

ENSURING RELIABLE OPERATION OF THE FORCED INTERNAL COMBUSTION ENGINE PISTON

A. P. Marchenko, V. O. Pylyov, O. U. Linkov, S. V. Lykov

The paper deals with the issues of reliability of piston materials in the process of increasing engine power. It is precisely the increase in the liter power of engines while ensuring environmental and economic requirements that is today one of the main areas of work in engine manufacturing. Studies have shown that material creep has significantly affects on the reliability of internal combustion engine parts. The most thermally loaded engine element is a piston. The main critical areas for it can be identified: the edge of the combustion chamber, the area of the piston rings and the piston skirt. The appearance of seizures on the piston skirt is sometimes observed even during the engine initial tests at the engine power increasing. Thus, we can speak about the relevance of the problem of identifying the reasons for reaching the critical state of the piston material. Based on these data, it becomes possible to develop measures to ensure the reliable operation of the piston. Among the most common materials for the manufacture of pistons are aluminum alloys AL25 and AK4. The chemical composition of these alloys varies considerably. The study obtained coefficients for calculating the creep rate for these materials. The identification of the calculation of the creep deformation of aluminum alloys at different stress levels, for different temperatures is carried out. The upper boundary of the region of model adequacy in terms of temperatures and stresses is determined. The creep rate of aluminum alloys is analyzed at different temperatures. In the conclusions, a comparison of the piston materials is made and the advantages of the AK4 alloy in comparison with the AL25 alloy, which are coming out when the engine power is increased, are indicated. The direction of further research is also indicated, which is associated with the analysis of the deformation of the considered materials at the first stage of creep.

Key words: internal combustion engine; power increase; temperature state; piston; piston material; tension; deformation; creep; modeling.

УДК 539.3

DOI: 10.20998/0419-8719.2021.2.07

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

КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНО ЗМІЩЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

У роботі описані дослідження напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміщених деталей двигунів внутрішнього згорання. Розроблено параметричну модель мікросередку, який містить комірку із двох частин. Перша частина моделює фрагмент алюмінієвої деталі із поверхневим корундовим шаром. Друга частина – це фрагмент чавунної деталі із зоною дискретного зміщення зі сталі. Варіюються: модуль пружності матеріалу корундового шару та форма зони дискретного зміщення. Установлені залежності міцнісних та жорсткісних характеристик досліджуваної системи від варіюваних параметрів. Вони є основою для обґрунтування раціональних режимів технології дискретно-континуального зміщення деталей двигунів внутрішнього згорання.

У ході досліджень установлено, що раніше визначені для дискретного зміщення ефекти сприятливого перерозподілу контактної взаємодії між деталями зберігаються і для дискретно-континуального зміщення. Визначені характерні залежності характеристик напружено-деформованого стану елементів дискретно-континуально зміщених деталей від варіюваних властивостей поверхневих шарів континуально зміщеної деталі, з одного боку, та форми зони дискретного зміщення, – з іншого. Це дає можливість визначити чутливість характеристик до цілеспрямованого або випадкового варіювання цих факторів. Установлена також доцільність постановки та розв'язання оптимізаційних задач визначення таких режимів технологічної операції дискретно-континуально зміщення, які забезпечують підвищення характеристик міцності, довговічності, коефіцієнта корисної дії двигунів внутрішнього згорання та інших машин, агрегатів і вузлів, що містять зміщені таким способом деталі.

Розроблений підхід, моделі та методи досліджень у подальшому будуть застосовані до досліджень напружено-деформованого стану контактуючих дискретно-континуально зміщених деталей конструкцій задля підвищення технічних і тактико-технічних характеристик виробів машинобудівних підприємств.

Ключові слова: дискретне зміщення; континуальне зміщення; дискретно-континуальне зміщення; двигуни внутрішнього згорання; міцність; напружено-деформований стан.

Вступ

Забезпечення міцності та довговічності деталей конструкцій, у т.ч. двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), є однією із провідних тенденцій сучасного машинобудування. У роботі [1], зокрема, відмічається, що серед сучасних методів зміщення (цементация, азотування, бомбардування низькоенергетичними іонами, епіламінування тощо) [2, 3], виділяється, серед іншого, серія, заснована на електроіскровому легуванні [4-6]. Також привертають увагу

методи дискретного і континуального зміщення [1].

У той же час традиційні та запропоновані методи зміщення не вичерпують усіх потенційних можливостей підвищення трибомеханічних характеристик деталей, що працюють у парі за високих навантажень. Це змушує розробляти нові методи зміщення, а також здійснювати супутні дослідження міцності, тертя і зношування.

Відповідно, запропоновано варіант дискретно-континуального зміщення контактуючих елементів

машинобудівних конструкцій. Одна з деталей зміцнюється дискретно, а інша – континуально. Отримана пара поєднує позитивні якості двох різнотипних методів зміцнення [1].

У роботі [1] описано дослідження напружено-деформованого стану представницької комірки дискретно-континуально зміцнених контактуючих деталей. Разом із тим не досліджено вплив на напружено-деформований стан властивостей корундового шару на алюмінієвій деталі після гальвано-плазмової обробки (ГПО), з одного боку, та форми зони дискретного зміцнення на деталі із чавуну, – з іншого. Це становить зміст цієї статті.

Аналіз методів дослідження напружено-деформованого стану контактуючих деталей

Дослідження напружено-деформованого стану контактуючих пружних тіл натеper здійснюється із залученням різних моделей та методів [7, 8]. Цим питанням, зокрема, присвячені роботи сучасних дослідників [9-16].

Незважаючи на широкий спектр чинників, що враховуються при аналізі контактної взаємодії, натеper розроблені методи та моделі не охоплюють одночасно такі важливі чинники, як реальна мікрота макрогеометрія, а також відхилення реальних властивостей матеріалів від номінальних. Крім того, відсутні загальні напрямки розв'язання задач синтезу раціональних технічних рішень.

З іншого боку, стосовно властивостей матеріалів та поверхневих шарів деталей, із них виготовлених, існує широкий спектр досліджень [17-21]. Разом із тим відсутні підходи, методи та моделі, що враховують чинники мікро- та макрогеометрії у їх поєднанні. У результаті 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 у роботах [1, 22]. Тому доцільно розвинути започатковані розробки задля визначення закономірностей впливу проектно-технологічних параметрів дискретно-континуального зміцнення на міцність, навантажувальну здатність та ресурс контактуючих елементів ДВЗ та інших агрегатів і вузлів машин військового та цивільного призначення.

Мета роботи – дослідження впливу на контактну взаємодію, міцність, ресурс та навантажувальну здатність дискретно-континуального зміцнення елементів двигунів, агрегатів та вузлів машин різного призначення.

Модель досліджуваної системи фрагментів контактуючих тіл

Для дослідження напружено-деформованого

стану контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл побудовано представницький осередок (рис. 1, 2).

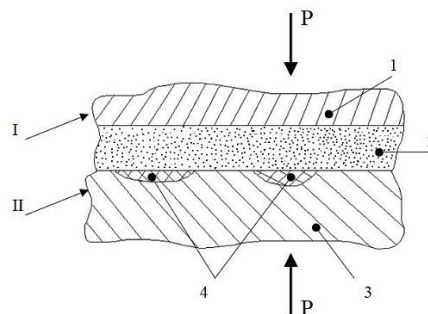


Рис. 1. Схема контактної взаємодії деталей: I – деталь з алюмінієвого сплаву, зміцнена шляхом гальвано-плазмового перетворення поверхні зі створенням корундового шару (2), II – деталь (основний матеріал – сталь, чавун (3)), зміцнена методом дискретного зміцнення (дискретно-зміцнена зона (4))

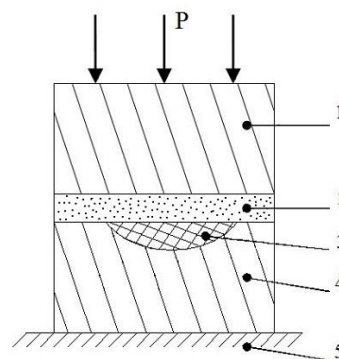


Рис. 2. Схема моделі представницької ґратки механічної системи: 1 – алюмінієвий сплав, 2 – шар Al_2O_3 , 3 – дискретно-зміцнена зона, 4 – основний матеріал, 5 – основа (жорстка основа)

При завданні механічних властивостей корундового шару враховувався вплив двох факторів: модуль пружності корундового шару 2 (рис. 2) та форма дискретно-зміцненої зони (ДЗЗ). Залежно від режимів технологічного процесу ці величини можуть змінюватися у досить широких межах. Для розрахункових досліджень використовуваним матеріалам присвоїли модулі пружності $E_2 = 3,45 \cdot 10^{10} \div 3,45 \cdot 10^{11}$ Па, інші матеріали мали властивості $E_1 = 7 \cdot 10^{10}$ Па, $E_3 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па (високолегована сталь), $E_4 = 1,1 \cdot 10^{11}$ Па (чавун). Основа моделювалася як жорстке закріплення.

Дискретно-зміцнена зона (ДЗЗ) моделювалася як просторове тіло із плоским дном (еліпс) та куполом у вигляді еліпсоїда. Його форма визначається формою основи (рис. 3).

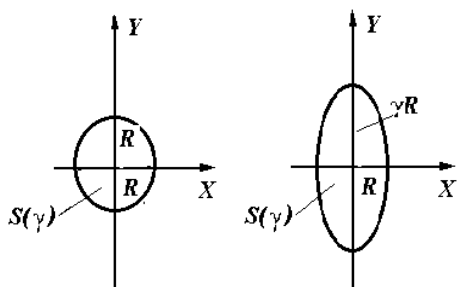


Рис. 3. Форма основи ДЗЗ (переріз області із площиною OXY : $R = 5$ мм; γR – більша напіввісь овала (еліпса)

Геометрична модель комірки представлена на рис. 4. Для кожної області геометричної моделі є відповідний набір параметрів, який описує фізико-механічні властивості матеріалів.

Для цього дослідження було побудовано 5 розрахункових груп, які налічували 8 розрахункових схем, відповідно. Відмінності у рамках однієї групи полягали у варіюванні фізико-механічних властивостей матеріалу відповідної області після корундування. Відмінності між групами полягали у розмірах дискретно зміщеного осередка, так для першої групи представляє 1/8 частина сфери із радіусом 0,5 мм, а для п'ятої розрахункової групи – це 1/8 частина еліпсоїда обертання із напівосями 0,5 мм та 0,91 мм. На рис. 5 наведені геометричні моделі для усіх розрахункових груп.

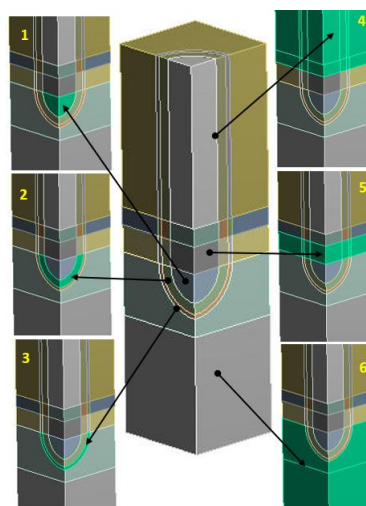


Рис. 4. Геометрична модель представницької комірки дискретно-континуально зміщених деталей: 1 – дискретно зміщена область ($E1, v1$), 2 – 1-й перехідний шар ($E2, v2$), 3 – 2-й перехідний шар ($E3, v3$), 4 – основний матеріал, сплав АК4 ($E4, v4$), 5 – шар з корундованим покриттям ($E5, v5$), 6 – основний матеріал, чавун ($E6, v6$)

Зокрема, введено до розгляду у відношення напівосей овала (рис. 3). Цей параметр γ змінюється у діапазоні $\gamma \in [1; 1,82]$. Варіюванням γ досягається зміна форми ДЗЗ.

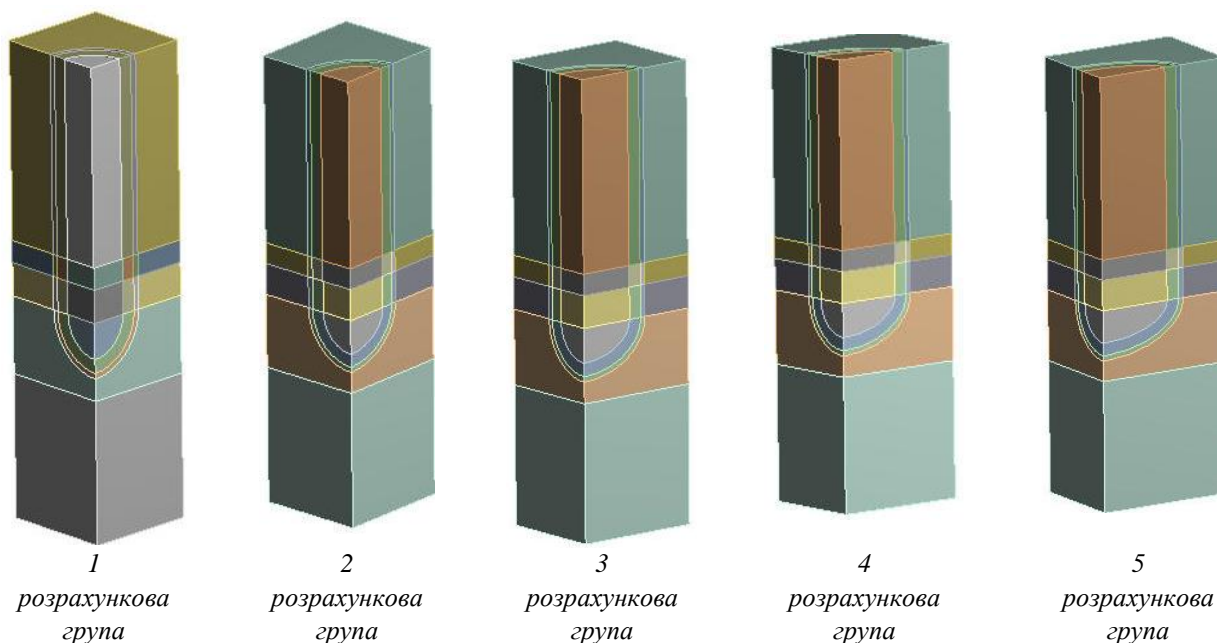


Рис. 5. Геометричні моделі для розрахункових груп

Також введено до розгляду параметр α ($\alpha = E_5 / E_6$). Цей параметр визначався як відношення модуля пружності області після операції корундування до модуля пружності основного матеріалу – чавуну. У таблиці 1 наведені модулі пружності матеріалів. Таким чином, безрозмірні параметри

α, γ формують параметричний простір, кожній точці якого відповідає конкретна реалізація (варіант) моделі досліджуваного об'єкта. Варіюванням цих параметрів досягається варіювання фізико-механічних та геометричних властивостей компонентів досліджуваної системи тіл.

Таблиця 1. Модуль пружності розглянутих матеріалів, Па

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

Побудована скінченно-елементна модель, яка наведена на рис. 6, налічувала близько 140 тис. елементів. На рис. 7 показані навантаження, закріплення, а також умови симетрії.

У процесі дослідження було визначено контактна пара (без тертя) між елементами моделі: нижньою частиною виконаної з чавуну із дискретно-зміцненою областю, і верхньою, виконаної з алюмінієвого сплаву АК4 з областю після ГПО. На рис. 8 наведена контактна пара.

Результати розв'язання задач аналізу напружено-деформованого стану системи контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл.

У ході досліджень варіювалися параметри α та γ у діапазонах [0,01; 10] та [1; 1,82]. При цьому контролювалися такі величини: максимальна інтенсивність напружень σ_e (еквівалентні напруження за Мізесом, МПа), максимальні повні переміщення w (мм) та максимальний контактний тиск q (МПа).

Нижче на рис. 9–16 наведені максимальні еквівалентні напруження для повної моделі, для шару з ГПО, для шару з дискретно зміцненим осередком, переміщення і контактний тиск, відповідно для окремих розрахункових груп та вибірково – для деяких випадків.

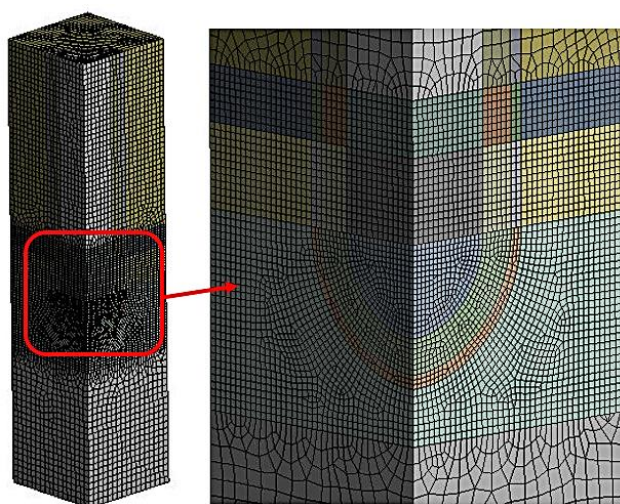


Рис. 6. Скінченно-елементна модель

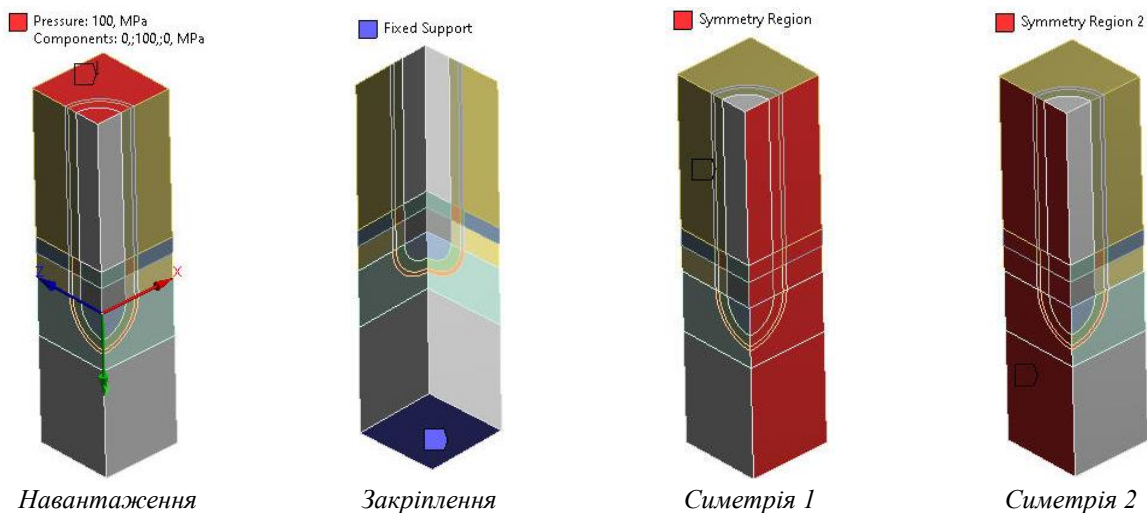


Рис. 7. Зовнішні навантаження та умови симетрії

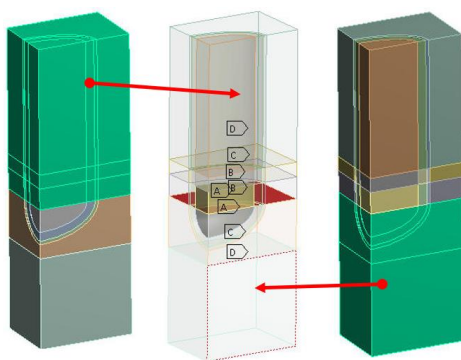


Рис. 8. Контактна пара



Рис. 9. Максимальні еквівалентні напруження (МПа), 1 розрахункова група



Рис. 10. Максимальні еквівалентні напруження (МПа), 3 розрахункова група



Рис. 11. Максимальні еквівалентні напруження (МПа), 4 розрахункова група

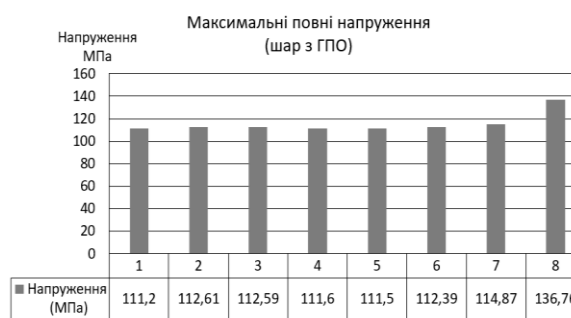


Рис. 12. Максимальні еквівалентні напруження (шар з ГПО) (МПа), 1 розрахункова група

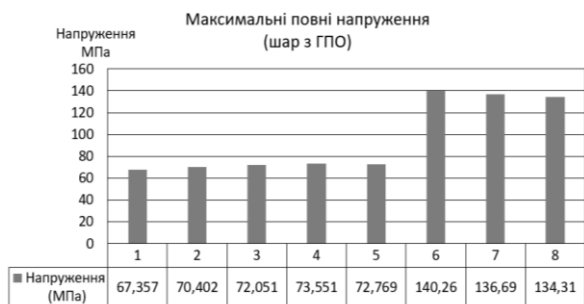


Рис. 13. Максимальні еквівалентні напруження (шар з ГПО) (МПа), 4 розрахункова група



Рис. 14. Максимальні еквівалентні напруження (МПа) (шар з дискретно зміцненим осередком), 1 розрахункова група



Рис. 15. Максимальні повні переміщення (мм) 1-5 розрахункові групи

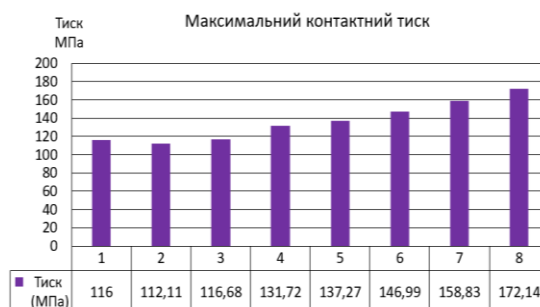


Рис. 16. Максимальний контактний тиск (МПа), 1 розрахункова група

Як ілюстрацію на рис. 17–20 наведені характерні розподіли еквівалентних (за Мізесом) напружень σ_e , переміщень w та контактного тиску q для

окремих груп та розрахункових схем.

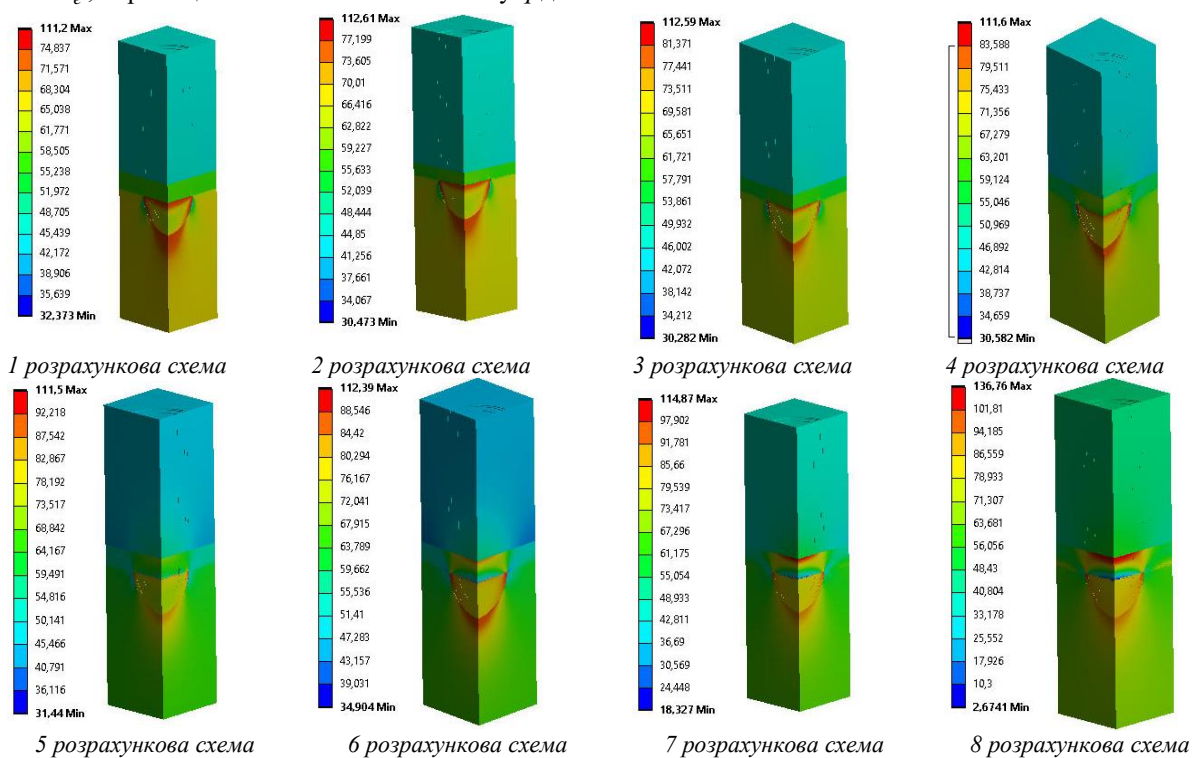


Рис. 17. Поля розподілу еквівалентних напружень (повна модель) (МПа), 1 розрахункова група

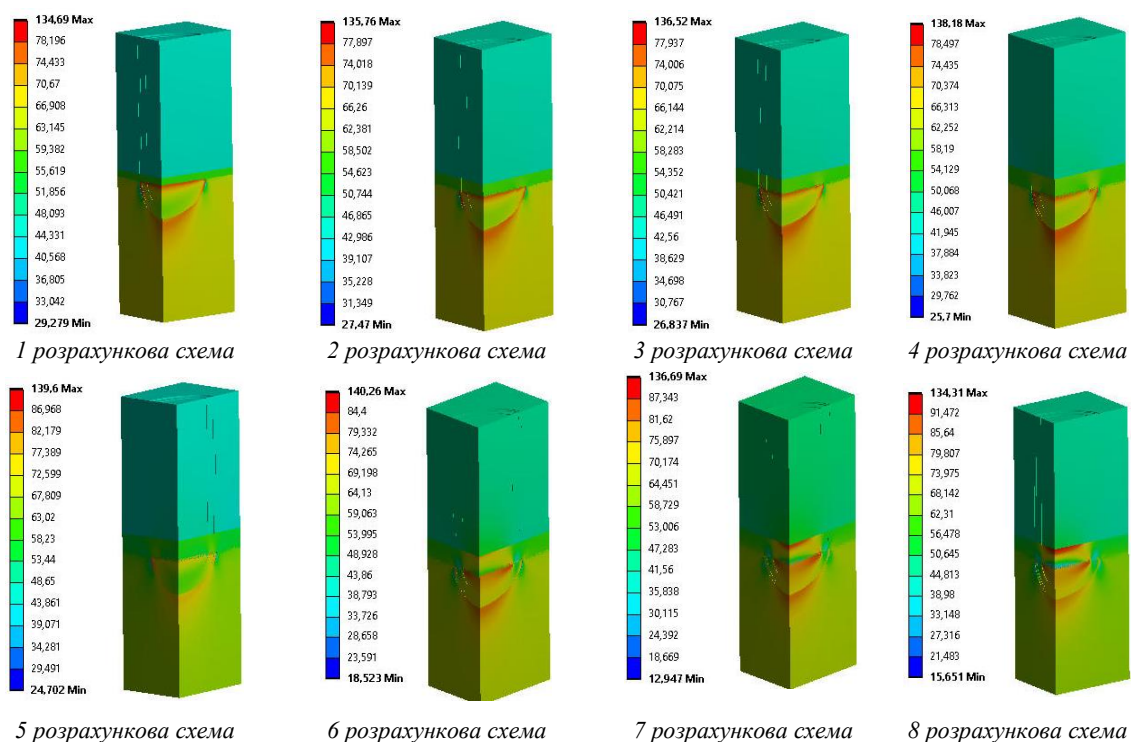


Рис.18. Поля розподілу еквівалентних напружень (повна модель) (МПа), 4 розрахункова група

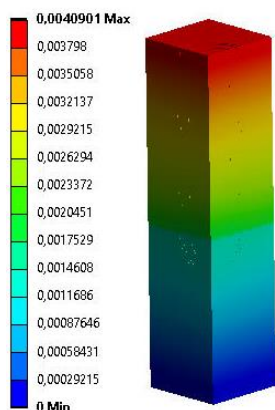


Рис. 19. Поля розподілу повних переміщень, мм

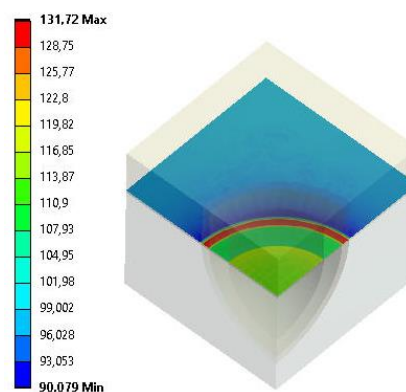


Рис. 20. Поля розподілу контактної тиску, МПа

Видно, що розподіли σ_e , w та q видозмінюються при варіюванні параметрів α , γ . Проте загальний вигляд цих розподілів зберігається. По-перше, для розподілів переміщень характерна наявність у актуальному (деформованому) стані (під дією тиску $p = 100$ МПа на верхню площину алюмінієвої деталі) «пагорба» із вершиною у центрі області контакту. Цей «пагорб» свідчить про набуття початково плоскої поверхні пагорбистого нанопрофілю. Цей ефект названий « Δ – ефектом» [1, 22], він зберігається за варіювання α , γ . По-друге, контактний тиск q між контактуючими деталями має ви-

гляд купола із максимумом у центрі області контакту та мінімумом – на периферії. У свою чергу, це призводить до відповідного перерозподілу напружень σ_e . Це характерно для так званого « σ – ефекту» [1, 22]. Він, як свідчать результати досліджень, теж зберігається за варіювання α , γ .

Отже, отримані результати свідчать про збереження характеру напружено-деформованого стану при контактній взаємодії дискретно-континуально зміцнених тіл, а також установлених раніше [1, 22] « Δ –» та « σ – ефекту».

Разом із тим, як видно із наведених результатів,

за збереження якісного характеру розподілів σ_e , w та q відбуваються кількісні їх зміни. Тобто, змінюється інтенсивність прояву « $\Delta \rightarrow$ » та « $\sigma -$ ефекту». Про це свідчать залежності інтегральних характеристик від параметрів α , γ (тобто розрахункові групи та схеми), подані на рис. 9–16.

Аналіз отриманих результатів свідчить про можливість впливу на розподіл контактного тиску між дискретно-континуально зміцненими деталями ДВЗ та інших машинобудівних конструкцій за рахунок варіювання параметрів α , γ (а, відповідно, і режимів технологічної операції зміцнення). При цьому змінюються і еквівалентні напруження, і повні переміщення. Тим самим забезпечується досягнення того чи іншого бажаного результату. Таким чином, обґрунтовано можливість та доцільність постановки та розв'язання оптимізаційної задачі за певними критеріями, наприклад, за рівнем еквівалентних напружень, повних переміщень або контактного тиску.

Перелічені критерії не вичерпують усього різноманіття задач, що виникають на практиці при проектуванні ДВЗ та інших машинобудівних конструкцій. Для прикладу, для пари «шийка колінчастого вала (КВ) ДВЗ – вкладиш підшипника ковзання» важливо досягти зниження зношуваності або втрат потужності на подолання сил тертя у двигуні.

Перша із вимог на пряму впливає на довговічність у спряженні «шийка КВ – вкладиш підшипника». У свою чергу, зростаючий рівень навантажень у цьому спряженні призводить до зростання зношування, тертя і напружень. Отже, запускаються прогресуюча спіраль «навантаження – контакт – тертя – зношування» [1], що спричиняє погіршення показників міцності, довговічності та ККД.

Друга із означених вище вимог на пряму впливає на ККД двигуна або іншої машини, агрегату або механізму, у складі яких є дискретно-континуально зміцнені деталі.

Інший приклад – контактна взаємодія поршня із гільзою циліндра двигуна внутрішнього згорання. У цьому випадку важливим аспектом є обґрунтування профіля бічної поверхні поршня за критеріями зниження тертя, зношування та підвищення задиростійкості.

Крім перелічених, можна навести й інші реальні та потенціальні приклади контактної взаємодії дискретно, континуально або дискретно-континуально зміцнених деталей конструкцій: елементи гідроредукторів для танкових трансмісій та нагнітачів повітря танкових двигунів, стовпи танкових гармат, торсіонні вали підвісок бронетехніки тощо. Для ко-

жного із перелічених випадків можливо сформулювати оптимізаційну задачу під заданий критерій чи обмеження. Разом із тим розроблена модель аналізу напружено-деформованого стану із урахуванням контактної взаємодії, що лежить в основі розв'язання задач синтезу, може бути застосована у будь-якому випадку. Для варіантів тільки дискретного або тільки континуального варіантів зміцнення варіативними можуть бути фізико-механічні властивості поверхневого шару (шорсткості) або хвилястість верхньої обробленої деталі. Це – аналоги мікрровластивостей досліджених вище шарів із ГПО та зон дискретного зміцнення, відповідно.

Висновки

1. У роботі розроблено підхід до аналізу напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених деталей двигунів внутрішнього згорання та інших конструкцій із урахуванням контактної взаємодії. Цей підхід відрізняється від відомих тим, що у розробленій моделі враховується чинники, які раніше не розглядалися як варіативні. Це дає можливість цілеспрямованого пошуку раціональних проектно-технологічних рішень при проектуванні, технологічній підготовці виробництва та виготовленні вузлів, що містять контактуючі зміцнені деталі за певними критеріями.

2. Побудована параметрична модель містить фрагменти двох деталей, одна із яких зміцнена дискретно, а інша – континуально. Цим самим забезпечується, на відміну від попередніх моделей, варіативність властивостей досліджуваної системи тіл, а, отже, і можливість здійснення багатоваріативного аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії.

3. У ході дослідження встановлено, що, по-перше, раніше визначені для дискретно-континуального зміцнення ефекти сприятливого перерозподілу контактної взаємодії між деталями зберігаються за варіювання властивостей поверхневого шару континуально зміцненої деталі та форми зони дискретного зміцнення – іншої деталі.

4. Визначені характерні залежності характеристик напружено-деформованого стану елементів дискретно-континуально зміцнених деталей від варіюваних властивостей поверхневих шарів континуально зміцненої деталі, з одного боку, та форми зони дискретного зміцнення, – з іншого. Це дає можливість визначати чутливість характеристик до цілеспрямованого або випадкового варіювання цих факторів.

5. Установлено також доцільність постановки та розв'язання оптимізаційних задач визначення та

ких режимів технологічної операції дискретно-континуально зміцнення, які забезпечують підвищення характеристик міцності, довговічності, ККД двигунів внутрішнього згоряння та інших машин, агрегатів і вузлів, що містять зміцнені таким способом деталі.

Розроблений підхід, моделі та методи досліджень у подальшому будуть застосовані до досліджень напружено-деформованого стану контактуючих дискретно-континуально зміцнених деталей конструкцій задля підвищення технічних і тактико-технічних характеристик виробів машинобудівних підприємств.

Список літератури:

1. Ткачук Н. А. Дискретно-континуальное упрочнение контактирующих элементов конструкций: концепция, математическое и численное моделирование / Н. А. Ткачук [и др.] // Наука и техника. – 2019. – № 3. – С. 240–247. 2. Дьяченко, С. С. Влияние генезиса модифицированного поверхностного слоя на конструктивную прочность изделий / С. С. Дьяченко, И. В. Пономаренко // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118, № 6. – С. 608–620. 3. Haruyoshi, Kubo. Technical Developments and Recent Trends in Crankshaft Materials [Electronic Resource] / Haruyoshi Kubo, Hiroyuki Mori // Journal of the Japan Institute of Marine Engineering. – 2005. – Vol. 40, Is. 2. – P. 248–253. https://doi.org/10.5988/jime.40.2_248. 4. Young Sang Ko [et al.], 2006, "Application of High Strength Microalloyed Steel in a New Automotive Crankshaft", available at: <https://www.forging.org/uploaded/content/media/298-Ko.pdf>. 5. Solov'ev, R. Y. Metal-Carbothermal Methods of Reducing the Degree of Oxidation of Dispersed Metal in Electric ARC Metallizing / R. Y. Solov'ev, P. A. Vorob'yev, N. N. Litovchenko // Welding International. – 2013. – Vol. 27, No 5. – P. 423–427. 6. Ivanov, V. I. Hardening of Objects and the Increase of their Lifetime by the Electrospark Method: the Object Classification and the Specific Features of the Technology / V. I. Ivanov, F. K. Burumkulov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2010. – Vol. 46, No 5. – P. 416–423. 7. Johnson, K. L. Contact Mechanics / K.L. Johnson. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1987. – 464 p. 8. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamental/ O.C. Zienkiewicz., R.L. Taylor, J.Z. Zhu// Butterworth-Heinemann, 2013. – 756 P. ISBN: 1856176339. 9. 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. 10. 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. 11. Barber J.R. Contact Mechanics/ J.R. Barber//Springer International Publishin, 2018. – 585 p. 12. Zhao J. Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach/ J. Zhao, E. Vollebregt, C. Oosterlee//Math. Modelling and Analysis. – 2016. – Vol. 21(1). – P. 119–141. 13. Li Q. Non-adhesive Contacts With Different Surface Tension Inside and Outside the Contact Area/ Q Li, V. L. Popov// Frontiers in Mechanical Engineering. – 2020. – V. 6. – P. 63. 14. Li Q. Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-spac/ Q. Li, R. Pohrt, I. A. Lyashenko, V. L. Popov// Proc. Inst.Mech. Eng. –

2019. – J 234. P. 73–83. 15. Wriggers P. A virtual element method for contact/ P. Wriggers, W.T. Rust, B. D. Reddy// Computational Mechanics. – 2016. – V. 5. – P. 1039–1050. 16. Popov V.L. Generalized master curve procedure for elastomer friction taking into account dependencies on velocity, temperature and normal force/ V.L. Popov, L. Voll, S. Kusche, Q. Li, S. V. Rozhkova// Tribology International. – April 2018. – V. 120. – P. 376–380. 17. 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. – P. 161–174. 18. 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. – V. 118, 6. – P. 608–620. 19. Subbotina V. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy/ V. Subbotina, O.Sobol// Machines. Technologies. Materials.– 2020. – Vol. 14, Vup. 6. – P. 247–250. 20. Субботіна В.В. Електрична міцність оксидних покриттів, сформованих методом мікродугового оксидування/ В.В. Субботіна, В.В. Білозеров, О.В. Соболю // Перспективні технології та прилади. – 2020. – № 16. – С. 134–140. 21. Мартуныак R. Friction and Multi-Field Problems in Sliding Contacts/R. Martynyak, E. Torskaya, Y. Xu// Frontiers in Mechanical Engineering, 2020, v. 6, p.76. 22. Ткачук Н.А. Континуальна і дискретно-континуальна модифікація поверхностей деталей: монографія / Н.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко, С.А. Кравченко, В.Г. Гончаров, В.В. Шпаковский, Н.Л. Белов, А.И. Шейко, А.К. Олейник, И. В. Пономаренко. Харьков: «Планета-Принт », 2018. 259 с.

Bibliography (transliterated):

1. Tkachuk, N. A. [i dr.] (2019), "Discrete and Continual Strengthening of Contacting Structural Elements: Conception, Mathematical and Numerical Modeling Diskretno-kontinual'noe uprochnenie kontaktirujushhih jelementov konstrukcij: koncepcija, matematicheskoe i chislennoe modelirovanie", Science and Technics ["Diskretno-kontinual'noe uprochnenie kontaktirujushhih jelementov konstrukcij: koncepcija, matematicheskoe i chislennoe modelirovanie", Nauka i tehnika], No. 3, pp. 240–247. 2. Dyachenko, S. S., Ponomarenko, I. V. (2017) "Influence of the genesis of the modified surface layer on the structural strength of products", Physics of Metals and Metallography ["Vlijanie genезisa modifіcіrovannogo poverhnostnogo sloja na konstruktivnuju prochnost' izdelij", Fizika metallov i metallovedenij], Vol. 118, No 6, pp. 608–620. 3. Haruyoshi, Kubo, Hiroyuki, Mori (2005), "Technical Developments and Recent Trends in Crankshaft Materials", Journal of the Japan Institute of Marine Engineering, 40 (2), pp. 248–253. https://doi.org/10.5988/jime.40.2_248. 4. Young, Sang Ko, Jin, Woo Park, Hyounsoo, Park, Jong, Dae Lim (2006), "Application of High Strength Microalloyed Steel in a New Automotive Crankshaft" Available at: <https://www.forging.org/uploaded/content/media/298-Ko.pdf>. 5. Solov'ev, R. Y., Vorob'yev, P. A., Litovchenko, N. N. (2013), "Metal-Carbothermal Methods of Reducing the Degree of Oxidation of Dispersed Metal in Electric ARC Metallizing", Welding International, 27 (5), pp. 423–427. <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.715930>. 6. Ivanov, V. I., Burumkulov, F. K. (2010), "Hardening of Objects and the Increase of their Lifetime by the Electrospark Method: the Object Classification and the Specific Features of the Technology", Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 46 (5), pp. 416–423. <https://doi.org/10.3103/s1068375510050042>. 7. Johnson, K. L. (1987), "Contact Mechanics", Cambridge, UK: Cambridge University Press, 464 p. 8. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Zhu, J.Z. (2013), "The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals", Butterworth-Heinemann, 756 p. ISBN: 1856176339. 9. 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. 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. Barber, J.R. (2018), "Contact Mechanics", Springer International Publishing, 585 p. 12. Zhao, J., Vollebregt, E., Oosterlee C. (2016), "Extending the BEM for elastic contact problems beyond the half-space approach", *Math. Modelling and Analysis*, Vol. 21(1), pp. 119–141. 13. Li, Q., Popov, V. L. (2020), "Non-adhesive Contacts With Different Surface Tension Inside and Outside the Contact Area", *Frontiers in Mechanical Engineering*, Vol. 6, p. 63. 14. 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. 15. Wriggers, P., Rust, W.T., Reddy, B. D. (2016), "A virtual element method for contac", *Computational Mechanics*, V. 58, pp. 1039–1050. 16. Popov, V.L., Voll, L., Kusche, S., Li, Q., Rozhkova, S. V. (2018), "Generalized master curve procedure for elastomer friction taking into account dependencies on velocity, temperature and normal force", *Tribology International*, V. 120, pp. 376–380. 17. 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. 18. 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. 19. 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. 20. Subbotina, V., Bilozero, V.V., Sobol, O. (2020), "Electrical strength of oxide coatings formed by the method of microarc oxidation", *Advanced technologies and devices ["Elektrychna miznist' oksy'dny'x pokry'ttiv, sformovany'x metodom mikrodogovogo oksy'duvannya", Perspektivni tehnologiyi ta pry'lyady]", No. 16, pp. 134–140. 21. Martynyak, R., Torskaya, E., Xu, Y (2020), "Friction and Multi-Field Problems in Sliding Contacts", *Frontiers in Mechanical Engineering*, v. 6, p. 76. 22. Tkachuk, N.A., D'yachenko, S.S., Posvjatenko, 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"]*, Kharkov: «Planeta-Print», 259 p.*

Надійшла до редакції 29.06.2021 р.

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.

Кравченко Сергій Олександрович – доктор техн. наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>; e-mail: dvskhpi2016@gmail.com.

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

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

Веретельник Олег Вікторович – канд. техн. наук, 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: andrej8383@gmail.com.

Куценко Сергій Володимирович – аспірант (PhD Student) кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: skutsenko@tmm-sapr.org.

Клочков Ілля Євгенович – молодший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин» Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: s008@tmm-sapr.org.

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

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНО УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Н.А. Ткачук, С.А. Кравченко, А.В. Грабовский, Н.Н. Ткачук, О.В. Веретельник, С.В. Куценко, И.Е. Клочков, М.С. Саверская

В работе описаны исследования напряженно-деформированного состояния дискретно-континуально упрочненных деталей двигателей внутреннего сгорания. Разработана параметрическая модель микросреды, содержащей ячейку из двух частей. Первая часть моделирует фрагмент алюминиевой детали с поверхностным корундовым слоем. Вторая часть - это фрагмент чугунной детали с зоной дискретного упрочнения из стали. Варьируются: модуль упругости материала корундового слоя и форма зоны дискретного упрочнения. Установлены зависимости прочностных и жесткостных характеристик исследуемой системы от варьируемых параметров. Они являются основой для обоснования рациональных режимов технологии дискретно-континуального упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания.

В ходе исследований установлено, что, ранее определенные для дискретного упрочнения эффекты благоприятного перераспределения контактного взаимодействия между деталями сохраняются и для дискретно-континуального упрочнения. Определены характерные зависимости характеристик напряженно-деформированного состояния элементов дискретно-континуально упрочненных деталей от варьируемых свойств поверхностных слоев континуально упрочненной детали, с одной стороны, и формы зоны дискретного упрочнения, - с другой. Это дает возможность определять чувствительность характеристик к целенаправленному или случайному варьированию этих факторов. Установлена также целесо-

образность постановки и решения оптимизационных задач определения таких режимов технологической операции дискретно-континуально упрочнения, обеспечивающих повышение прочностных характеристик, долговечности, коэффициента полезного действия двигателей внутреннего сгорания и других машин, агрегатов и узлов, содержащих упрочненные таким способом детали.

Разработанный подход, модели и методы исследований в дальнейшем будут применены к исследованиям напряженно-деформированного состояния контактирующих дискретно-континуально упрочненных деталей конструкций для повышения технических и тактико-технических характеристик изделий машиностроительных предприятий.

Ключевые слова: дискретное упрочнение; континуальное упрочнение; дискретно-континуальное упрочнение; двигатели внутреннего сгорания; прочность, напряженно-деформированное состояние.

CONTACT INTERACTION OF DISCRETE-CONTINUALLY STRENGTHENED PARTS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Tkachuk M. A., Kravchenko S. O., Grabovskiy A. V., Tkachuk M. M., Veretelnik O. V., Kutsenko S. V., Klochkov I. E., Saverska M. S.

Studies of the stress-strain state of discrete-continuously strengthening parts of internal combustion engines are described in the paper. A parametric model of a microcell containing a two-part cell has been developed. The first part simulates a fragment of an aluminum part with a surface corundum layer. The second part is a fragment of a cast iron part with a zone of discrete strengthening of steel. Vary: modulus of elasticity of the corundum layer material and the shape of the discrete hardening zone. The dependences of the strength and stiffness characteristics of the studied system on the varied parameters are established. They are the basis for substantiation of rational modes of technology of discrete-continuous strengthening of parts of internal combustion engines.

In the course of research, it was found that previously determined for discrete strengthening, the effects of a favourable redistribution of contact interaction between parts are preserved for discrete-continuous strengthening. The characteristic dependences of the features of the stress-strain state of the elements of discrete-continuously strengthening parts on the varied properties of the surface layers of the continuously strengthened part, on the one hand, and the shape of the discrete strengthening zone, on the other, are determined. This makes it possible to determine the sensitivity of the characteristics to purposeful or random variation of these factors. It is also expedient to set and solve optimization problems to determine such modes of technological operation of discrete-continuous strengthening, which increase the characteristics of strength, durability, efficiency of internal combustion engines and other machines, units and assemblies containing such strengthened parts.

The developed approach, models and research methods will be further applied to studies of the stress-strain state of contacting discrete-continuously strengthened parts of structures to improve the technical and tactical and technical characteristics of products of machine-building enterprises.

Keywords: discrete strengthening; continuous strengthening; discrete-continuous strengthening; internal combustion engines; strength; stress-strain state.