

**С. О. КРАВЧЕНКО, М. А. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, О. В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, М. М. ТКАЧУК,  
І. П. ГРЕЧКА, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, О. С. ЛЬОЗНИЙ, Ю. С. ЧАЛА**

### **ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНИХ МЕТОДІВ ЗМІЦНЕННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН ВІЙСЬКОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

У роботі описані дослідження ефективності проривних методів різкого підвищення ресурсу високонавантажених елементів машин військового та цивільного призначення на основі методів їх дискретно-континуального зміцнення. Ці методи, на відміну від традиційних, поєднують переваги методів дискретного та континуального зміцнення та позбавлені їх основних недоліків. Здійснено аналіз 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 пагорбистих підвищень. Макроефекти полягають у адаптації форми контактуючих деталей під розподіл контактних зусиль, згладжуючи їх загальну нерівномірність. У підсумку досягається загальний ефект зміцнення, підвищення міцності, навантажувальної здатності та ресурсу елементів машин військового та цивільного призначення. Досягається проривне підвищення характеристик машин військового та цивільного призначення до рівня, що відповідає та переважає світовий для аналогічних виробів.

**Ключові слова:** дискретне зміцнення; континуальне зміцнення; дискретно-континуальне зміцнення; контактна взаємодія; машини військового та цивільного призначення; контактуючі деталі

**С. А. КРАВЧЕНКО, Н. А. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСКИЙ, О. В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, Н. Н. ТКАЧУК,  
И. П. ГРЕЧКА, А. Ю. ВАСИЛЬЕВ, О. С. ЛЕЗНЫЙ, Ю. С. ЧАЛАЯ**

### **ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН ВОЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В работе описаны исследования эффективности прорывных методов резкого повышения ресурса высоконагруженных элементов машин военного и гражданского назначения на основе методов их дискретно-континуального упрочнения. Эти методы, в отличие от традиционных, сочетают преимущества методов дискретного и континуального упрочнения и лишены их основных недостатков. Осуществлен анализ контактного взаимодействия представленных структур контактирующих тел на микроуровне. Они состоят из фрагментов контактирующих деталей, одна из которых упрочнена континуально, а другая – дискретно. При контактном взаимодействии на микроуровне проявляются, с одной стороны, эффекты наноуровня, а с другой – макроуровня. Наноефекты заключаются в перераспределении контактных усилий между телами: из плавных они превращаются в архипелаг бугристых возвышений. Макроефекты заключаются в адаптации формы контактирующих деталей под распределение контактных усилий, сглаживая их общую неравномерность. В итоге достигается общий эффект упрочнения, повышения прочности, нагрузочной способности и ресурса элементов машин военного и гражданского назначения. Достигается прорыв в улучшении характеристик машин военного и гражданского назначения, которое соответствует или превышает мировой уровень для аналогичных изделий.

**Ключевые слова:** дискретное упрочнение; континуальное упрочнение; дискретно-континуальное упрочнение; контактное взаимодействие; машины военного и гражданского назначения

**S. KRAVCHENKO, M. M. TKACHUK, A. GRABOVSKIY, O. VERETELNYK, M. M. TKACHUK,  
I. HRECHKA, A. VASILIEV, O. LOZNYI, YU. CHALA**

### **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF DISCREETLY CONTINUAL STRENGTHENING METHODS BASED ON ANALYSIS OF CONTACT INTERACTION OF MILITARY AND CIVILIAN VEHICLES ELEMENTS**

The paper describes studies of breakthrough methods effectiveness for sharply increasing the resource of highly loaded military and civilian vehicles elements based on methods of their discreetly continual strengthening. These methods, unlike traditional ones, combine the advantages of discrete and continual strengthening methods and lack their main disadvantages. The analysis of contact interaction of representative structures of contacting bodies at the microlevel is carried out. They consist of fragments of contacting parts, one of which is strengthened continually, and the other part is strengthened discretely. At contact interaction at the microlevel, on the one hand, the effects of the nanolevel are manifested, and on the other hand, the effects of the macrolevel are manifested too. Nanoeffects are the redistribution of contact forces between bodies: from smooth ones they turn into an archipelago of hilly elevations. Macroeffects are to adapt the shape of the contact parts to the distribution of contact forces, smoothing their overall unevenness. As a result, the overall effect of strengthening is achieved, increasing the strength, load capacity and resource of military and civilian vehicles elements. A breakthrough is being achieved in improving the performance of military and civilian vehicles, which corresponds to or exceeds the world level for similar products.

**Keywords:** discrete strengthening; continual strengthening; discreetly continual strengthening; contact interaction; military and civilian vehicles

**Вступ.** Оскільки конструктивні заходи поліпшення тактико-технічних і технічних характеристик машин військового та цивільного призначення натепер себе значною мірою вичерпали, то раціональним є створення нових проектно-технологічних рішень, які дають приріст окремих показників не на одиниці, а на десятки відсотків та в рази. Для цього, у свою чергу, потрібно задіяти та

дослідити механізми, що проявляються на нанорівні, працюють - на мікрорівні, а ефект, ними породжуваний, - на макрорівні. Це складає зміст досліджень, описаних у роботі.

**Аналіз методів зміцнення та дослідження ко-**

© С. О. Кравченко, М. А. Ткачук, А. В. Грабовський,  
О. В. Веретельник, М. М. Ткачук, І. П. Гречка,  
А. Ю. Васильєв, О. С. Льозний, Ю. С. Чала, 2021

**нтактної взаємодії елементів машинобудівних конструкцій.** Протягом останніх десятиліть велике значення набувають роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, спрямовані на удосконалення технологій зміцнення робочих поверхонь високонавантажених елементів машин.

Методи інженерії поверхні (нанесення покриттів, модифікування поверхневого шару, плазмові технології тощо) описані у роботах [1-10].

Серед таких методів достатньо ефективними є дослідження, описані у роботах акад. С. Фірстова та проф. С. Дьяченко [1, 2]. 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 [3–5].

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 цій роботі, 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 [6–8], у яких увагу звертають на сплави з високою ентропією, однофазні багатоелементні сплави та наноструктуровані металеві матеріали. У роботах [9, 10] 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 [1-8] можуть дати вихідні дані стосовно тенденцій впливу тих чи інших чинників на властивості певних об'єктів.

Моделі [9–16] дають можливість досліджувати вплив окремих чинників на контактну взаємодію. Вони розроблені та описані у роботах [17, 18]. 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 та описані у роботах [17, 18]. На їх основі забезпечується практична складова – можливість розроблення рекомендацій стосовно проектно-технологічних параметрів зміцнення елементів машин військового та цивільного призначення із підвищеними тактико-технічними і технічними характеристиками.

*Мета роботи* – теоретичне обґрунтування за-

собів підвищення до рівня, який відповідає та переважає світовий, технічних та тактико-технічних характеристик машин військового та цивільного призначення шляхом аналізу впливу на контактну взаємодію, міцність, ресурс та навантажувальну здатність дискретно-континуального зміцнення їх елементів.

**Загальні підходи до обґрунтування підвищення до рівня, який відповідає та переважає світовий, технічних та тактико-технічних характеристик машин військового та цивільного призначення шляхом аналізу впливу на контактну взаємодію, міцність, ресурс та навантажувальну здатність дискретно-континуального зміцнення їх елементів.** На основі комплексу досліджень та розробок [17, 18] розроблені теоретичні основи дискретно-континуальних методів зміцнення. Зокрема, отримала розвиток теорія узагальненого параметричного моделювання фізико-механічних процесів і станів у складних механічних системах у аспекті врахування варіативних проектно-технологічних засобів зміцнення елементів конструкцій машин військового та цивільного призначення. Це дає можливість варіювати проектно-технологічні рішення, у т.ч. – на мікрорівні, а контролювати ефекти – на нано- та макрорівні. У свою чергу, це створює можливість цілеспрямованого пошуку та обґрунтування проривних технічних і технологічних рішень стосовно об'єктів військової і цивільної техніки.

З точки зору охопту проблеми, що постала, здійснено формування концепції поєднання переваг та усунення недоліків методів дискретного та континуального зміцнення елементів машин військового та цивільного призначення шляхом обґрунтування ефективного методу дискретно-континуального зміцнення (ДКЗ). За тематикою досліджень здійснено попередній аналіз напружено-деформованого стану (НДС) та контактної взаємодії фрагментів двох тіл, оброблених методами корундування (перше тіло) та електроіскрового дискретного зміцнення (друге тіло) [17, 18].

Установлено, що у такій системі спостерігаються два типи ефектів. Перший полягає у перерозподілі зусиль контактної взаємодії між контактуючими елементами конструкцій на мікро- та макрорівнях. Це призводить до сприятливих ефектів з огляду на підвищення загальної міцності, оскільки навантаження передається на більш міцні елементи поверхневих шарів. Другий ефект полягає у переважно нерівномірній зміні мікрогеометричної форми контактуючих тіл: зношування більшою мірою проявляється у матриці, тобто основному матеріалі, менше – у зоні «островів» «архіпелагу» дискретного зміцнення.

Крім того, розроблені методи багатшарових покриттів деталей машин, вирощування корундового шару на алюмінієвих деталях, а також дискретного електроіскрового легування деталей конструкцій. Разом із тим не здійснене системне дослідження ефектів при дискретно-континуальному зміцненні машин військового та цивільного призначення. Для цього необхідно розробити відповідні математичні та чисельні моделі досліджуваних об'єктів, здійснити аналіз впливу фізико-механічних властивостей континуальних покриттів та зон дискретного зміц-

нення на контактну взаємодію та розробити рекомендації щодо проектно-технологічних параметрів відповідальних елементів машин військового та цивільного призначення.

### Варіаційна постановка задачі дослідження напружено-деформованого стану контактуючих дискретно-континуально зміцнених елементів

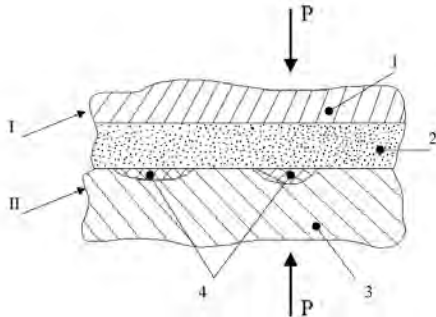


Рисунок 1 – Схема контактної взаємодії деталей:

*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 (4)

З однієї сторони у цій системі присутня деталь (основний матеріал – сталь, чавун), на поверхню якої нанесено методом електроіскрового зміцнення архіпелаг дискретно зміцнених зон. Між зоною дискретного зміцнення (ЗДЗ) та основним матеріалом деталі розміщена перехідна зона (див. рис. 1, 2). З іншої сторони у цій системі розташована деталь із алюмінієвого сплаву, покрита корундовим шаром ( $Al_2O_3$  у суміші різних фаз).

Властивості матеріалів ЗДЗ та корундового мікрошару залежать від режимів технологічного зміцнення (сила струму, тривалість операції, товщина шару, матеріал дискретного зміцнення тощо). Крім того, значення мають властивості основних матеріалів контактуючих тіл. Відштовхуючись від підходів узагальненого параметричного моделювання, усі ці чинники разом із іншими формують параметричний простір узагальнених параметрів  $p = \{p_1; p_2; \dots; p_N\}$ . Компоненти  $p_i$  у сукупності визначають конкретний об'єкт досліджень.

Характеристиками напружено-деформованого стану контактуючих тіл є вектор переміщень точок тіл та шарів із номерами  $s$   $u_i^{(s)}$ ,  $i = 1, 2, 3$ , а також відповідні компоненти тензорів деформацій  $\varepsilon_{ij}^{(s)}$ ,  $i, j = 1, 2, 3$  та напружень  $\sigma_{ij}^{(s)}$ ,  $i, j = 1, 2, 3$ . Поля переміщень, деформацій та напружень визначені у областях простору  $\Omega_s$ , точки якого ідентифікуються радіус-векторами  $\mathbf{r}$  із координатами  $(x_1, x_2, x_3)$ .

Для визначення напружено-деформованого стану контактуючих тіл пропонується два підходи. Перший базується на теорії варіаційних нерівностей і полягає у мінімізації функціоналу повної енергії системи контактуючих тіл:

**машин військового та цивільного призначення.** Для обґрунтування раціональних режимів дискретно-континуальних методів зміцнення елементів машин військового та цивільного призначення введено до розгляду представницьку комірку, яка на мікрорівні визначає властивості системи контактуючих тіл (рис. 1, 2) [17, 18].

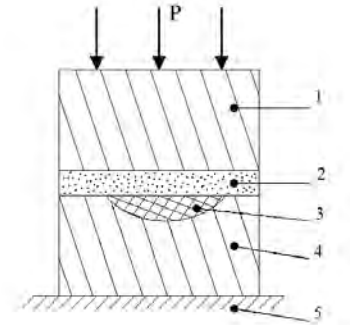


Рисунок 2 – Представницька комірка дискретно-континуально зміцнених конструкцій механічної системи:

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

$$J = \frac{1}{2} \sum_s \int_{(\Omega_s)} \sigma_{ij}^{(s)} \varepsilon_{ij}^{(s)} d\Omega_s - \sum_s \int_{(\Gamma_s)} f_i^{(s)} u_i^{(s)} d\Gamma_s \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $f^{(s)}$  – вектор поверхневих навантажень із компонентами  $f_i^{(s)}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;

$\Gamma_s$  – границі областей  $\Omega_s$ .

Тут

$$J = J(p, f). \quad (2)$$

Функціонал (1) мінімізується на множині

$$K : \{u_v^{(\varphi)} + u_v^{(\psi)} \leq \delta_{\varphi\psi}\} \quad (3)$$

де  $u_v^{(\varphi)}, u_v^{(\psi)}$  – нормальні переміщення точок поверхонь тіл із номерами  $\varphi, \psi$ ;

$\delta_{\varphi\psi}$  – зазор між цими тілами.

Відповідно, у ході мінімізації визначаються області контакту  $S_c^{(s)}$  та розподіли контактного тиску  $q^{(s)}$ . При цьому

$$S_c^{(s)} = S_c^{(s)}(p); \quad q^{(s)} = q^{(s)}(p); \quad u_j^{(s)} = u_j^{(s)}(p); \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij}^{(s)} = \varepsilon_{ij}^{(s)}(p); \quad \sigma_{ij}^{(s)} = \sigma_{ij}^{(s)}(p),$$

які визначаються у ході розв'язання задачі (1) із обмеженнями (3).

Другий підхід базується на принципі Кальєра:

$$\Phi(q) = \frac{1}{2} \sum_s \int_{S_c^{(s)}} q^{(s)} u_v^{(s)} dS + \sum_s \int_{S_c^{(s)}} (\Delta_s - h_s) dS \rightarrow \min, \quad (5)$$

де  $\Delta_s$  – зближення контактуючих тіл, які спряжені на поверхнях  $S_c^{(s)}$ ;

$h_s$  – початковий зазор уздовж нормалі до поверхні  $S_c^{(s)}$ .

У ході мінімізації (5) на множині невід’ємних розподілів контактного тиску

$$q^{(s)} \geq 0 \quad (6)$$

знаходиться дійсний їх розподіл, а також дійсні області контакту  $S_c^{(s)}$ .

Як і у попередньому випадку, оскільки  $\Phi = \Phi(p)$ , визначаються параметричні залежності, аналогічні залежностям (4).

Таким чином, обидва зазначених підходи дають можливість установити не тільки одиничні розподіли компонент напружено-деформованого стану за певних технологічних режимів, але й також здійснювати аналіз чутливості цих компонент напружено-деформованого стану до варіювання окремих складових  $p_i$ . Також можлива постановка задач обґрунтування такого набору параметрів  $p^*$ , який дає змогу досягти максимуму (мінімуму) заданої характеристики

$$p^* : H = H(p) \rightarrow \max(\min). \quad (7)$$

При цьому можуть бути природним чином задіяні чисельні методи скінченних та граничних елементів.

Отже, розроблений підхід є основою цілеспрямованого поліпшення технічних та тактико-технічних характеристик дискретно-континуального зміцнення деталей конструкцій машин військового та цивільного призначення.

Запропонований підхід може бути застосований до досліджень напружено-деформованого стану дискретно-континуального зміцнення деталей машинобудівних конструкцій різного типу.

**Результати розрахунків напружено-деформованого стану представницького осередку системи зміцнених тіл.** У рамках роботи було здійснено чисельне дослідження представницького осередку (комірки) з утвореними областями після здійснення дискретного зміцнення і корундування шляхом гальвано-плазмової обробки (ГПО). Моделювання представницького осередку дає можливість оцінити напружено-деформований стан і контактну взаємодію контактуючих тіл при варіюванні параметрами моделі.

Геометрична модель четверті комірки, що досліджується, наведена на рис. 3. Для кожної області геометричної моделі є відповідний набір

параметрів, який описує фізико-механічні властивості матеріалів.

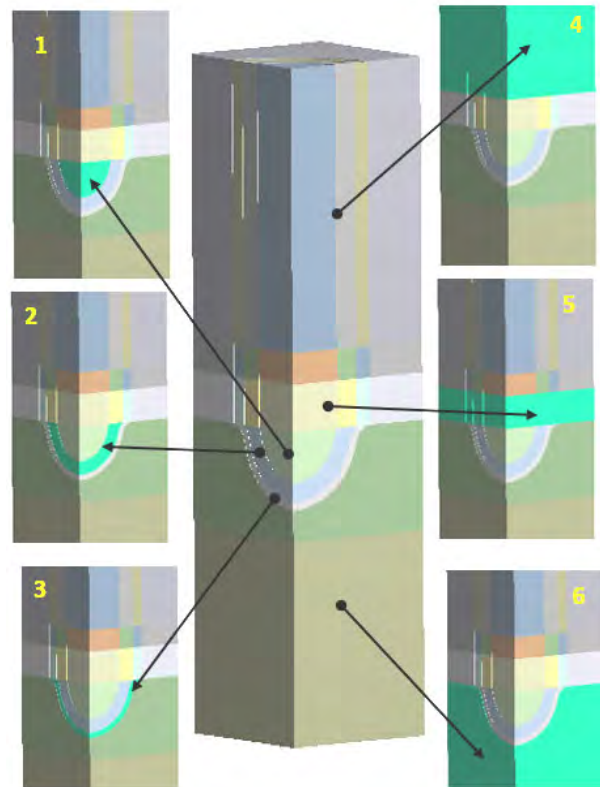


Рисунок 3 – Геометрична модель досліджуваної системи тіл та фізико-механічні властивості їхніх матеріалів:

- 1 – дискретно зміцнена область ( $E_1, \nu_1$ ),
- 2 – 1-й перехідний шар ( $E_2, \nu_2$ ),
- 3 – 2-й перехідний шар ( $E_3, \nu_3$ ),
- 4 – основний матеріал, сплав АК4 ( $E_4, \nu_4$ ),
- 5 – шар з корундованим покриттям ( $E_5, \nu_5$ ),
- 6 – основний матеріал, чавун ( $E_6, \nu_6$ )

Для цього дослідження було побудовано 8 розрахункових схем, відмінності полягали у варіюванні фізико-механічних властивостей матеріалу відповідної області після корундування. У межах здійсненого дослідження був введений параметр  $\gamma$  ( $\gamma = E_5/E_6$ ). Цей параметр визначався як відношення модуля пружності матеріалу області корундованого шару до модуля пружності основного матеріалу (чавун). У табл. 1 наведені модулі пружності матеріалів, використані у ході досліджень.

Побудована скінченно-елементна модель, яка представлена на рис. 4, налічувала близько 200 тис. елементів. На рис. 5 представлені навантаження, закріплення, а також властивості симетрії.

У процесі дослідження було побудовано контактну пару (без тертя) між елементами моделі: нижньою частиною, виконаною з чавуну з дискретно-зміцненою областю, і верхньою, виконаною з алюмінієвого сплаву АК4 з областю після ГПО. На рис. 6 наведена контактна пара.

У ході досліджень визначалися максимальні еквівалентні напруження, максимальні переміщення і максимальний контактний тиск для всіх розрахункових схем. Нижче на рис. 7–10 наведені

максимальні еквівалентні напруження для повної моделі і для шару з ГПО, переміщення і контактний тиск, відповідно.

За результатами здійснених досліджень були визначені напруження і переміщення уздовж обраної лінії контролю у вигляді графіків. На рис. 11 наведена лінія контролю, уздовж якої визначалися еквівалентні напруження і переміщення, на рис. 12, 13 – графіки з напруженнями і переміщеннями уздовж цієї лінії для всіх розрахункових схем (вісь абсцис – у безрозмірних величинах), а у табл. 2–4 – поля розподілів еквівалентних напружень у повних моделях і для шару після ГПО, а також контактний тиск для всіх розрахункових схем, відповідно.

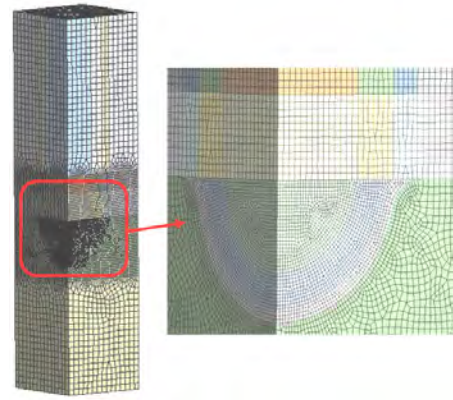


Рисунок 4 – Скінченно-елементна модель представницького осередку досліджуваної системи

Таблиця 1 – Модуль пружності розглянутих матеріалів контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл

Параметр	Од. вимір.	Розрахункові схеми							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$\gamma$		0,01	0,05	0,1	0,5	1	2,5	5	10
$E_1$	Па	$2,10 \cdot 10^{11}$							
$E_2$		$2,10 \cdot 10^{11}$							
$E_3$		$2,10 \cdot 10^{11}$							
$E_4$		$7,00 \cdot 10^{10}$							
$E_5$		$1,10 \cdot 10^9$	$5,50 \cdot 10^9$	$1,10 \cdot 10^{10}$	$5,50 \cdot 10^{10}$	$1,10 \cdot 10^{11}$	$2,75 \cdot 10^{11}$	$5,50 \cdot 10^{11}$	$1,01 \cdot 10^{12}$
$E_6$		$1,10 \cdot 10^{11}$							

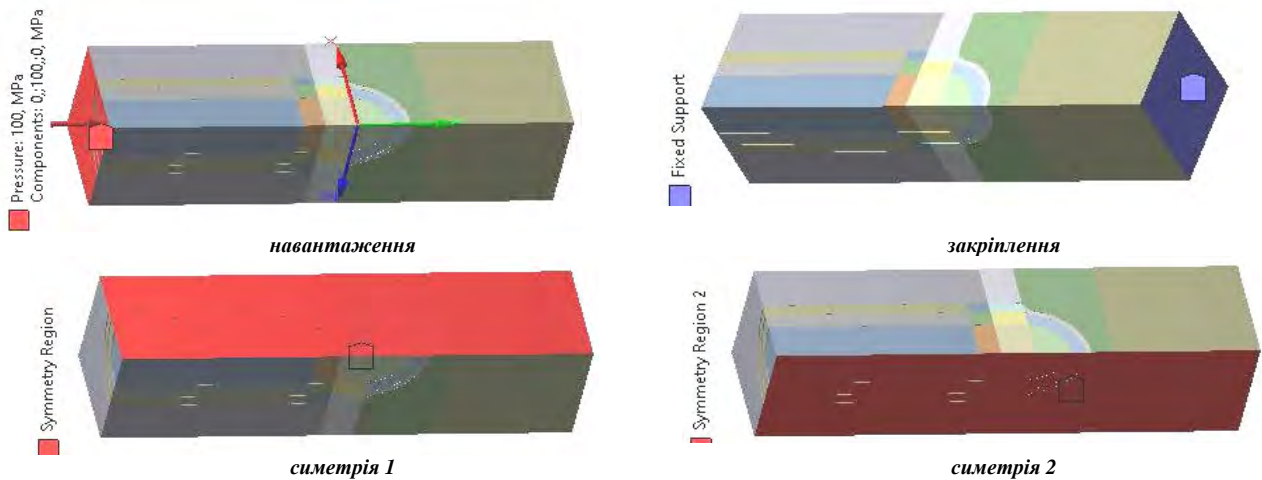


Рисунок 5 – Зовнішні навантаження та граничні умови

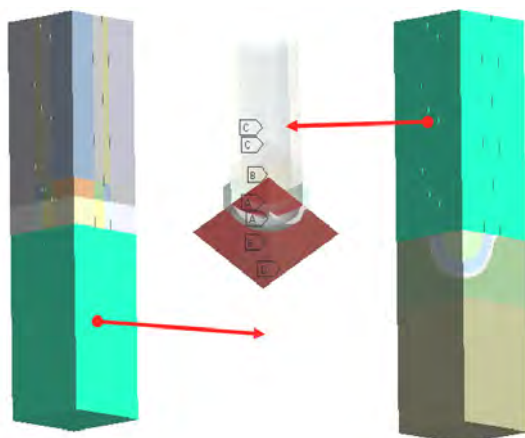


Рисунок 6 – Контактна пара

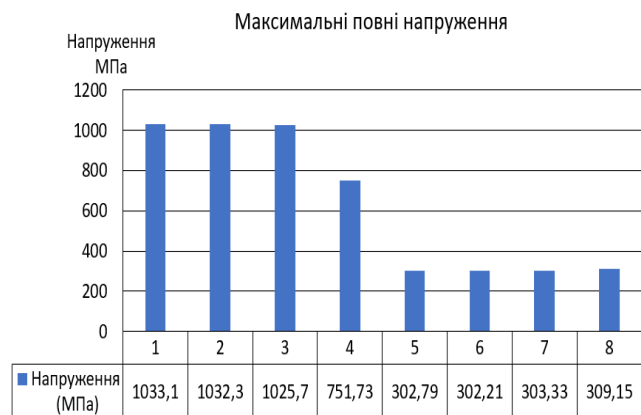


Рисунок 7 – Максимальні еквівалентні напруження (див. табл. 1)



Рисунок 8 – Максимальні еквівалентні напруження (шар з ГПО) (див. табл. 1)



Рисунок 9 – Максимальні повні переміщення (див. табл. 1)



Рисунок 10 – Максимальний контактний тиск (див. табл. 1)

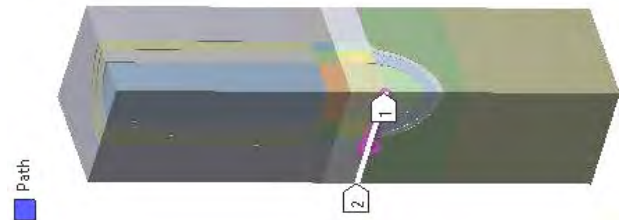


Рисунок 11 – Лінія (шлях) для контролю розподілів компонент характеристик напружено-деформованого стану

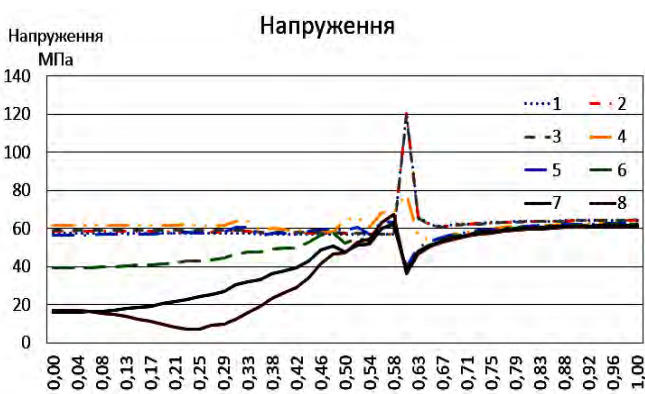


Рисунок 12 – Напруження уздовж лінії контролю (див. рис. 11 і варіанти табл. 1)

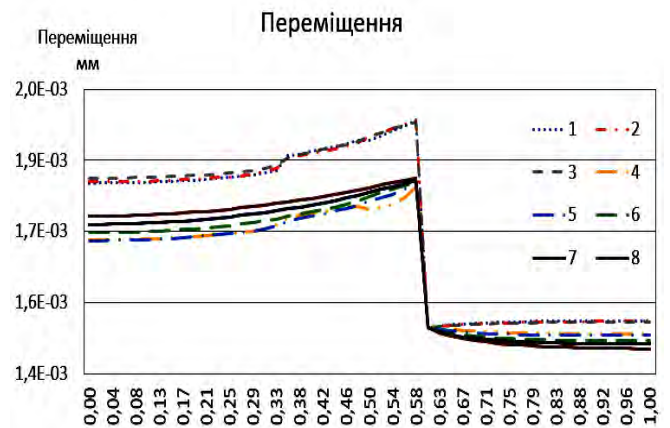

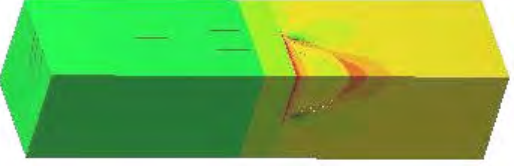

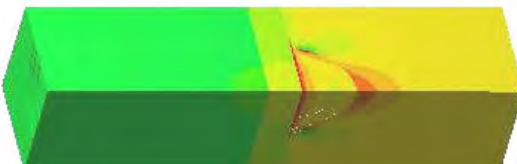

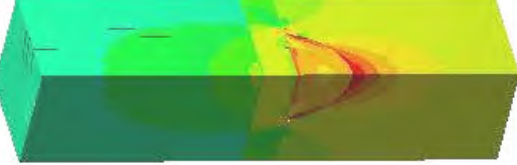

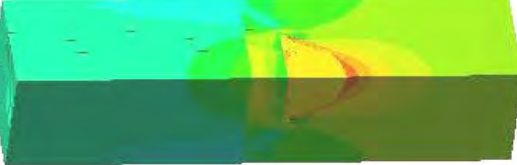

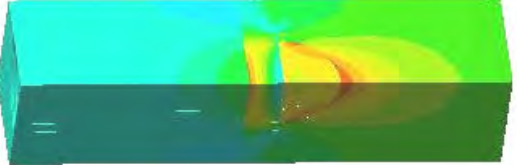

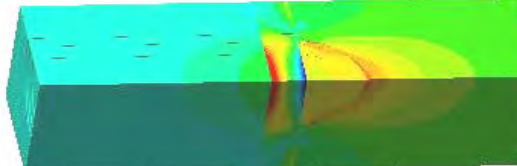

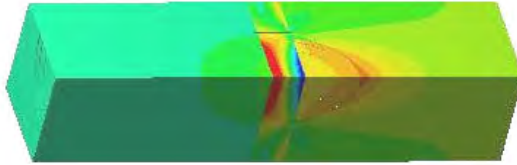


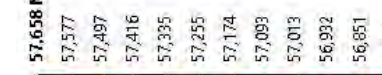
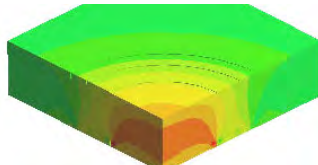
Рисунок 13 – Переміщення уздовж лінії контролю (див. рис. 11 і варіанти табл. 1)

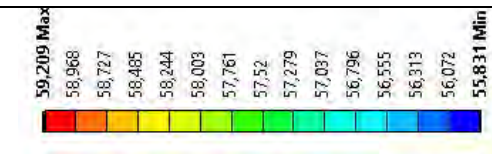
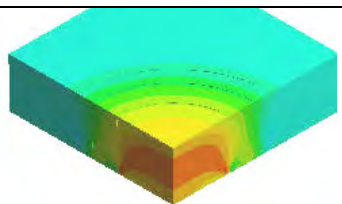
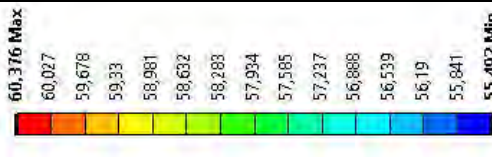
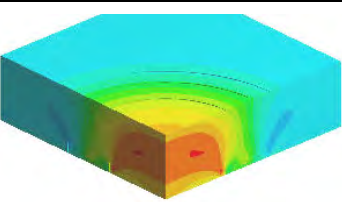
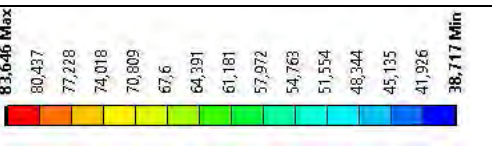
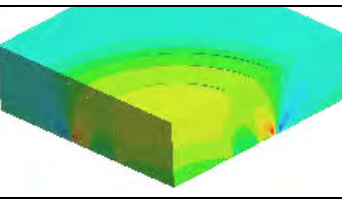
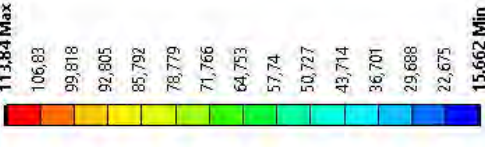
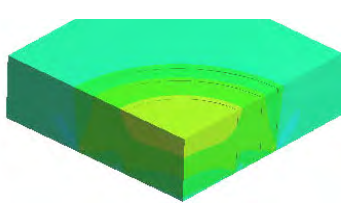
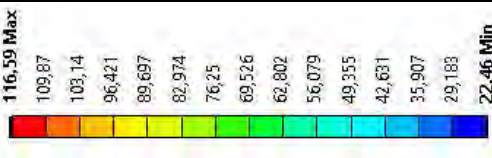
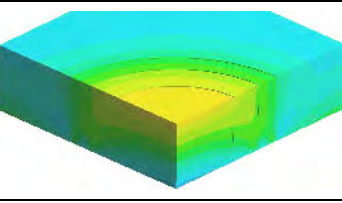

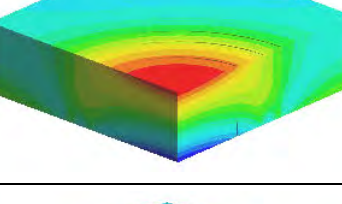
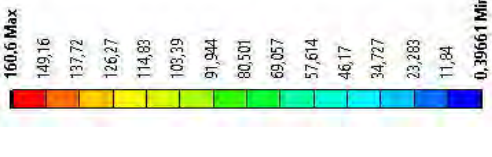
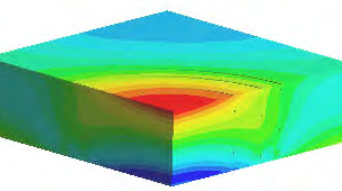
Таблиця 2 – Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа (повна модель)

№ розрахункової схеми	Шкала	Розподіл еквівалентних напружень, МПа
1	<p>1033,1 МПа 80,425 74,935 69,445 63,955 58,464 52,974 47,484 41,994 36,504 31,014 25,523 20,033 14,543 9,0528 МПа</p>	

№ розрахункової схеми	Шкала	Розподіл еквівалентних напружень, МПа
2	<p>10323.3 Max</p>  <p>82,151 76,489 70,828 65,166 59,505 53,843 48,182 42,52 36,859 31,197 25,536 19,874 14,213 8,5514 Min</p>	
3	<p>10255.7 Max</p>  <p>82,18 76,487 70,795 65,102 59,41 53,717 48,024 42,332 36,639 30,947 25,254 19,562 13,869 8,1764 Min</p>	
4	<p>751.73 Max</p>  <p>86,563 80,821 75,08 69,338 63,597 57,855 52,114 46,372 40,631 34,889 29,148 23,406 17,665 11,923 Min</p>	
5	<p>302.79 Max</p>  <p>94,431 88,371 82,312 76,253 70,194 64,135 58,076 52,017 45,958 39,899 33,84 27,78 21,721 15,662 Min</p>	
6	<p>302.21 Max</p>  <p>97,346 91,586 85,825 80,065 74,304 68,544 62,783 57,023 51,262 45,502 39,741 33,981 28,22 22,46 Min</p>	
7	<p>303.33 Max</p>  <p>102,27 95,636 88,998 82,361 75,724 69,086 62,449 55,812 49,174 42,537 35,9 29,262 22,625 15,988 Min</p>	
8	<p>309.15 Max</p>  <p>107,24 99,02 90,802 82,588 74,364 66,146 57,927 49,708 41,49 33,271 25,053 16,834 8,6152 0,39661 Min</p>	

Таблиця 3 – Поля розподілу еквівалентних напружень, МПа (шар з ГПО)

№ розрахункової схеми	Шкала	Розподіл еквівалентних напружень, МПа
1	<p>57.658 Max</p>  <p>57,577 57,497 57,416 57,335 57,255 57,174 57,093 57,013 56,932 56,851 56,77 56,69 56,609 56,528 Min</p>	

№ розрахункової схеми	Шкала	Розподіл еквівалентних напружень, МПа
2	 <p>59,209 Max 58,968 58,727 58,485 58,244 58,003 57,761 57,52 57,279 57,037 56,796 56,555 56,313 56,072 55,831 Min</p>	
3	 <p>60,376 Max 60,027 59,678 59,33 58,981 58,632 58,283 57,934 57,585 57,237 56,888 56,539 56,19 55,841 55,492 Min</p>	
4	 <p>83,646 Max 80,437 77,228 74,018 70,809 67,6 64,391 61,181 57,972 54,763 51,554 48,344 45,135 41,926 38,717 Min</p>	
5	 <p>113,84 Max 106,83 99,818 92,805 85,792 78,779 71,766 64,753 57,74 50,727 43,714 36,701 29,688 22,675 15,662 Min</p>	
6	 <p>116,59 Max 109,87 103,14 96,421 89,697 82,974 76,25 69,526 62,802 56,079 49,355 42,631 35,907 29,183 22,46 Min</p>	
7	 <p>121,67 Max 114,12 106,57 99,025 91,476 83,927 76,378 68,83 61,281 53,732 46,183 38,634 31,085 23,537 15,988 Min</p>	
8	 <p>160,6 Max 149,16 137,72 126,27 114,83 103,39 91,944 80,501 69,057 57,614 46,17 34,727 23,283 11,84 0,39561 Min</p>	

**Висновки.** Розроблений загальний підхід до обґрунтування раціональних техніко-технологічних рішень для дискретно-континуального зміцнення елементів машин військового та вивізного призначення дає підстави для наступних висновків:

1. Метод дискретно-континуального зміцнення робочих поверхонь елементів машин військового та цивільного призначення має проривний характер та

дає можливість різкого збільшення ресурсу, міцності та навантажувальної здатності цих об'єктів.

2. Розроблений метод та підхід дають можливість дослідження впливу мікроструктури на нано- та макроефекти, які сприяють підвищенню технічних та тактико-технічних характеристик машин військового та цивільного призначення.

Таблиця 4 – Поля розподілу контактної тиску, МПа

№ розрахункової схеми	Розподіл контактної тиску, МПа	№ розрахункової схеми	Розподіл контактної тиску, МПа
1	<p>102,3 Max</p> <p>98,449 Min</p>	2	<p>104,08 Max</p> <p>98,096 Min</p>
3	<p>106,49 Max</p> <p>97,88 Min</p>	4	<p>157,88 Max</p> <p>67,777 Min</p>
5	<p>132,87 Max</p> <p>72,891 Min</p>	6	<p>144,06 Max</p> <p>70,644 Min</p>
7	<p>152,3 Max</p> <p>69,13 Min</p>	8	<p>157,13 Max</p> <p>67,987 Min</p>

3. Як свідчить аналіз результатів досліджень, при дискретно-континуальному зміцненні елементів контактуючих деталей конструкцій, так саме як і при дискретному зміцненні, спостерігається сприятливий характер розподілу контактної тиску. Це полягає у тому, що, по-перше, контактний тиск зосереджується у зонах дискретного зміцнення, а також має понижений рівень у області незміцненого основного матеріалу. По-друге, профіль поверхонь контактуючих тіл у актуальному стані має нерівномірний характер: більш тісне зближення – у зонах дискретного зміцнення, і більш слабке – поза нею. Такі особливості призводять до поліпшення умов роботи деталей за критеріями міцності, тертя та зношуваності при контактній рухомій взаємодії.

4. Розроблений узагальнений параметричний підхід, моделі та методи досліджень напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених тіл дають змогу ставити та розв'язувати задачі визначення технологічних режимів цього процесу за тими чи іншими критеріями. Це становить напрямки подальших досліджень на створеній методологічній базі.

#### Список літератури

1. 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, 3-4, pp. 161–174.
2. 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. T.118, 6, pp. 608–620.
3. Subbotina V., O.Sobol. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials.* 2020. Vol. 14, Vup. 6, pp. 247–250.
4. Субботіна В.В., Білозеров В.В., Соболю О.В. Електрична міцність оксидних покриттів, сформованих методом мікродугового оксидування. *Персп. техн. та прил.*, 2020,16, pp. 134–140.
5. Nemyrovskiy Ya., E.Posvyatenko... Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching. *DSMIE* 2019, pp. 238–247.
6. Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim. High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview. *Advanced Engineering Materials.* 2017. V. 20.
7. I.A. Ovid'ko, R.Z. Valiev, Y.T. Zhu. Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials. *Progress in Materials Science.* 2018. Vol. 94, pp. 462–540.
8. K.Ming, X.Bi, J.Wang. Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures. *International Journal of Plasticity*, 2019, pp. 1–14.
9. Yastrebov, V. A., Anciaux, G. & Molinari, J. F. On the accurate computation of the true contact area in mechanical contact of random rough surfaces. *Tribol. Int.* 2017, vol. 114, pp. 161–171.
10. Papangelo, A., Hoffmann, N., & Ciavarella, M. (2017). Load-separation curves for the contact of self-affine rough surfaces. *Scientific reports*, 7(1), 6900.
11. Zhao J., Vollebregt E., Oosterlee C. Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach. *Math. Modelling and Analysis.* 2016, vol. 21(1), pp. 119–141.
12. Li, Q. and Popov, V. L. Non-adhesive Contacts With Different Surface Tension Inside and Outside the Contact Area. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2020, vol. 6, p. 63.
13. Li Q., Pohrt R., Lyashenko I. A., Popov V. L. (2019). Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proc. Inst. Mech. Eng. J.* 234, pp. 73–83.
14. MorteX method for contact along real and embedded surfaces: coupling X-FEM with the Mortar method B. R. Akula, J. Vignollet, V. A. Yastrebov. *Mechanics of Solids*. 2017, vol. 52, pp. 435–443.
15. P. Wriggers, W.T. Rust, B. D. Reddy. A virtual element method for contact. *Computational Mechanics*, 2016, vol. 58, pp. 1039–1050.
16. V.L.Popov, L.Voll, S.Kusche, Q.Li, S. V. Rozhkova. Generalized master curve procedure for elastomer friction taking into account dependencies on velocity, temperature and normal force. *Tribology International*, April 2018, vol. 120, pp. 376–380.
17. Ткачук Н. А., Кравченко С. А., Пылев В. А., Парсаданов И. В., Грабовский А. В., Веретельник О. В. Дискретно-континуальное упрочнение контактирующих элементов конструкций: концепция, математическое и численное моделирование. *Наука и техника (Беларусь)*. 2019. Т. 18, № 3. С. 240–247.
18. Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей : монография / Н. А. Ткачук [и др.] ; Нац. техн. ун-т "Харьков. политех. ин-т". Харьков : Щедра садиба плюс, 2015. 259 с.

#### References (transliterated)

1. 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, 3-4, 161–174.
2. 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. T.118, 6, 608–620.
3. V.Subbotina, O.Sobol. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials.* 2020. Vol. 14, Vup. 6, pp. 247–250.
4. Subbotina V.V., Bilozero V.V., Sobol' O.V. Elektrichna micnist' oksy'dny'x pokry'ttiv, sformovany'x metodom mikrodogovogo oksy`duvannya. *Persp. texn. ta pry'l.* 2020, 16, pp. 134–140.
5. Ya. Nemyrovskiy, E.Posvyatenko... Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching. *DSMIE* 2019, pp. 238–247.
6. Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim. High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications – An Overview. *Advanced Engineering Materials.* 2017. V. 20.
7. I.A. Ovid'ko, R.Z. Valiev, Y.T. Zhu. Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials. *Progress in Materials Science.* 2018, vol.94, pp. 462–540.
8. K.Ming, X.Bi, J.Wang. Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures. *International Journal of Plasticity*, 2019, pp. 1–14.
9. Yastrebov, V. A., Anciaux, G. & Molinari, J. F. On the accurate computation of the true contact area in mechanical contact of random rough surfaces. *Tribol. Int.* 2017. Vol. 114, pp. 161–171.
10. Papangelo, A., Hoffmann, N., & Ciavarella, M. (2017). Load-separation curves for the contact of self-affine rough surfaces. *Scientific reports*, 7(1), 6900.
11. Zhao J., Vollebregt E., Oosterlee C. Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach. *Math. Modelling and Analysis.* 2016, vol. 21(1), pp. 119–141.
12. Li, Q. and Popov, V. L. Non-adhesive Contacts With Different Surface Tension Inside and Outside the Contact Area. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2020, vol. 6, pp. 63.
13. Li Q., Pohrt R., Lyashenko I. A., Popov V. L. (2019). Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proc. Inst. Mech. Eng. J* 234, pp. 73–83.
14. MorteX method for contact along real and embedded surfaces: coupling X-FEM with the Mortar method B. R. Akula, J. Vignollet, V. A. Yastrebov. *Mechanics of Solids*. 2017, vol. 52, pp. 435–443.
15. P. Wriggers, W.T. Rust, B. D. Reddy. A virtual element method for contact. *Computational Mechanics*, 2016, vol. 58, pp. 1039–1050.
16. V.L.Popov, L.Voll, S.Kusche, Q.Li, S. V. Rozhkova. Generalized master curve procedure for elastomer friction taking into account dependencies on velocity, temperature and normal force. *Tribology International*, April 2018, vol. 120, pp. 376–380.
17. Tkachuk N. A., Kravchenko S. A., Pylev V. A., Parsadanov I. V., Grabovskij A. V., Veretel'nik O. V.. Diskretno-kontinual'noe uprochnenie kontaktirujushhih jelementov konstrukcij: koncepcija, ma-tematicheskoe i chislennoe modelirovanie. *Nauka i tehnika (Belarus')*. 2019. T. 18, no. 3. pp. 240–247.

18. Kontinualnaya i diskretno-kontinualnaya modifikatsiya poverhnostey detaley : monografiya / N. A. Tkachuk [i dr.] tehn. un-t "Khar'kov. polytehn. yn-t". Har'kov : Shhedra sadyba pljus, 2015. 259 p.

Надійшла (received) 21.02.2021

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

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

**Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola A.)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@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: <http://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

**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 «Інформаційні технології та системи колісних і гусеничних машин імені О.О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org

**Гречка Ірина Павлівна (Гречка Ирина Павловна, Hrechka Iryna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4907-9170>; e-mail: girinap7@gmail.com

**Васильєв Антон Юрійович (Васильев Антон Юрьевич, Vasiliev Anton)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8106-0950>; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

**Льозний Олег Сергійович (Лезный Олег Сергеевич, Lozny Oleg)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент гр. МІТ87Б(ТМ), м. Харків, Україна; e-mail: s1708@tmm-sapr.org

**Чала Юлія Сергіївна (Чалая Юлия Сергеевна, Chala Yuliia)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка гр. МІТ87Б(ТМ), м. Харків, Україна; e-mail: s1713@tmm-sapr.org