

*М.М. Ткачук, А.П. Марченко, С.О. Кравченко, М.А. Ткачук, О.В. Веретельник,  
А. В. Грабовський, В.В. Веретельник*

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНО ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ

У статті розглядається вплив властивостей матеріалів на контактну взаємодію зміцнених деталей конструкцій. Для оброблення цих деталей застосовується технологія дискретно-континуального зміцнення. Контактуючі деталі виготовлені із різних матеріалів. З одного боку – деталь із алюмінієвого сплаву. На її поверхні вирощується мікрошар оксидної кераміки. З іншого боку – чавунна або сталеві деталь, у поверхневі шари якої індентовано електроіскровим методом архіпелаг зон зміцненого матеріалу. Тобто перша деталь оброблена континуально, а друга – дискретно. Досліджується вплив властивостей матеріалів у зонах зміцнення на контактну взаємодію таких деталей. Розроблені рекомендації стосовно вибору матеріалів та технологічних режимів дискретно-континуального зміцнення. Зокрема, встановлено, що характер розподілу контактної тиску та напружень за Мізесом суттєво залежить від поєднань значень модулів пружності шару оксидної кераміки на алюмінієвій деталі та зони дискретного зміцнення на чавунній деталі. При цьому зі зростанням модуля пружності матеріалу зон дискретного зміцнення відбувається якісна зміна цих розподілів. Контактний тиск у центральній частині області контакту спочатку набуває мінімуму, а потім – максимуму. У той же час, вплив модуля пружності шару оксидної кераміки на алюмінієвій деталі – менш виражений. Відносний рівень контактної тиску та напружень за Мізесом змінюється у дослідженому діапазоні варіювання модулів пружності матеріалів зон континуального та дискретного зміцнення у досить широкому коридорі. Отже, можна управляти рівнем контрольованих величин. А відтак – є можливість обґрунтування вибору того чи іншого матеріалу, а також конструктивних та технологічних рішень при створенні тих чи інших елементів конструкцій. Важливе значення для обґрунтування раціональних технічних рішень вузлів нових конструкцій має не тільки рівень контактної тиску та напружень за Мізесом. Контактна взаємодія визначає розподіл навантажень між елементами конструкцій, що певним чином безпосередньо впливає на їх напружено-деформований стан та міцність. Також на додаток запускається серія процесів і станів: тертя, зношування, навантаженість. Вони залежать від розподілу контактних сил. Отже, із фізичної точки зору реалізується «мультифізичний» процес, а із технічної – багатокритеріальний. У результаті, на кожному із етапів виникає низка конкуруючих вимог та обмежень, які слід брати до уваги при обґрунтуванні раціональних технічних рішень нових виробів, зокрема, двигунів внутрішнього згоряння.

**Ключові слова:** контактна взаємодія; напружено-деформований стан; дискретне зміцнення; континуальне зміцнення; дискретно-континуальне зміцнення; метод скінчених елементів; напруження; контактний тиск; модуль пружності; двигун внутрішнього згоряння.

### Вступ

Сучасне машинобудування стикається із низкою системних проблем у прагненні досягнути більш високих технічних і тактико-технічних характеристик своїх виробів. По-перше, це здебільшого еволюційний характер розвитку технічних рішень та принципів їх функціонування. Дійсно, проривні рішення потребують нових досягнень у фундаментальних та прикладних галузях науки. А вони потребують усе більш масштабних витрат ресурсів.

По-друге, це здебільшого вичерпані можливості традиційних конструктивних рішень елементів сучасних машин. Це стосується і двигунів внутрішнього згоряння, і трансмісій, і рушіїв, і систем спеціального призначення тощо. Відтак, тільки самими заходами важко досягти суттєвого поліпшення технічних і тактико-технічних характеристик (ТіТТХ) машин, агрегатів, систем і вузлів, що створюються чи модернізуються.

По-третє, традиційні технології поліпшення службових характеристик деталей машин мають низку вад. Серед цих вад найбільш відчутною є те, що як правило, поліпшення однієї з характеристик

призводить до погіршення інших. Так, підвищення твердості супроводжується зниженням міцності при дії багатоциклових навантажень. Нанесення плівок та покриттів із високими триботехнічними властивостями може породжувати пониженою задиростійкість та термічне відшарування приповерхневих шарів матеріалу деталі. Якщо ж застосовуються технології, що передбачають тривалий високотемпературний вплив на деталь, то можуть мати місце її залишкові деформації тощо.

Як альтернативний шлях запропоновано метод дискретно-континуального зміцнення (ДКЗ) пар деталей [1]. Цей метод дає змогу досягти принципово нових проривних досягнень при створенні нових виробів військового та цивільного призначення за рахунок примноженої сукупної дії чинників різної природи. По-перше, це матеріалознавчий аспект: обґрунтовується мікроструктура гетерогенних композицій, що дає підвищені характеристики на рівні представницького мікроосередку матеріалу. По-друге, на мікро- та макрогеометричному рівні визначаються фізичні ефекти, які призводять до забезпечення необхідного рівня міцності, зни-

ження тертя, підвищення довговічності роботи вузла тощо. По-третє, визначається спосіб та режими технологічних операцій, які реалізують цей метод у конкретному випадку. Таким чином, цілеспрямовано здійснюється покрокове поліпшення кінцевого результату на етапах досліджень, технологічної підготовки та виробництва нових виробів.

Разом із тим, запропонований підхід потребує дослідження різних аспектів, які дотепер недостатньо вивчені з точки зору впливу на властивості контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених деталей машин. Зокрема, становить інтерес аналіз впливу властивостей матеріалів зміцнених зон на розподіл контактного тиску між деталями. Це склало напрямок досліджень, описаних у роботі.

#### **Аналіз існуючих методів зміцнення деталей машин**

Проблема зміцнення є актуальною для широкої множини деталей машин. Так, у [1–3] описані різні групи технологій зміцнення елементів конструкцій. Як зазначалося, множину відомих на сьогодні методів інженерії поверхні деталей машин умовно розділено на чотири класи: нанесення покриттів, модифікування поверхневого шару, технологічного забезпечення фізико-механічних властивостей і топографії поверхні, а також комбіновані («гібридні») методи. Дослідження показали, що набуття потрібних службових характеристик поверхнею деталі (зносостійкості, теплостійкості, корозійної стійкості, опору окисленню, втомної міцності, контактної жорсткості, опору адгезії, антифрикційних або фрикційних властивостей, герметичності з'єднань, ущільнення пар тертя, утримання мастила, а також декоративно-художніх, екологічних, електроізоляційних, теплоізоляційних, ріжучих та інших корисних властивостей) відбувається через комплекс геометричних і фізико-механічних характеристик поверхні. До останніх, зокрема, належать точність, шорсткість, твердість, мікротвердість, опорна площа, пористість, залишкові напруження, мікроструктура, мікрорельєф, макрорельєф, адгезія, текстура, міцність зчеплення з основою тощо [1–3].

Якщо звернутися, наприклад, до деталей ДВЗ, то широко застосовуються різні методи зміцнення. Зокрема, це різні види хіміко-термічної обробки (ХТО): цементация, нітроцементация, ціанування, азотування, борування, бороазотування, силіціювання, сульфидування, дифузне хромування, алітування тощо. ХТО застосовують для підвищення зносостійкості за рахунок збільшення поверхневої твердості деталей тертя, підвищення опору абразивному зносу, протизадірної та корозійної стійкості. При деяких методах ХТО також підвищується втомна міцність виробу. Загальним недоліком цих

процесів є велика тривалість технологічного циклу, шкідливість виробництва, застосування високих температур і, як наслідок, зростання зерна веде до окрихчування сталі, деформації (викривлення) зміцнених деталей, а відповідно – збільшення припусків під механічну обробку, а також висока енергоємність, неможливість багаторазового (повторного) зміцнення деталей.

Крім того, це способи, в основі яких лежить термічне зміцнення, що полягає в дії інтенсивного потоку енергії на локальну ділянку поверхні, поглинанні цього потоку енергії приповерхневим шаром деталі і внаслідок цього – у швидкому розігріві ділянки до високих температур. Після припинення дії потоку енергії нагріта ділянка охолоджується внаслідок теплопровідності у внутрішні об'єми матеріалу, а також за рахунок тепловіддачі з поверхні. При цьому досягається висока швидкість охолодження (вище критичної для певної марки сталі або чавуну). У процесі нагрівання та охолодження відбуваються фазові перетворення. Найбільш поширений метод обробки цього виду – поверхневе загартування. Потік енергії можна отримати електричним, електроімпульсним, лазерним, ультразвуковим та іншими способами. У виробництві найбільше поширення знайшли процеси індукційного і газополуменового нагріву поверхні виробів. Недоліки цих методів: висока вартість і великі габарити технологічного обладнання, особливо у випадку лазерної обробки; висока енергоємність; у деяких випадках – зниження втомної міцності.

Іншою групою є зміцнення за рахунок поверхневого пластичного деформування (ППД), при якому в металі відбуваються структурні зміни, пов'язані з підвищенням щільності дислокацій, їх взаємодією, подрібненням блоків, виникненням макро– і мікронапружень. У сталях, що мають після термообробки у структурі залишковий аустеніт, при цьому може відбуватися його часткове перетворення у мартенсит і виділення дисперсних карбідних частинок. Пластична деформація може бути здійснена обкаткою поверхні деталі роликком або кулькою, вигладжуванням алмазним, ельборовим, твердосплавним та іншим інструментами, гідроабразивним і дрібоструйним наклепом, карбуванням тощо. Але слід мати на увазі, що при такому способі обробки не досягаються високі значення твердості, а, значить, деталі мають низьку зносостійкість. Крім цього, недоліками зміцнення пластичною деформацією є те, що при підвищенні температури у процесі експлуатації властивості матеріалу поверхні деталі, отримані при зміцненні, частково або повністю зникають. У деяких випадках також реєструється зниження пластичності. Використання ППД є раціональним для вже зміцнених іншими

методами деталей як остаточна обробка, яка в більшості випадків призводить до виникнення поверхневих стискних напружень, що сприяють підвищенню втомного опору. ППД також зменшує шорсткість поверхні і заліковує ультрадрібні тріщини, у результаті чого зменшується чутливість матеріалу до концентраторів напружень.

Також добре відомий метод зміцнення металів об'ємною термічною обробкою. У технології термічної обробки основна увага приділяється вибору температури нагріву, залежно від марки сталі, часу витримки при цій температурі для його завершення фазових і структурних перетворень і швидкості охолодження, що забезпечує утворення необхідної структури. При цьому дуже важливим є вибір температури нагріву таким чином, щоб, з одного боку, міг утворитися гомогенний аустеніт, тобто встигли розчинитися карбідні частинки, а з іншого, – не відбулося би зростання зерна, що призведе до окрихчування сталі. Не менш важливим є і вибір охолоджуючого середовища, яке, забезпечуючи швидкість охолодження вище критичної, не чинило би впливу на зростання гартівних напружень. До недоліків об'ємних методів термічної обробки можна віднести: енергоємність; екологічно шкідливе виробництво; деформації (викривлення) виробів; ці методи не завжди забезпечують необхідні триботехнічні характеристики виробу.

Як уже зазначалося, традиційні методи і технології зміцнення деталей машин, зокрема ДВЗ, мають низку недоліків. На противагу їм методи дискретно-континуального зміцнення, що запропоновані у [1], мають суттєві переваги. Дійсно, останніми роками активний розвиток отримали процеси дискретної обробки поверхонь, 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 матеріалу вала, а й забезпечити високі триботехнічні характеристики поверхонь, що працюють у контакті з контртілом. Серед таких методів широке застосування знайшло дискретне зміцнення на основі електроіскрового легування [1, 4–6].

Процес електроіскрового легування має низку особливостей, які сприяють його поширенню: перенесення матеріалу залежить від ерозійної стійкості анода і катода; можливість формування покриттів із характеристиками широкого діапазону значень; висока адгезія електроіскрового покриття з основним матеріалом; відсутність нагріву і деформації деталі у процесі обробки; товщина шару, що наноситься, і

глибина легування обмежені; поверхня має велику шорсткість; продуктивність процесу невисока; на поверхні можливе формування каверн.

Розвиток цього напрямку було продовжено на Державному підприємстві «Завод ім. В.О. Малишева» з метою розробки технології зміцнення поверхонь сталевих і чавунних деталей ДВЗ [7, 8]. Такий формування зносостійкої поверхні деталі описано і використовується [7]. Його суть якого полягає у конфігурації нанесення зміцнених зон при перенесенні металу з анода на катод у момент іскрового розряду між ними на великогабаритних деталях. Одночасно з цим перенесенням відбувається зміцнення та макролегування приповерхневої зони деталі, що призводить до зміни хімічного складу і фізико-механічних властивостей матеріалу основи у плямі контакту з електродом. Метод електроіскрового зміцнення має низку особливостей [9]: одиничний електроіскровий розряд дає змогу забезпечити стабільність фізико-механічних властивостей окремої ділянки (плями); зміцнення за один прохід різко підвищує продуктивність процесу (частина поверхні залишається незміцненою); зміна величини струму розряду дає можливість регулювати глибину і площу одиничної ділянки, а також глибину проникнення в основу (макролегування); керуючи частотою імпульсу або швидкістю відносного переміщення анода і катода, можна варіювати кількість дискретних ділянок на робочій поверхні деталі.

При дискретному зміцненні робочої поверхні сама деталь не піддається впливу великих температур, що виключає пов'язані з цим температурні навантаження. У зв'язку з цим, цю технологію можливо використовувати на кінцевих операціях виготовлення деталей чи при їх ремонті.

З іншого боку, перспективним є застосування технології мікродугового оксидування при зміцненні робочих поверхонь алюмінієвих деталей конструкцій.

Зокрема, на поршнях ДВЗ із алюмінієвих сплавів [8] знаходить застосування технологія оксидокерамічних покриттів [10, 11]. У цьому випадку формування покриття відбувається за рахунок мікродугового оксидування алюмінієвої поверхні самої деталі, а покриття має більш високу адгезію з алюмінієвою основою. Це вже не покриття, а керамічний шар. Його одержують у гальваностатичному і потенціостатичному режимах. При утворенні керамічного шару на вогневій поверхні алюмінієвого поршня методом мікродугового оксидування створюється захисний шар (шуба) з коефіцієнтом теплопровідності, що значно менше, ніж у алюмінієвого сплаву. Застосування однофазних оксидних плівок для теплоізоляції деталей деяких конструкцій недоцільне [10] через велику різницю коефіцієнтів термічного розширення покриття й матеріалу поршня.

Проблему можуть вирішити багатокомпонентні й багатофазні керамічні шари, які мають коефіцієнти лінійного розширення, близькі аналогічному коефіцієнту деталі, отримані методом анодного мікродугового оксидування (АМДО). Такий керамічний шар одержують за допомогою спеціальної установки.

Утворений керамічний шар в основному складається 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. Відомо, що 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.

Таким чином, можна констатувати, що протягом останніх десятиліть велике значення набувають роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, спрямовані на удосконалення технологій зміцнення робочих поверхонь високонавантажених елементів машин військового та цивільного призначення. Методи інженерії поверхні (нанесення покриттів, модифікування поверхневого шару, плазмові технології тощо) та досліджень описані у роботах [12–21]. Серед таких методів достатньо ефективними є дослідження, описані у роботах акад. С. Фірстова та проф. С. Дьяченко [12, 13]. Мова йде про фізико-механічні властивості чистих металів, низьколегованих сплавів та багатокомпонентних твердих розчинів, включаючи сплави з високою ентропією. Привертають увагу роботи проф. О. Соболя та проф. Е. Посв'ятенка із напрямків багатшарових покриттів та корундування, а також холодного пластичного деформування [14–16]. Усі перелічені методи досліджень та зміцнення мають низку переваг та недоліків. Проте принциповим загальним їх недоліком є можливість поліпшення певних характеристик, як правило, за рахунок погіршення інших. Відповідно, високі механічні властивості покриттів супроводжуються проблемами розтріскування або відшарування тощо. У методі, що пропонується [1], навпаки, передбачається поліпшення не однієї окремо взятої, а комплексу характеристик. Ця проривна властивість особливо важлива для елементів машин військового та цивільного призначення. Також суттєве значення мають публікації [17–19], у яких увагу звертають на сплави з високою ентропією, однофазні багатоелементні сплави та наноструктуровані металеві матеріали. У роботах [20, 21] описані дослідження контактної взаємодії твердих тіл із реальною мікрогеометрією поверхні. Усі перелічені публікації в основному спрямовані на методи аналізу властивостей існуючих металів, сплавів, покриттів. Разом із тим у практичному плані високу актуальність та важливість набули проблеми синтезу матеріалів та покриттів із бажаними фізико-механічними властивостями. Тут експериментальні дослідження [12–19]

можуть дати вихідні дані стосовно тенденцій впливу тих чи інших чинників на властивості певних об'єктів. Моделі [20, 21] дають можливість досліджувати вплив окремих чинників на контактну взаємодію. Проте ні перші, ні другі не містять постановок, підходів, моделей та методів розв'язання обернених задач. Тобто виникає проблема створення таких засобів досліджень, які формують варіативний об'єкт та уможливають обґрунтування технічних рішень із заданими властивостями. Якраз такі підходи, моделі та методи частково розроблені авторами [1]. На їх основі забезпечується практична складова – можливість розроблення рекомендацій стосовно проектно-технологічних параметрів зміцнення елементів машин військового та цивільного призначення із підвищеними ТіТТХ.

Важливими напрямками досліджень при цьому є аналіз напружено-деформованого стану (НДС) дискретно-континуально зміцнених тіл із урахуванням контактної взаємодії. При цьому важливим, зокрема, є визначення впливу властивостей матеріалів зміцнених зон на розподіл та перерозподіл контактного тиску у спряженні зміцнених деталей. Це становить мету роботи.

#### **Загальна постановка задачі досліджень контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених деталей конструкцій**

Відомо [1], що основна ідея методу дискретно-континуального зміцнення деталей машин полягає у тому, що у поверхневі шари чавунної чи сталеві деталі індентується високоміцний матеріал у вигляді архіпелагу зон дискретного зміцнення (ЗДЗ), а на поверхні спряженої із нею алюмінієвої деталі вирощується мікрошар оксидної кераміки у вигляді різних ( $\alpha$  – та  $\gamma$ –) фаз  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При цьому, на відміну від застосування одного із методів зміцнення (чи то дискретного, чи континуального), значення мають властивості не тільки окремих нових матеріалів (чи то індентованих, чи вирощених), а також їх поєднань. Це – з одного боку. З іншого боку – різко розширився спектр властивостей матеріалів ЗДЗ та оксидної кераміки. Наприклад, як матеріал ЗДЗ можуть застосовуватися тверді сплави, високолеговані сталі тощо.

Їхні фізико-механічні властивості можуть суттєво відрізнятись від властивостей основного матеріалу. Так, тверді вольфрамові сплави на кобальтових та нікелевих зв'язках мають модуль пружності до 600 ГПа, тобто у майже втричі вище, ніж у сталей, та ще більш переважає модуль пружності чавуна. З іншого боку, варіювання складу шару  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (тобто співвідношень характеристик  $\alpha$  та  $\gamma$ -фаз), а також ступеня його пористості може у межах порядку величини змінювати його модуль пружності.

Слід зауважити, що ці особливості стосуються не тільки модуля пружності, але й показників твер-

дості, коефіцієнтів тертя, характеристик міцності тощо. Отже, з одного боку, існує потенційна можливість варіювання фізико-механічних властивостей матеріалів для зміцнення при застосуванні методу дискретно-континуального зміцнення деталей машин, а з іншого – ця можливість натепер уже є певним чином реально здійсненою. Саме тому слід дослідити вплив варіювання парних та множинних наборів властивостей матеріалів зміцнення при ДКЗ на контактну взаємодію спряжених деталей машин. Зокрема, мова йде про модулі пружності цих матеріалів.

У загальному плані задача досліджень може бути поставлена у такому вигляді. Розглядається мікросередок, що поєднує, з одного боку, континуально зміцнену деталь із алюмінієвого сплаву, а з іншого – дискретно зміцнену чавунну деталь (рис. 1, 2) [4–6].

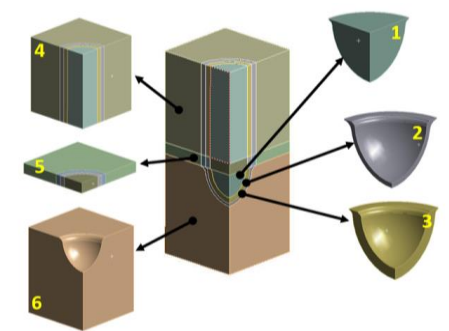


Рис. 1. Геометрична модель:

1 – дискретно зміцнена область ( $E_1(E_d), v_1$ ), 2 – 1-й перехідний шар ( $E_2, v_2$ ), 3 – 2-й перехідний шар ( $E_3, v_3$ ), 4 – основний матеріал, сплав АК4 ( $E_4, v_4$ ), 5 – шар з корундовим покриттям ( $E_5(E_c), v_5$ ), 6 – основний матеріал, чавун ( $E_6, v_6$ )

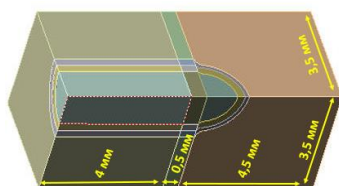


Рис. 2. Геометрична модель представницького осередку із розмірами

Оскільки потенційно діапазон модулів пружності матеріалу шару оксидної кераміки  $E_c$  та ЗДЗ  $E_d$  можуть змінюватися у широких діапазонах, то для їх опису вводиться пара характеристик:

$$\alpha_c = \lg\left(\frac{E_c}{E_c^0}\right), \alpha_d = \lg\left(\frac{E_d}{E_d^0}\right), \quad (1)$$

де  $E_c^0$  – модуль пружності алюмінію (як базове значення – 70 ГПа),  $E_d^0$  – модуль пружності чавуна (як базове значення – 110 ГПа).

Задля охоплення діапазону варіювання, що покриває властивості широкої множини матеріалів, обрано межі варіювання

$$\alpha_c \in [\lg(11/700); \lg(110/7)],$$

$$\alpha_d \in [\lg(20/11); \lg(60/11)].$$

Для контролю характеристик НДС та контактної взаємодії введені параметри:

$$\gamma_p = \frac{p_{\max}(\alpha_c, \alpha_d)}{p_{\max}(0, 0)};$$

$$\gamma_\sigma^c = \frac{\sigma_{\max}^c(\alpha_c, \alpha_d)}{\sigma_{\max}^c(0, 0)}; \gamma_\sigma^d = \frac{\sigma_{\max}^d(\alpha_c, \alpha_d)}{\sigma_{\max}^d(0, 0)}, \quad (2)$$

де  $p_{\max}$ ,  $\sigma_{\max}$  – рівень контактного тиску та еквівалентних напружень (у шарі кераміки  $Al_2O_3$  (індекс «с») та ЗДЗ (індекс «d»)) залежно від  $\alpha_c, \alpha_d$ .

Ставиться задача: визначити тенденції зміни характеру розподілу напружень за Мізесом та контактного тиску у спряженні деталей, підданих ДКЗ, а також залежності  $\gamma_p, \gamma_\sigma^c, \gamma_\sigma^d$  від параметрів  $\alpha_c, \alpha_d$ .

#### Розрахункова модель представницького осередку деталей, підданих дискретно-континуальному зміцненню

Фізико-механічні характеристики наведені у табл. 1, 2, а на рис. 3 – розрахункова скінченно-елемента модель, представницького осередку деталей, підданих ДКЗ, яка налічувала 170 тис. елементів. Зовнішнє модельне навантаження – 100 МПа. На рис. 4 представлені навантаження, закріплення, а також умови симетрії, а на рис. 5, 6 – розподіли контактного тиску  $p$  та еквівалентних напружень  $\sigma$  у спряжених тілах (базовий варіант).

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики матеріалів (розрахункові групи)

Параметри, ГПа	Розрахункові групи					Base
	1	2	3	4	5	
$E_1(E_d)$						
$E_2$	200	300	400	500	600	200
$E_3$						
$E_4$	70					70
$E_6$	110					110

Для даного дослідження було побудовано 5 розрахункових груп (1, 2, 3, 4 та 5), у свою чергу, кожна налічувала 7 (А, В, С, D, Е, F та G) розрахункових схем. Відмінності у рамках однієї групи полягали у варіюванні модуля пружності матеріалу відповідно області дискретно зміцненої ділянки, а відмінності між розрахунковими схемами полягали у варіюванні модуля пружності відповідно області після корундування.

Таблиця 2. Фізико-механічні характеристики матеріалів  $E_5$  ( $E_c$ ), ГПа, для різних розрахункових схем

Розрахункові схеми							Base
A	B	C	D	F	E	G	
1,1	5,5	11	55	110	550	1100	70

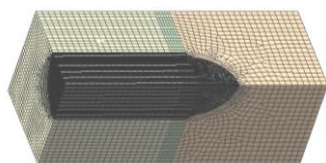


Рис. 3. Скінченно-елементна модель представницького осередку деталей, підданих дискретно-континуальному зміцненню

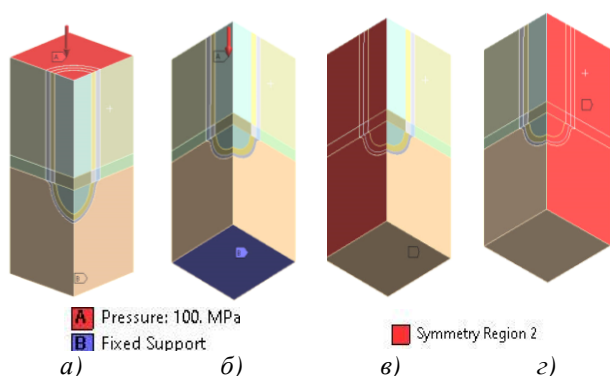


Рис. 4. Зовнішні навантаження та умови симетрії: а – навантаження; б – закріплення; в – симетрія 1; г – симетрія 2

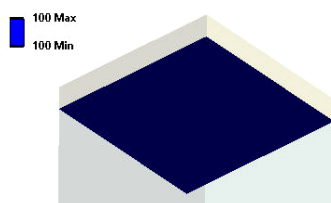


Рис. 5. Розподіл контактної тиску  $p$ , МПа (базовий набір параметрів  $E_c^0, E_d^0$ )

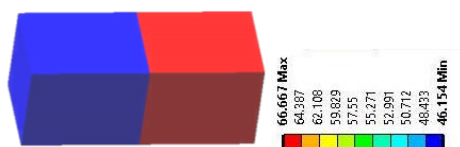


Рис. 6. Розподіл напружень за Мізесом  $\sigma$ , МПа (базовий набір параметрів  $E_c^0, E_d^0$ )

Установлено, що рівень  $p_{\max}(0,0)=100$  МПа,  $\sigma_{\max}^c(0,0)=46.15$  МПа,  $\sigma_{\max}^d(0,0)=66.67$  МПа. Ці значення будуть використовуватися задля визначення шуканих залежностей.

### Результати багатоваріантних досліджень напружено-деформованого стану та контактної взаємодії тіл, підданих дискретно-континуальному зміцненню

Із застосуванням моделі, наведеної на рис. 1, здійснене скінченно-елементне дослідження НДС та контактної взаємодії тіл, підданих ДКЗ. На рис. 7–14 наведені діаграми із максимальними еквівалентними напруженнями за Мізесом  $\sigma$  та контактним тиском  $p$  у елементах досліджуваної системи. У табл. 3, 4 наведені характерні розподіли  $\sigma$  та  $p$  для певних поєднань параметрів  $\alpha_c, \alpha_d$ .

На рис. 15–17 наведені поверхні, які описують зміну відносного рівня максимальних еквівалентних напружень за Мізесом та контактної тиску з урахуванням змін модулів пружності для матеріалів областей ДКЗ. Ці поверхні були отримані за допомогою співвідношень (1), (2).

### Аналіз результатів дослідження напружено-деформованого стану та контактної взаємодії деталей, підданих дискретно-континуальному зміцненню, та висновки

Ретельний аналіз результатів дослідження НДС та контактної взаємодії деталей, підданих ДКЗ, дає підстави відзначити такі характерні особливості, установити такі закономірності та обґрунтувати такі висновки.

1. Характер розподілу контактної тиску та напружень за Мізесом суттєво залежить від поєднань значень модулів пружності шару оксидної кераміки на алюмінієвій деталі  $E_c$  та зони дискретного зміцнення  $E_d$  – на чавунній деталі. При цьому з рухом  $E_d$  від менших до більших значень відбувається якісна зміна цих розподілів: наприклад, контактний тиск при малих  $E_d$  у центральній частині області контакту може набувати мінімуму, а потім – максимуму. У той же час, вплив  $E_c$  – менш виражений.

2. Рівень контактної тиску та напружень за Мізесом змінюється у дослідженому діапазоні варіювання модулів пружності матеріалів зон континуального та дискретного зміцнення та порівняно із базовим варіантом від 100 до 400 МПа для контактної тиску, 66–213 МПа – еквівалентні напруження (елемент 1), 66–660 МПа – еквівалентні напруження (елемент 3). Це – досить відчутний коридор, у межах якого можна управляти рівнем контрольованих величин. А відтак – є можливість обґрунтування вибору того чи іншого матеріалу, а також конструктивних та технологічних рішень при створенні тих чи інших елементів конструкцій.

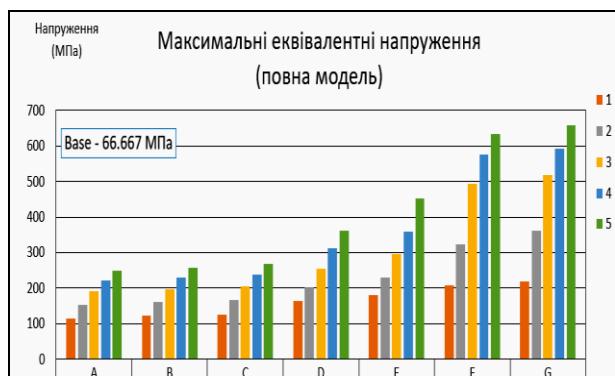


Рис. 7. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом (МПа) для усіх розрахункових схем

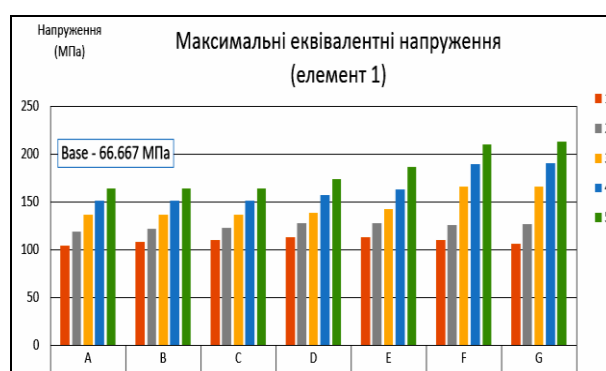


Рис. 8. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом (МПа) (елемент 1)

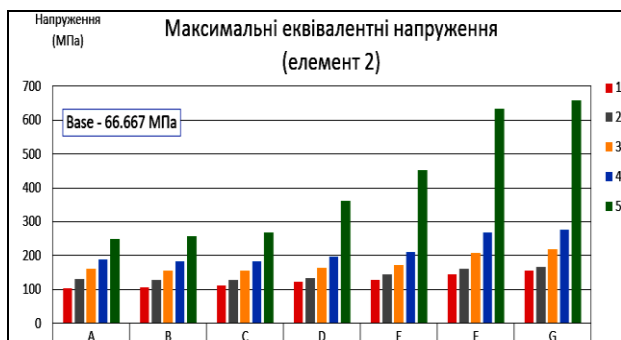


Рис. 9. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом (МПа) (елемент 2)

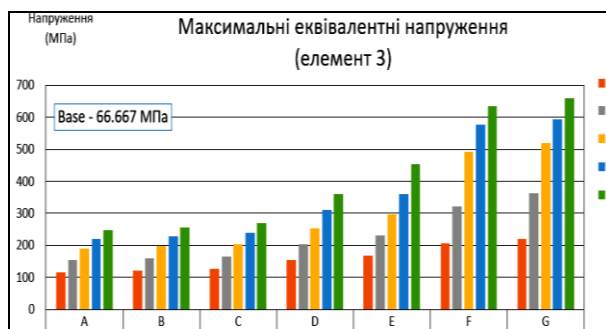


Рис. 10. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом (МПа) (елемент 3)

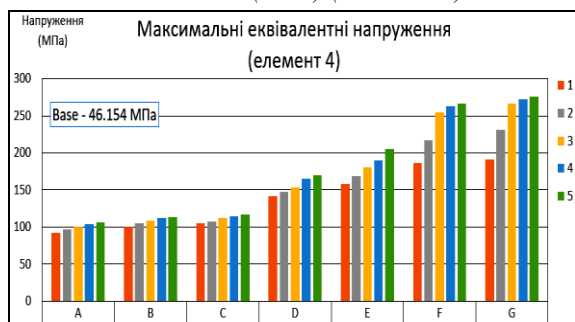


Рис. 11. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом (МПа) (елемент 4)

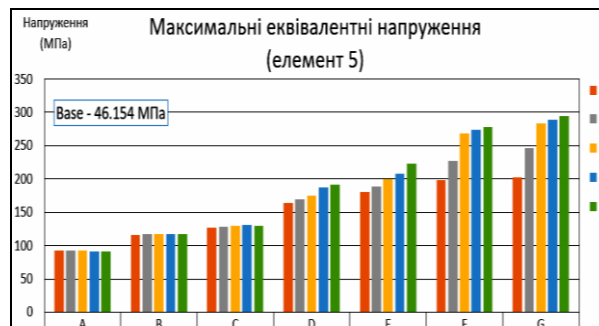


Рис. 12. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом (МПа) (шар з ГПО) (елемент 5)

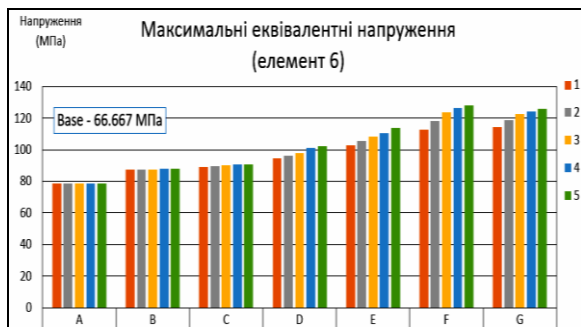


Рис. 13. Максимальні еквівалентні напруження за Мізесом (МПа) (елемент 6)

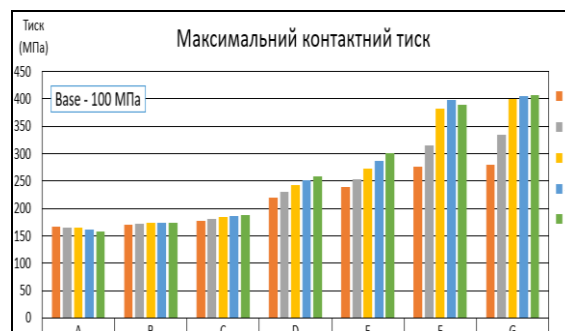


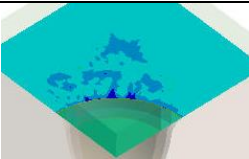
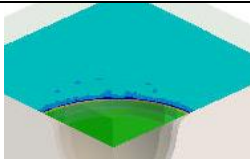
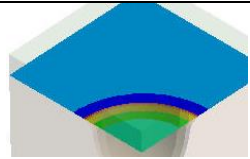


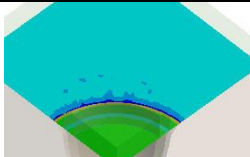
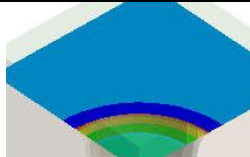
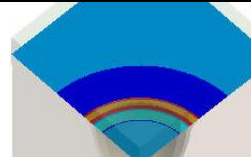
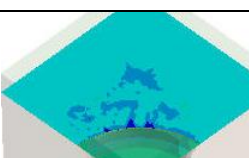
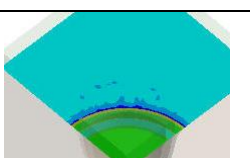
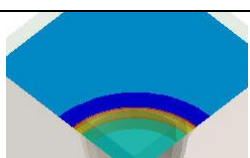

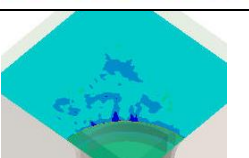
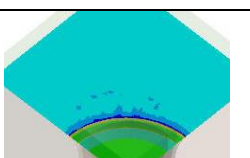
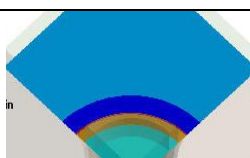

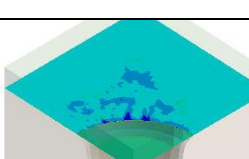
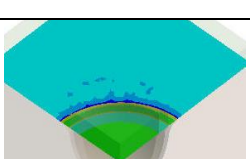
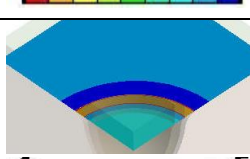
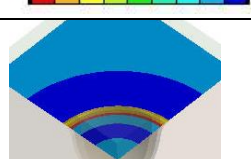
Рис. 14. Максимальний контактний тиск (МПа)

Таблиця 3. Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом (МПа) для різних розрахункових груп та схем

Розрах. група	Розрахункова схема			
	A	B	E	G
1				
2				
3				
4				
5				



Таблиця 4. Розподіл контактного тиску (МПа) для різних розрахункових груп та схем

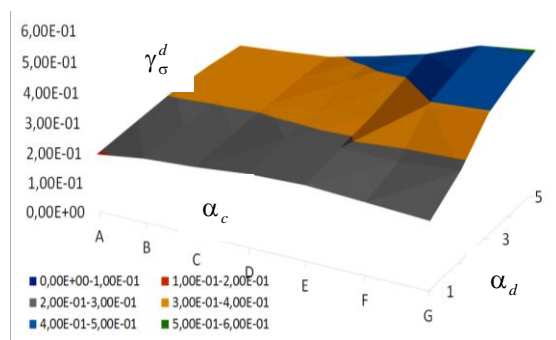
Група	Розрахункова схема			
	A	B	E	G
1	 <p>169.99 Max 158.69 147.4 136.1 124.8 113.5 102.2 90.905 79.606 68.308 Min</p>	 <p>169.99 N 158.69 147.4 136.1 124.8 113.5 102.2 90.905 79.606 68.308 N</p>	 <p>238.63 Ma 218.58 198.53 178.48 158.43 138.38 118.34 98.287 78.239 58.191 Mir</p>	 <p>279.25 Max 254.77 230.29 205.8 181.32 156.84 132.36 107.88 83.396 58.914 Min</p>
2	 <p>165.54 Ma 154.85 144.15 133.45 122.75 112.05 101.35 90.656 79.958 69.26 Min</p>	 <p>171.97 Ma 160.39 148.81 137.23 125.66 114.08 102.5 90.923 79.345 67.767 Mir</p>	 <p>253.43 Ma 231.49 209.54 187.59 165.65 143.7 121.75 99.809 77.862 55.916 Mir</p>	 <p>333.73 Ma 302.69 271.66 240.62 209.59 178.55 147.52 116.48 85.448 54.413 Mir</p>
3	 <p>164.36 Ma 153.82 143.29 132.75 122.21 111.67 101.14 90.599 80.061 69.524 Min</p>	 <p>173.27 Ma 161.33 149.78 138.04 126.29 114.55 102.8 91.056 79.311 67.566 Mir</p>	 <p>272 Max 247.8 223.59 199.39 175.19 150.98 126.78 102.58 78.374 54.171 Mir</p>	 <p>399.62 Ma 360.81 322.01 288.21 244.4 205.6 166.8 128 89.192 50.389 Mir</p>
4	 <p>161.4 Ma 151.26 141.12 130.97 120.83 110.69 100.55 90.403 80.261 70.118 M</p>	 <p>173.81 162.01 150.21 138.42 126.62 114.83 103.03 91.234 79.438 67.641</p>	 <p>287.34 261.31 235.28 209.25 183.22 157.18 131.15 105.12 79.088 53.056</p>	 <p>404.7 Max 365.15 325.59 286.04 246.49 206.94 167.38 127.83 88.282 48.731 Mir</p>
5	 <p>158.47 Ma 148.73 139 128.27 118.53 108.8 100.07 90.335 80.602 70.869 Min</p>	 <p>173.61 N 161.87 150.14 138.4 126.67 114.93 103.19 91.457 79.721 67.984 N</p>	 <p>301.4 Ma 273.61 245.82 218.04 190.25 162.46 134.67 106.88 79.091 51.303 M</p>	 <p>407.73 Ma 367.67 327.61 287.55 247.49 207.44 167.38 127.32 87.262 47.204 Mi</p>

3. Важливе значення для обґрунтування раціональних технічних рішень вузлів нових конструкцій має не тільки рівень контактної тиску та напружень за Мізесом. Це тільки один бік критеріа-

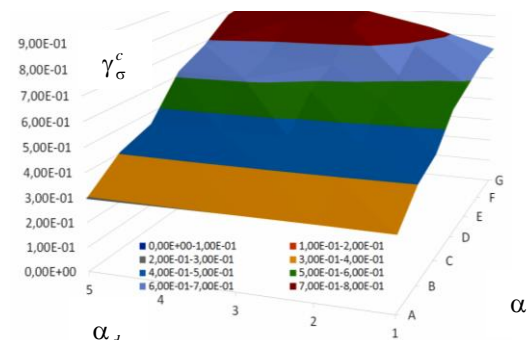
льних вимог, хоча і важливий. Дійсно, контактна взаємодія визначає розподіл навантажень між елементами конструкцій, що певним чином безпосередньо впливає на їх НДС та міцність. Проте, на до-

даток, запускається серія процесів і станів: тертя, зношування, навантаженість. Тертя залежить від рівня контактного тиску, умов зношування та фрикційних властивостей контактуючих матеріалів. Тертя також впливає на зношувальність, яка визначається також і триботехнічними властивостями матеріалів. Зношувальність викликає зміну мікропрофілю та макрогеометрії у контактному сполученні деталей, що зумовлює вплив на рівень навантаженості. Отже, цей цикл «навантаження – контактний тиск – тертя – зношування» відтворюється у вигляді

ді спіралі процесів і станів. Тому кожна ланка цього циклу має двоякий вплив: з одного боку, безпосередньо на потужність, міцність, ККД, довговічність відповідно, а з іншого, – також на інші сусідні ланки. Отже, із фізичної точки зору маємо «мультифізичний» процес, а із технічної – багатокритеріальний. Більш того, на кожному із етапів згаданого циклу виникає низка конкуруючих вимог та обмежень, які слід брати до уваги при обґрунтуванні раціональних технічних рішень нових виробів.



елемент 1



елемент 5

Рис. 15. Відносні рівні еквівалентних напружень за Мізесом залежно від групи та схеми (див. табл. 1, 2)

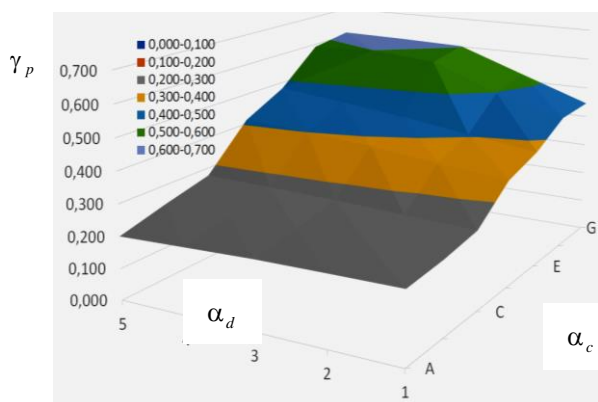


Рис. 16. Відносні рівні контактного тиску залежно від групи та схеми (див. табл. 1, 2)

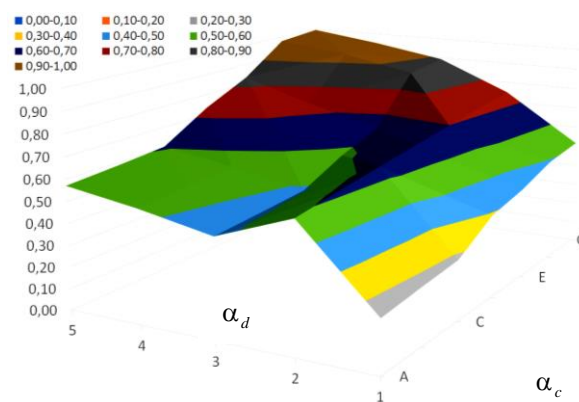


Рис. 17. Відносні рівні еквівалентних напружень за Мізесом залежно від групи та схеми, повна модель (див. табл. 1, 2)

4. Якщо відштовхуватися тільки від одного критерію, наприклад, від рівня контактного тиску у спряженні деталей, підданих дискретно-континуальному зміцненню, то можливе визначення «оптимальних» властивостей матеріалів зміцнення. Для кожного конкретного випадку це може бути здійснено на основі певного алгоритму цілеспрямованого пошуку, в основі якого – розв’язання задачі аналізу напружено-деформованого стану та контактної взаємодії. Розв’язання цієї задачі аналізу описане у роботі. Розроблена модель може бути напряму застосована для пошуку цього т.з. «оптимуму».

5. Розв’язання задачі визначення т. з. «оптиму-

му» (див. п. 4) у прикладному аспекті має декілька особливостей. По-перше, це рішення слід реалізувати у конкретному матеріалі із т. з. «оптимальними» властивостями. По-друге, слід визначити технологію та режими обробки у тому чи іншому випадку. По-третє, це рішення необхідно узгодити із множиною інших критеріїв, вимог та обмежень (див. п.3). Проте слід зазначити, що базове «ядро», тобто підхід, моделі та методи аналізу НДС та контактної взаємодії деталей, що піддані дискретно-континуальному зміцненню, уже розроблені, реалізовані та описані у цій роботі.

Розробки та результати розрахунків, описані у роботі, можуть бути використані при подальших дос-

лідження деталей ДВЗ, трансмісій, систем спеціального призначення, рушіїв, опор, зубчастих передач, підшипників та інших елементів конструкцій, підданих дискретно-континуальному зміцненню.

### Список літератури:

1. Континуальна і дискретно-континуальна модифікація поверхностей деталей: монографія / [Ткачук Н.А., С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко, С.А. Кравченко и др.]. – Харків: «Планета-Прінт», 2018. – 259 с. 2. Інженерія поверхні / [Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. – К.: Наук. думка, 2007. – 558 с. 3. Канарчук В.Є. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів / В.Є. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата. – К.: Вісник НТУ, 2000. – Вип.4. – С.3–14. 4. Контактна взаємодія дискретно-континуально зміцнених деталей двигунів внутрішнього згорання / М.А. Ткачук, С.О. Кравченко, А.В. Грабовський, М.М. Ткачук [та інші.] // Двигуни внутрішнього згорання. – 2021. – № 2. – С. 49–59. 5. Розрахунково-експериментальні дослідження напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених деталей машин / О. В. Веретельник, М. М. Ткачук, С. О. Кравченко [та інші.] // Вісник НТУ «ХП». Серія: Машинознавство та САПР. – 2021. – № 2. – С. 5–21. 6. Дискретно-континуальні методи зміцнення елементів машин військового та цивільного призначення / [Ткачук М.А., Кравченко С.О., Ткачук М.М., Грабовський А.В. та інші.] // Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем розбудови сектору безпеки і оборони: кол. монографія / за загальною редакцією проф. А.П. Марченка. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2021. – С. 288–323. 7. Гончаров В.Г. Дискретные покрытия – эффективный способ упрочнения деталей автомобилей. Сб. науч. раб. / Гончаров В.Г., Савченков Б.В., Александров Н.Г. – Варна: Изд. ТУ – Варна, 2003. – С. 282–289. 8. Двигуни внутрішнього згорання: серія підручників у 6 т. / А. П. Марченко [та ін.]; ред. А. П. Марченко; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХП», 2014. 9. Верхогуров А.Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А.Д. Верхогуров, И.М. Муха. – Киев: Техника, 1982. – 188 с. 10. Шпаковский В.В. Влияние керамической теплоизоляции поршня на размах температурной волны / В.В. Шпаковский, А.П. Марченко, О.Ю. Лыньков, В.В. Пылев // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2009. – № 8(65). – С. 111–115. 11. Эффект влияния малых толщин теплозащитного покрытия поршня на его меновенную поверхность температуру / [А.П.Марченко, В.А. Пылев, В.В. Шпаковский и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: XI междунар. научн.-практ. конф. – Владимир, 2008. – С. 220–223. 12. Firstov S.A. Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening) / S.A. Firstov, T.G.Rogul, O.A. Shut // Powd.Met.and Met.Ceram. – 2018. – 3-4. – 161-174. 13. D'yachenko S.S. Effect of the origin of the modified surface layer on the structural strength of workpieces / S.S. D'yachenko, I.V. Ponomarenko // The Phys. of Met. and Metallography. – 2017. – T.118, 6. – P. 608-620. 14. Subbotina V. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy / V. Subbotina, O. Sobol // Machines. Technologies. Materials. – 2020. – Vol. 14, no. 6. – P. 247-250. 15. Субботіна В.В. Електрична міцність оксидних покриттів, сформованих методом мікродугового оксидування / Субботіна В.В., Білозеров В.В., Соболев О.В. // Персп. техн. та прил., 2020. – Vol. 16, pp. 134–140. 16. Nemyrovskiy Ya. Technical-Economic Aspects of the Use

of Technological Process of Deforming Broaching. / Nemyrovskiy Ya., Posvyatenko E. // DSMIE. – 2019. – P. 238–247. 17. Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications / Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim // An Overview. Advanced Engineering Materials. – 2017. – Vol. 20(1). <https://doi.org/10.1002/adem.201700645>. 18. Ovid'ko I.A. Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials. / I.A. Ovid'ko, R.Z. Valiev, Y.T. Zhu. // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 94. – P. 462–540. 19. Ming K. Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures. / K. Ming, X. Bi, J. Wang. International Journal of Plasticity. – 2019. – P. 1–14. 20. Yastrebov, V. A. On the accurate computation of the true contact-area in mechanical contact of random rough surfaces / V. A. Yastrebov, G. Anciaux, J. F. Molinari // Tribol. Int. – 2017. – Vol. 114. – P. 161–171. 21. Papangelo A. Load-separation curves for the contact of self-affine rough surfaces / A. Papangelo, N. Hoffmann, M. Ciavarella. Scientific reports. – 2017. – 7(1), 6900.

### Bibliography (transliterated):

1. Tkachuk, N.A., D'yachenko, S.S., Posvyatenko, Je. K., Kravchenko, S.A., Goncharov, V.G., Shpakovskij, V.V., Belov, N.L., Shejko, A.I., Olejnik, A.K., Ponomarenko, I. V. (2018), "Continuous and discrete-continuous modification of surfaces of parts": monograph ["Kontinual'naja i diskretno-kontinual'naja modifikacija poverhnostej detalej: monografija"], Kharkiv: "Planeta-Print", 259 p. 2. Yushchenko K.A., Borysov Yu.S., Kuznetsov V.D., Korzh V.M. (2007). Surface engineering ["Inzheneriia poverkhni"], K.: Nauk. dumka, 558 p. 3. Kanarchuk, V.Ie., Posvyatenko, E.K., Lopata, L.A. (2000). "Surface engineering of transport vehicles components" ["Inzheneriia poverkhni detalei transportnykh zasobiv"]. K.: Visnyk NTU, No. 4, pp. 3–14. 4. Tkachuk M.A., Kravchenko S.O., Hrabovskiy A.V., Tkachuk M.M. [and others] (2021) "Contact interaction of continually-discretely strengthened parts of internal combustion engines", Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia ["Kontaktna vzaemodiia dyskretno-kontynualno zmitsnykh detalei dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia"], Kharkiv, NTU "KhPI", No. 2, pp. 49–59, <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.2.07>. 5. Veretelnyk, O. V., Tkachuk, M. M., Kravchenko, S. O. [and others] (2021). "Computational and experimental study of stress-strain state of continually-discretely strengthened machine parts", Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR ["Rozrakhunkovo-eksperymentalni doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu dyskretno-kontynualno zmitsnykh detalei mashyn"], Kharkiv: NTU "KhPI", No. 2, pp. 5–21. 6. Tkachuk, M.A., Kravchenko, S.O., Tkachuk, M.M., Hrabovskiy, A.V., Veretelnyk, O.V. (2021). Continual-discrete strengthening methods for components of military purposed and civil machines, Naukovo-tehnichni pidkhody do vyrishennia aktualnykh problem rozbudovy sektoru bezpeky i oborony : kolektyvna monohrafiia / za zahalnoiu redaktsiieiu prof. A.P. Marchenka ["Dyskretno-kontynualni metody zmitsnennia elementiv mashyn viiskovoho ta tsyvilnoho pryznachennia"], Odesa, Vydavnychiy dim «Helvetyka», pp. 288-323. 7. Goncharov, V.G., Savchenkov, B.V., Aleksandrov, N.G. (2003). "Discrete coatings are an effective way to harden car parts". Sat. scientific slave. ["Diskretnyye pokrytiya – effektivnyy sposob uprochneniya detaley avtomobiley". Sb. nauch. rab.], Varna: Ed. TU – Varna, pp. 282–289. 8. Marchenko, A. P. [and others] (2014). "Internal combustion engines": a

series of textbooks in 6 volumes / ed. A. P. Marchenko; [Dyuhny vnutrishn'oho zhoryannya : seriya pidruchnykiv u 6 t.], National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv: NTU "KhPI". 9. Verkhoturov, A.D., Mukha, Y.M. (1982) "Technology of electrospark alloying of metal surfaces" ["Tekhnolohiya elektroyiskrovoho lehyrovannya metallycheskykh poverkhnosti"], Kyev: Tekhnyka, 188 p. 10. Shpakovsky, V.V., Marchenko, A.P., Lynkov, O.Yu., Pylev, V.V. (2009), "Influence of ceramic thermal insulation of the piston on the amplitude of the temperature wave", Aviation and space technology and technology ["Vlyyanye keramicheskoy teplozolyatsyy porshnya na razmakh temperaturnoy volny", Aviatstyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya], Kharkiv, National. aerospace KhAI University, No. 8(65), pp. 111–115. 11. Marchenko, A.P., Pylev, V.A., Shpakovsky, V.V. [and others] (2008), "The effect of small thicknesses of the heat-protective coating of the piston on its instantaneous surface temperature" ["Effekt vliyaniya malykh tolshchyn teplozashchytynoho pokrytya porshnia na eho mhnovennuiu poverkhnostnuiu temperaturu"], Fundamental and applied problems of piston engine improvement: XI Intern. scientific-practical conf., Vladymyr, pp. 220–223. 12. Firstov, S.A., Rogul, T.G., Shut, O.A. (2018), "Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening)", Powd. Met. and Met. Ceram, No. 3-4, pp. 161–174. 13. D'yachenko, S.S., Ponomarenko, I.V. (2017), "Effect of the origin of the modified surface layer on the structural strength of workpieces", The Phys. of Met. and Metallography, Vol. 118, 6, pp. 608–620. 14. Subbotina, V., Sobol, O. (2020), "Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy", Machines. Technologies. Materials, Vol. 14, Vup. 6, pp. 247–250. 15. Subbotina, V., Bilozarov, V.V., Sobol, O. (2020), "Electrical strength of oxide coatings formed by the

method of microarc oxidation", Advanced technologies and devices ["Elektrychna micznist` oksy`dny`x pokry`ttiv, sformovany`x metodom mikrodogovogo oksy`duvannya", Perspekty`vni tekhnologii ta pry`lady`, No. 16, pp. 134–140, <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-19>. 16. Nemyrovskiy, Ya., Posvyatenko, E. and Sardak, S. (2019), "Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching". In book: Advances in Design, Simulation and Manufacturing II, Proceedings of the 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019, Lutsk, Ukraine, pp.238–247, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_24). 17. Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim (2017), High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview. Advanced Engineering Materials, Vol. 20(1). <https://doi.org/10.1002/adem.201700645>. 18. Ovid'ko, I.A., Valiev, R.Z. and Zhu, Y.T. (2018), "Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials". Progress in Materials Science. Vol. 94, pp. 462-540. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.002>. 19. Ming, K., Bi, X. and Wang J. (2019). "Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures". International Journal of Plasticity, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2018.10.005>. 20. Yastrebov, V. A., Anciaux, G. & Molinari, J. F. (2017), "On the accurate computation of the true contact-area in mechanical contact of random rough surfaces". Tribol. Int., Vol. 114, pp. 161-171. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.02727>. 21. Papangelo, A., Hoffmann, N., & Ciavarella, M. (2017), Load-separation curves for the contact of self-affine rough surfaces. Scientific reports, 7(1), 6900.

Надійшла до редакції 29.06.2022 р.

**Ткачук Микола Миколайович** – доктор техн. наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний 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

**Марченко Андрій Петрович** – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>, e-mail: andreymarchenko51@gmail.com

**Кравченко Сергій Олександрович** – доктор техн. наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: dvskhpi2016@gmail.com.

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

**Веретельник Олег Вікторович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>. тел.: (057)7076166; e-mail: veretelnik.oleg@gmail.com

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

**Веретельник Віктор Володимирович** – канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Прикладної математики», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6226-3330>. тел.: (057)7165858; e-mail: veretelnik.victor@gmail.com

**MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF CONTACT INTERACTION OF DISCRETE-CONTINUALLY STRENGTHENED PARTS**

*M.M. Tkachuk, A.P. Marchenko, S.O. Kravchenko, M.A. Tkachuk, O.V. Veretelnyk, A.V. Grabovskiy, V.V. Veretelnyk*

This paper considers the influence of material properties on the contact interaction of strengthened structural parts. Discrete-continual strengthening technology is used to process these parts. Contacting parts are made of different materials. On the one side there is an aluminum alloy part. A microscopic layer of oxide ceramics is grown on its surface. On the other side there is a cast iron or steel part with an archipelago of strengthened material spots introduced by the electric spark method on the surface. Hence, the first part is processed continually, and the second one is processed discretely. The influence of material properties in the strengthening zones on the contact interaction of such parts is studied. Recommendations regarding the choice of materials and technological modes of discrete-continual strengthening have been developed. In particular, it was established that the character of contact pressure distribution and Mises stresses significantly depends on the combination of the moduli of the oxide ceramic layer on the aluminum part and the discrete strengthening zone on the cast iron part. At the same time, with the growth of the elasticity modulus of the material of discrete strengthening zones, a qualitative change in these distributions occurs. The contact pressure in the central part of the contact area first acquires a minimum and then a maximum. At the same time, the influence of the elastic modulus of the oxide ceramic layer on the aluminum part is less pronounced. The relative level of contact pressure and von Mises stresses varies in the studied range of variation of the modulus of elasticity of materials of continual and discrete strengthening zones in a fairly wide corridor. Therefore, it is possible to control the level of controlled values. And therefore there is an opportunity to justify the choice of one or another material, as well as constructive and technological solutions when creating certain structure elements. Not only the level of contact pressure and von Mises stresses is important for rationalizing technical solutions of new machine components. Contact interaction determines the loads distribution between structural elements, which in a certain way directly affects their stress-strain state and strength. Also, a series of processes and states are launched in addition: friction, wear, bearing capacity. They depend on the distribution of contact forces. So, from a physical point of view, a "multi-physical" process is implemented, and from a technical point of view, this is a "multi-criteria" process. As a result, a number of competing requirements and limitations arise at each of the stages, which should be taken into account when justifying rational technical solutions for new products, in particular, internal combustion engines.

**Keywords:** contact interaction; stress-strain state; discrete strengthening; continual strengthening; discrete-continual strengthening; finite element method; stresses; contact pressure; elastic modulus; internal combustion engine.