

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-27>

УДК 621.787.4

ДЗЮРА ВОЛОДИМИР

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-1801-2419>e-mail: volodymyrdzyura@gmail.com**ДЖИВАК ТАРАС**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0009-0008-9170-2126>e-mail: tdzhyvak@gmail.com**КИРИК СЕРГІЙ**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0009-0002-6649-7649>e-mail: kyryk_sergii@ukr.net**ПРОЕКТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНЯХ ШАТУННИХ ВКЛАДИШІВ**

У статті розглянуто проектування спеціалізованого інструменту для формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх робочих поверхнях шатунних вкладишів двигунів внутрішнього згоряння. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення трибологічних характеристик деталей вузлів тертя, оскільки регулярні мікрорельєфи здатні покращувати утримання мастильного матеріалу, підвищувати маслоємність поверхні та зменшувати інтенсивність зношування.

У роботі обґрунтовано конструкцію інструменту поверхневого пластичного деформування з деформувальними елементами у вигляді кульок, призначеного для формування канавок регулярного мікрорельєфу на внутрішній поверхні шатунних вкладишів автомобіля Volvo V50 1.6 HDI при їх обробці в обоймі. Визначено основні геометричні параметри процесу формування мікрорельєфу, встановлено кількість та розташування деформувальних елементів інструменту, а також показано вплив діаметра кульок, їх виступу та величини заглиблення на ширину і глибину канавок. Кут нахилу канавок визначається величиною осової подачі інструменту.

Проведено розмірний аналіз конструкції інструменту методом повної взаємозамінності шляхом розв'язання зворотної задачі розмірного ланцюга. На основі виконаних розрахунків визначено номінальні розміри та поля допусків замикаючої ланки інструменту з урахуванням пружного та пружно-пластичного деформування матеріалу поверхневого шару.

Запропонована конструкція інструменту передбачає можливість регулювання виступу деформувальних елементів, що забезпечує стабільне формування параметрів регулярного мікрорельєфу. Використання розробленого інструменту дозволяє формувати поверхні з оптимальною відносною площею мікрорельєфу, підвищувати маслоємність і експлуатаційну надійність шатунних вкладишів двигунів внутрішнього згоряння.

Ключові слова: регулярні мікрорельєфи, шатунні вкладиші, маслоємність, розмірний аналіз, робоча поверхня, деформувальний елемент, інструмент

DZYURA VOLODYMYR, DZHYVAK TARAS, KYRYK SERGI

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

DESIGN OF A TOOL FOR FORMING REGULAR MICRORELIEFS ON THE WORKING SURFACES OF CONNECTING ROD INSERTS

The article considers the design of a specialized tool for forming regular microreliefs on the inner working surfaces of connecting rod inserts of internal combustion engines. The relevance of the study is determined by the need to improve the tribological characteristics of friction units, since regular microreliefs can enhance lubricant retention, increase the oil capacity of the surface, and reduce wear intensity. The paper substantiates the design of a surface plastic deformation tool equipped with deforming elements in the form of balls, intended for forming grooves of a regular microrelief on the inner surface of connecting rod inserts of a Volvo V50 1.6 HDI engine during their machining in a holder. The main geometric parameters of the microrelief formation process are determined, the number and arrangement of the deforming elements of the tool are established, and the influence of the ball diameter, their protrusion, and the indentation depth on the width and depth of the grooves is analyzed. The inclination angle of the grooves is determined by the axial feed of the tool.

A dimensional analysis of the tool design was carried out using the method of complete interchangeability by solving the inverse problem of the dimensional chain. Based on the performed calculations, the nominal dimensions and tolerance fields of the closing link of the tool were determined, taking into account the elastic and elastic-plastic deformation of the surface layer material. The proposed tool design provides the possibility of adjusting the protrusion of the deforming elements, which ensures stable formation of the parameters of the regular microrelief. The use of the developed tool makes it possible to form surfaces with an optimal relative area of the microrelief, thereby increasing the oil capacity and operational reliability of connecting rod inserts in internal combustion engines.

Keywords: regular microreliefs, connecting rod inserts, oil capacity, dimensional analysis, working surface, deforming element, tool.

Стаття надійшла до редакції / Received 04.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Дзюра Володимир, Дживак Тарас, Кирик Сергій

Постановка проблеми у загальному вигляді**та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Сучасне машинобудування дедалі частіше спирається на концепцію функціональних поверхонь, властивості яких визначаються не лише матеріалом і класом шорсткості, а й цілеспрямовано сформованою мікрогеометрією. Регулярні мікрорельєфи, тобто періодичні мікроструктури заданої форми, кроку та глибини,

розглядаються як один із найефективніших інструментів керування трибологічними, гідродинамічними, контактними та експлуатаційними характеристиками деталей. Такі мікрорельєфи здатні стабілізувати режим мащення, підвищувати зносостійкість, зменшувати коефіцієнт тертя, покращувати ущільнення, утримання мастильного матеріалу, а також формувати потрібні адгезійні й оптичні властивості поверхні. У результаті мікротекстурування переходить із категорії «фінішної обробки для покращення шорсткості» у площину інженерії поверхні, де мікрорельєф виступає керованим конструктивно-технологічним параметром.

Поряд із зростанням вимог до функціональності поверхонь посилюються й вимоги до відтворюваності та керованості процесів формування регулярних мікрорельєфів. У промислових умовах критичними стають не лише досягнення заданих параметрів рельєфу, а й їхня стабільність у серії, чутливість до зносу інструмента, зміни жорсткості технологічної системи, коливань режимів, властивостей матеріалу заготовки та умов мащення/охолодження. Саме тому ключовим елементом забезпечення якості мікротекстурованих поверхонь є інструмент, який безпосередньо реалізує геометричне відтворення мікрорельєфу у матеріалі деталі. Інструмент у цьому контексті слід розглядати не як допоміжний засіб, а як ланку технологічного ланцюга, функція якого це формування профілю поверхні на мікрорівні, де будь-яка похибка профілю, биття, мікрівібрації чи локальний знос трансформуються у систематичну похибку періодичності, глибини та форми елементів рельєфу.

Відомі технологічні підходи [1, 2, 3, 4, 5] до отримання регулярних мікроструктур включають прецизійне різання, накатування, пластичне деформування (зокрема алмазне вигладжування та мікропластичне профілювання), штампування/тиснення, а також комбіновані процеси з керованою кінематикою чи вібраційним збудженням. Незважаючи на різноманіття методів, їх об'єднує спільна проблема: пряма залежність геометрії сформованого мікрорельєфу від параметрів інструмента і динаміки контакту в зоні обробки. На практиці це проявляється у складності перенесення лабораторних результатів у серійне виробництво, обмеженнях продуктивності, нестабільності параметрів рельєфу при зміні матеріалів та режимів, а також у зростанні вимог до точності налаштування і діагностики процесу. Відтак актуальним стає науково обгрунтоване проектування інструментів, яке поєднує геометричний синтез робочого профілю, вибір матеріалів і покриттів, забезпечення жорсткісно-демпфувальних характеристик, теплової стабільності, зносостійкості та відтворюваності мікропрофілю протягом ресурсу.

Додаткову складність становить те, що регулярний мікрорельєф є багатопараметричною структурою. Окрім очевидних характеристик таких як крок та глибина мікроелементів, істотними є форма профілю, радіуси заокруглень, заповнення площі, орієнтація (анізотропія), ступінь перекриття слідів, локальна деформація матеріалу та стан поверхневого шару після обробки. У реальних контактах тертя та мащення саме поєднання геометричних параметрів з фізико-механічним станом поверхні визначає ефект мікротекстурування, тому проектування інструмента має враховувати не лише «малюнок» рельєфу, а й механізм його утворення. Це висуває потребу у створенні узгоджених моделей, які встановлюють зв'язок між конструктивними параметрами інструмента, кінематикою процесу та результативними характеристиками мікрорельєфу з урахуванням пружнопластичної взаємодії, тертя в зоні контакту, мікрівібрацій та зносу.

Метою цієї статті є обгрунтування проектування конструкції інструменту для формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній поверхні шатунного вкладиша та розрахунок його розмірів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

У публікаціях з проблематики регулярних мікрорельєфів, сформованих методами поверхневого пластичного деформування (ППД), простежується еволюція від нормування геометрії елементів рельєфу до інженерного синтезу інструмента та керованої кінематики на CNC. Геометричні параметри поверхонь із регулярним мікрорельєфом задає ГОСТ 24773-81, де формалізовано класифікацію та параметри повністю/частково регулярних структур, що зручно використовувати як базу для постановки вимог до форми елемента, кроку та допустимих відхилень. Концептуально важливою є робота [6], у якій показано підхід до формування поверхонь із уніфікованими параметрами канавок мікрорельєфу як до керованого процесу, де повторюваність структури визначається стабільністю контакту «інструмент–деталь» і умовами деформування. В роботі [7] автори обгрунтовують переваги регулярного топографії поверхні для зносо- та фретинг-стійкості й тим самим підсилюють тезу, що регулярність мікрогеометрії є функціонально значущою для забезпечення кращих експлуатаційних властивостей поверхні, а не лише для зменшення параметрів шорсткості поверхні.

У роботі [8] розглядається кульове вигладжування з накладанням вібрацій, що дозволяє формувати квазірегулярні та регулярні мікрорельєфи з підвищеною відтворюваністю. Особливу увагу приділено конструкції інструмента: вузлу кульки, системі попереднього навантаження та передачі коливань. Для проектування інструменту ця праця важлива тим, що демонструє, як додатковий ступінь свободи (вібрація) розширює можливості керування мікрорельєфом.

У роботі [9] автори застосовують принципи аксіоматичного проектування для аналізу пристрою текстурування методом вигладжування. Стаття є цінною з методологічної точки зору: інструмент розглядається як система з чітко визначеними функціональними вимогами (регулярність рельєфу, стабільність сили, сумісність з верстатом).

У площині власне проектування інструмента ключовими стають роботи, де конструкція напряму пов'язана з точністю відтворення регулярної структури [10] пропонують спеціалізований інструмент для ППД на неплоских функціональних поверхнях і демонструють верифікацію працездатності вузлів через FEM-аналіз міцності/деформацій, що є корисним шаблоном для розділу «розрахунок і перевірка конструкції інструмента». Для внутрішніх циліндричних поверхонь актуальною є робота [11] де акцент зроблено на схемі регулювання зусилля

вібронакатування та методиці визначення взаємопов'язаних структурних параметрів інструмента під задані умови формування регулярної топографії. Окремий напрям – інструменти з віброприводом деформувального елемента.

Розмірний аналіз інструментів, що працюють методом поверхневого пластичного деформування розглянуто в роботах [12]. Авторами розроблені конструкції інструментів та розглянуто особливості його налаштування на заданий розмір.

Формулювання цілей статті

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування конструкції інструменту для формування регулярного мікрорельєфу на внутрішніх поверхнях шатунних вкладишів двигунів внутрішнього згоряння, а також визначення його основних конструктивних параметрів на основі розмірного аналізу, що забезпечують стабільне відтворення канавок заданої глибини та геометрії і сприяють підвищенню маслоємності та експлуатаційної надійності робочих поверхонь.

Виклад основного матеріалу

В статті проведено проектування інструменту для формування регулярних мікрорельєфів, що формуються на внутрішній поверхні шатунних вкладишів автомобіля [13] Volvo V50 1.6 HDI із наступними геометричними параметрами: $D_{ring} = 47,0$ mm; $B_{ring} = 16,9$ mm, при їх обробці в обоймі (рис.1).

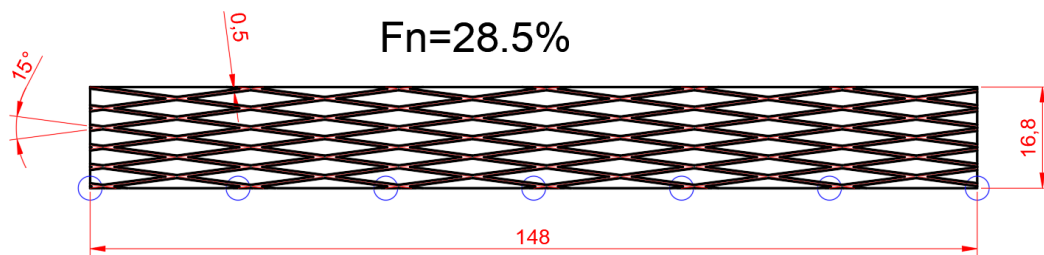


Рис. 1. Розгортка шатунного вкладиша

Оскільки в шатунному вкладиші має місце шість точок з яких розпочинається формування канавок, то проєктований інструмент повинен містити шість деформувальних елементів, які розміщені рівномірно по колу. Глибина сформованих канавок буде визначатись діаметром посадкового місця оправки інструменту та діаметром самих деформувальних елементів. Ширина канавок мікрорельєфу визначатиметься діаметром деформувальних елементів та величиною їх заглиблення в поверхню шатунних вкладишів. Кут нахилу канавок мікрорельєфу визначатиметься величиною осевої подачі інструменту.

Процес проектування інструменту складається з наступних етапів:

- аналіз вихідних даних для проектування (геометрія канавки, відносна площа мікрорельєфу, допуску на розмір виробу);
 - встановлення допусків відомих ланок (деформувальних елементів), їх допуск складає 0,5 мкм.;
 - розмірний аналіз (визначення розмірів і допусків замикаючої ланки інструменту);
 - проектування конструкції інструменту на основі проведених розрахунків.
- Візуально процес проектування можна відобразити наступною схемою (рис. 2).

Аналіз вихідних даних для проектування (геометрія канавки, відносна площа мікрорельєфу, допуску на розмір)

Встановлення допусків відомих ланок (деформувальних елементів)

Розмірний аналіз (визначення розмірів і допусків замикаючої ланки інструменту)

Проектування конструкції інструменту

Рис.2. Алгоритм проектування інструменту для формування регулярних мікрорельєфів на робочих поверхнях шатунних вкладишів

Проведено аналіз вихідних даних для проектування. Діаметр внутрішньої робочої поверхні шатунного вкладиша складає $47,11 \pm 0,005$ мм.

Наступним етапом є встановлення допусків відомих ланок, тобто деформувальних елементів. Для кульок діаметром 4 мм класу точності Р6 (ГОСТ 3306-88 або ISO 492) допуски визначаються таблицями для тіл кочення: діаметр кульки 4 мм має допуск за діаметром ± 0.0005 мм мм, а відхилення від сферичності та шорсткість поверхні мають суворо обмежені значення (відхилення форми та розміру залежать від класу точності), які значно менші, ніж для стандартних підшипників, що забезпечує високу точність роботи.

Детальніше про допуски для кульок Р6:

- діаметр (номінальний): 4.000 мм
- допуск діаметра (відхилення): $+0.0005$ мм (або $+0.5$ мкм)
- відхилення від сферичності (різниця між найбільшим та найменшим діаметрами): ≤ 0.0005 мм (≤ 0.5 мкм)

- відхилення від діаметра в будь-якому перерізі: ≤ 0.0005 мм (≤ 0.5 мкм)
- шорсткість поверхні (R_a): ≤ 0.025 мкм.

Необхідно сформувати канавку глибиною 0,05 мм. Таким чином розмір інструменту повинен становити $47,21^{+0,005}_0$ мм.

Розрахункова схема для розрахунку розмірного ланцюга представлена на рис. 3.

Щоб забезпечити якісне виконання технологічного процесу необхідно враховувати велику кількість факторів, які впливають на формування одержуваного розміру. Одним з найважливіших факторів є пружне відновлення, що має місце після проходження робочого елемента інструменту. Оскільки інструмент використовується на завершальних етапах технологічного процесу, то проведення розмірного аналізу фінішної операції обробки з врахуванням пружного і пружно-пластичного деформування.

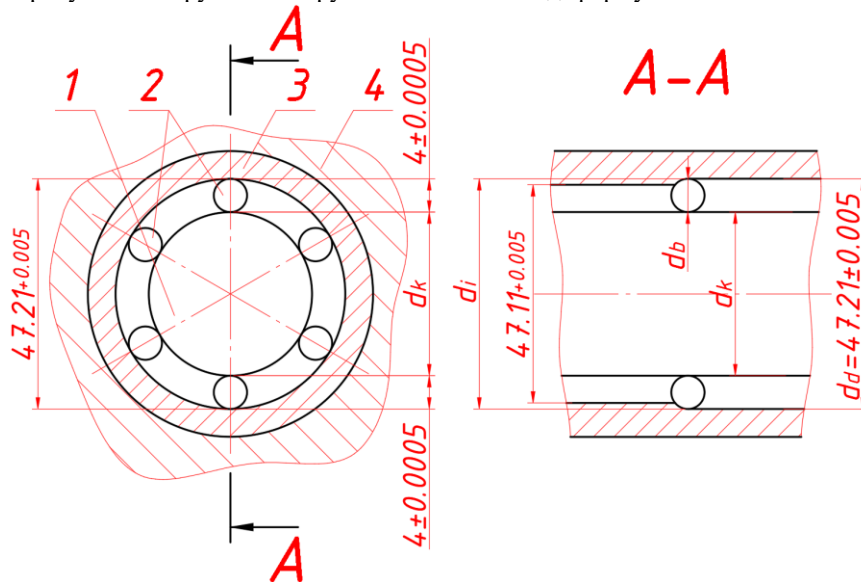


Рис. 3. Розрахункова схема технологічного процесу формування канавок на поверхні шатунного вкладиша: 1 – оправка інструменту; 2 – деформувальні елементи; 3 – шатунний вкладиш; 4 – обойма вкладиша.

Розмірний розрахунок параметрів інструменту з деформувальними елементами у вигляді кульок для формування канавок у шатунних вкладишах. У даному випадку буде мати місце лише пластичне деформування канавок. Оскільки формування канавок вкладиша буде відбуватись в обоймі, то товщина стінки самого вкладиша немає суттєвого значення, оскільки стінки обойми будуть компенсувати зусилля, яке буде намагатись розтиснути сам вкладиш. Товщина стінок обойми повинна бути не менше 20...30мм.

Розрахунок розмірного ланцюга проводимо методом повної взаємозамінності шляхом вирішення зворотної задачі.

1. Замикаючою ланкою розмірного ланцюга є розмір корпусу інструменту $d_k = A_\Sigma$.

2. Складаємо схему розмірного ланцюга і переконуємося, що збільшуючою ланкою є ланка A_1 , інші ланки – зменшуючі.

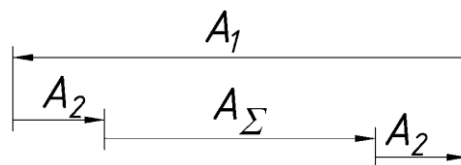


Рис. 4. Схема розмірного ланцюга інструменту

Даний ланцюг можна рахувати методом, що містить мінімальну кількість ланок (принцип найкоротшого ланцюга), оскільки вона рівна кількості деталей, які беруть участь у формуванні кінцевого розміру канавок.

3. Складаємо рівняння лінійного розмірного ланцюга:

Таким чином збільшуюча ланка $A_1=47,21^{+0,005}$ мм;

Зменшуюча ланка $A_2=4\pm 0,0005$ мм (кількість таких ланок $n=2$);

Замикаюча ланка, яку необхідно знайти A_Σ .

Визначаємо номінальний розмір замикаючої ланки

Номінальний розмір A_Σ розраховується як різниця між сумою номіналів збільшувальних ланок та сумою номіналів зменшувальних ланок:

$$A_\Sigma = A_1 - (A_2 + A_2) = A_1 - 2 \cdot A_2;$$

2. Розрахунок номінального розміру

$$A_1 = 47,21 \text{ мм};$$

$$A_2 = 4,0 \text{ мм}.$$

$$A_{\Sigma \text{ном}} = 47,21 - (4,0 + 4,0) = 39,21 \text{ мм}.$$

Розрахунок проведемо методом максимуму–мінімуму.

Розрахуємо верхнє відхилення ES_{Σ} .

$$ES_{\Sigma} = es_1 - (ei_2 + ei_2).$$

$$ES_{\Sigma} = +0,005 - (-0,0005 - 0,0005) = +0,006 \text{ мм}$$

Розрахуємо нижнє відхилення EI_{Σ} .

$$EI_{\Sigma} = ei_1 - (es_2 + es_2)$$

$$EI_{\Sigma} = 0 - (+0,0005 + 0,0005) = -0,001$$

Таким чином розмір замикаючої ланки складає

$$A_{\Sigma} = 39,21_{-0,001}^{+0,006}$$

Розроблено конструкцію інструменту (рис.3а) та його оправки (рис. 3 б) з регулюванням величини виступу деформувальних елементів, що дозволить забезпечити необхідний розмір $47,21_0^{+0,005}$ мм.

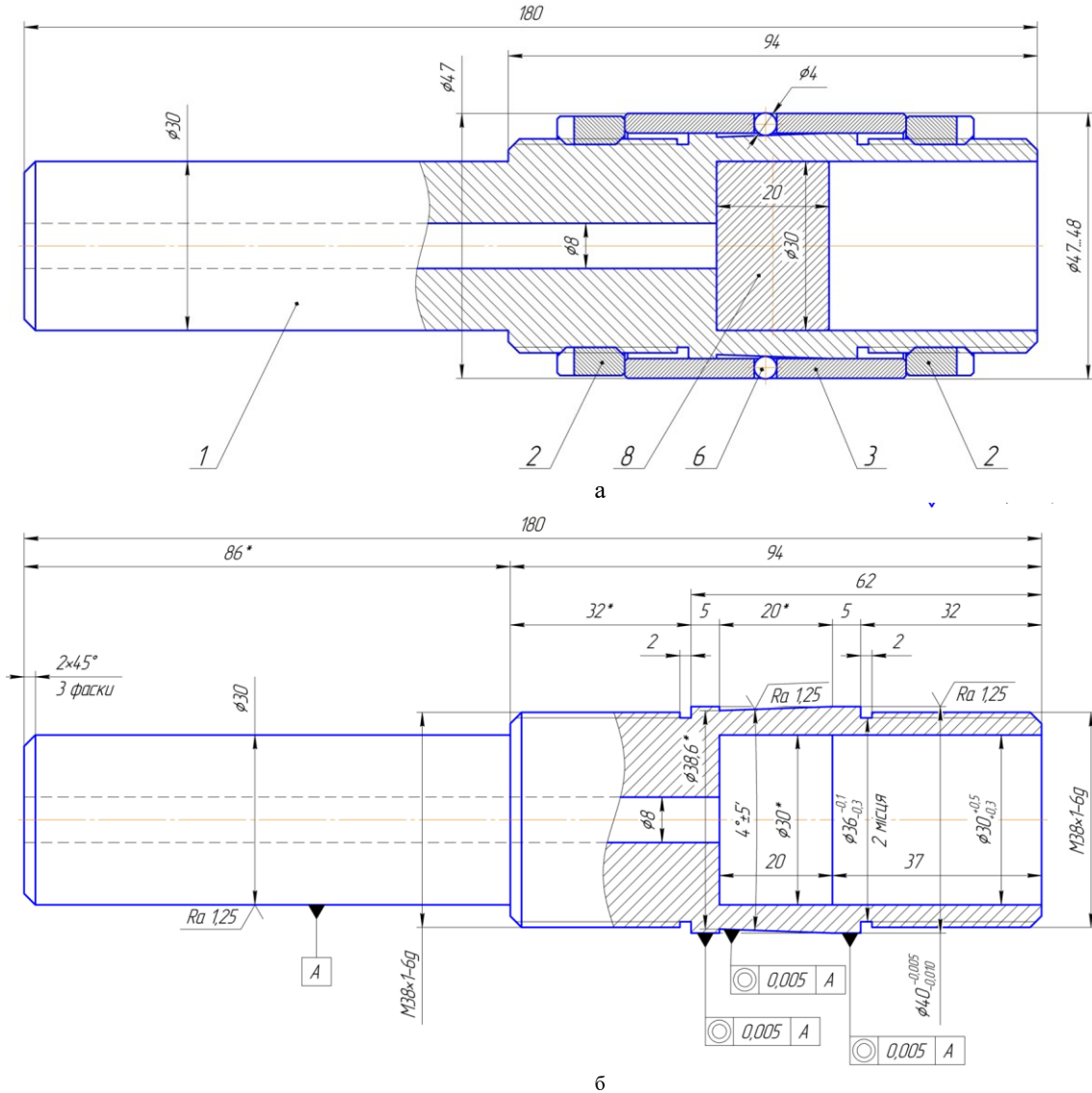


Рис. 5. Інструмент для формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній поверхні шатунних вкладишів:
а – інструмент в зборі; б – оправка інструменту

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розроблено конструкцію інструменту для формування регулярних мікрорельєфів на внутрішній поверхні шатунних вкладишів при їх обробленні в обоймі. Розроблений інструмент дозволяє регулювати величину розміру замикаючої ланки. Проведено розмірний аналіз інструменту та встановлено фактичні розміри з полями допусків для замикаючої ланки інструменту. Розроблений інструмент забезпечить високу продуктивність при формуванні регулярних мікрорельєфів з відносною площею 28,5%, що є оптимальним з точки зору забезпечення максимальної маслоємності поверхні шатунного вкладиша.

Література

1. Pawlus, P., Koszela, W., & Reizer, R. (2022). Surface texturing of cylinder liners: A review. *Materials*, 15, 8629. <https://doi.org/10.3390/ma15238629>
2. Grabon, W., Koszela, W., Pawlus, P., & Ochwat, S. (2013). Improving tribological behaviour of piston ring–cylinder liner frictional pair by liner surface texturing. *Tribology International*, 61, 102–108.
3. Slavov, S., & Dimitrov, D. (2018). A study for determining the most significant parameters of the ball-burnishing process over some roughness parameters of planar surfaces carried out on CNC milling machine. In *MATEC Web of Conferences*, 178, 02005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817802005>
4. Nagit, G., Dodun, O., Slatineanu, L., Ripanu, M., Mihalache, A., & Hrituc, A. (2020). Influence of some process input factors on the main dimensions of the grooves generated during the ball vibroburnishing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 968, 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/968/1/012007>
5. Dzyura, V., Maruschak, P., Slavov, S., & Dimitrov, D. (2023). Applying regular relief onto conical surfaces of continuously variable transmission to enhance its wear resistance. *Transport*, 38(3), 178–189. <https://doi.org/10.3846/transport.2023.20628>
6. Schneider, Yu. (1984). Formation of surfaces with uniform micropatterns on precision machine and instruments parts. *Precision Engineering*, 6(4), 219–225. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(84\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0141-6359(84)90007-2)
7. Bulatov, V. P., Krasny, V. A., & Schneider, Y. G. (1997). Basics of machining methods to yield wear- and fretting-resistive surfaces having regular roughness patterns. *Wear*, 208(1–2), 132–137.
8. Jerez-Mesa, R., Llumà, J., & Travieso-Rodríguez, J. A. (2021). Vibration-assisted ball burnishing. *Encyclopedia*, 1, 460–471. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1020038>
9. Nagit, G., Slătineanu, L., Merticaru, V., Ripanu, M.-I., Mihalache, A.-M., Tăbăcaru, L., & Boca, M. (2017). Analysis of a device for texturing by burnishing using principles from axiomatic design. In *MATEC Web of Conferences*, 127, 01021. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20171270102>
10. Slavov, S., & Iliev, I. (2016). Design and FEM static analysis of an instrument for surface plastic deformation of non-planar functional surfaces of machine parts. *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability*, (2). Târgu Jiu: Editura “Academica Brâncuși”.
11. Kryvyi, P., & Dzyura, V. Instrument for inner cylinder surfaces vibrating rolling and its structural parameters determination technique. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 2(82), 70–81.
12. Дзюра, В. О., Кривий, П. Д., & Нарогняк, Г. С. (2008). Розмірний аналіз величини підйому на зуб дорна кочення для абсолютно пластичних матеріалів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*, 13(4), 67–72.
13. Дзюра, В. О., Дживак, Т. Р., & Крук, О. Ю. (2024, грудень 11–12). Напрями вдосконалення шатунних вкладишів двигунів внутрішнього згорання технологічними методами. У *Актуальні задачі сучасних технологій: Збірник тез доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів* (с. 83). Тернопіль: ФОП Паляниця В. А.

References

1. Pawlus, P., Koszela, W., & Reizer, R. (2022). Surface texturing of cylinder liners: A review. *Materials*, 15, 8629. <https://doi.org/10.3390/ma15238629>
2. Grabon, W., Koszela, W., Pawlus, P., & Ochwat, S. (2013). Improving tribological behaviour of piston ring–cylinder liner frictional pair by liner surface texturing. *Tribology International*, 61, 102–108.
3. Slavov, S., & Dimitrov, D. (2018). A study for determining the most significant parameters of the ball-burnishing process over some roughness parameters of planar surfaces carried out on CNC milling machine. In *MATEC Web of Conferences*, 178, 02005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817802005>
4. Nagit, G., Dodun, O., Slatineanu, L., Ripanu, M., Mihalache, A., & Hrituc, A. (2020). Influence of some process input factors on the main dimensions of the grooves generated during the ball vibroburnishing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 968, 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/968/1/012007>
5. Dzyura, V., Maruschak, P., Slavov, S., & Dimitrov, D. (2023). Applying regular relief onto conical surfaces of continuously variable transmission to enhance its wear resistance. *Transport*, 38(3), 178–189. <https://doi.org/10.3846/transport.2023.20628>
6. Schneider, Yu. (1984). Formation of surfaces with uniform micropatterns on precision machine and instrument parts. *Precision Engineering*, 6(4), 219–225. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(84\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0141-6359(84)90007-2)
7. Bulatov, V. P., Krasny, V. A., & Schneider, Y. G. (1997). Basics of machining methods to yield wear- and fretting-resistant surfaces having regular roughness patterns. *Wear*, 208(1–2), 132–137.
8. Jerez-Mesa, R., Llumà, J., & Travieso-Rodríguez, J. A. (2021). Vibration-assisted ball burnishing. *Encyclopedia*, 1, 460–471. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1020038>
9. Nagit, G., Slătineanu, L., Merticaru, V., Ripanu, M.-I., Mihalache, A.-M., Tăbăcaru, L., & Boca, M. (2017). Analysis of a device for texturing by burnishing using principles from axiomatic design. In *MATEC Web of Conferences*, 127, 01021. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20171270102>
10. Slavov, S., & Iliev, I. (2016). Design and FEM static analysis of an instrument for surface plastic deformation of non-planar functional surfaces of machine parts. *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability*, (2). Târgu Jiu: Editura “Academica Brâncuși”.
11. Kryvyi, P., & Dzyura, V. Instrument for vibrating rolling of internal cylindrical surfaces and a technique for determining its structural parameters. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 2(82), 70–81.
12. Dzyura, V. O., Kryvyi, P. D., & Narohniak, H. S. (2008). Dimensional analysis of the rise per tooth of a rolling broach for perfectly plastic materials. *Bulletin of the Ternopil State Technical University*, 13(4), 67–72.
13. Dzyura, V. O., Dzhvyak, T. R., & Kruk, O. Yu. (2024, December 11–12). Directions for improving connecting rod bearings of internal combustion engines by technological methods. In *Current Problems of Modern Technologies: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students* (p. 83). Ternopil: FOP Palyanytsia V. A.