

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:
**«Розробка пристрою для відновлення робочої
поверхні втулок шатунів методом пластичного
деформування»**

Виконав здобувач вищої освіти 4 курсу
групи ГМ-22-3
ОПП «Галузеве машинобудування»
Спеціальності
133 «Галузеве машинобудування»
_____ Артем ШАНГІН

Керівник роботи к.т.н., ст. викладач
_____ Павло ЄРЬОМІН

Рецензент: _____

Кропивницький 2026

Центральноукраїнський національний технічний університет			
Факультет	Механіко-технологічний		
Кафедра	Машинобудування,	мехатроніки	і
	робототехніки		
Рівень вищої освіти	перший (бакалаврський)		
Галузь знань	13 Механічна інженерія		
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування		
Освітньо-професійна програма	Галузеве машинобудування		

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА

Шангіну Артему Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка пристрою для відновлення робочої
поверхні втулок шатунів методом пластичного
деформування
2. Керівник роботи: к.т.н., ст. викл., Павло ЄРЬОМІН
3. Строк подання роботи до захисту « ____ » червня 2026 р.

Затверджено наказом ЦНТУ від _____ 2026 року № _____

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є підвищення ефективності відновлення шатунних втулок двигунів внутрішнього згоряння шляхом розробки інструменту та технологічного процесу обробки робочої поверхні комбінованим методом пластичного деформування, зниження собівартості відновлення деталі, підвищення продуктивності праці.

*Завдання: здійснити аналіз існуючого технологічного процесу відновлення шатунних втулок, запропонувати заходи по раціоналізації та підвищенню ефективності технологічного процесу;
провести комплекс робіт по підборі обладнання та пристосувань для відновлення робочої поверхні втулок;
розробити конструкцію та вимоги до прошивного інструменту, із розробкою конструкторської документації.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	15 квітня 2026 р.	вик.
2	Виконання загальної частини	30 квітня 2026 р.	вик.
3	Виконання технологічної частини	20 травня 2026 р.	вик.
4	Виконання конструкторської частини	25 травня 2026 р.	вик.
5	Розробка креслеників	30 травня 2026 р.	вик.
6	Усунення недоліків після перевірки керівником роботи	15 червня 2026 р.	вик.
7	Перевірка роботи на академічний плагіат	червня 2026 р.	вик.
8	Рецензування роботи	червня 2026 р.	
9	Захист кваліфікаційної роботи	червня 2026 р.	

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис) Артем ШАНГІН

Керівник роботи _____
(підпис) Павло ЄРЬОМІН

АНОТАЦІЯ

Артем Шангін. Розробка пристрою для відновлення робочої поверхні втулок шатунів методом пластичного деформування. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «бакалавр»: ЦНТУ, м. Кропивницький, 2026 р. – 48 с. Матеріали презентації – креслення загальним обсягом ____ л. ф. А1.

Метою роботи є підвищення ефективності відновлення шатунних втулок двигунів внутрішнього згоряння шляхом розробки вдосконаленого інструменту та оновленого технологічного процесу обробки робочої поверхні втулки комбінованим методом пластичного деформування (а саме – вібророзкочування з наступним фінішним деформуючим протягуванням), що забезпечує зменшення працемісткості, підвищення продуктивності та зниження собівартості ремонту.

Вдосконалення досягається шляхом аналізу базового технологічного процесу відновлення втулок, виявлення його недоліків та заміни малопродуктивних операцій на комбіноване поверхневе пластичне деформування. У роботі виконано аналіз конструкції шатунної втулки, матеріалу, умов роботи в парі тертя з поршнеvim пальцем. У технологічній частині проведено огляд та класифікацію способів відновлення, обґрунтовано вибір комбінованого методу, здійснено підбір обладнання та розрахунок режимів обробки. У конструкторській частині розроблено кінематичну схему пристрою для вібророзкочування, конструкцію багатокулькового розкатника та вузла осциляції, а також деформуючу протяжку (прошивку) для фінішної обробки отвору та затискне пристосування для базування втулки.

Актуальність. Робота зумовлена необхідністю підвищення ресурсу та надійності кривошипно-шатунного механізму двигунів внутрішнього згоряння, широким розповсюдженням бронзових втулок у двигунобудуванні та обмеженою ефективністю традиційних методів відновлення (наплавлення,

гальванічних покриттів) для усунення малих зносів (до 0,1 мм) без випресовування втулки.

Практичне значення. У роботі був проаналізований базовий заводській технологічний процес та розроблені пропозиції щодо вдосконалення процесу відновлення шатунних втулок шляхом застосування комбінованого методу поверхневого пластичного деформування (вібророзкочування з наступним деформуючим протягуванням). Також представлено вдосконалену схему багатокулькового розкатника з вузлом осциляції та деформуючої прошивки для обробки робочої поверхні шатунної втулки.

Ключові слова: шатунна втулка, відновлення, пластичне деформування, вібророзкочування, деформуюче протягування, регулярний мікрорельєф, багатокульковий розкатник.

ABSTRACT

Artem Shangin. Development of a device for restoring the working surface of connecting rod bushings by the method of plastic deformation. Qualification work for the educational degree "Bachelor": CUNTU, Kropyvnytskyi, 2026 - 48 p. Presentation materials – drawings (___ pages format A1).

The objective of this work is to enhance the efficiency of restoring internal combustion engine connecting rod bushings by developing an improved tool and an updated technological process for processing the bushing's working surface using a combined surface plastic deformation method (specifically, vibratory roller burnishing followed by finishing deforming broaching). This approach ensures reduced labor intensity, increased productivity, and lower repair costs.

The improvement is achieved by analyzing the baseline technological process of bushing restoration, identifying its shortcomings, and replacing low-productivity operations with combined surface plastic deformation. The work includes an analysis of the connecting rod bushing design, its material, and its operating conditions within the friction pair with the gudgeon pin (wrist pin). In the technological section, a

review and classification of restoration methods are performed, the choice of the combined method is justified, and the equipment selection and machining parameter calculations are carried out. In the engineering design section, a kinematic diagram of the vibratory burnishing device, the design of a multi-ball roller burnisher, an oscillation unit, a deforming broach (drift) for final hole finishing, and a clamping fixture for bushing locating and orientation are developed.

Topicality. This work is driven by the necessity to increase the service life and reliability of the internal combustion engine crank mechanism, the widespread use of bronze bushings in engine manufacturing, and the limited efficiency of traditional restoration methods (welding deposition, electroplating) for eliminating minor wear (up to 0.1 mm) without pressing the bushing out.

Practical meaning. The baseline factory technological process was analyzed, and proposals were developed to improve the restoration process of connecting rod bushings by applying a combined method of surface plastic deformation (vibratory roller burnishing followed by deforming broaching). Furthermore, an improved design of a multi-ball roller burnisher with an oscillation unit and a deforming drift for processing the working surface of the connecting rod bushing is presented.

Key words: connecting rod bushing, restoration, plastic deformation, vibrorolling, deforming broaching, regular microrelief, multi-ball roller.

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПISKA

до кваліфікаційної роботи на тему:

**«Розробка пристрою для відновлення робочої
поверхні втулок шатунів методом пластичного
деформування»**

КРБ.ПМ.26.04.03.00.00 ПЗ

Виконав здобувач вищої освіти
4 курсу групи ГМ-22-3
ОПП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
_____ Артем ШАНГІН

Керівник роботи к.т.н., ст. викл.
_____ Павло ЄРЬОМІН

Кропивницький 2026

Зміст

ВСТУП	9
1 Технологічна частина. Аналіз умов роботи та методів відновлення	11
1.1 Призначення, конструкція та умови роботи шатунних втулок двигунів внутрішнього згоряння.....	11
1.2 Аналіз причин відмов та зношування робочої поверхні втулок	13
1.3 Огляд та класифікація існуючих способів відновлення внутрішніх поверхонь шатунних втулок	15
1.3.1 Відновлення нанесенням покриттів	15
1.3.2 Відновлення об'ємним пластичним деформуванням	16
1.3.3 Відновлення поверхневим пластичним деформуванням (ППД)	17
1.4 Обґрунтування вибору комбінованого методу відновлення	18
1.4.1 Обґрунтування вибору вібророзкочування	19
1.4.2 Обґрунтування вибору деформуючого протягування	19
1.4.3 Висновки та переваги комбінованого методу відновлення	20
2 Конструкторська частина. Розробка пристрою та інструменту для відновлення втулок	22
2.1 Розробка кінематичної схеми пристрою для нанесення регулярного мікрорельєфу	22
2.2 Конструкція багатокулькового розкотника та вузла осциляції	25
2.2.1 Багатокульковий розкотник	26
2.2.2 Вузол осциляції	27
2.2.3 Взаємодія складових частин	29
2.3 Характеристика та аналіз технологічності шатунної втулки	29
2.4 Розробка конструкції деформуючої прошивки для калібрування отвору втулки	31
2.4.1 Принцип роботи та загальна будова	33
2.4.2 Матеріали та вимоги до термообробки	34
2.4.3 Порівняння з базовою технологією	34
2.5 Розрахунок на міцність твердосплавних деформуючих елементів	35
2.6 Розрахунок на міцність різьбового з'єднання	40
2.7 Організація робочого місця	43
Загальні висновки	45
Список використаних джерел	46
Додаток А	48

ВСТУП

За останній час у машинобудівній галузі України з'явилась широка гамма сучасних конструкційних матеріалів, які мають різноманітні якості та призначення. Але, незважаючи на їх широкий асортимент, традиційні бронзові сплави продовжують займати велику питому вагу як матеріал для виготовлення підшипників ковзання, зокрема втулок верхніх головок шатунів двигунів внутрішнього згоряння. Їх використання не зменшується завдяки тому, що бронза має високі антифрикційні властивості, гарно працює в умовах граничного тертя при високих питомих тисках та навантаженнях, а також за наявності абразивних часток в мастилі.

Шатунні втулки є відповідальними деталями кривошипно-шатунного механізму, які напряду впливають на ресурс ДВЗ. Відновлення цих деталей після зношування дозволяє значно зменшити витрати на ремонт та знизити собівартість продукції. Однак допустимий радіальний знос втулок не перевищує 0,1 мм, що обмежує використання традиційних способів відновлення, таких як електролітичне нарощування або газополуменеве напилення, через їх високу енергоємність та трудомісткість.

Відомі методи механічної лезвійної обробки, зокрема такі, як розточування, хонінгування або полірування, не у всіх випадках забезпечують потрібну продуктивність та економічну ефективність в умовах ремонтного виробництва. Вважаючи на це, поверхнєве пластичне деформування (ППД), зокрема вібророзкочування, дозволяє не тільки відновити розмір деталі без зняття стружки, але й створити регулярний мікрорельєф із заданими параметрами шорсткості та маслоємності. Для збільшення опорної площі поверхні після вібророзкочування як фінішна операція пропонується використовувати деформуюче протягування.

Актуальність використання комбінованого методу відновлення – вібророзкочування з наступним деформуючим протягуванням – для обробки внутрішніх поверхонь шатунних втулок та розробка відповідного обладнання й інструменту обумовлюється потребою в підвищенні ефективності ремонтних процесів, зниженні собівартості відновлення деталей та забезпеченні стабільної якості сполучення «шатунна втулка – поршневий палець» у двигунах внутрішнього згоряння.

Розділ 1 Технологічна частина. Аналіз умов роботи та методів відновлення

1.1 Призначення, конструкція та умови роботи шатунних втулок двигунів внутрішнього згоряння

Шатунні втулки належать до підшипників ковзання, виконаних з кольорових металів, і є одними з найбільш дорогих та швидкозношуваних деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), що лімітують міжремонтний і загальний термін служби двигуна [1]. Вони призначені для роботи в парі тертя з поршневим пальцем, забезпечуючи шарнірне з'єднання поршня з шатуном.

Конструктивно шатунні втулки виготовляють у вигляді тонкостінних циліндричних деталей з бронзових сплавів. Найбільш поширеною є бронза марки Бр ОЦС-5-5-5, та менш поширенна Бр ОЦС-6-6-3 [2]. Вибір бронзи зумовлений її високими антифрикційними властивостями, здатністю добре працювати в умовах граничного тертя при високих питомих тисках та навантаженнях, а також за наявності абразивних часток. Хімічний склад та твердість матеріалу шатунних втулок деяких дизельних двигунів для важкої техніки представлено у таблиці 1 [1].

Таблиця 1 -Хімічний склад та твердість оброблюваних матеріалів

№ п/п	Оброблюваний матеріал	Вид деталей	Вміст хімічних елементів									НВ, ГПа
			Fe	Si	P	Al	Cu	Pb	Zn	Sb	Sn	
1	БрО5Ц5С5	Шатунна втулка ЯМЗ-236	0,4	0,05	0,1	0,05	80,9	6	6	0,5	6	0,06

2	БрО6Ц6С3	Шатунна втулка СМД-62	0,4	0,02	0,05	0,05	81,03	4	7	0,5	7	0,07
---	----------	-----------------------------	-----	------	------	------	-------	---	---	-----	---	------

Умови роботи шатунних втулок є одними з найскладніших. На рисунку 1.1 наведено схему сил, що діють на втулку верхньої голівки шатуна.

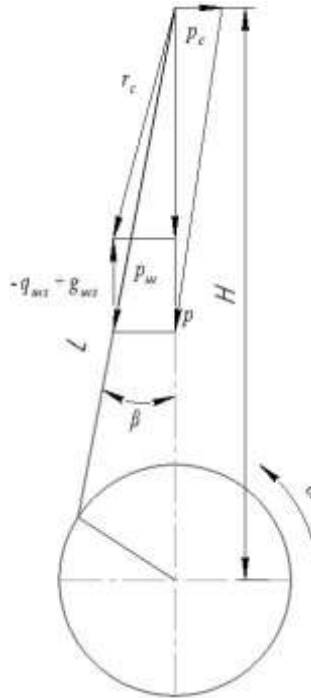


Рисунок 1.1 Схема сил, що діють на втулку верхньої голівки шатуна [8]:

P - надлишковий тиск газів; P_c - вертикальна складової сили, що навантажує шатунну втулку; g_{ms} - вага шатуна; q_{ms} - сила інерції маси шатуна; r_c - повний тиск у шатунному підшипнику; P_m - сила, що діє уздовж осі шатуна; P_n - нормальна сила, що діє на стінку циліндра; L - довжина шатуна; H - відстань від осі поршневого пальця до осі колінчатого валу при повороті шатуна на кут; ω - кутова швидкість обертання колінчатого вала.

Сполучення «шатунна втулка – поршковий палець» працює переважно в граничній фазі тертя при високих питомих тисках і навантаженнях за наявності абразиву, що призводить до підвищеного зносу [2].

Допустимий радіальний знос шатунних втулок становить не більше 0,1 мм [2]. Перевищення цього значення викликає збільшення зазорів, появу стукотів та втрату потужності двигуна. Статистичний аналіз показує, що лише близько 4,5% втулок двигунів ЯМЗ-236, ЯМЗ-238 та 3,0% втулок СМД-62 є придатними без ремонту, а решта потребують відновлення [2].

1.2 Аналіз причин відмов та зношування робочої поверхні втулок

Працездатність пари тертя «шатунна втулка – поршневий палець» визначається стійкістю поверхонь до спрацювання в умовах граничного тертя при високих питомих тисках та обмеженому змащуванні [1]. Аналіз експлуатаційних відмов дозволяє виділити чотири основні механізми зношування робочої поверхні втулок.

Абразивне зношування виникає внаслідок потрапляння у зазор твердих часток (продуктів спрацювання, абразивного пилю, часток нагару). Ці частки діють як мікрорізальний інструмент, спричиняючи появу рисок, задирів та виривання матеріалу. Інтенсивність абразивного зношування зростає при недостатньому очищенні масла та повітря [2].

Втомне викришування (підтинг) виникає через циклічний характер навантажень (зусилля від тиску газів та інерції багаторазово змінюються за один робочий цикл). У поверхневому шарі бронзи накопичуються втомні пошкодження, що призводять до утворення мікротріщин і подальшого викришування часток металу. Цей вид зношування різко прискорюється при збільшенні зазорів у парі [1].

Адгезійне схоплювання (заїдання) відбувається в умовах граничного тертя при локальному підвищенні температури (особливо при порушенні

мащення або перевантаженнях). Спостерігається перенос матеріалу втулки на поршневий палець та навпаки, утворення нагартованих ділянок і глибоких задирів. Адгезійне схоплювання може призвести до заклинювання пальця у втулці та аварійного виходу двигуна з ладу [2].

Корозійно-механічне зношування зумовлене накопиченням у мастилі органічних кислот та сірчистих сполук (продуктів окиснення палива та масла). Вони спричиняють корозію антифрикційного шару втулки, особливо при тривалих простоях або роботі на холодному двигуні. Корозійне руйнування прискорюється при одночасному механічному впливі (терті), утворюючи виразки та раковини на робочій поверхні [2].

Вплив конструктивних та експлуатаційних факторів. До основних конструкторсько-технологічних дефектів, що погіршують працездатність втулок, належать зсув осей циліндрів та неперпендикулярність осі поршневого пальця до осі циліндра. Це спричиняє “перекидання” поршня, виникнення сил крайового тиску до 1400Н та утворення корсетності – нерівномірного зносу поверхні втулки у вертикальній площині [1].

Велике значення має правильний вибір зазорів. При збільшенні зазору понад 0,007...0,010 мм з’являються ударні навантаження, інтенсифікується втомне викришування та зростає знос. При зменшенні зазору порушуються умови гідродинамічного змащення, що викликає перегрів і схоплювання [1].

Важливу роль відіграє мікрогеометрія поверхні. Оптимальна вихідна шорсткість ($Rz \approx 6,3$ мкм) дозволяє скоротити час приробляння та зменшити знос у початковий період експлуатації. Відхилення від оптимальної мікрогеометрії призводить до прискореного зношування [3].

1.3 Огляд та класифікація існуючих способів відновлення внутрішніх поверхонь шатунних втулок

Специфіка шатунних втулок (тонкостінність, допустимий знос до 0,1 мм, робота в умовах граничного тертя) обмежує застосування багатьох традиційних методів ремонту. Узагальнено всі способи можна розділити на дві групи: відновлення нанесенням покриттів та відновлення пластичним деформуванням [1].

1.3.1 Відновлення нанесенням покриттів

Термодифузійне насичення (цинкування) дозволяє збільшити розмір отвору до 1,0 мм. Недоліками є необхідність ізоляції поверхонь, що не підлягають нарощуванню, та велика енергоємність процесу [1].

Електролітичне осадження (міднення, залізнення, хромування) забезпечує покриття товщиною 0,1...0,5 мм. Перспективними є композиційні електролітичні покриття (КЕП) на основі міді з дисульфідом молібдену, графітом, які мають високі антифрикційні властивості. Однак швидкість осадження залишається низькою, а для нанесення покриття потрібна випресовка втулки [2].

Газополуменеве напилення бронзових порошків забезпечує пористий шар з невисокою міцністю зчеплення, потребує подальшої механічної обробки і ускладнене для малих діаметрів [3].

Електродугове наплавлення (вібродугове, у вуглекислому газі, під шаром флюсу) для тонкостінних бронзових втулок має суттєві обмеження: високе

тепловкладення викликає деформацію, а метал наплавленого шару має неоднорідну структуру, що погіршує антифрикційні властивості [4].

Висновок для групи нанесення покриттів: більшість методів вимагають випресовки втулки, мають високу енергоємність, значну трудомісткість або погіршують антифрикційні характеристики. Для усунення зносів до 0,1 мм вони часто неефективні через великі припуски на подальшу механічну обробку.

1.3.2 Відновлення об'ємним пластичним деформуванням

Осаджування – збільшення зовнішнього діаметра втулки (і відповідне зменшення внутрішнього) за рахунок зменшення її висоти. Метод дозволяє відновлювати втулки без випресовки, але зменшення висоти підвищує питомі навантаження, а процес потребує потужного пресового обладнання [1].

Обтиснення – зменшення зовнішнього діаметра, за рахунок чого зменшується внутрішній розмір. Застосовується як підготовча операція для наступного нарощування зовнішньої поверхні. Відомий спосіб обтиснення втулки з наступним нарощуванням зовнішньої поверхні контактним наварюванням стрічки [5].

Роздача (дорнування) – збільшення внутрішнього діаметра за рахунок пластичного перерозподілу металу при проходженні через отвір деформуючого елемента (кульки, пуансона) [6].

Загальними недоліками методів об'ємного деформування є: неможливість відновлення більш ніж на 1...2 ремонтні розміри, зниження втомної міцності та вплив на початкову геометрію отвору (овальність, конусність) [5].

1.3.3 Відновлення поверхневим пластичним деформуванням (ППД)

Ця група методів передбачає локальний пластичний перерозподіл металу без зміни довжини деталі і є найбільш перспективною для фінішної обробки внутрішніх поверхонь втулок.

Розкочування (кульками або роликами) забезпечує зменшення внутрішнього розміру на 0,02...0,06 мм, вигладжування мікронерівностей та зміцнення поверхневого шару. Недолік – вирівнювання мікроканалок, що зменшує маслоємність поверхні [4].

Вібродозкочування – надання деформуючому інструменту (кульці), крім обертального та поступального руху, ще й осцилюючого (вібраційного) руху. Це дозволяє отримувати повністю регулярний мікрорельєф (ПРМР) із заданими параметрами шорсткості та маслоємності, що є критично важливим для умов граничного тертя [7].

Електро механічна обробка (ЕМО) поєднує термічний та силовий вплив. При пропусканні струму великої сили (400...800А) з низькою напругою (2...6В) через інструмент і деталь відбувається локальне нагрівання зони контакту, що полегшує пластичне деформування і дозволяє збільшувати подачу. Метод дозволяє відновлювати зноси до 0,35 мм, але потребує складного джерела живлення та ізоляції [4].

Деформуюче протягування (прошивання) – інструмент (прошивка) має один або декілька деформуючих конусів. При проході через отвір відбувається пружно-пластична деформація, що збільшує діаметр, зменшує шорсткість і підвищує твердість поверхні. Товщина зміцненого шару може досягати 1,5...2,0 мм [4].

Комбіноване протягування (різання і деформування) – інструмент поєднує ріжучі зуби та деформуючі елементи. Це дозволяє за один прохід зняти

припуск (різанням) і одночасно сформувати зміцнений шар з оптимальною мікрогеометрією (деформуванням). Такий підхід вважається найбільш прогресивним для фінішної обробки отворів [8].

1.4 Обґрунтування вибору комбінованого методу відновлення

Проведений у попередніх підрозділах аналіз показує, що більшість існуючих способів відновлення внутрішніх поверхонь шатунних втулок мають суттєві недоліки, які унеможливають їх ефективне застосування в умовах серійного ремонту:

1. Методи нанесення покриттів (електролітичні, газотермічні, наплавлення) потребують випресовки втулки, мають високу енергоємність, значні витрати матеріалів та часто погіршують антифрикційні властивості через неоднорідність структури [1].
2. Методи об'ємного пластичного деформування (осаджування, обтиснення) не забезпечують необхідної точності форми отвору, змінюють висоту втулки, що негативно впливає на питомі навантаження, або потребують складного пресового обладнання [2].
3. Традиційне розкочування кульками або роликами дозволяє лише вигладжувати поверхню, не створюючи регулярного мікрорельєфу, що зменшує маслоємність і погіршує умови роботи в режимі граничного тертя [3].

Враховуючи це, а також специфічні вимоги до відновлення шатунних втулок (допустимий знос $\leq 0,1$ мм, робота в умовах граничного тертя, заборона на випресовування, потреба в підвищенні зносостійкості), найбільш раціональним є використання комбінованого методу поверхневого пластичного деформування (ППД), який поєднує дві послідовні операції: вібророзкочування та деформуюче протягування [4].

1.4.1 Обґрунтування вибору вібророзкочування

Вібророзкочування полягає в тому, що деформуючому інструменту (кульці), крім обертального та поступального руху, надається додатковий осцилюючий (вібраційний) рух. Це дозволяє отримувати на оброблюваній поверхні повністю регулярний мікрорельєф (ПРМР) із заданими параметрами шорсткості та маслоємності [5].

Переваги вібророзкочування для відновлення шатунних втулок:

1. Можливість обробки без випресування втулки з шатуна;
2. Зменшення внутрішнього діаметра на величину 0,05...0,10 мм, що достатньо для компенсації граничного зносу;
3. Утворення на поверхні регулярних мікроканалов (гвинтових або кільцевих), які виконують роль додаткових масляних кишень, що особливо важливо при граничному терті та пускових режимах [6];
4. Зміцнення поверхневого шару (наклеп) на глибину до 0,3...0,5 мм за рахунок пластичної деформації [3].
5. Основним недоліком вібророзкочування є деяке зменшення опорної площі поверхні через наявність мікровиступів між канавками.

1.4.2 Обґрунтування вибору деформуючого протягування

Деформуюче протягування (в нашому випадку – прошивання) є процесом, при якому через попередньо оброблений отвір протягують/проштовхують інструмент (протяжку або прошивку), робоча частина якого має один або декілька калібруючих кілець із твердого сплаву з

робочою частиною у вигляді конуса. При цьому відбувається пружно-пластична деформація оброблюваного металу, що забезпечує [3]:

1. Збільшення опорної площі поверхні (площа контакту з поршневим пальцем зростає в 1,5...2,0 рази порівняно з вібророзкотною поверхнею);
2. Остаточне калібрування отвору до номінального розміру (або заданого ремонтного) з високою точністю (6...8 квалітет);
3. Зниження шорсткості до $Ra_{0,1...0,2}$ мкм;
4. Зміцнення поверхневого шару на більшу глибину (до 1,0...1,5 мм) порівняно з вібророзкочуванням [7];
5. Підвищення втомної міцності деталі за рахунок створення сприятливих залишкових напружень стиску [6].

1.4.3 Висновки та переваги комбінованого методу відновлення

Послідовне застосування вібророзкочування та деформуючого прошивання дозволяє отримати поверхню з унікальними трибологічними характеристиками: регулярний мікрорельєф забезпечує надійне утримання мастила, а високоопорна згладжена поверхня («плато» між мікроканавками) – мінімальне тертя та зношування в парі з поршневим пальцем. Така будова поверхні є найбільш доцільною для роботи в умовах граничного тертя при високих питомих навантаженнях [4].

Крім того, комбінований метод має суттєві техніко-економічні переваги:

1. відсутність потреби у випресовуванні – втулка відновлюється безпосередньо в шатуні;

2. мінімальний припуск на обробку (знімається шар до 0,05 мм включно), завдяки чому виключається необхідність попереднього нанесення матеріалу (як при наплавленні або гальваніці);
3. висока продуктивність – весь процес прошивання займає 20...40 секунд на одну втулку;
4. відсутність витратних матеріалів (електродів, порошків, флюсів, електролітів);
5. екологічність – немає шкідливих викидів та стоків [8];
6. можливість багаторазового відновлення – після наступного зносу операцію можна повторити (за умови збереження достатньої товщини стінки втулки).

Таким чином, запропонований комбінований метод «вібророзкочування і наступне деформуюче прошивання» є найбільш раціональним для ремонту бронзових шатунних втулок, оскільки він:

1. Усуває знос до 0,10 мм без зняття стружки та нанесення матеріалу;
2. Не потребує випресування втулки з шатуна;
3. Забезпечує формування регулярного мікрорельєфу з оптимальною маслоємністю;
4. Значно підвищує опорну площу та зносостійкість поверхні;
5. Відрізняється високою продуктивністю, низькою собівартістю та екологічністю.

Саме на основі цього методу запропоновано вдосконалену конструкцію пристрою для вібророзкочування (багатокульковий розкатник з вузлом осциляції), конструкцію деформуючої прошивки та технологічний процес відновлення.

2.1 Розробка кінематичної схеми пристрою для нанесення регулярного мікрорельєфу

[illegible]

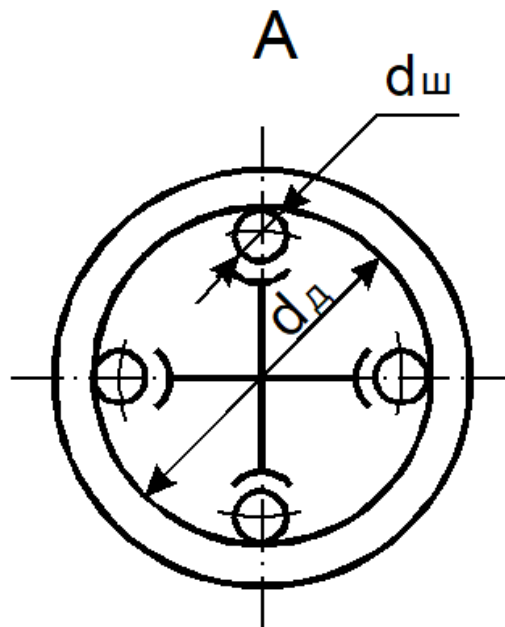


Рисунок 2.1. Кінематична схема пристрою для нанесення регулярного мікрорельєфу на внутрішні циліндричні поверхні: I – ведучий вузол; II – кульковий розкатник; III – осциляційний вузол; 1 – втулка шліцьова; 2, 19 – гвинт регулюючий; 3 – елемент деформуючий (кулька); 4 – конус рухомий; 5 – шпонка; 6 – палець; 7 – корпус розкатника; 8 – стопор; 9 – вал осцилятора; 10 – упор рухомий; 11 – кульковий підшипник; 12 – копір змінний; 13 – кришка осцилятора задня з конусом Морзе; 14 – корпус осцилятора; 15 – маточина; 16 – байонет; 17 – кільце сепаратора нерухоме; 18 – кільце сепаратора рухоме; 20 – вал шліцьовий.

Спосіб функціонування розробленого механізму, який складається з ведучого вузла, вузла осциляції та багатокулькового розкатника, змонтованих на токарно-гвинторізному верстаті, зводиться до того, що багатокульковий розкатник виконує обертальний і зворотно-поступальний рух уздовж осі оброблюваної деталі, якій надається рух подачі [2].

Ведучий вузол – шліцьова втулка, в якій при осциляції переміщається шліцевий вал розкатника. Багатокульковий розкатник складається зі шліцьового

вала, корпуса, рухомого конуса, обойм сепаратора та деформувальних кульок. Рухомий конус зафіксований на сегментній шпонці від провертання і може переміщатися вздовж неї по осі вала. На зовнішній поверхні конуса виконано поздовжні канавки з радіусом, більшим за радіус кульок, що забезпечує їх точну фіксацію по колу [3].

Процес налаштування натягу виконується так. Для його збільшення рухомий конус пересувають ліворуч за допомогою болтів (інші болти при цьому відгвинчують), і рухома обойма сепаратора також зсувається ліворуч. Після досягнення потрібного натягу один болт із контргайкою обмежує хід конуса вправо, а інший фіксує його від руху вліво. Іншими болтами закріплюють конус та рухому обойму сепаратора відносно нерухомої обойми у такому положенні, за якого кульки можуть вільно обертатися [4].

Осциляційний вузол складається з корпуса, передньої та задньої кришок з направляючими втулками, вала з маточиною і змінним копіром, упора, встановленого на гвинті. Кришки з'єднані з корпусом шпильками. Для демонтажу копіра передбачена знімна втулка, що запресовується в корпус і утримується в ньому болтами [2].

Пристрій працює наступним чином. Знімний багатокульковий розкатник встановлюється всередину оброблюваної втулки так, щоб шліцевий кінець вала входив у шліцеву втулку ведучого вузла, а кульки розташовувалися праворуч від поверхні, на яку наноситься мікрорельєф. У цьому положенні розкатник з'єднується з валом осцилятора. При обертанні шпинделя верстата обертальний рух передається шліцевій втулці, багатокульковому розкатнику і валу осцилятора з копіром. У зв'язку з тим, що кулькопідшипник рухомого упора входить у нахилений паз копіра, всі обертові деталі, крім шліцевої втулки, будуть виконувати так само і зворотно-поступальний рух уздовж осі оброблюваної втулки, якій повідомляється рух подачі. Накладення обертального і зворотно-поступального рухів деформуючих елементів і поступального

переміщення деталі забезпечує створення регулярного мікрорельєфу на оброблюваній поверхні [1].

Таким чином, у запропонованому пристрої осцилювання інструмента і його обертання здійснюється від одного приводу – приводу верстата, що забезпечує жорсткий кінематичний зв'язок і дозволяє отримувати ПРМР із заданими параметрами [2].

2.2 Конструкція багатокулькового розкотника та вузла осциляції

2.2.1 Багатокульковий розкотник

Багатокульковий розкотник (рис. 2.2) є основним робочим органом запропонованого пристрою і призначений для пластичного деформування внутрішньої поверхні втулки з метою створення регулярного мікрорельєфу та зміцнення поверхневого шару [1].

Конструктивно розкотник складається з наступних елементів [1]:

1. шліцьового валу, який забезпечує передачу обертального руху та осьове переміщення при осциляції;
2. корпусу, в якому розміщені всі внутрішні елементи;
3. рухомого конуса, що переміщається вздовж осі вала і забезпечує радіальне переміщення кульок при регулюванні натягу;
4. рухомого та нерухомого кілець сепаратора, які фіксують положення кульок по колу;
5. деформуючих елементів (кульок), що безпосередньо контактують з оброблюваною поверхнею;

6. регулювальних болтів, контргайок, установочних штифтів, гвинтів та шпонки.

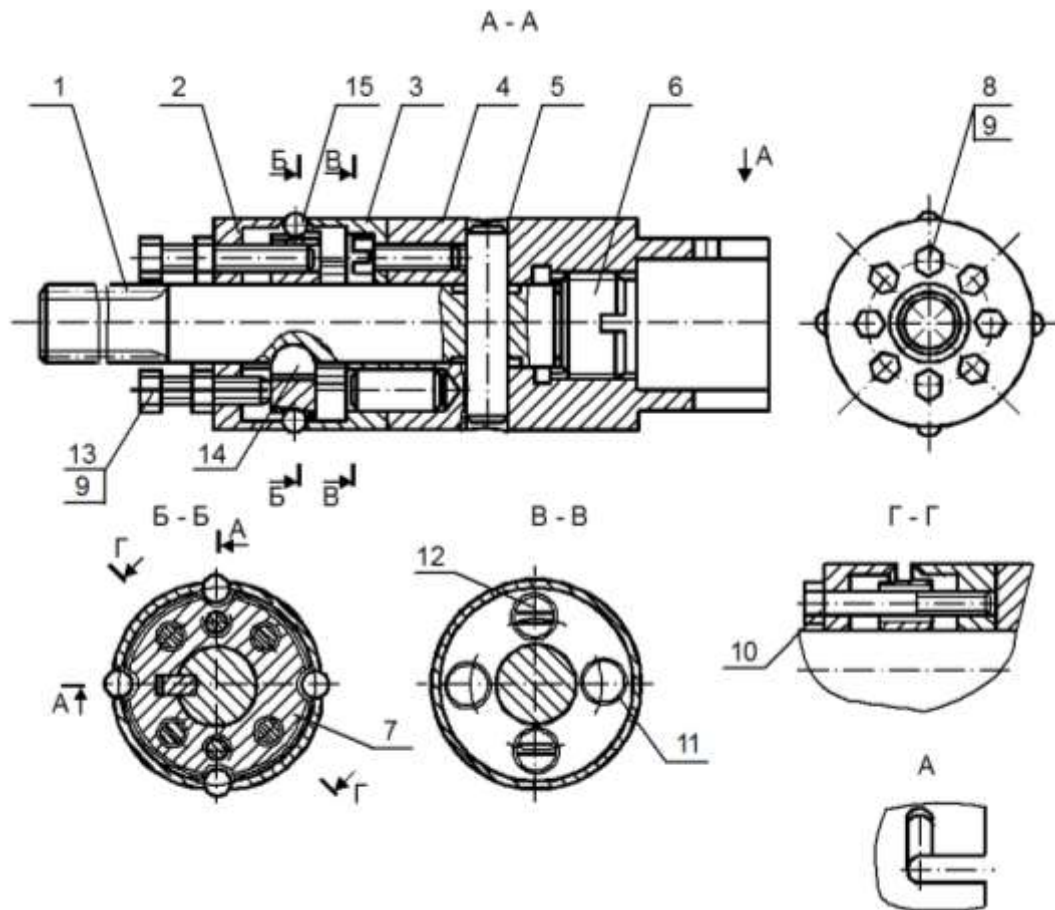


Рисунок 2.2. Конструкція багатокулькового розкотника: 1 – вал шліцьовий; 2 – кільце сепаратора рухоме; 3 – кільце сепаратора нерухоме; 4 – корпус; 5 – палець; 6 – пробка різьбова; 7 – конус; 8, 10, 13 – болт регулюючий; 9 – контргайка; 11 – штифт установочний; 12 – гвинт; 14 – шпонка; 15 – елемент деформуючий (кулька).

Рухомий конус фіксується на сегментній шпонці, яка унеможливає його обертання, і здатний зсуватися вздовж неї по осі шліцьового валу. Зовнішня поверхня конуса має поздовжні циліндричні пази, радіус основи яких дещо більший за радіус кульок. Це забезпечує точне фіксування кульок по колу та їхнє вільне обертання під час роботи [1].

Регулювання радіального натягу кульок на оброблювану поверхню здійснюється наступним чином:

1. щоб підвищити натяг, рухомий конус за допомогою налагоджувальних гвинтів зсувається ліворуч (інші гвинти при цьому викручуються), а рухома обойма сепаратора так само зміщується вліво;
2. після досягнення необхідного натягу один з болтів з контргайкою обмежує хід конуса праворуч, а другий – фіксує його від переміщення вліво;
3. решта болтів закріплюють конус та рухому обойму сепаратора у такому взаємному розташуванні з нерухомою обоймою, яке дозволяє кулькам вільно обертатися [2].

Така конструкція дозволяє точно регулювати натяг на деформуючі елементи, що є критичним для отримання якісного регулярного мікрорельєфу.

2.2.2 Вузол осциляції

Вузол осциляції (рис. 2.3) призначений для надання багатокульковому розкатнику зворотно-поступального (вібраційного) руху вздовж осі оброблюваної деталі.

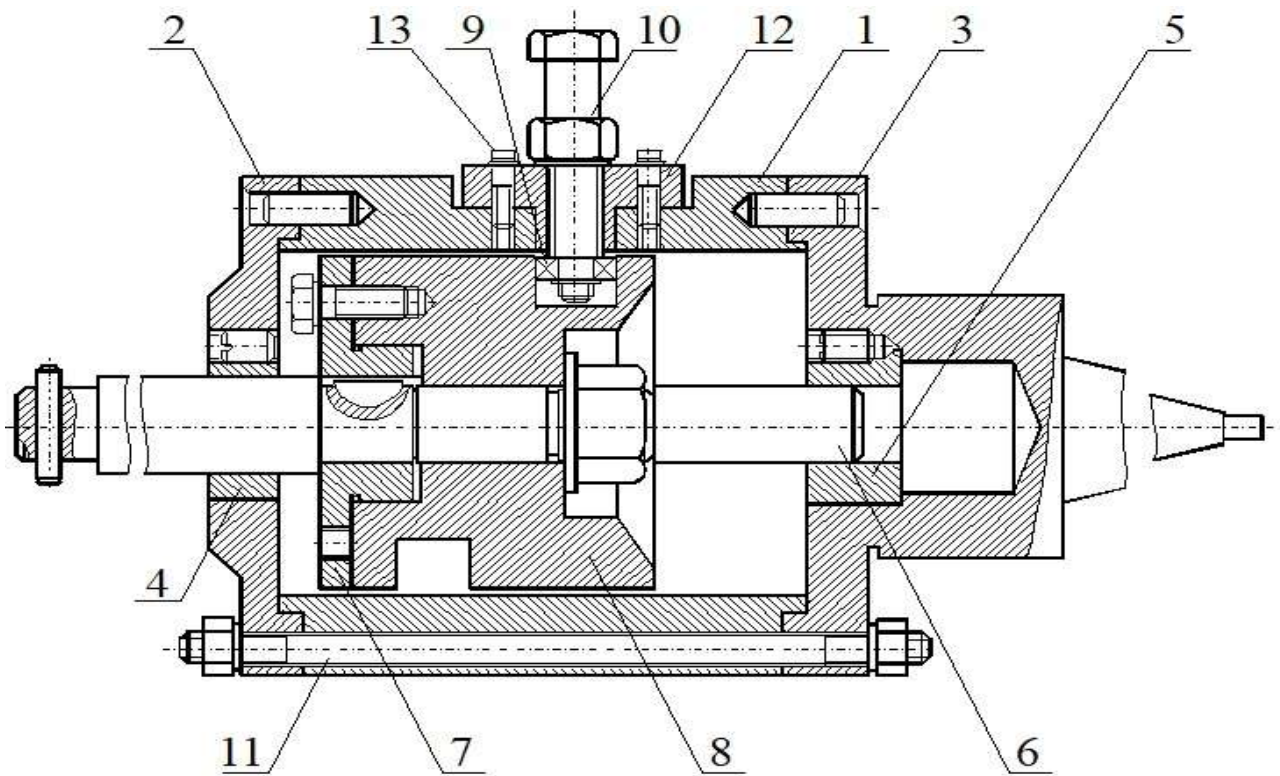


Рисунок 2.3. Осциляційний вузол: 1 – корпус; 2 – кришка передня; 3 – кришка задня; 4, 5 - втулка напрямна; 6 – вал; 7 – маточина; 8 – копір змінний; 9 – упор; 10 – гвинт; 11 – шпилька; 12 – втулка знімна; 13 – болт.

Конструктивно він складається з [1]:

1. корпусу, який кріпиться на супорті верстата;
2. передньої та задньої кришок з направляючими втулками, які забезпечують точне осьове переміщення вала;
3. валу з маточиною, на якому закріплено змінний копір;
4. змінного копіра, що має нахилений паз, форма якого визначає закон руху осциляції;
5. упору, встановленого на гвинті, який через кулькопідшипник взаємодіє з пазом копіра;
6. знімної втулки для демонтажу копіра, що запресовується в корпус і утримується болтами.

Принцип дії вузла осциляції наступний. При обертанні шпинделя верстата обертальний рух через шліцеву втулку передається валу осцилятора з копіром. Кулькопідшипник рухомого упора входить у нахилений паз копіра, тому при обертанні вала упор здійснює зворотно-поступальний рух, передаючи його через маточину на вал розкатника. Амплітуда та частота осциляції визначаються кутом нахилу паза копіра та швидкістю обертання [2].

Для зміни параметрів регулярного мікрорельєфу (кроку витків, глибини канавок) передбачена можливість заміни копіра. Різні копії мають пази з різними кутами нахилу, що дозволяє адаптувати процес до різних типорозмірів втулок та вимог до шорсткості [1].

2.2.3 Взаємодія складових частин

У зібраному стані багатокульковий розкатник встановлюється всередину оброблюваної втулки, після чого його шліцевий вал з'єднується з валом осцилятора за допомогою байонетного замка. Така конструкція забезпечує швидко заміну інструменту та надійне з'єднання під час роботи [2].

Сумісна робота багатокулькового розкатника та вузла осциляції дозволяє отримати на внутрішній поверхні втулки регулярний мікрорельєф у вигляді гвинтових канавок, параметри яких (крок, глибина, форма) визначаються режимами обробки (частотою обертання, амплітудою осциляції, поздовжньою подачею) [1].

2.3 Характеристика та аналіз технологічності шатунної втулки

Об'єктом відновлення є втулка верхньої головки шатуна двигуна внутрішнього згоряння (дизельний двигун СМД-62). Втулка виготовлена з бронзи марки БрО6Ц6С3 (ГОСТ 613-79), хімічний склад та твердість якої

наведено в табл. 1 (розділ 1). Механічні властивості: межа міцності при розтягу $\sigma_B \approx 250$ МПа, межа текучості $\sigma_T \approx 150$ МПа, твердість HB $\approx 70 \dots 80$ (0,07 ГПа).

Геометричні параметри втулки (згідно з кресленням):

- внутрішній діаметр $D=44,0$ мм (номінал);
- зовнішній діаметр $D_3=51$ мм;
- довжина (висота) $L=45$ мм;
- товщина стінки $t=3,5$ мм.

Втулка запресована у верхню головку шатуна і в процесі експлуатації не випресовується. Робоча поверхня – внутрішній циліндричний отвір, який сполучається з поршневим пальцем. До цього отвору ставляться такі технічні вимоги:

1. точність діаметрального розміру – за 7...8 квалітетом ($\varnothing 44_{-0,025}^{+0}$ або $\varnothing 44_{-0,020}^{+0}$ залежно від ремонтного креслення).
2. шорсткість поверхні – $Ra \leq 0,32$ мкм (для нової втулки) або $Ra \leq 0,63$ мкм після відновлення.
3. допустимий радіальний знос (граничний стан) – не більше 0,10 мм. При збільшенні зазору понад 0,12...0,15 мм під час роботи двигуна виникають удари, стук та інтенсивне зношування пальця.
4. похибка геометричної форми (овальність, конусність) – у межах 0,01...0,02 мм.
5. на робочій поверхні не допускаються задири, подряпини, сліди корозії та механічні пошкодження.

Аналіз технологічності виготовлення та відновлення втулки:

- тонкостінність ($t=3,5$ мм) вимагає обережних режимів обробки, особливо при механічному знятті стружки (розточуванні, хонінгуванні), щоб уникнути деформації.

- наявність запресування унеможливорює використання методів, що потребують вільного доступу до зовнішньої поверхні (наприклад, наплавлення або осаджування без спеціального оснащення).

- високі вимоги до чистоти поверхні виключають застосування звичайних різальних інструментів без фінішної обробки (притирання, хонінгування або ППД).

- малий допустимий знос (0,10 мм) робить недоцільним використання методів, що потребують нанесення товстих шарів (наплавлення, гальваніка), оскільки припуск на подальшу механічну обробку буде більшим, ніж сам знос.

Таким чином, традиційна технологія відновлення (розгортання під ремонтний розмір з виготовленням нестандартного пальця) є трудомісткою, а методи нанесення покриттів – енергоємними та економічно недоцільними. Найбільш раціональним є використання поверхневого пластичного деформування (ППД), яке дозволяє усунути знос без зняття стружки, не випресовуючи втулку, та створити оптимальний мікрорельєф для роботи в умовах граничного тертя.

2.4 Розробка конструкції деформуючої прошивки для калібрування отвору втулки

Для фінішної обробки (калібрування) внутрішнього отвору шатунної втулки після вібророзкочування розроблено збірну деформуючу прошивку. Інструмент призначений для пластичного роздавання отвору до номінального діаметра $\varnothing 44^{+0}_{-0,020}$, згладжування мікронерівностей, створених вібророзкочуванням, та формування високоопорної поверхні («плато» між мікроканавками).

Багатокульковий розкатник вводять усередину втулки, де деформуючі кульки, розташовані по колу в сепараторі, під дією рухомого конуса розтискаються і контактують із внутрішньою поверхнею. При обертанні

розкатника кульки перекачуються по поверхні, пластично видавлюючи метал і створюючи регулярний мікрорельєф.

Водночас вузол осциляції, встановлений на супорті верстата, через обертання вала з копіром передає зворотно-поступальний рух валу розкатника за допомогою кулькопідшипника, який рухається по нахиленому пазу. Одночасно з обертанням це забезпечує осциляцію кульок уздовж осі, а поздовжня подача деталі накладається на ці рухи, формуючи гвинтовий регулярний мікрорельєф на внутрішній поверхні втулки.

Після завершення вібророзкочування втулку переносять на гідравлічний прес, де збірну деформуючу прошивку закріплюють у штоку. Втулку фіксують у затискному пристосуванні, забезпечуючи співвісність її отвору з віссю прошивки. Подачу МОР (5 % емульсія) здійснюють зовнішнім зрошенням безпосередньо в зону контакту інструмента з деталлю.

При робочому ході штока преса перше деформуюче кільце (зовнішнім діаметром 43,80 мм) своїм робочим конусом розпочинає пластичне роздавання отвору та згладжує мікронерівності, друге кільце (43,92 мм) продовжує деформацію, збільшуючи діаметр до проміжного значення, а третє калібруюче кільце (44,00 мм) з найдовшою циліндричною стрічкою остаточно формує номінальний діаметр $\varnothing 44$ мм, необхідну шорсткість $Ra\ 0,16\ldots 0,32$ мкм та високоопорну поверхню («плато» між мікроканавками). МОР безперервно подається протягом усього ходу, знижуючи тертя, охолоджуючи зону деформації та вимиваючи мікрочастинки бронзи.

Після проходження всіх трьох кілець через отвір шток продовжує рух до повного виходу прошивки з деталі. Завдяки більшому куту зворотного конуса кілець (10° проти 4° робочого) при зворотному ході контакт із поверхнею мінімальний, що виключає повторне деформування. Деталь звільняють від затискного пристосування та передають на контроль.

2.4.1 Принцип роботи та загальна будова

Прошивка (рис. 2.4) складається з наступних основних елементів:

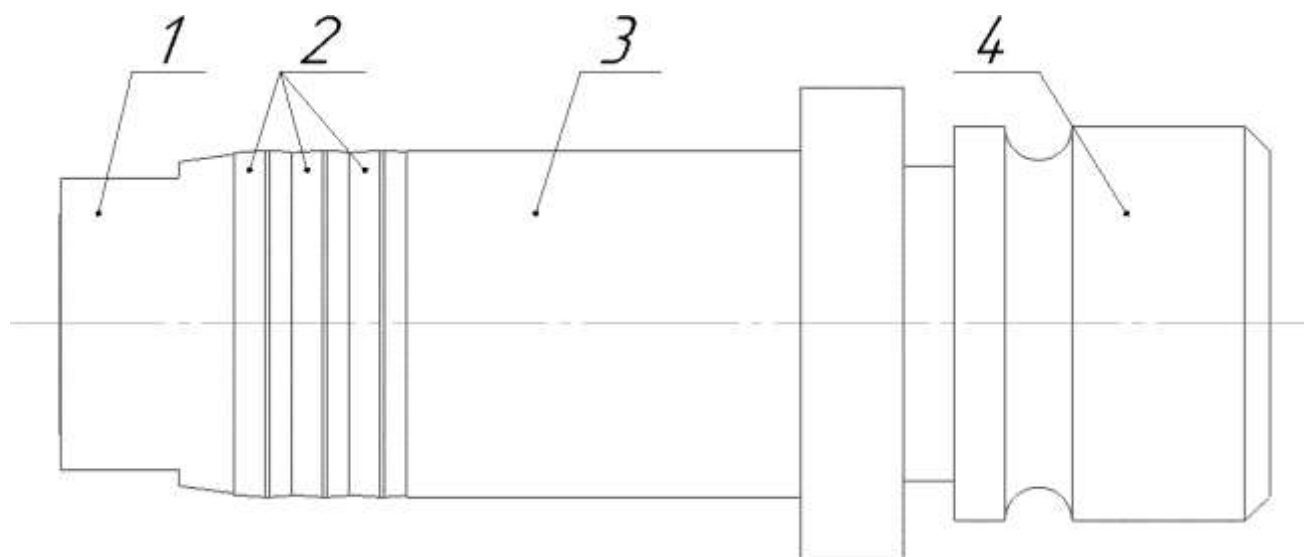


Рисунок 2.4 – Схема деформуючої прошивки

1 – гайка стяжна (сталь 40Х) для фіксації пакета деталей; 2 – деформуючі кільця (три штуки) з твердого сплаву ВК6; 3 – дистанційна втулка (сталь 45); 4 – циліндрична оправка з хвостовиком (сталь 40Х, загартована).

На оправку в такій послідовності нанизуються: дистанційна втулка, третє деформуюче кільце, друге кільце, перше кільце, потім нагвинчується гайка. Затягування гайки створює осьовий натяг, який жорстко фіксує всі елементи на оправці. Гайка кріпиться до оправки за допомогою різьби М27×1,5.

Таблиця 2. Зовнішні діаметри кілець (за ходом прошивки):

№ кільця	Призначення	Діаметр, мм	Діаметральний натяг (відносно $D_{\text{попер}} \approx 43,72$ мм)
1 (переднє)	Центрування, початок деформації	43,80	0,08 мм

№ кільця	Призначення	Діаметр, мм	Діаметральний натяг (відносно $D_{\text{попер}} \approx 43,72$ мм)
2 (середнє)	Основне пластичне деформування	43,92	0,12 мм
3 (заднє)	Калібрування +згладжування	44,00	0,08 мм

Такий розподіл натягів забезпечує поступове наростання деформації, виключає перевантаження матеріалу втулки та утворення задирів. Останнє кільце (калібруюче) має мінімальний натяг (0,08 мм) і максимальну довжину циліндричної стрічки – для остаточного формування розміру та шорсткості.

2.4.2 Матеріали та вимоги до термообробки

- Деформуючі кільця – твердий сплав групи ВК6 (ГОСТ 3882-74). Твердість HRA 87...89, межа міцності на згин $\sigma_{zg} = 1400$ МПа.
- Оправка з хвостовиком, гайка – сталь 40Х (ДСТУ 4543:2006). Після механічної обробки – гартування до HRC 40...45 та відпуск.
- Дистанційні втулки – сталь 45 (ГОСТ 1050-88), нормалізована.

2.4.3 Порівняння з базовою технологією

Запропонована прошивка замінює операції чистового розгортання або хонінгування, які зазвичай використовують після наплавлення або гальванічного нарощування. На відміну від різальних інструментів, деформуюча прошивка не знімає стружку, а пластично перерозподіляє метал, що дозволяє:

- зменшити шорсткість з $Ra \approx 0,6$ мкм після вібророзкочування до $Ra \approx 0,16 \dots 0,32$ мкм;

- підвищити твердість поверхневого шару на 20...30% за рахунок наклепу;
- уникнути додаткового припуску на механічну обробку (економія матеріалу).

2.5 Розрахунок на міцність твердосплавних деформуючих елементів

Розрахунок деформуючих елементів на міцність виконується за методикою, наведеною в [2, 9, 11]. Твердосплавне кільце розглядаємо як симетрично навантажений елемент (зони контакту з оброблюваною поверхнею знаходяться на рівних відстанях від торців). Мета розрахунку – визначення товщини стінки t_k , висоти L_k мінімальної конструктивної висоти $L_{k,д}$ та відстані від торця до циліндричної стрічки h' . Розрахунок виконується в наступній послідовності:

Вихідні дані для розрахунку:

Зовнішній діаметр елемента: $D_k = 44$ мм

Діаметр отвору елемента: $d_k = 30$ мм

Сила протягування: $Q = 4000$ Н

Матеріал: Твердий сплав ВК6 (межа міцності $\sigma_{из.в.ст.} = 1400$ МПа);

Кут робочого конусу: $\alpha = 4^\circ$;

Фактичний натяг на елемент: $\alpha_\phi = 0,1$ мм.

1) Визначаємо товщину стінки деформуючого елемента:

$$t_k = 0.329 \frac{Q^{0,735} \cdot K_L \cdot 0,938^l}{f^{0,43} \cdot [\sigma_{из}]^{0,735} \cdot D_{K0,36}}$$

де Q – сила протягування;

K_L – коефіцієнт висоти деформуючого елемента (відношення фактичної висоти деформуючого елемента до його оптимальної висоти $L_{\text{опт}}$), значення якого приведено в [1];

l – фактична ширина контакту робочої поверхні елемента з оброблюваною поверхнею, яка залежить від діаметра отвору d_0 та товщини стінки t_0 деталі до обробки, а також від величини фактичного натягу α_f , значення обираємо із [1];

f – коефіцієнт тертя при деформуючому прошиванні;

$[\sigma_{\text{из}}]$ – допустиме напруження на згин для твердого сплаву;

D_k – зовнішній діаметр деформуючого елемента, приймаємо конструктивно.

Допустиме напруження на згин для твердого сплаву визначаємо за формулою:

$$[\sigma_{\text{из}}] = \frac{\sigma_{\text{из.в.}} \cdot K_{\text{п.с.}}}{K_{\text{з.п.}}}$$

де $\sigma_{\text{из.в.}}$ - фактична межа міцності твердого сплаву на згин;

$$\sigma_{\text{из.в.}} = 4,62 \cdot D_k^{-0,36} \cdot t_k^{-0,45} \cdot \sigma_{\text{из.в.ст.}}$$

де $\sigma_{\text{из.в.ст.}}$ – межа міцності твердого сплаву на згин, який оговорено ДСТУ;

Приймаємо попередньо товщину стінки $t_k = 7$ мм (для $D=44$, $d=30$).

$$\sigma_{\text{из.в.}} = 4,62 \cdot 44^{-0,36} \cdot 7^{-0,45} \cdot 1400 = 0,69 \text{ ГПа}$$

$K_{\text{п.с.}}$ коефіцієнт, що залежить від посадки деформуючого елемента на оправку протяжки;

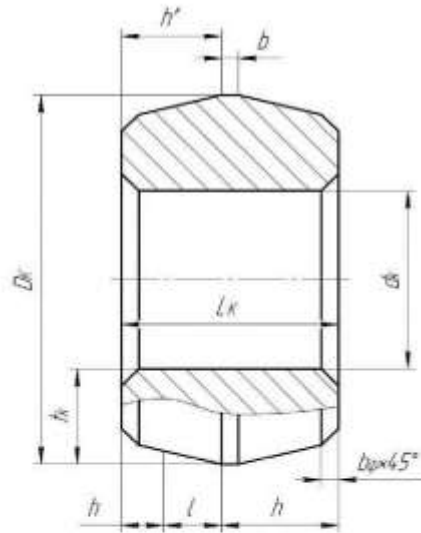


Рисунок 2.5 – Схема до розрахунку на міцність твердосплавного деформуючого елемента симетрично навантаженої форми

Розрахунок коефіцієнту посадки $K_{п.с.}$ при зазорі $= -0.03$ мм;

$$K_{п.с.} = 1,1 \cdot d_k^{0.33} \cdot t_k^{-0.42} \cdot e^{\frac{310 + \Delta^{1.1}}{d_k}} \cdot K_{\phi}$$

Де d_k – діаметр отвору деформуючого елемента, приймаємо конструктивно;

e – основа натурального логарифма;

Δ - зазор або натяг між поверхнею отвору деформуючого елемента і оправкою протяжки, при натягу має додатній знак, а при зазорі – від’ємний;

K_{ϕ} - коефіцієнт форми отвору деформуючого елемента.

$$K_{п.с.} = 1,1 \cdot 30^{0.33} \cdot 7^{-0.42} \cdot e^{\frac{310 + (-0.03)^{1.1}}{30}} \cdot 1 \approx 1,095$$

$$K_{п.с.} = 1,095; \text{ приймемо } K_{п.с.} = 1,1$$

При визначенні $\sigma_{из.в.}$ та $K_{п.с.}$, підставляємо товщину стінки елемента, обрану конструктивно та рівну 4 мм.

$K_{з.п.=1,8}$ коефіцієнт запасу міцності, визначається із [1].

$$[\sigma_{из.}] = \frac{0,69 \cdot 1,1}{1,8} \approx 0,420 \text{ ГПа.}$$

Визначаємо товщину стінки деформуючого елемента:

$$t_k = 0,329 \frac{4000^{0,735} \cdot 1,2 \cdot 0,938^{1,6}}{0,1^{0,43} \cdot 0,42^{0,735} \cdot 44^{0,36}} \approx 6,466 \text{ мм}$$

Порівнюємо отримане значення $t_k = 6,4 \text{ мм}$ та прийняте конструктивно $t_k = 7 \text{ мм}$. Їх різниця не перевищує $1,6 \text{ мм}$, тому приймаємо первісне значення $t_k = 7 \text{ мм}$.

Знаходимо висоту деформуючого елемента:

$$L_K = K_L \cdot \left[\frac{l}{2} \cdot \sqrt{\frac{l^2}{4} + \frac{8 \cdot v \cdot R_k \cdot W}{\pi \cdot (R_k^2 - r_k^2)}} \right],$$

де R_k і r_k відповідно зовнішній радіус і радіус отвору деформуючого елемента.

$$R_k = \frac{D_k}{2} = \frac{44}{2} = 22 \text{ мм}$$

$$r_k = \frac{r_k}{2} = \frac{30}{2} = 15 \text{ мм}$$

v - відношення межі міцності твердого сплаву при згині до межі міцності при стиску, для ВК6 $v = 0,30$;

W – момент опору згину деформуючого елемента в перерізі перпендикулярному до вісі, мм^3 . Значення W знаходимо за формулою:

$$W = \frac{9 \cdot (R_k^4 - r_k^4) \cdot (R_k^2 - r_k^2) - 8 \cdot (R_k^3 - r_k^3)^2}{12 \cdot (R_k^3 - r_k^3) - 18 \cdot (R_k^2 - r_k^2) \cdot r_k} \cdot \pi$$

$$W = \frac{9 \cdot (22^4 - 15^4) \cdot (22^2 - 15^2) - 8 \cdot (22^3 - 15^3)^2}{12 \cdot (22^3 - 15^3) - 18 \cdot (22^2 - 15^2) \cdot 15} \cdot 3,14 = 881,712 \text{ мм}^3$$

Визначимо висоту деформуючого елемента:

$$L_K = 1,2 \cdot \left[\frac{1,6}{2} \cdot \sqrt{\frac{1,6^2}{4} + \frac{8 \cdot 0,3 \cdot 22 \cdot 881,712}{3,14 \cdot (22^2 - 15^2)}} \right] = 7,296 \text{ мм}$$

Визначимо мінімальну допустиму (з конструктивних міркувань) висоту $L_{к.д.}$ деформуючого елемента:

$$L_{к.д.} = \frac{\alpha_\phi}{2 \cdot \tan \alpha} + b + 2 \cdot (b_{\text{фас}} + c)$$

де b - ширина циліндричної стрічки, $b=0,5$ мм;

α - кут робочого конуса, $\alpha = 4^\circ$;

$b_{\text{фас}}$ - ширина фаски, $b_{\text{фас}} = 0,5$ мм;

c - неробоча ділянка робочого конусу, що дорівнює довжині зворотного конусу, $c=2$ мм.

$$L_{к.д.} = \frac{0,06}{2 \cdot \tan 4} + 0,5 + 2 \cdot (0,5 + 2) \approx 5,9 \text{ мм}$$

Умова міцності виконується, так як мінімально допустима висота $L_{к.д.}$, менша, ніж розрахована висота деформуючого елемента.

Мінімальна відстань h' від торця деформуючого елемента до циліндричної стрічки:

$$h' = \frac{L_{к.д.} + l}{2},$$

де $L'_{к.д.}$ прийнята з умови міцності та конструктивних міркувань висота деформуючого елементу.

$$L'_{к.д.} \geq L_{к.д.}$$

$$h' = \frac{5,9 + 1,6}{2} = 3,75 \text{ мм}$$

Приймаємо за конструктивним міркуванням: $h' = 4$ мм. Приведений розрахунок дає гарантію, що деформуючий елемент, який має знайдені значення геометричних розмірів, задовольняє вимоги міцності на згин та стиск.

2.6 Розрахунок на міцність різьбового з'єднання

Розрахунок виконується для різьбового з'єднання «оправка-гайка» (рис. 2.6), оскільки воно сприймає основне навантаження при зворотному ході інструмента. Різьба – M27×1,5. Розрахунок проводимо на розтяг різьбового кінця оправки та зминання різьби. Вплив скручування від затягування гайки враховуємо збільшенням осрової сили на 10%.

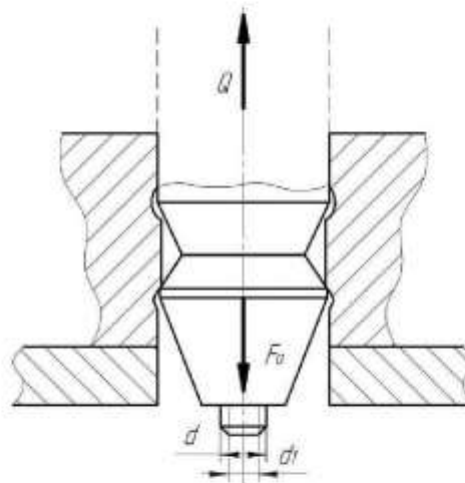


Рисунок 2.6 – Схема сил, що діють у різьбовому з'єднанні «оправка-гайка»

Умова міцності оправки:

$$Q_p = [\sigma_p] \cdot \frac{\pi \cdot d_1}{4}$$

Звідкіля

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_p}{\pi \cdot [\sigma_p]}}$$

де Q_p розрахункове осьове зусилля, Н;

$[\sigma_p]$ - допустиме напруження розтягу, $\frac{H}{mm^2}$;

d_1 - внутрішній діаметр різьби, мм.

$$Q_p = 4000$$

$$[\sigma_p] = 217$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 4000}{3,14 \cdot 217}} = 25,8 \text{ мм}$$

Таким чином різьба М27 буде достатня для даного з'єднання.

Розрахунок на міцність різьбового з'єднання при змінних навантаженнях проводимо по амплітуді циклу та по найбільшій напрузі циклу.

Умова міцності по амплітуді циклу:

$$n_\alpha = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_\alpha} \geq [n_\alpha]$$

де n_α - дійсний запас міцності по амплітуді;

$[n_\alpha]$ - допустимий запас міцності;

σ_{-1} - межа витривалості при розтягу матеріалу гладкого зразку при симетричному циклу, $\sigma_{-1} = 240 \frac{H}{мм^2}$;

K_σ - ефективний коефіцієнт концентрації напружень, $K_\sigma = 3.5$;

σ_α - амплітуда змінних напружень.

$$\sigma_\alpha = \frac{x \cdot Q}{2 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}}$$

де x - коефіцієнт зовнішнього навантаження, $x = 0.05$.

$$\sigma_\alpha = \frac{0,05 \cdot 4000}{2 \cdot \frac{3,14 \cdot 25,8^2}{4}} = 0,19$$

$$n_\alpha = \frac{240}{3,5 \cdot 0,19} = 360 > 2,5 = [n_\alpha]$$

Умова міцності по амплітуді циклу виконується.

Перевірка умови міцності по найбільшому напруженні циклу.

$$n = \frac{\sigma_m}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m}{\sigma_0 + 2 \cdot \sigma_\alpha} \geq [n]$$

де n - дійсний коефіцієнт запасу міцності по максимальному навантаженню;

σ_m - межа текучості матеріалу;

σ_0 - напруження від початкового затягування;

$[n]$ допустимий коефіцієнт, запасу міцності по максимальним напруженням.

$$\sigma_0 = \frac{4 \cdot Q_0}{\pi \cdot d_1^2} \leq [\sigma_0]$$

$$Q_0 = Q \cdot K$$

$$K=1,3$$

$$Q_0 = 4000 \cdot 1,3 = 5200 \text{ Па}$$

$$\sigma_m = 360$$

$$\sigma_0 = \frac{4 \cdot 5200}{3,14 \cdot 30^2} = 7,36 \leq 234 = [\sigma_0]$$

$$n = \frac{360}{7,36 + 2 \cdot 0,19} = 46,5 \geq 1,25 = [n]$$

Таким чином, міцність по найбільшій напрузі циклу забезпечена.

2.7 Організація робочого місця

Організація робочого місця відповідає вимогам ГОСТ 12.2.033-80.

Біля верстата передбачений стелаж, тумбочка, для розміщення різних інструментів, альбом технологічної документації. На підлозі, по всій довжині верстата, передбачена дерев'яні грати шириною 0,6 м від найбільш виступаючих частин верстата.

Для керування верстатом установлений пульт, що перебуває в моторному полі (зона 1). На пульті є кнопки «пуск» дворучного включення з відстанню між ними 300 мм. На пульті передбачена кнопка «стоп» грибоподібної форми збільшених розмірів червоного кольору.

Органи керування, позначені назвами або символами відповідно до ГОСТ 12.4.40-80.

Для сигналізації про хід виконання технологічної операції використовуються світлофільтри червоних, чорних, жовтих, зеленого, синього й білих кольорів.

Загальні висновки:

1) Проведений аналіз літературних джерел на задану тему показав, що традиційні методи відновлення шатунних втулок не завжди ефективні для усунення зносів до 0,1 мм через високу трудомісткість та необхідність випресовування;

2) Проведений комплекс робіт по підбору обладнання та пристосувань для відновлення робочої поверхні втулок; Запропоновано вдосконалений комбінований метод поверхневого пластичного деформування (вібророзкочування з наступним деформуючим прошиванням), розроблено відповідні конструкції багатокулькового розкатника, вузла осциляції та збірної прошивки;

3) Розроблена конструкція та вимоги до прошивного інструменту, із розробкою конструкторської документації. Перевірочні розрахунки підтвердили міцність тврдосплавних робочих елементів прошивки;

4) Запропонований метод обробки забезпечує відновлення без випресовки втулки із шатуна, високу продуктивність, відсутність витратних матеріалів та екологічність, що підтверджує мету роботи – підвищення ефективності відновлення втулок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Немировський Я. Б. Вплив умов базування на точність деталей, оброблених деформуючим протягуванням // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2014. – № 3 (75). – С. 144–157.
2. Немировський Я. Б. Технологічне забезпечення точності при обробці отворів деформуючим протягуванням // Різання та інструмент в технологічних системах : міжнар. наук.-техн. зб. – Харків : НТУ України «ХПІ», 2013. – Вип. 83. – С. 195–207.
3. Немировський Я. Б. Особливості деформуючого протягування різнотовщинних заготовок // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. пр. / Кіровогр. нац. техн. ун-т. – Кіровоград, 2013. – Вип. 26. – С. 135–142.
4. Чернявський О. В. Обробка круглих отворів протягуванням : навч. посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2008. – 72 с.
5. Чабанний В. Я. Ремонт автомобілів : навч. посібник. – Кіровоград : Центрально-Українське вид-во, 2007. – 348 с.
6. Гасило Ю. А. Конспект лекцій з дисципліни «Основи технології відновлення деталей» : для здобувачів вищ. освіти другого (магістерського) рівня за спец. 131 – Прикладна механіка за освіт.-проф. програмою «Технологія та устаткування зварювання». Кам'янське : ДДТУ, 2017. 147 с.
7. Ichkova M., Anastasov K., Dikova T. Surface plastic deformation of leaded brass components using a Ferro-Tic Grade C cylindrical-ended deforming element // Archives of Materials Science and Engineering. 2025. Vol. 136, No. 1-2. P. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.6368>. (Angl.)
8. Хітров І. О., Кононогов Ю. А. Відновлення деталей пластичним деформуванням та способи для його здійснення // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35 (74), № 1. С. 191–196. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/30>.

9. Che Y., Zhang M., Chen Q., Ren H., Li N., Liu S., Cui Y. Tribodynamics and Fretting Behavior of Connecting Rod Big-End Bearings in Internal Combustion Engines // Lubricants. 2025. Vol. 13, No. 9. Art. 376. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants13090376>. (Angl.)

10. Yin J., Meng X., Zhang R., Lyu B. Wear failure analysis based on a new tribo-dynamic-wear coupling model for big-end bearings and heavy-duty engine experiments // Friction. 2026. Vol. 14, No. 1. Art. 9441071. DOI: <https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441071>. (Angl.)

11. Годунко М. О., Гречка А. І. Основи 3D моделювання і робототехніки : навч. посіб. для проведення практичних занять. – К. : 7БЦ, 2024. – 42 с.

12. Мажара В. А., Щербина К. К., Артюхов А. М., Тененика С. А., Шестаков І. С. Система автоматизованого проектування технологічного оснащення // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – Вип. 54. – С. 12–23.

13. Заїка, С., Заїка, А., Лисенко, О., & Скібінський, Я. (2025). Підвищення ефективності обробки отворів корпусних деталей із чавуну деформуючим протягуванням. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 357(5.1), 167-174. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-20>

14. Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Цеханов Ю.О., Єрьомін П.М., Мірзак В.Я., Щербина К.К. «Особливості деформуючого протягування малопластичних матеріалів» Матеріали X міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», м. Чернігів, Україна, 23-25 вересня 2020 р., стор. 9-11 <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/17645>

Додаток А

[illegible]