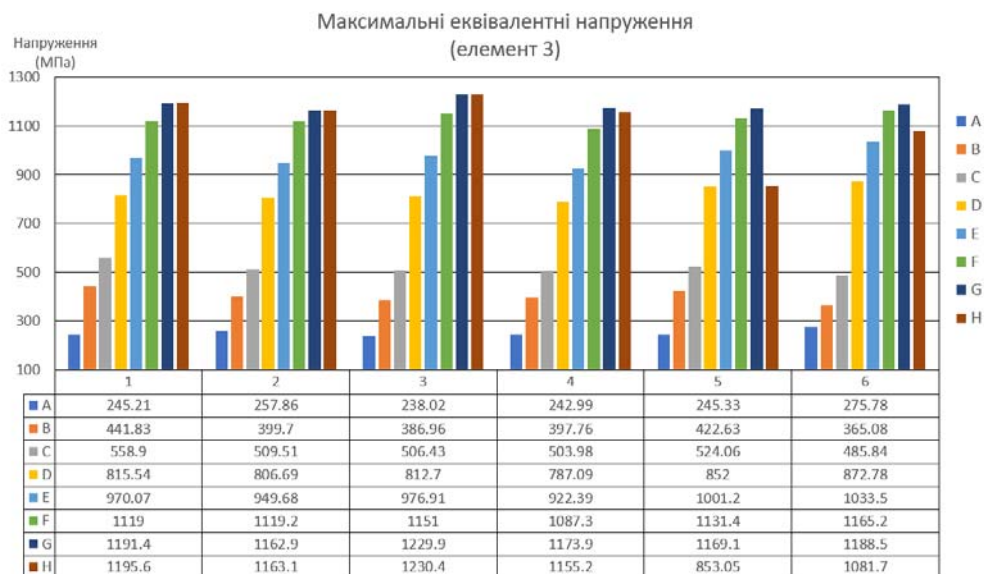


Рисунок 11 – Максимальні еквівалентні напруження (елемент 3)

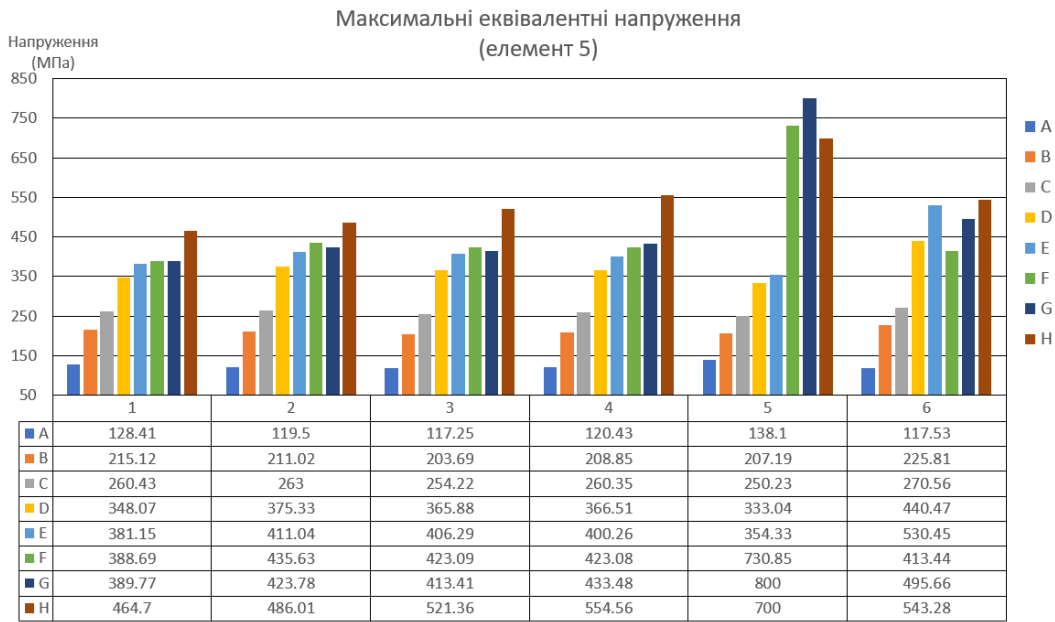


Рисунок 12 – Максимальні еквівалентні напруження (шар з ГПО) (елемент 5)



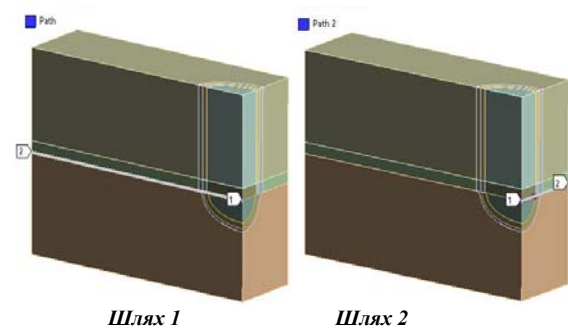
Рисунок 13 – Максимальний контактний тиск, МПа

У ході дослідження було задано два шляхи, уздовж яких визначались розподіли повного переміщення. На рис. 14 наведені ці шляхи, а на рис. 15–17 – графіки з переміщеннями та діаграми із параметром Δ , який визначає різницю між максимальними та мінімальними переміщеннями уздовж шляху відповідно для обох шляхів та усіх розрахункових схем. Значення максимальних повних переміщень наведено на рис. 18.

У табл. 3, 4 наведені поля розподілу еквівалентних напружень за Мізесом у повних моделях, відповідно для окремих розрахункових груп, а у табл. 5, 6 – поля розподілу еквівалентних напружень за Мізесом у елементах моделі, відповідно для окремих розрахункових груп та схем.

Отримані розподіли контактного тиску наведені

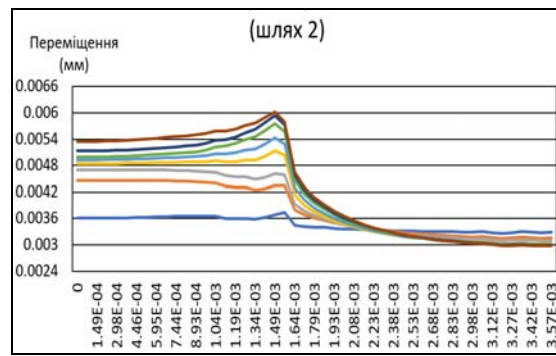
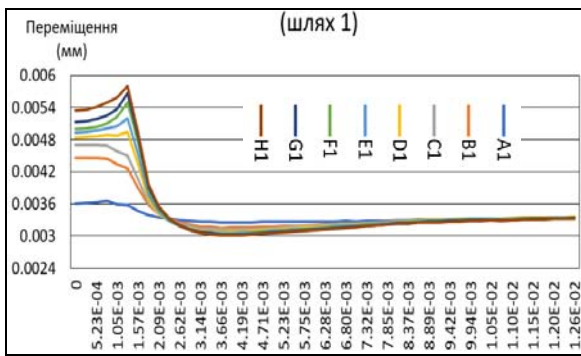
у табл. 7 для певних розрахункових схем.



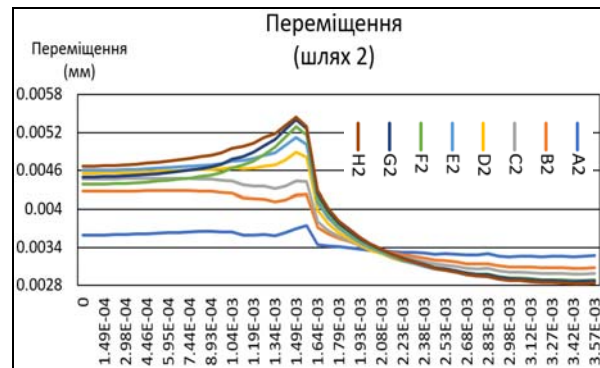
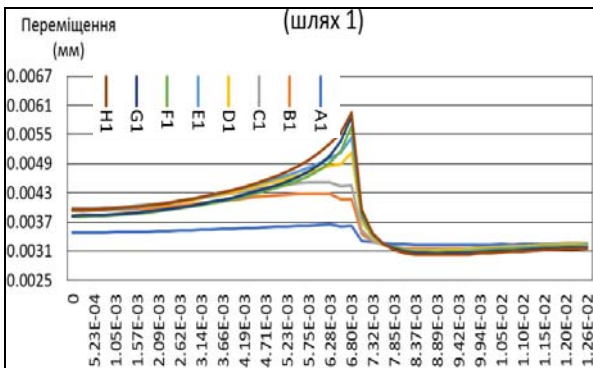
Шлях 1

Шлях 2

Рисунок 14 – Шляхи, уздовж яких визначались переміщення

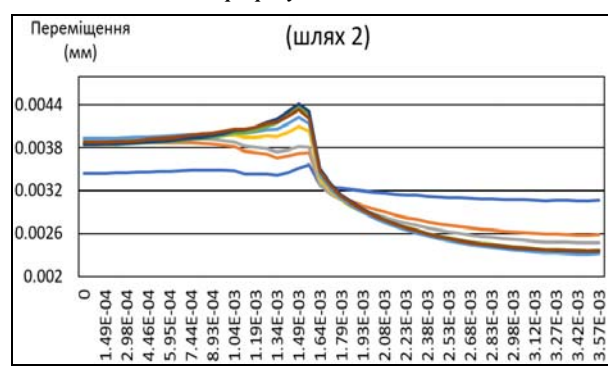
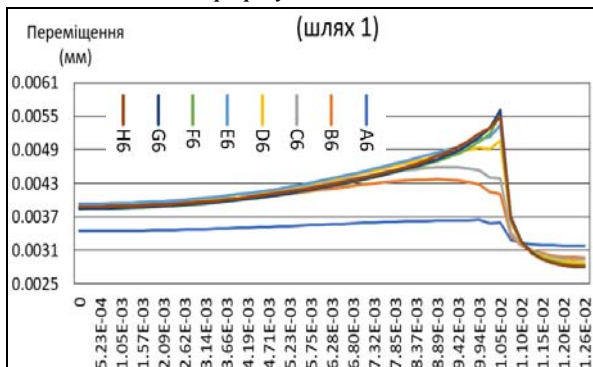


1 розрахункова схема



4 розрахункова схема

2 розрахункова схема



6 розрахункова схема

Рисунок 15 – Переміщення вздовж шляху 1 та 2 для різних розрахункових схем

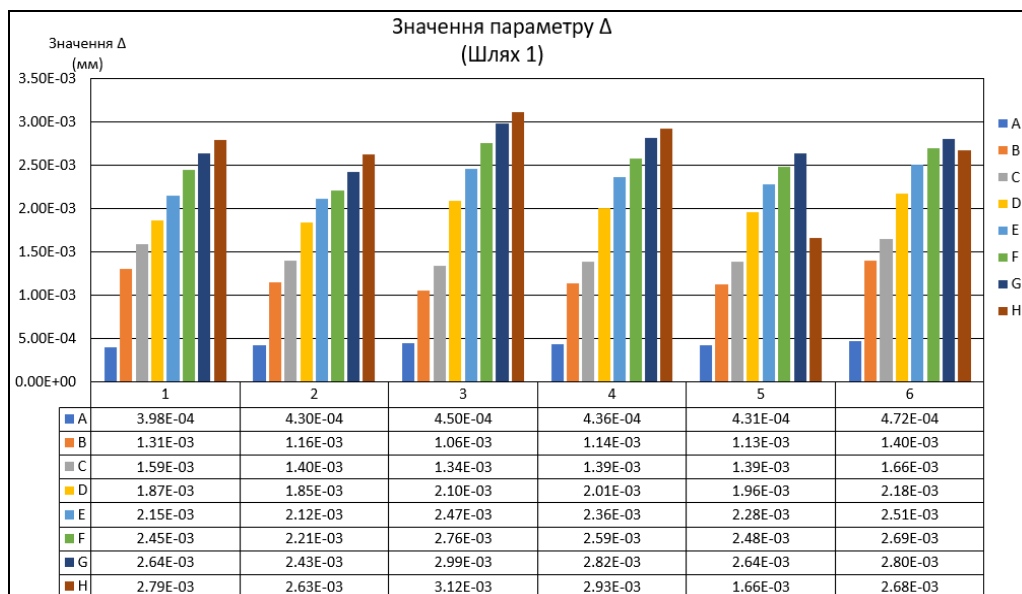


Рисунок 16 – Значення параметру Δ, шлях 1

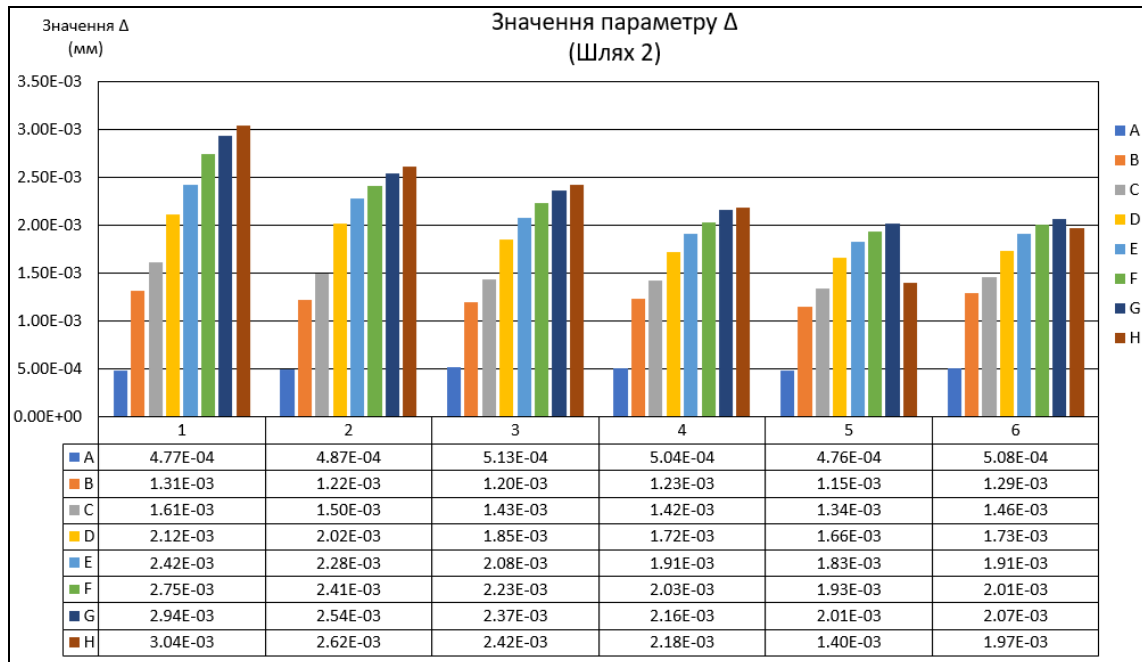


Рисунок 17 – Значення параметру Δ, шлях 2

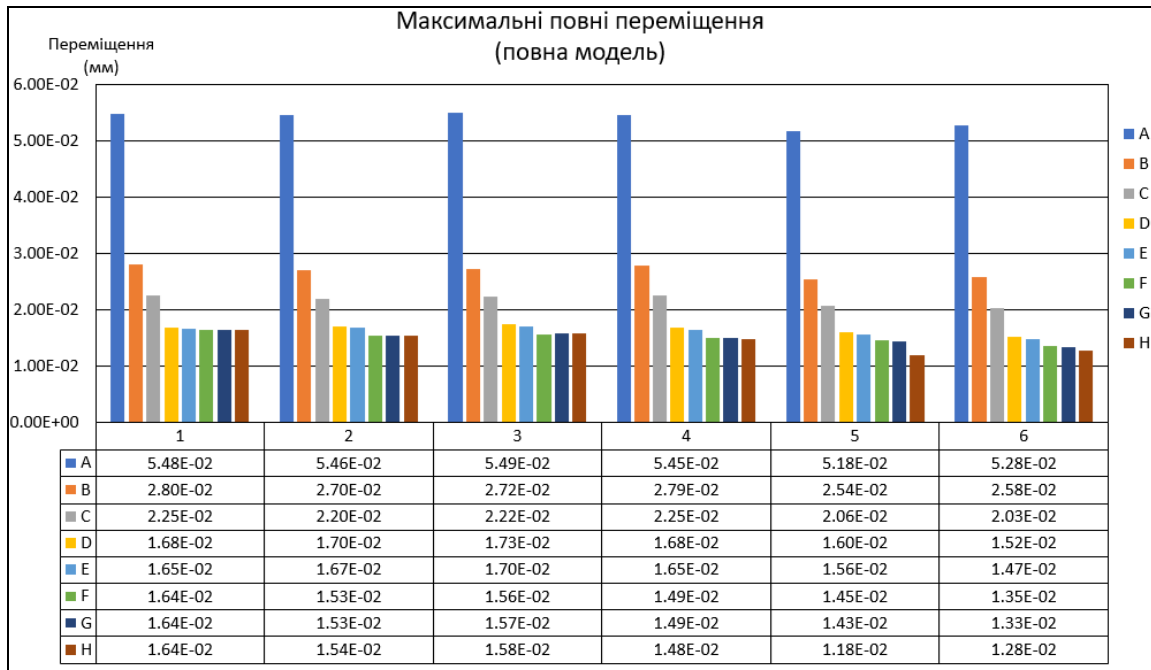
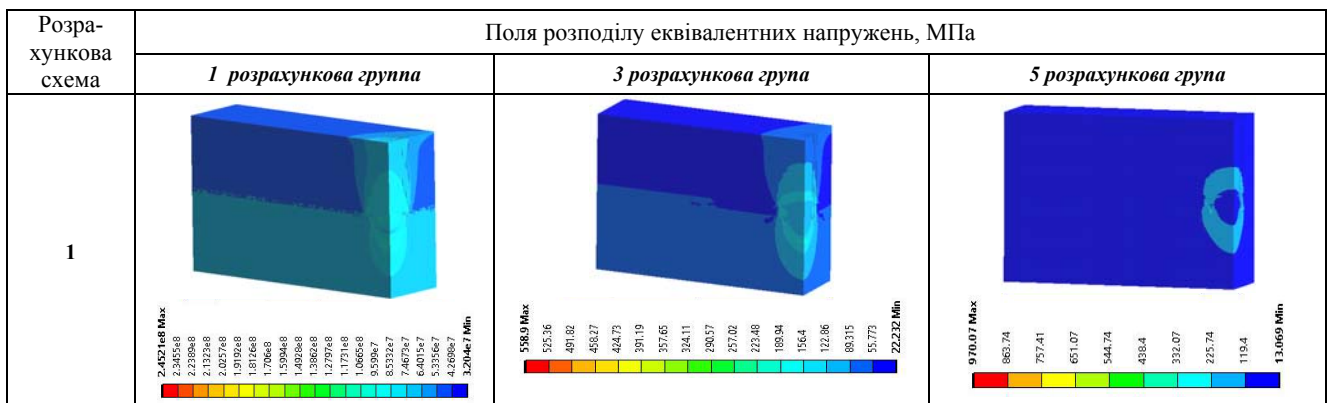
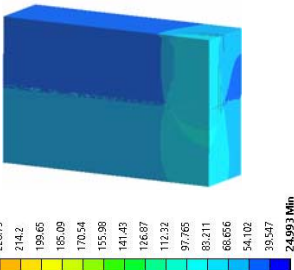
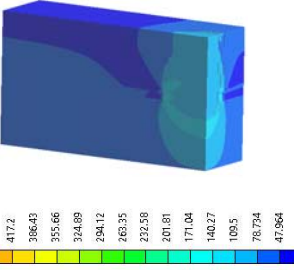
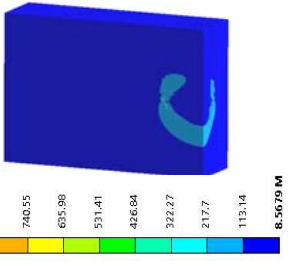
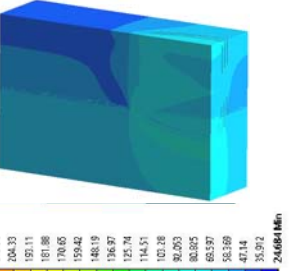
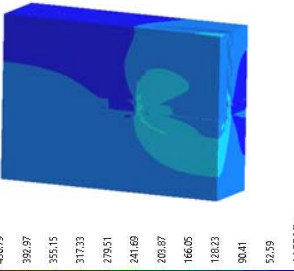
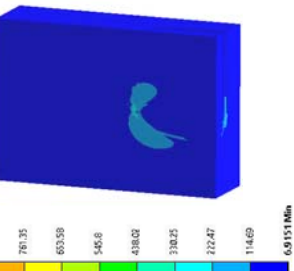
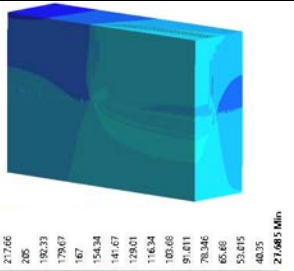
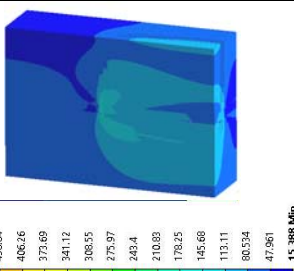
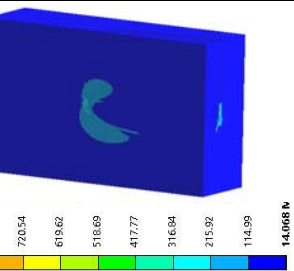
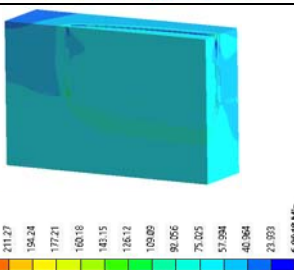
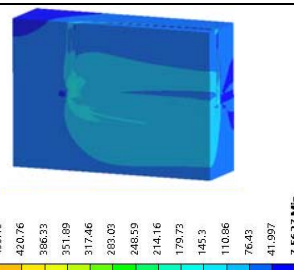
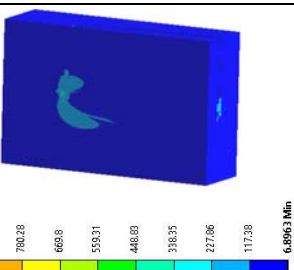
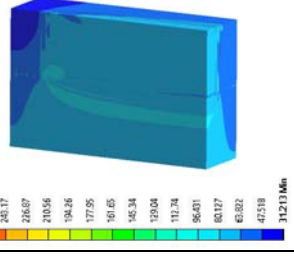
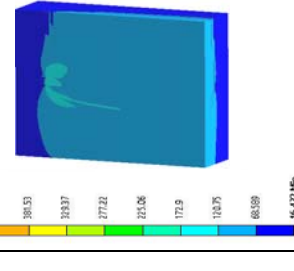
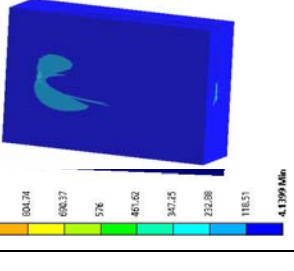


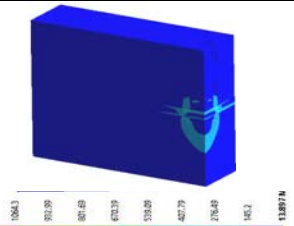
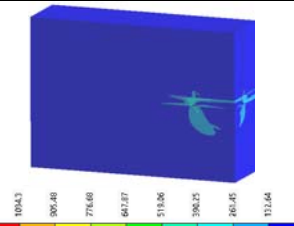
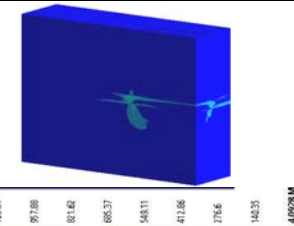
Рисунок 18 – Максимальні повні переміщення, мм

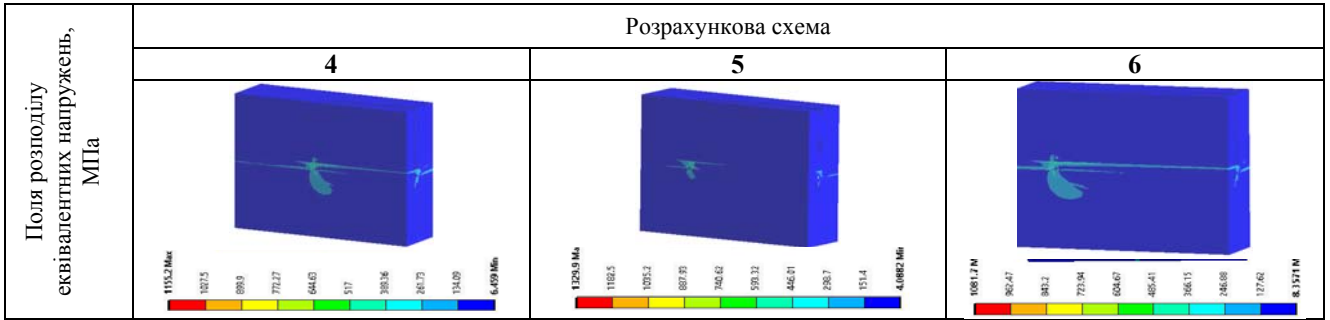
Таблиця 3 – Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа, (повна модель) для різних розрахункових груп



| Розрахункова схема | Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа | | |
|--------------------|--|--|--|
| | 1 розрахункова група | 3 розрахункова група | 5 розрахункова група |
| 2 |  257,86 Max 243,31 228,75 214,2 199,65 185,09 170,54 155,98 141,43 126,87 112,32 97,765 83,211 68,656 54,102 39,547 24,993 Min |  509,51 Max 478,74 447,97 417,2 386,43 355,66 324,89 294,12 263,35 232,58 201,81 171,04 140,27 109,5 78,734 47,964 17,194 Min |  940,68 M 885,11 740,55 635,98 531,41 426,84 322,27 217,7 113,14 8,5679 M |
| 3 |  238,82 Max 215,96 204,33 192,11 181,88 170,65 159,42 148,19 136,97 125,74 114,51 103,28 92,05 80,825 69,6 58,379 47,14 35,92 24,684 Min |  506,43 Max 468,61 430,79 392,97 355,15 317,33 279,51 241,69 203,87 166,05 128,23 90,41 52,59 14,77 Min |  916,61 Max 868,13 720,35 603,58 546,8 430,01 330,25 224,47 114,69 6,9151 Min |
| 4 |  242,99 Max 220,33 217,66 205 189,23 179,67 169,18 154,34 141,67 129,01 116,34 103,66 91,01 78,346 65,68 53,015 40,35 21,685 Min |  503,98 Max 471,41 438,84 406,26 373,69 341,12 308,55 275,97 243,4 210,83 178,25 145,68 113,11 80,534 47,861 15,388 Min |  922,39 N 821,46 720,54 619,62 518,69 417,77 316,84 215,92 114,99 14,068 N |
| 5 |  245,37 Max 228,3 211,27 194,24 177,21 160,18 143,15 126,12 109,09 92,06 75,025 57,994 40,964 23,933 6,9618 Min |  524,06 Max 489,63 455,19 420,76 386,33 351,89 317,46 283,03 248,59 214,16 179,73 145,3 110,86 76,43 41,997 7,5637 Min |  1001,2 Max 890,77 780,28 668 553,31 448,83 338,35 227,86 117,38 6,8963 Min |
| 6 |  225,78 Max 209,49 193,17 176,87 160,56 144,26 127,95 111,65 95,34 79,04 62,73 46,42 30,11 13,813 Min |  483,84 Max 433,69 383,53 333,37 283,21 233,06 182,91 132,75 82,6 32,5 16,32 Min |  1033,5 Max 918,11 804,74 686,37 576 462,62 347,25 232,88 118,51 4,1399 Min |

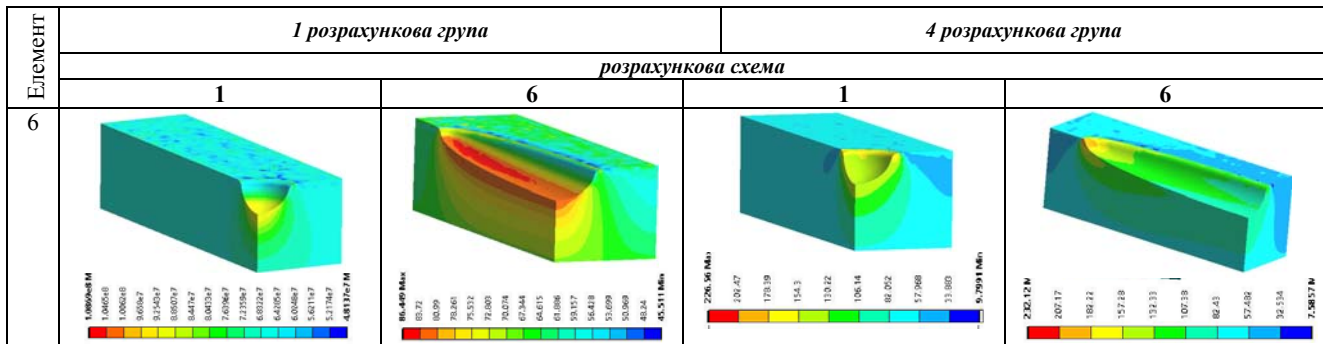
Таблиця 4 – Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа, (повна модель) для 8-ї розрахункової групи

| Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа | Розрахункова схема | | |
|---|---|--|---|
| | 1 | 2 | 3 |
|  1195,5 N 1084,3 971,89 861,69 751,39 641,09 530,8 420,79 310,69 200,6 90,1 11,897 N |  1164,17 1044,3 906,46 776,66 647,87 518,86 390,25 260,45 131,64 3,8296 N |  1238,4 M 1084,1 971,88 861,62 751,37 641,06 530,81 420,76 310,66 200,6 90,1 11,897 M | |

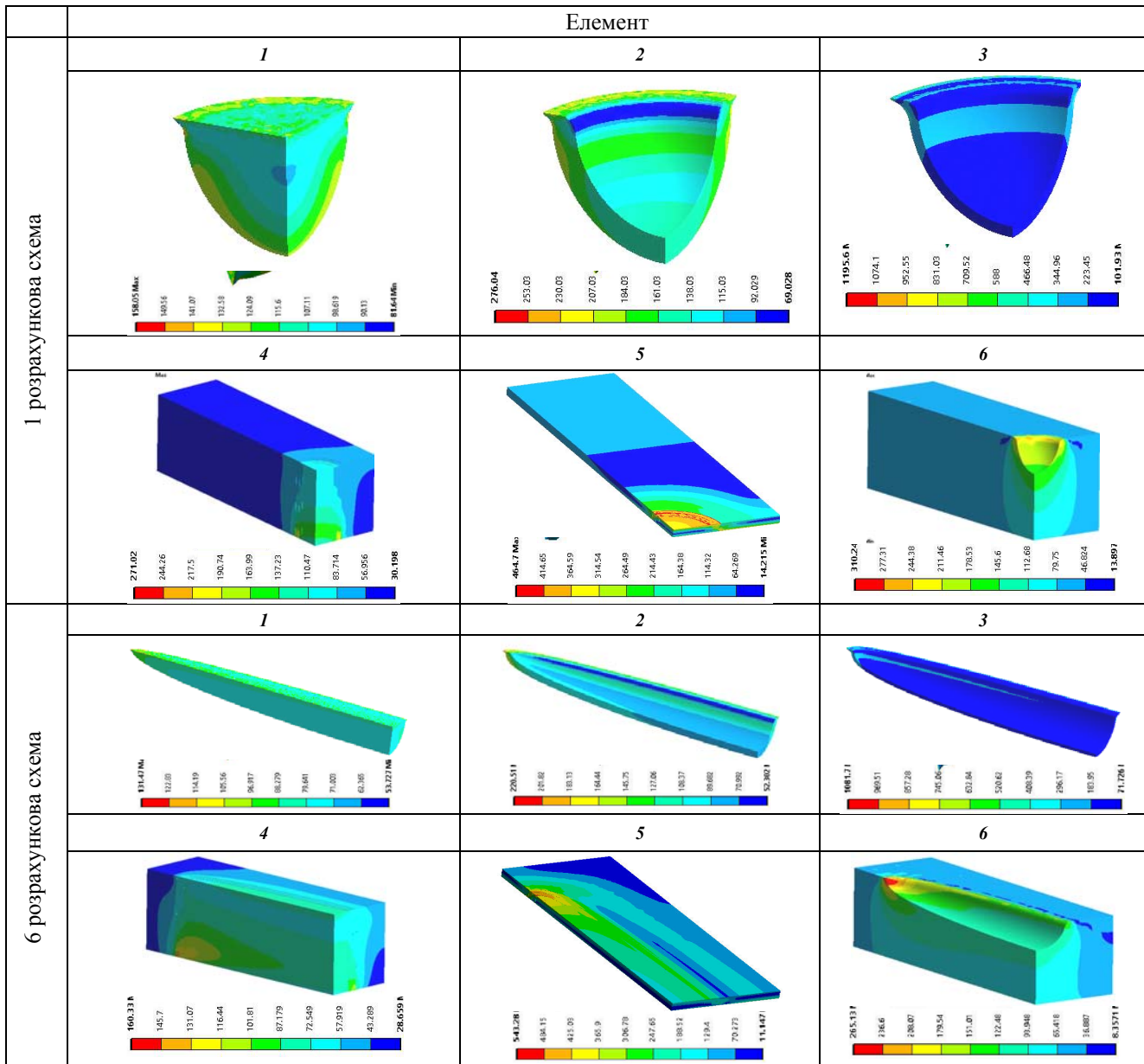


Таблиця 5 – Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа, для різних елементів

| Елемент | 1 розрахункова група | | 4 розрахункова група | |
|---------|---|--|---|--|
| | розрахункова схема | | | |
| | 1 | 6 | 1 | 6 |
| 1 | 1190.6kPa 1316.6kPa 1106.6kPa 1001.8kPa 1070.6kPa 1170.7kPa 1270.7kPa 1370.7kPa 1470.7kPa 1570.7kPa 1670.7kPa 1770.7kPa 1870.7kPa 1970.7kPa 2070.7kPa 2170.7kPa 2270.7kPa 2370.7kPa 2470.7kPa 2570.7kPa 2670.7kPa 2770.7kPa 2870.7kPa 2970.7kPa 3070.7kPa 3170.7kPa 3270.7kPa 3370.7kPa 3470.7kPa 3570.7kPa 3670.7kPa 3770.7kPa 3870.7kPa 3970.7kPa 4070.7kPa 4170.7kPa 4270.7kPa 4370.7kPa 4470.7kPa 4570.7kPa 4670.7kPa 4770.7kPa 4870.7kPa 4970.7kPa 5070.7kPa | 1142.3kPa 109.98kPa 104.93kPa 100.29kPa 95.668kPa 90.977kPa 86.326kPa 81.675kPa 77.024kPa 72.374kPa 67.723kPa 63.072kPa 58.421kPa 53.77kPa 49.119kPa 44.468kPa | 119.81kPa 103.35kPa 101.26kPa 113.8kPa 106.32kPa 99.348kPa 91.972kPa 84.896kPa 77.42kPa 70.144kPa | 127.82kPa 119.2kPa 110.57kPa 101.94kPa 93.314kPa 84.686kPa 76.058kPa 67.431kPa 58.803kPa 50.176kPa |
| 2 | 1399.3kPa 1349.5kPa 1299.8kPa 1249.8kPa 1199.8kPa 1149.8kPa 1099.8kPa 1049.8kPa 999.8kPa 949.8kPa 899.8kPa 849.8kPa 799.8kPa 749.8kPa 699.8kPa 649.8kPa 599.8kPa 549.8kPa 499.8kPa 449.8kPa 399.8kPa 349.8kPa 299.8kPa 249.8kPa 199.8kPa 149.8kPa 99.8kPa 49.8kPa | 130.27kPa 124.32kPa 118.38kPa 112.45kPa 106.48kPa 100.54kPa 94.592kPa 88.646kPa 82.699kPa 76.753kPa 70.807kPa 64.861kPa 58.914kPa 52.968kPa 47.022kPa | 218.91kPa 202.37kPa 185.84kPa 169.3kPa 152.76kPa 136.23kPa 119.69kPa 103.15kPa 86.618kPa 70.081kPa | 187.01kPa 172.46kPa 158.34kPa 144.61kPa 129.67kPa 115.33kPa 101kPa 86.663kPa 72.326kPa 57.992kPa |
| 3 | 2472.1kPa 2376.8kPa 2281.5kPa 2186.2kPa 2090.9kPa 1995.6kPa 1900.3kPa 1805kPa 1709.7kPa 1614.4kPa 1519.1kPa 1423.8kPa 1328.5kPa 1233.2kPa 1137.9kPa 1042.6kPa 947.3kPa 852kPa 756.7kPa 661.4kPa 566.1kPa 470.8kPa 375.5kPa 280.2kPa 184.9kPa 89.6kPa | 275.78kPa 255.4kPa 235.02kPa 214.64kPa 194.26kPa 173.88kPa 153.5kPa 133.12kPa 112.74kPa 92.355kPa 71.974kPa 51.594kPa 31.213kPa | 815.54kPa 734.58kPa 653.62kPa 572.66kPa 491.7kPa 410.74kPa 329.78kPa 248.82kPa 167.86kPa 86.894kPa | 872.78kPa 783.18kPa 693.58kPa 603.98kPa 514.38kPa 424.78kPa 335.18kPa 245.58kPa 155.98kPa 66.392kPa |
| 4 | 1820.8kPa 1711.8kPa 1602.8kPa 1493.8kPa 1384.8kPa 1275.8kPa 1166.8kPa 1057.8kPa 948.8kPa 839.8kPa 730.8kPa 621.8kPa 512.8kPa 403.8kPa 294.8kPa 185.8kPa 76.8kPa | 126.58kPa 123.87kPa 119.16kPa 114.45kPa 109.74kPa 105.03kPa 100.32kPa 95.61kPa 90.9kPa 86.19kPa 81.48kPa 76.77kPa 72.06kPa 67.35kPa 62.64kPa 57.93kPa 53.22kPa 48.51kPa 43.8kPa 39.09kPa 34.38kPa 29.67kPa 24.96kPa 20.25kPa 15.54kPa 10.83kPa 6.12kPa | 228.95kPa 208.71kPa 184.46kPa 160.21kPa 135.96kPa 111.71kPa 87.46kPa 63.21kPa 38.96kPa 14.71kPa | 244.93kPa 224.69kPa 196.05kPa 172.8kPa 148.76kPa 124.71kPa 100.67kPa 76.66kPa 52.62kPa 28.53kPa |
| 5 | 1264.1kPa 1235.7kPa 1187.4kPa 1139.1kPa 1090.8kPa 1042.5kPa 994.2kPa 945.9kPa 897.6kPa 849.3kPa 801kPa 752.7kPa 704.4kPa 656.1kPa 607.8kPa 559.5kPa 511.2kPa 462.9kPa 414.6kPa 366.3kPa 318kPa 269.7kPa 221.4kPa 173.1kPa 124.8kPa 76.5kPa 28.2kPa | 117.57kPa 113.54kPa 107.54kPa 101.54kPa 95.54kPa 89.54kPa 83.54kPa 77.54kPa 71.54kPa 65.54kPa 59.54kPa 53.54kPa 47.54kPa 41.54kPa 35.54kPa 29.54kPa 23.54kPa 17.54kPa 11.54kPa 5.54kPa 0.54kPa | 348.97kPa 310.28kPa 272.48kPa 234.69kPa 196.89kPa 159.1kPa 121.3kPa 83.507kPa 45.712kPa 7.9177kPa | 440.47kPa 395.56kPa 344.66kPa 296.75kPa 248.84kPa 200.93kPa 153.02kPa 105.11kPa 57.201kPa 9.2922kPa |



Таблиця 6 – Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа, для 8-ї розрахункової групи для різних елементів



Із наведених результатів видно, що і розподіли контактного тиску, і переміщень (а також відносних переміщень Δ), і напружень (та еквівалентних напружень за Мізесом) суттєво залежать, як від вибору групи, так і схеми. Тобто, спостерігається значний вплив на ці контрольовані поля та характеристики НДС варійованих проектно-технологічних парамет-

рів. Отже, за рахунок варіювання останніх можна досягти позитивних зрушень у характеристиках міцності та зношуваності. Відповідно, на цій основі можливе обґрунтування прогресивних рішень у формуванні конструктивних рішень, технологічних та експлуатаційних режимів для досліджуваної системи дискретно-континуально зміцнених тіл. При цьому

зберігається переважне перевантаження контактними силами зон дискретного зміцнення, тобто т.з. « σ -ефект» [10,11]. Також зберігається т.з. « Δ –

ефект», що полягає у нерівномірному зближенні поверхонь контактуючих тіл [10, 11].

Таблиця 7 – Поля розподілу контактного тиску, МПа, для різних розрахункових груп

| Розрахункова схема | Поля розподілу контактного тиску, МПа | | |
|--------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 1 розрахункова група (A) | 3 розрахункова група (C) | 6 розрахункова група (F) |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 5 | | | |

Експериментальні дослідження роботи дискретно-континуально зміцнених деталей на прикладі елементів кривошипно-шатунного механізму двигунів внутрішнього згоряння. На основі чисельних досліджень були обґрунтовані нові тех-

нологічні рішення різних конструкцій, зокрема, елементів ДВЗ. Для визначення ефективності запропонованих рекомендацій щодо розробки та виготовлення вузлів тертя із застосуванням комбінованого використання технологій дискретно-континуального

зміцнення з метою забезпечення та подовження експлуатаційного ресурсу двигунів внутрішнього згоряння виникла необхідність розгорнутих стендових випробувань на моторних стендах кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння» Національного технічного університету «ХПІ». За основу було обрано стендовий дизельний двигун 4ЧН 12/14, на якому було встановлено сталевий колінчастий вал, корінні та шатунні шийки якого були зміцнені методом дискретного зміцнення із щільністю дискретності покриття зміцненої поверхні $55 \div 75\%$ від загальної площі шийки. Загальний вигляд експериментального колінчастого валу наведено на рис. 19.

При зборі двигуна у парі тертя кривошипно-шатунного механізму були застосовані корінні та шатунні вкладиші, виготовлені із сталі-алюмінієвої смуги з антифрикційним покриттям зі сплаву АМО1–20, робочі поверхні яких було перетворено методом мікродугового оксидування за технологією, розробленою в НТУ «ХПІ» [13, 14]. Загальний вигляд зміцненої цим методом поверхні шатунного вкладиша зображено на рис. 20, а корінного вкладиша – на рис. 21.



Рисунок 19 – Експериментальний колінчастий вал дизельного двигуна 4ЧН 12/14

Перед операцією дискретного зміцнення шийки колінчастого валу були прошліфовані. Загальний вигляд шийок колінчастого валу до зміцнення зображено на рис. 22, а після – на рис. 23.

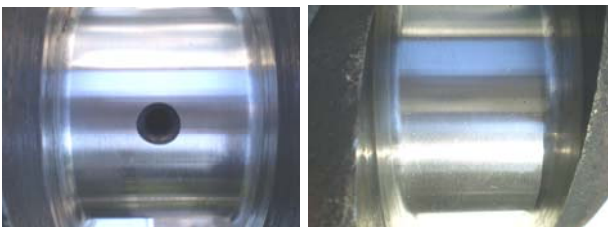


Рисунок 20 – Загальний вигляд робочої поверхні корінної та шатунної шийки сталевого колінчастого валу двигуна 4ЧН 12/14 до зміцнення:
а – корінна шийка; б – шатунна шийка

У ході досліджень встановлено:

1. Сталевий колінчастий вал дизеля 4ЧН 12/14, робочі поверхні корінних та шатунних шийок якого були зміцнені методом дискретного зміцнення із дискретністю $55 \div 75\%$ від загальної площі, при ви-

пробуванні на режимах роботи згідно програми випробувань підтвердив свою працездатність.

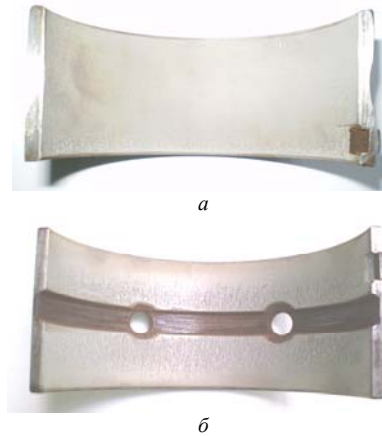


Рисунок 21 – Шатунний та корінний вкладиші, робоча поверхня яких зміцнена методом мікродугового оксидування:
а – шатунний вкладиш; б – корінний вкладиш

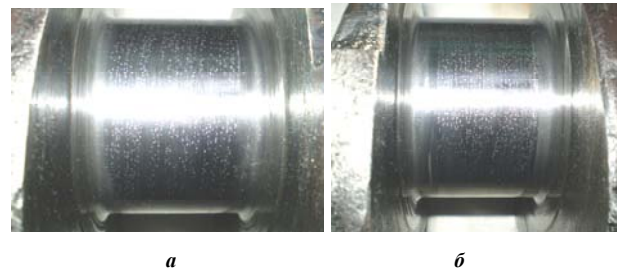


Рисунок 22 – Вигляд поверхонь корінної та шатунної шийок дизеля 4ЧН 12/14 після 80 годин роботи:
а – корінна шийка; б – шатунна шийка

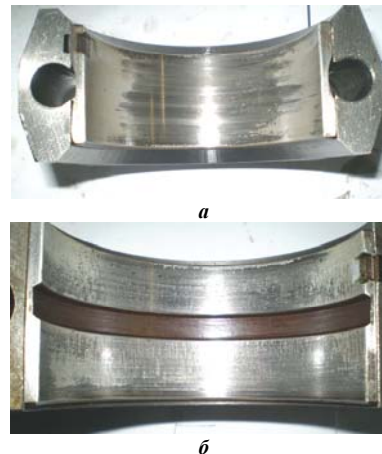


Рисунок 23 – Вигляд поверхонь шатунного та корінного сталі-алюмінієвих вкладишів дизеля 4ЧН 12/14 після 80 годин роботи:
а – шатунний вкладиш; б – корінний вкладиш

2. При дискретному зміцненні робочих поверхонь корінних та шатунних шийок за шкалою Віккерса HV їх міцність суттєво підвищилась від 295 до 676 HV.

3. Корінні та шатунні вкладиші виготовлені із сталі-алюмінієвої смуги з антифрикційним покриттям зі сплаву АМО1–20, приповерховий шар якого

було модифіковано методом мікродугового оксидування на глибину до 100 мкм. При роботі вкладиші забезпечили надійну роботу колінчастого валу у процесі випробувальних досліджень.

4. Протягом 80 годин роботи двигуна з різними навантаженнями, згідно програми випробувань, партертя «шийка колінчастого валу – вкладиш», яка виготовлена із комбінованим використанням технології дискретного зміцнення та мікродугового оксидування, показала надійну роботу.

5. Після здійснення випробувань вузол тертя «шийка колінчастого валу – вкладиш» пройшов припрацювання.

6. Дослідження здійснювались із вкладишами, приповерховий шар яких було модифіковано методом мікродугового оксидування із утворенням структури $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Це викликало підвищене зношування вкладиша.

7. При виготовленні пар тертя «шийка колінчастого валу – вкладиш» доцільне зниження первинних зазорів, що дасть змогу поліпшити якість роботи пари тертя та збільшити її ресурс в експлуатації.

Висновки. У роботі наведені результати розрахунково-експериментальних досліджень напружено-деформованого стану та зношування дискретно-континуально зміцнених деталей машин на прикладі елементів ДВЗ.

У роботі отримані такі наукові і практичні результати:

1. Запропоновано новий підхід до технології автоматизації процесу побудови параметричних, керованих, якісних скінченно-елементних моделей складних конструкцій і технологій зміцнення високонавантажених елементів машин як складового елемента всього циклу проектних і технологічних робіт.

2. Реалізовано запропонований новий підхід у вигляді спеціалізованих програмно-модельних комплексів для автоматизованого проектування, дослідження напружено-деформованого стану, виготовлення і зміцнення складних машинобудівних конструкцій. Він діє у вигляді програмно-апаратного комплексу для аналізу і синтезу моделей елементів складних механічних систем.

3. При здійсненні чисельних досліджень виявлено збереження раніше виявлених [10, 11] двох ефектів, які названі « Δ -ефект» та « σ -ефект». Перший з них полягає у позитивному характері зміни деформованого профілю у контакті зміцнюваного елемента машини зі спряженими елементами. Другий ефект полягає у створенні сприятливого залишкового напруженого стану після зміцнення досліджуваного об'єкту із застосуванням нової дискретно-континуальної технології. Після накладення на розподіл робочих напружень створюється результуючий напружений стан, значно віддалений від небезпечного рівня порівняно з незміцненими деталями машин.

4. На рівні мікроструктури встановлено, що контактна взаємодія поверхонь здійснюється на всій площі спряження деталей, однак нормальні зусилля передаються переважно через зони дискретного зміцнення. Внаслідок взаємного руху контактуючих деталей у зоні їх спряження виникають сили тертя,

які розподіляються в цій зоні нерівномірно, а інтегрально вони менші, ніж у варіанті спряження незміцнених деталей. У свою чергу, нерівномірним буде і зношування, причому воно суттєво менш інтенсивне, ніж без застосування зміцнення.

5. Продемонстровано ефективність запропонованого комбінованого використання технологій дискретного зміцнення робочих поверхонь сталевих та чавунних деталей і технології гальвано-плазмового перетворення робочих поверхонь алюмінієвих деталей. Такий спосіб виготовлення пар тертя дає можливість суттєво поліпшити умови їх припрацювання та роботи на перших етапах експлуатації, що суттєво підвищує надійність і довговічність двигунів у цілому.

6. Розрахунковим шляхом встановлено та експериментально підтверджено, що раціонально коефіцієнт дискретності слід забезпечувати на рівні $60\div 70\%$ від загальної площі зміцнення.

7. Показано, що корінні та шатунні вкладиші, виготовлені зі сталі-алюмінієвої смуги з антифрикційним покриттям зі сплаву АМО1–20, приповерховий шар якого було модифіковано методом мікродугового оксидування на глибину до 100 мкм, забезпечують надійну роботу колінчастого валу ДВЗ.

8. Установлено, що при здійсненні подальших досліджень необхідно виконувати мікродугове оксидування при більших щільностях струму. При цьому переважно утвориться структура $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ з підвищеною твердістю, зносостійкістю та теплостійкістю.

У подальшому описані дослідження будуть поширені на більшу множину деталей машин різного призначення із різними варіантами виконання технологічних операцій дискретно-континуального зміцнення.

Список літератури

1. Ткачук М. М. [та інш.]. Дискретно-континуальні методи зміцнення елементів ДВЗ: теорія, дослідження, ефекти. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 12-а Міжнародна науково-практична конференція, 06-08 вересня 2021 р.* Херсон: Херсонська державна морська академія, 2021. С.192-195.
2. Ткачук Н. А. [и др.]. Дискретно-континуальное упрочнение контактирующих элементов конструкции: концепция, математическое и численное моделирование. *Наука и техника*. 2019. № 3. С. 240–247.
3. Григорьяни А.Г., Сафонов А.М. *Основы лазерного термического упрочнения сплавов*. М.: Высшая школа, 1988. 163 с.
4. Посвятенко Э.К. Тенденции поверхностного упрочнения зубчатых колес. *Надійність і довговічність машин і споруд*. 2005. Вып. 24. С. 127–144.
5. Лебедев П.К., Калеко Д.Н. Импульсная дуговая термическая обработка поверхности металлов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1998. № 6. С.32-36.
6. Посвятенко Е.К. Відновлення колінчастих валів двигунів внутрішнього згоряння іонно-імпульсним азотуванням. *Вісник Сумського державного університету: Технічні науки. Машинобудування*. 2005. № 11. С. 119–122.
7. Бернштейн М.Л. *Технология термической обработки стали*. М.: Металлургия, 1981. 291 с.
8. Николаев Е.Н., Коротин И.М. *Термическая обработка токама высокой частоты*. М.: Высшая школа, 1970. 147 с.
9. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. *Упрочнение металлов*. М.: Машиностроение, 1986. 319 с.
10. Ткачук Н.А., Дьяченко С.С., Посвятенко Э.К., Кравченко С.А. [и др.] *Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография*. Харьков: «Планета-Принт», 2018. 259 с.
11. Кравченко С. О. *Забезпечення ресурсу ДВЗ шляхом застосу-*

- вання 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. політехн. ін-т". – Харків, 2018. 315 с.
12. Иванов Г. П. *Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин*. М.: Mashgiz, 1961. 303 с.
 13. Шпаковский В.В. Научно-технические основы улучшения показателей ДВЗ застосуванням поршнів з корундовим шаром. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.05.03. Харків: НТУ «ХПІ». 2009. 425 с.
 14. Белозёров В.В., Казак И.Б., Олейник А.К., Кравченко С.А. Влияние микродугового оксидирования на характеристики трения и износа материалов сопряжения колеччатый вал-вкладыш двигателей типа Д100 и Д80. *Всеукраинский научно-технический журнал изд. НТУ «ХПИ»*. Двигатели внутреннего сгорания. 2017. №2. С. 47–51.
 15. Firstov S.A., Rogul T.G., Shut O.A. Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening). *Powd. Met. and Met. Ceram.* 2018, no. 3–4, pp. 161–174.
 16. D'yachenko S.S., Ponomarenko I.V. Effect of the origin of the modified surface layer on the structural strength of workpieces. *The Phys. of Met. and Metallography*. 2017. Vol. 118, no. 6, pp. 608–620.
 17. Subbotina V., Sobol O. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials*. 2020. Vol. 14, no. 6, pp. 247–250.
 18. Субботіна В.В., Білозеров В.В., Соболю О.В. Електрична міцність оксидних покриттів, сформованих методом микродугового оксидування. *Перспективні технології та прилади*. 2020. № 16. С. 134–140.
 19. Nemyrovskiy Ya., Posvyatenko E. Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching. *DSMIE –2019*. P. 238–247.
 20. Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview. *Advanced Engineering Materials*. 2017. Vol. 20.
 21. Ovid'ko I.A., R.Z. Valiev, Zhu Y.T. Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials. *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 94. P. 462–540.
 22. Ming K., X. Bi, J. Wang Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures. *International Journal of Plasticity*. 2019. P. 1-14.
 23. Гончаров В.Г., М.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, С.О. Кравченко, Шеремет В.М. Наукові основи зміцнення поверхонь високонавантажених елементів двигунів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків, НТУ «ХПІ». 2009. № 28. С.20-30.
 24. Dyfuchyn Y., Rudakov K. Numerical modelling of bolted composite joints. Bolts rigidity effect on normal stresses in the composite layers. *Mech. and Adv. Technologies*. 2017, no. 1(79). P. 19–25.
 25. Papangelo A., Hoffmann N., Ciavarella M. Load-separation curves for the contact of self-affine rough surfaces. *Scientific reports*. 2017, no. 7(1), p. 6900.
 26. Tkachuk M. A Numerical Method for Axisymmetric Adhesive Contact Based on Kalker's Variational Principle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. No 3/7(93). P. 34–41
 27. Кравченко С.О., М.А. Ткачук, А.В. Грабовський, О.В. Веретельник, М.М. Ткачук, І.П. Гречка, А.Ю. Васильєв, О.С. Льозний, Чала Ю.С. Теоретико-експериментальне обґрунтування дискретно-континуальних методів зміцнення на основі аналізу контактної взаємодії елементів машин військового та цивільного призначення. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків, НТУ «ХПІ». 2021. № 1. С. 53–63
 28. Ткачук М.А., Кравченко С.О., Грабовський А.В., Ткачук М.М., Веретельник О.В., Куценко С.В., Клочков І.Є., Саверська М.С. Контактна взаємодія дискретно-континуально зміцнених деталей двигунів внутрішнього згорання. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2021. № 2. С. 49-59.
 - zmicznennya elementiv DVZ: teoriya, doslidzhennya, efekty'. Suchasniy energetychni ustanovky na transporti i technologii ta obladnannya dlya yix obslugovuvannya. *12-a Mizhnarodna naukovo-praktychna konferenciya, 06-08 veresnya 2021 r. Xerson: Xersons'ka derzhavna mors'ka akademiya*, 2021, pp.192-195.
 2. Tkachuk N. A. [i dr.]. Diskretno-kontinual'noe uprochnenie kontaktiruyushhikh elementov konstrukcij: koncepcziya, matematicheskoe i chislennoe modelirovanie [Discrete and Continual Strengthening of Contacting Structural Elements: Conception, Mathematical and Numerical Modeling]. *Nauka i tekhnika*, 2019, no. 3, pp. 240–247.
 3. Grigor'yani A.G., Safonov A.M. *Osnovy lazernogo termouprochneniya splavov*. Moscow: Vysshaya shkola, 1988. 163 p.
 4. Posvyatenko E.K. Tendencii poverkhnostnogo uprochneniya zubchatykh koles. *Nadijmi'st' i dovgovi'chni'st' mashin i sporud*, 2005, vol. 24, pp. 127–144.
 5. Lebedev P.K., Kaleko D.N. Impul'snaya dugovaya termicheskaya obrabotka poverkhnosti metallov. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1998, no. 6, pp.32-36.
 6. Posvyatenko E.K. Vidnovlennya kolinchastyx valiv dvyguniv vnutrishn'ogo zgorjannya ionno – impul'sny'm azotuvannjam. Vi-sny'k Sums'kogo derzhavnogo universitetu: *Tekhnichni nauki. Mashynobuduvannya*. 2005, no. 11, pp. 119–122.
 7. Bernshtejn M.L. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki stali*. M.: Metallurgiya, 1981. 291 p.
 8. Nikolaev E.N., Korotin I.M. *Termicheskaya obrabotka tokami vy'sokoj chastoty*. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. 147 p.
 9. Polevoj S.N., Evdokimov V.D. *Uprochnenie metallov*. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 319 p.
 10. Tkachuk N.A., D'yachenko S.S., Posvyatenko E.K., Kravchenko S.A. [i dr.] *Kontinual'naya i diskretno-kontinual'naya modifikaciya poverkhnostej detalej: monografiya*. Khar'kov: «Planeta-Pri'nt», 2018. 259 p.
 11. Kravchenko S. O. *Zabezpechennya resursu DVZ shlyaxom zastosuвання dy'skretno-konty'nual'nogo zmicznennya robochy'x poverxon' [Elektronny' resurs]* : dy's. ... d-ra техн. наук : спец. 05.05.03 : галузь знань 14 / Сергій Олександрович Кравченко ; наук. консультант Марченко А. П. ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків, 2018. 315 p.
 12. Иванов Г. П. *Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин*. Moscow: Mashgiz, 1961. 303 p.
 13. Shpakovskiy V.V. *Naukovo-tekhnichni osnovy polipshennya pokazny'kiv DVZ zastosuванняm porshniv z korundovy'm шаром*. dy's. ... d-ra техн. наук : спец. 05.05.03. Kharkiv: NTU «KhPI». 2009. 425 p.
 14. Belozerov V.V., Kazak Y.B., Olejnyk A.K., Kravchenko S.A. Vly'yaniye mykrodugovogo oksy'dirovaniya na karakterysty'ky treniya y' y'znosa materiyalov sopryazhnyya kolenchaty' valvkladysh dvy'gately' ty'pa D100 y' D80. *Vseukrayn'sky'j nauchnotekhnicheskyy' zhurnal y'zd. NTU «KhPI»*. Dvy'gately' vnutrennego sgoraniya. 2017, no.2, pp. 47–51.
 15. Firstov S.A., Rogul T.G., Shut O.A. Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening). *Powd. Met. and Met. Ceram.* 2018, no. 3–4, pp. 161–174.
 16. D'yachenko S.S., Ponomarenko I.V. Effect of the origin of the modified surface layer on the structural strength of workpieces. *The Phys. of Met. and Metallography*. 2017. Vol. 118, no. 6, pp. 608–620.
 17. Subbotina V., Sobol O. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials*. 2020. Vol. 14, no. 6, pp. 247–250.
 18. Subbotina V.V., Bilozerov V.V., Sobol' O.V. Elektrichna miцnist' oksy'dny'x pokry'ttiv, sformovany'x metodom mikrodugovogo oksy'duvannya. *Perspekty'vni tehnologiyi ta pry'lyady'*. 2020, no. 16, pp. 134–140.
 19. Nemyrovskiy Ya., Posvyatenko E. Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching. *DSMIE –2019*. P. 238–247.
 20. Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview. *Advanced Engineering Materials*. 2017. Vol. 20.
 21. Ovid'ko I.A., R.Z. Valiev, Zhu Y.T. Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials. *Progress in Materials Science*. 2018. Vol. 94, pp. 462–540.
 22. Ming K., X. Bi, J. Wang Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures. *International Journal of*

References (transliterated)

1. Tkachuk M. M. [ta insh.]. Dy'skretno-konty'nual'ni metody'

- Plasticity*. 2019, pp. 1-14.
23. Goncharov V.G., M.A. Tkachuk, S.S. D'yachenko, S.O. Kravchenko, Sheremet V.M. Naukovi osnovy zmicznennya poverxon' vy'sokonavantazheny'x elementiv dvy'guniv. Visnyk NTU "KhPI". Tem. vy'p.: Mashy'noznavstvo ta SAPR. 2009, no.28, pp.20-30.
 24. Dyfuchyn Y., Rudakov K. Numerical modelling of bolted composite joints. Bolts rigidity effect on normal stresses in the composite layers. *Mech. and Adv. Technologies*. 2017, no. 1(79). P. 19–25.
 25. Papangelo A., Hoffmann N., Ciavarella M. Load-separation curves for the contact of self-affine rough surfaces. *Scientific reports*. 2017, no. 7(1), p. 6900.
 26. Tkachuk M. A Numerical Method for Axisymmetric Adhesive Contact Based on Kalker's Variational Principle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, no. 3/7(93), pp. 34–41
 27. Kravchenko S. O., M. A. Tkachuk, A. V. Grabovs'ky'j, O. V. Veretel'ny'k, M. M. Tkachuk, I. P. Grechka, A. Yu. Vasy'l'yev, O. S. L'ozny'j, Chala Yu. C. Teorety'ko-ekspy'mental'ne obg'runtuvannya dy'skretno-konty'nual'ny'x metodiv zmicznennya na osnovi analizu kontaktnoyi vzyemodiyi elementiv mashy'n vijs'kovogo ta'vi-l'nogo pry'znachennya. Visnyk Nacional'nogo texnichnogo universy'tetu «Kharkivs'ky'j politexnichny'j insty'tub». Kharkiv, NTU «KhPI». 2021, no. 1, pp. 53–63.
 28. Tkachuk M.A., Kravchenko S.O., Grabovs'ky'j A.V., Tkachuk M.M., Veretel'ny'k O.V., Kucenko S.V., Klochkov I.Ye., Savers'ka M.S. Kontaktna vzyemodiya dy'skretno-konty'nual'no zmiczneny'x detalej dvy'guniv vnutrishn'ogo zgoryannya. *Dvy'guny' vnutrishn'ogo zgoryannya*. 2021, no. 2, pp. 49-59.

Надійшла (received) до редакції 12.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Веретельник Олег Вікторович (Веретельник Олег Викторович, Veretelnyk Oleg) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057)7076166; e-mail: veretelnyk.oleg@gmail.com

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

Кравченко Сергій Олександрович (Кравченко Сергей Александрович, Kravchenko Serhii) – доктор техн. наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: dvskhpi2016@gmail.com.

Саверська Марія Сергіївна (Саверская Мария Сергеевна, Saverska Mariia) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант (PhD Student) кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9271-9586>; e-mail: m.saverska@tmm-sapr.org

Куценко Сергій Володимирович (Куценко Сергей Владимирович, Kutsenko Serhii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна, викладач-стажист кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; Харків, e-mail: skutsenko@tmm-sapr.org

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

Клочков Ілля Євгенович (Клочков Илья Евгеньевич, Klochkov Illia) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-69-01; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4923-2833>; e-mail: s008@tmm-sapr.org

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