

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра агроінженерії та автомобільного транспорту

Пояснювальна записка
до дипломної роботи на здобуття ступеня вищої освіти
« магістр »
бакалавр, магістр

на тему: «Дослідження процесу зміцнювальної обробки поверхонь деталей багатоконтактним віброударним інструментом»

Виконав: здобувач вищої освіти за освітньо-професійною програмою
Технології і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва
назва ОПП
спеціальності 208 Агроінженерія
код та найменування спеціальності
ступеня вищої освіти «магістр» групи ___
Спиця М. А.
Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти
Керівник: Канівець О. В.
Прізвище та ініціали керівника
Рецензент: Дудник В. В.
Прізвище та ініціали рецензента

Полтава – 2022 року

ВСТУП

Підвищення довговічності, надійності та якості машин завжди були пріоритетними завданнями сучасного машинобудування. Одним із шляхів їх розв'язання пов'язане із створенням заданих показників якості поверхні та поверхневого шару деталей машин, а також із удосконаленням технології виготовлення [1].

Умови роботи деталей машин у багатьох випадках характеризуються високими механічними і тепловими навантаженнями, наявністю в спряженому просторі хімічно агресивних або абразивних середовищ, що зумовлює необхідність розробки конструкційних матеріалів типу високолегованих сталей і сплавів або розробку прогресивних методів поверхневого зміцнення з нанесенням покриття з певними властивостями, що мають чітко задані характеристики, або створення мікрогеометрії поверхневого шару.

Використання високоміцних матеріалів для відповідальних деталей конструкцій забезпечує зниження маси і підвищення техніко-економічних показників сучасних машин. Але отримання високої статичної міцності металів супроводжується різким сповільненням зростання границі їхньої міцності. Використання високоміцних сталей нерідко ускладнюється їх підвищеною чутливістю до концентрації напружень і різного роду дефектів, таких як тріщин.

Руйнування деталі в процесі експлуатації, як правило, починається з поверхневого шару. Це пояснюється тим, що поверхневі шари виявляються найбільш напруженими, є межею поділу фаз і піддаються активному впливу зовнішнього середовища. Звідси виникає необхідність покращення фізико-механічних характеристик металу і геометрії робочих поверхонь деталей.

Важливе місце в підвищенні надійності роботи та довговічності механізмів машин відводиться процесам зміцнення деталей методами поверхневого пластичного деформування (ППД), що забезпечують сприятливі та стабільні якісні характеристики поверхні з погляду експлуатаційних показників.

Велика кількість робіт дослідників присвячена вивченню наявних і створенню нових методів ППД [2]. Найбільший ефект зміцнення від використання ППД досягається для циклічно навантажуваних деталей із конструктивними або експлуатаційними концентраторами напружень. Використання методів ППД показало свою ефективність і по відношенню до деталей, що зазнають під час експлуатації зносу [3].

Аналіз методів ППД показав, що серед широкої гами методів ППД, окрім обробки кульково-стержневим зміцнювачем (КСЗ), тільки віброобкочування, вібровигладжування, карбування та ультразвукова обробка дають змогу поряд зі зміцненням регулювати мікрорельєф поверхневого шару. Завдяки таким перевагам дробоструминної обробки, як можливість інтенсивного локального впливу на оброблювану поверхню, КСЗ значно простіше і дешевше, дає змогу проводити обробку вручну. З іншого боку, можливе встановлення КСЗ на верстати токарної та фрезерної груп дає йому змогу успішно конкурувати з вигладжуванням та вібронакочуванням. КСЗ являє собою невеликий віброверстат, в якому середовище, за допомогою проміжного агента – стержнів, впливає на порівняно невелику площу поверхні деталі. Порівняльний аналіз методів оздоблювально-зміцнювальної обробки динамічним поверхнево-пластичним деформуванням показує, що кульково-стержневий зміцнювач є найбільш універсальним за низької вартості, конструктивної простоти і досить високої продуктивності.

КСЗ дає змогу обробити галтелі малої кривизни, неглибокі згладжені уступи, згладити макро- і мікровиступи та западини. При цьому також відбувається явище поверхневого зміцнення і зниження залишкових розтягувальних напружень, що додатково підвищує втомні і триботехнічні показники оброблених виробів. Таким чином, даний інструмент має досить серйозні передумови для його широкого використання в ремонтній сфері та машинобудуванні.

Мета роботи: дослідження процесу зміцнювальної обробки поверхонь деталей багатоконтактним віброударним інструментом та вивчення впливу конструктивних елементів інструменту на його роботу.

Об'єктом дослідження є процес зміцнювальної обробки поверхонь деталей багатоконтактним віброударним інструментом.

Предметом дослідження є конструктивні елементи багатоконтактного віброударного інструменту.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити закономірності процесу поширення ударних імпульсів у системі багатоконтактного віброударного інструмента;

- розробити методики розрахунку і вибору конструктивних елементів багатоконтактного віброударного інструменту на основі аналізу динаміки роботи інструменту;

- дослідити вплив конструктивних елементів інструменту для нанесення регулярних мікрорельєфів на міцність оброблюваної поверхні.

Практична значимість:

1. Запропоновано модель перебігу ударної хвилі в конструкції багатоконтактного віброударного інструменту.

2. Визначено роль конструктивних елементів у роботі багатоконтактного віброударного інструменту та запропоновано методи їх розрахунку.

Методи дослідження. Завдання вирішувалися за допомогою теоретичних та експериментальних методів. Методичною та теоретичною основою роботи стали наукові праці з техніки, технології вібраційного зміцнення, технології машинобудування та фізики твердого тіла. Вимірювання параметрів поверхневого вібраційного зміцнення, нанесення регулярних мікрорельєфів, вибору конструктивних елементів інструменту проводилися відповідно до наведених у роботі методик. Для обробки та аналізу експериментальних даних застосовували комп'ютерні програми.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальні засади зміцнення поверхонь деталей машин

Надійність роботи машин безпосередньо залежить від стану поверхонь відповідальних деталей, що характеризується геометричними і фізико-механічними параметрами.

Теорія надійності виділяє три основні типи відмов механізмів машин [4]:

- відмови механізмів машин протягом початкового періоду експлуатації;
- відмови за рахунок зносу під час старіння конструктивних елементів механізмів машин;
- відмови, що виникають внаслідок концентрації навантажень, які перевищують розрахункові.

Зазвичай руйнування деталі під час експлуатації починається із поверхневого шару [5]. У процесі формування геометричної точності деталі внаслідок дії робочого інструменту та нагрівання металу в зоні обробки відбуваються структурні зміни, виникають наклеп і залишкові напруження як в поверхневому шарі, так і в перерізі деталі. Звідси впливає необхідність покращення фізико-механічних характеристик матеріалу і геометрії робочих поверхонь деталей шляхом послідовної обробки.

Розрізняють наступні класи методів зміцнення [2, 3]:

1. Зміцнення створенням плівки на поверхні виробу:
 - осадження металу в процесі хімічної реакції;
 - електролітичне осадження металів;
 - осадження твердих осадів із парів;
 - напилення зносостійких сполук.
2. Зміцнення зміною хімічного складу поверхневого шару металу:
 - дифузійне насичення.

3. Зміцнення впливом на структуру поверхневого шару:

- фізико-термічна обробка;
- лазерна обробка;
- електрофізична обробка;
- механічна обробка (ППД);
- наплавлення легованого металу.

4. Зміцнення зміною енергетичного запасу поверхневого шару:

- обробка в магнітному полі.

5. Зміцнення зміною шорсткості поверхні:

- електрохімічне полірування;
- обробка різанням.

6. Зміцнення зміною структури всього об'єму металу:

- термічна обробка;
- криогенна обробка.

Одним із найбільш економічних та ефективних видів зміцнення є поверхневе пластичне деформування (ППД), яке дає змогу повніше реалізовувати потенційні властивості конструкційних матеріалів у реальних деталях, особливо в деталях складної форми [6].

Ефективність зміцнення методом ППД [7] пов'язана із інтенсивністю пружно-пластичної деформації матеріалу поверхневого шару. Під час зміцнення досягається зміна низки показників властивостей поверхні та матеріалу поверхневого шару: формується якісно нова макро- і мікрогеометрія поверхні; у поверхневому шарі виникають залишкові макронапруги стиснення; кристалічна решітка матеріалу поверхневого шару зазнає пружно-пластичних викривлень, що призводять до формування залишкових мікронапруг; деформація металу поверхневого шару підвищує опір пластичної деформації за циклічних експлуатаційних навантажень; підвищуються межі пластичності та стійкість до деформації; підвищуються межі пластичної деформації за циклічних експлуатаційних навантажень.

У порівнянні з іншими методами зміцнення поверхонь деталей, поверхнєве пластичне деформування має ряд переваг [3]:

- утворюється дрібнозерниста структура поверхневого шару;
- утворюється сприятливі стискаючі залишкові напруги;
- відсутні царапини та задири оброблюваної поверхні частинками абразиву;
- відсутні дефекти, що пов'язані із термічним впливом;
- забезпечується якість поверхні по усій площі;
- досягнення оптимальних параметрів шорсткості поверхні деталей із різноманітних матеріалів, зберігаючи початкову форму заготовок;
- для утримання змащувального матеріалу на поверхні деталі є можливість утворювати регулярні мікрорельєфи;
- плавне підвищення мікротвердості поверхні.

1.2 Аналіз способів і методів зміцнювальної обробки

Використання ППД для обробки відповідальних деталей машин зумовлено можливістю обробки великої кількості конструкційних матеріалів, а також поверхонь практично будь-якої форми і розмірів.

Деякі методи ППД дають змогу створювати на поверхні деталей машин і приладів регулярний мікрорельєф [2] з метою зниження втрат на тертя та унеможливлення надирів, задирів і захоплювання; зменшення матеріаломісткості, підвищення надійності та довговічності, скорочення тривалості та унеможливлення приробітку, унеможливлення ручних робіт (абразивне полірування, шабрування), переходу на розрахункові методи нормування і технологічного забезпечення мікрогеометрії.

Методи ППД можна розділити на два класи: які використовують динамічний і статичний вплив на оброблювану поверхню, а також методи оздоблювально-зміцнювальної обробки ППД.

До динамічних методів ППД відносяться: карбування, віброударна обробка, дробоструменева і гідродробоструменева, ультразвукова обробка та ударна обробка спеціальним інструментом. Динамічне навантаження різко прискорює ковзання дислокацій, що призводить до збільшення сил тертя решітки. У свою чергу збільшення сил тертя перешкоджає швидкому ковзанню дислокацій і тим самим спричиняє приріст критичної напруги зсуву та додаткове зміцнення металу [8].

До статичних можна віднести обкочування і розкочування роликів або кульковим інструментом, вигладжування, дорнування, віброобкочування, вібровиглажування.

Процес обкочування і розкочування роликів або кульковим інструментом ґрунтується на вдавлюванні більш твердого тіла (кульки або ролика) в менш тверде (поверхневий шар оброблюваної поверхні) [17, 33, 55]. Його використовують для обробки циліндричних, конічних, плоских, а також спеціальних або складнопрофільних поверхонь: сфер, галтельних переходів, жолобів підшипників тощо. У результаті поверхні оброблених деталей можуть мати шорсткість Ra 0,2-0,4 і твердість HRC 45-55. Конструкції існуючих інструментів не є універсальними. Пружні або копіювальні, оснащені тарованим силовим елементом, мають ширший діапазон регулювання розміру, проте конструкція їхня складніша, а продуктивність нижча, ніж жорстких. Крім того, описані інструменти не дають змоги наносити регулярні мікрорельєфи на оброблювані поверхні.

Вигладжування – процес пластичної деформації оброблюваної поверхні ковзаючим інструментом [9]. У процесі проходження інструмент розсовує метал, утворюючи канавку на оброблюваній поверхні. Залежно від способу кріплення алмазного інструменту розрізняють жорстке і пружне вигладжування. При жорсткому інструмент закріплюють на верстаті подібно до різця, і він під час обробки проникає в поверхню деталі на задану глибину, яка зазвичай становить 3-7 мкм. Пружне - здійснюється спеціальними пристроями з пружним елементом, що забезпечує сталість сили

вигладжування незалежно від похибки установки і точності геометричної форми оброблюваної поверхні. До недоліків цього методу можна віднести неможливість оброблення поверхонь з непостійним профілем, а також неможливість нанесення регулярного мікрорельєфу.

Дорнування – процес поверхнево пластичного деформування, під час якого більш твердий інструмент (дорн) протягують або продавлюють усередині наскрізного отвору, водночас зовнішній розмір дорна має перевищувати внутрішній розмір отвору [10]. Дорнування може бути поверхневим, за якого деформується поверхневий шар, і об'ємним - пластичне деформування відбувається по всьому об'єму оброблюваної деталі. За характером розташування оброблюваної деталі розрізняють вільне (без обмеження деформацій по зовнішній поверхні) і дорнування в обоймах. Дорнування може бути калібрувальним і зміцнювальним. При багатозубому дорнуванні частина зубів калібрувальні, а частина зміцнювальні. Обробці дорном можуть піддаватися не тільки циліндричні, а й фасонні поверхні, основна вимога до них - сталість форми перерізу по всій довжині. Зі збільшенням розмірів перерізу оброблюваної поверхні різко збільшується зусилля, необхідне для протягування дорна. Іншим недоліком можна вважати необхідність застосування для поверхонь різних за розміром або формою відповідного тільки їй дорна або комплекту дорнів.

У процесі віброобкочування (вібровигладжування) на відміну від простого обкочування (вигладжування), крім основної подачі, інструменту, притиснутому до оброблюваної поверхні, надається зворотно-поступальний рух [11]. Як інструмент застосовують сталеві загартовані кулі (для віброобкатування) і сферичні наконечники (для вібровигладжування) з природних, синтетичних алмазів і твердого сплаву. Залежно від режимів віброобкочування в процесі обробки на поверхні деталі утворюються два різновиди мікрорельєфу: система паралельних каналів і «правильна» сітка каналів. У зв'язку зі складністю кінематики руху інструменту відносно

оброблюваної поверхні обробленню піддаються тільки плоскі, зовнішні та внутрішні циліндричні поверхні.

Карбування – процес зміцнення поверхневого шару деталі ударним впливом спеціального інструменту [12, 13]. В якості якого застосовують сферичні, еліпсові та спеціальної форми бойки, ролики, а також кулі з високоміцної інструментальної сталі або надтвердого матеріалу. Карбування за рахунок відносно невеликої швидкості деформування забезпечує значну глибину 30-40мм і високий ступінь зміцнення. Недоліками цього методу є невелика продуктивність під час оброблення протяжних поверхонь, а також те, що в процесі оброблення вихідна шорсткість часто збільшується.

Вібродарна обробка – об'ємна вібраційна обробка. При такій обробці оброблювальне середовище і деталі розташовуються в робочій камері, встановленій на пружних підвісках, що має можливість коливатися в різних напрямках [14]. Низькочастотні коливання камери генеруються в більшості випадків за допомогою дебалансного вібратора. Як робоче середовище під час вібродарної обробки використовують загартовані сталеві кульки різного діаметра та інші металеві гранули. Мікрорельєф обробленої поверхні повністю стохастичний. Оброблення внутрішніх поверхонь неможливе (для внутрішніх отворів співрозмірних із розміром обробного середовища) або відбувається з меншою інтенсивністю, ніж зовнішніх, а також виникають труднощі під час розроблення установок для оброблення великогабаритних і довгомірних деталей змінного перерізу.

Дробоструминна і гідродробоструминна – обробка поверхні деталі потоком дроби, що вільно летить [2]. Під час сухої дробоструминної обробки удари дроби слідує один за одним з великою частотою. Початкові удари очищають поверхню не тільки від окалини й оксидної плівки, а й від чужорідних молекулярних частинок. Процес дробоструминної обробки протікає в умовах сухого тертя. Гідродробеструйна обробка протікає в умовах гідродинамічного тертя, оскільки в зоні удару завжди є достатній прошарок мастильного матеріалу, а поверхня дробинок вкрита МОР. Під час обробки

обох видів здебільшого має місце прямий удар, коли куля впроваджується в тіло, а не ковзає по ньому. Під час обробки дробом шорсткість оброблюваної поверхні може як зменшуватися, так і незначно збільшуватися. До недоліків цих методів можна віднести неможливість отримання будь-якого мікрорельєфу крім стохастичного. Крім того, неможливо обробляти закриті порожнини і внутрішні поверхні.

Ультразвукова обробка відрізняється від статичних методів поверхнево-пластичного деформування тим, що оброблювальному інструменту надають додаткові ультразвукові коливання з частотою 18-24 кГц і амплітудою 15-30 мкм [15, 16]. Як обробний інструмент використовують ті самі інструменти, що й за статичних методів ППД. Інструмент встановлюють у концентратор, від якого йому передаються ультразвукові коливання. Серед недоліків можна відзначити складність виготовлення концентраторів, внаслідок високих точностних вимог, що пред'являються до них, а також невелику продуктивність, оскільки використовується один інструмент з однією точкою контакту.

Таким чином, наведений аналіз показує, що:

- надійність роботи машин безпосередньо залежить від якості поверхневого шару відповідальних деталей, яка характеризується геометричними та фізико-механічними параметрами;

- руйнування деталі в експлуатації, як правило, починається з поверхневого шару. Це пояснюється тим, що поверхневі шари виявляються найбільш напруженими, є межею розділу фаз і піддаються активному впливу зовнішнього середовища;

- одним із найбільш економічних та ефективних видів зміцнення є поверхневе пластичне деформування (ППД), що дає змогу повніше реалізувати потенційні властивості конструкційних матеріалів у реальних деталях, особливо в деталях складної форми (з концентраторами напруження);

- серед широкої гами методів ППД тільки віброобкочування, вібровигладжування, карбування та ультразвукова обробка дають змогу поряд зі зміцненням регуляризувати мікрорельєф поверхні.

Однак кожен із них має низку істотних недоліків. Так при віброобкочуванні та вібровигладжуванні через складність кінематики руху інструменту відносно оброблюваної поверхні, обробці піддаються тільки плоскі, зовнішні та внутрішні циліндричні поверхні. До недоліків карбування можна віднести невелику продуктивність під час оброблення протяжних поверхонь, а також те, що в процесі оброблення вихідна шорсткість часто збільшується. Як недоліки ультразвукової обробки можна відзначити складність виготовлення концентраторів, внаслідок високих вимог, що пред'являються до них, а також невелику продуктивність.

1.3 Конструктивні особливості та технологічне призначення багатоконтактного віброударного інструменту

Кульково-стержневий зміцнювач (КСЗ) – багатоконтактний віброударний інструмент для обробки поверхонь деталей методом поверхнево-пластичного деформування був створений у 1986 році [3]. В основу створення інструменту лягла спроба об'єднати технологічні можливості вібраційної обробки (гнучкість обробного середовища) і переваги простого карбування, що характеризуються високою інтенсивністю впливу.

Конструкція інструменту складається з двох вузлів: джерела ударних імпульсів і самого зміцнювача. Джерелом ударних імпульсів можуть бути використані стандартні пневмо- і електромагнітні молотки, а також спеціальні віброударні пристрої. В існуючих конструкціях джерелом ударних імпульсів використовують клепальні пневмомолотки різних типів виконання.

На рисунку 1 показано багатоконтактний зміцнювач, що складається з корпусу 2, упаковки сталевих стержнів зі сферично заточеними кінцями 3, середовища загартованих сталевих кульок 4 і ударника 5.

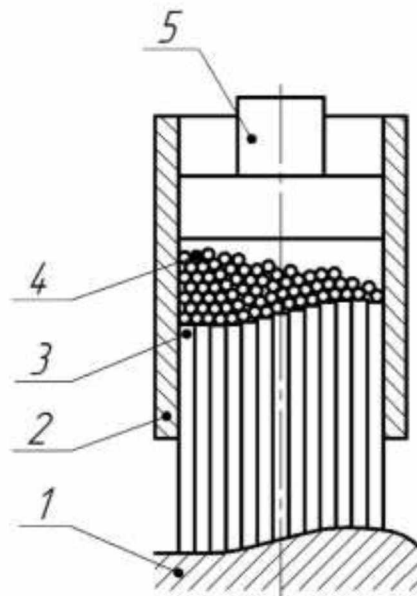


Рисунок 1 – Схема багатоконтактного віброударного інструмента
1 – деталь; 2 – корпус; 3 – стержні; 4 – сталеві кульки; 5 – ударник

У конструкції багатоконтактного віброударного інструменту кульково-стержневого зміцнювача використовується явище передавання ударного імпульсу від ударника 5, який приводять у рух пневмомолотком. Ударник 5, через замкнений об'єм корпусу 2, діє на загартовані сталеві кульки 4, які, у свою чергу, тиснуть на сталеві стержні зі сферичними наконечниками 3. Наконечники 3 безпосередньо впливають на оброблювану поверхню 1.

Завдяки властивості псевдотекучості об'єму кульок геометричне місце сферичних вершин стержнів може змінюватись та набувати різні форми: сфери, циліндра і навіть поверхні з негативною кривизною. Даний інструмент можна використовувати для зміцнення як плоских, так і лекальних поверхонь для створення стискаючих залишкових напружень, згладжування западин, а також нанесення регулярного мікрорельєфу на пари тертя. На рисунку 2 представлено конструктивні схеми інструментів для обробки різних поверхонь.

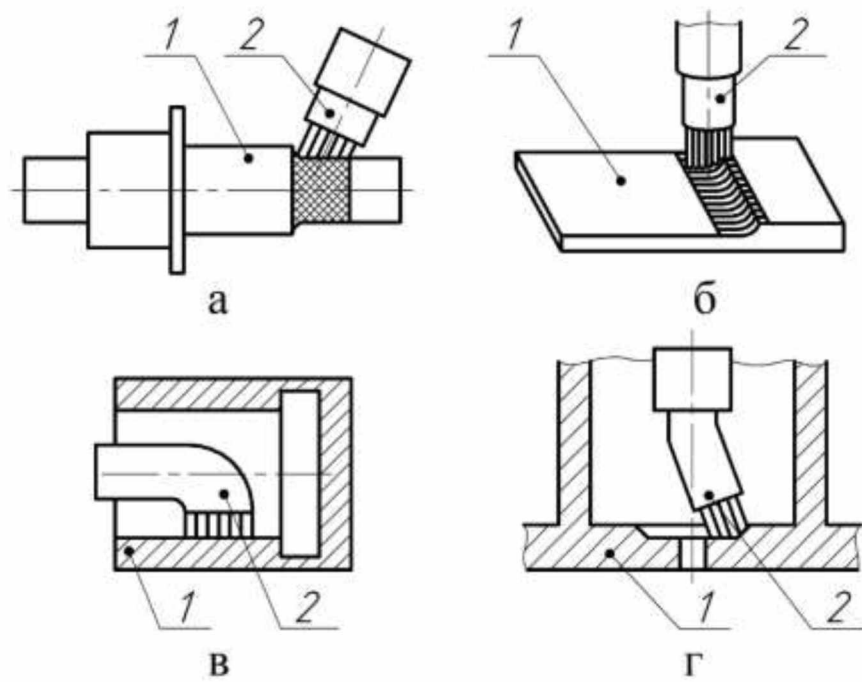


Рисунок 2 – Схеми технологічних можливостей багатоконтактного віброударного інструменту: 1 – деталь, 2 – інструмент; а, б) поверхні з прямим доступом; в, г) внутрішні поверхні.

Для створення регулярної топографії відбитків потрібне точне дотримання таких параметрів, як енергія і кількість ударів, нанесених в одну точку, а також рух пучка інденторів по жорстко заданій траєкторії з певною швидкістю [17, 18]. У зв'язку з цим стає актуальним використання багатоконтактного віброударного інструменту спільно з механізмами подачі металорізального обладнання.

Висновки

1. Виконано теоретичні дослідження, що спрямовані на розширення технологічних можливостей процесу поверхневого зміцнення, у тому числі оздоблювальної та зміцнювальної обробки багатоконтактним віброударним інструментом КСЗ.

2. Методика вибору конструктивних параметрів багатоконтактного віброударного інструменту для обробки реальних поверхонь недостатньо вивчена та потребує подальших досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Моделювання віброударної системи кульково-стержневого зміцнювача

Для розробки методики раціонального вибору схеми кульково-стержневого зміцнювача, типорозміру ударного збуджувача, призначення режимів роботи інструменту та розрахунку його конструктивних параметрів необхідно описати технологічний процес. До недоліків діючих моделей КСЗ необхідно віднести неврахування періодичності роботи інструменту [19], що є занадто грубим припущенням, яке не дає змоги задовільно прогнозувати характеристики КСЗ під час зміни тих чи інших конструктивних параметрів. Кульково-стержневий зміцнювач – є нелінійною віброударною системою з великим числом ударних пар, а його динаміка не піддається якісній аналітиці. Тому розглянемо роботу пневмомолотка і насадки КСЗ порізно, щоб знайти припущення, що дають змогу довести виконання завдання до кінця, не втративши найважливіших характеристик роботи інструмента.

Пневматичні ударні інструменти, до яких належать відбійні та клепальні молотки, бури для гірничих робіт, переважно побудовані за схемою, наведеною на рисунку 2.1. Згідно з наведеною схемою, розглянемо роботу пневмомолотка типу КМП. Під час натискання на курковий клапан стиснене повітря з магістралі надходить через канали 4 бойка 1 у камеру розширення, внаслідок чого боек переміщається вліво і при цьому перекриває доступ повітря. Боек, що набрав швидкість, долаючи опір пружини 5, досягає каналами 3 вікон 2, тим самим зменшуючи до нуля тиск повітря в камері розширення.

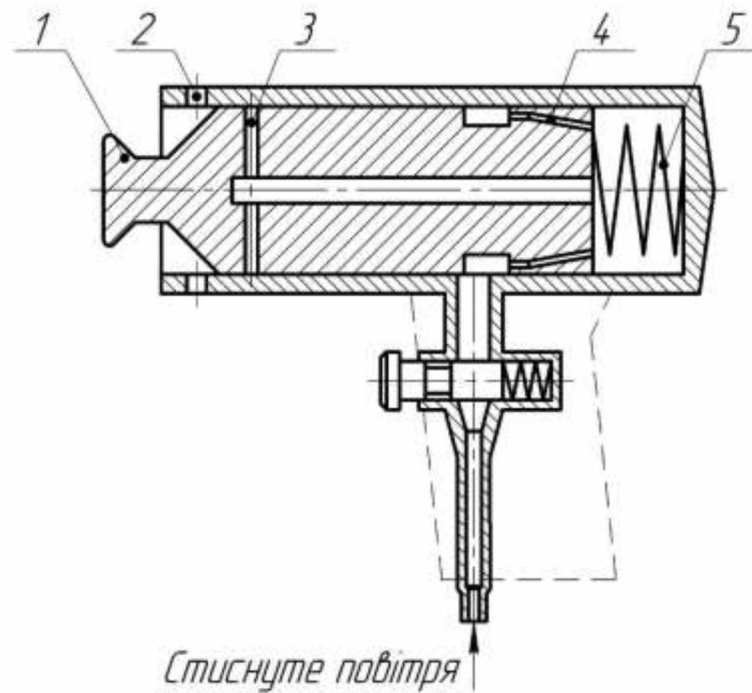


Рисунок 2.1 – Схема пневматичного молотка типу КПМ

У цьому ж положенні бойок завдає удару (для КСЗ – по ударнику або кулькам). Після відскоку бойок рухається вправо та, в певному положенні, відкриває доступ до стиснутого повітря. Таким чином, майже увесь період бойок рухається під дією сили пружності пружини, а відносно меншу частину періоду – під додатковою дією тиску стисненого повітря та зовсім мало – під дією сили співудару. Період стійких стаціонарних коливань системи мало залежать від характеру зіткнення бойка й ударника, оскільки наявні сили тертя стабілізують рух бойка. Розв’язання задачі про пружно підвішений бойок, що збуджується періодичними ударними імпульсами, показує, що теоретично можливе нескінченне число ударних резонансів не може реалізуватися в системі з тертям.

На рисунку 2.2 наведена схема узагальненої силової імпульсної системи кульково-стержневого зміцнювача. Під час її дослідження будемо намагатись зберегти в моделі мінімальний набір параметрів, що дає змогу зв’язати амплітудно-частотні характеристики впливу збудника, величини та співвідношення мас, що зіштовхуються, а також властивості оброблюваної поверхні.

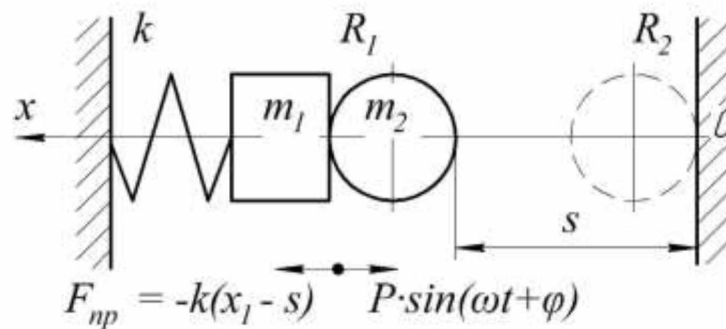


Рисунок 2.2 – Схема точного розв'язку моделі КСЗ

Після удару по ударнику бойок відскакує та здійснює вільні коливання на пружині до наступного контакту з ударником. Ударник отримує ударний імпульс у напрямку оброблюваної поверхні та передає його кулькам, а ті, зі свого боку, – стержням. Після взаємодії з поверхнею, стержні отримують імпульс віддачі, передають його кулькам, кульки – ударнику, ударник – бойку. Надалі процес повторюється за такою ж самою схемою. Поглинання енергії удару зумовлюється внутрішнім і зовнішнім тертям та не змінює величини імпульсу. Закон збереження імпульсу є більш універсальним, ніж закон збереження енергії. Тобто імпульс системи до досягнення ним оброблюваної поверхні не змінюється. Зменшившись після відбиття від перешкоди, імпульс повертається бойку також незмінним. Це дає змогу замінити систему «ударник – кульки – стержні» одним тілом, а поглинання енергії в ланцюзі врахувати коефіцієнтом відновлення під час удару об бойок і перешкоду. Приведені дані дають змогу значно спростити схему віброударної системи. Згідно зі стандартною класифікацією віброударних систем (ВУС) ця модель є двомасовою [20], вона схожа на відомі моделі «молоточок Андреева», модель Русакова-Харкевича, але відрізняється від них наявністю нерухомої перепони з безмежною масою.

Необхідно зазначити, що, незважаючи на детальне вивчення віброударних систем багатьма фахівцями з нелінійної механіки, замкнуті розв'язки отримано лише для 5-6 найпростіших моделей. Звичайно, що наявність тертя не враховується, тому не дозволить розв'язати питання про стійкість віброударних коливань. Однак, якщо точне розв'язання моделі буде

отримано, воно зможе використовуватись для визначення наявності тих чи інших віброударних режимів, якими можна врахувати більшість явищ і чинників процесу.

Розглянемо припущення моделі, що зображена на рисунку 2.2: динамічна збурювальна сила P є гармонійною (синусоїдальною) з амплітудою, частотою ω та початковою фазою φ , що починається від моменту співудару пружно підвішеного вантажу з кулькою, який приймаємо за початок відліку часу; тривалість співударів обох типів приймається рівною нулю; пружний елемент є лінійним із коефіцієнтом жорсткості k ; тертя мас об стінки відсутнє, втрати енергії в системі мають місце тільки під час співударів тіл і описуються коефіцієнтами відновлення R_1 і R_2 в обох ударних парах; розподілений зазор-натяг замінюється сумарним зазором-натягом S ; маси ланок ВУС замінені двома наведеними масами m_1 і m_2 , маси деталі та додаткового обладнання прийняті нескінченно великими.

Таким чином, сама структура прийнятої моделі і введені спрощення визначають перелік параметрів інструменту. Адекватність прийнятої моделі може бути оцінена після виявлення її здатності відображати реальні процеси в інструменті, що встановлені експериментально.

Із рисунка 2.2 видно, що початок координат X сумісний з оброблюваною поверхнею. Координату точки удару позначимо X_c . Частоту збурювальної сили позначимо ω , частоту усталених вимушених коливань – $\omega_s = 2\pi/T_s$, а кратність режиму – $l = \omega/\omega_s$.

Виконаємо аналіз руху маси m_2 . Оскільки в проміжках між ударами маса m_2 рухається вільно, період руху віброударної системи складається з часу t_1 руху від ударника m_1 до оброблюваної поверхні:

$$t_1 = \frac{x_c}{V_2} \quad (2.1)$$

і з часу зворотного руху від оброблюваної поверхні назустріч ударнику:

$$t_2 = \frac{x_c}{U_2} = \frac{x_c}{R_2 \cdot V_2}, \quad (2.2)$$

$$T_s = t_1 + t_2 = \frac{x_c(1+1/R_2)}{V_2}. \quad (2.3)$$

де U_2 – швидкість маси m_2 після удару об оброблювану поверхню;
 V_2 – швидкість маси m_2 , що рухається до оброблюваної поверхні;
 R_2 – коефіцієнт відновлення після удару маси m_2 об оброблювану поверхню.

Таким чином, швидкості маси m_2 до і після удару об оброблювану поверхню становлять:

$$V_2 = -\frac{\omega \cdot x_c}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot (1 + 1/R_2), \quad (2.4)$$

$$U_2 = \frac{\omega \cdot x_c}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot (1 + R_2). \quad (2.5)$$

Отже, вираз для зміни координати тіла масою m_2 становить:

$$x_2 = \begin{cases} x_c \left[1 - \frac{\omega \cdot t}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot (1 + 1/R_2) \right] & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\omega \cdot (1 + 1/R_2)} \\ \left[(1 + R_2) \frac{\omega \cdot t}{2 \cdot \pi \cdot l} - R_2 \right] & \text{при } T_s \geq t \geq \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\omega \cdot (1 + 1/R_2)} \end{cases} \quad (2.6)$$

Таким чином, в усталеному режимі рух маси m_2 рівномірний за винятком миттєвих ударів із масою m_1 і об оброблювану поверхню.

Розглянемо рух маси m_1 . Сила пружності пружини становить:

$$F_{\text{пр}} = -k(x_1 - s). \quad (2.7)$$

Тоді рівняння руху маси m_1 в проміжках часу між ударами становить:

$$\ddot{x}_1 + \omega_1^2 \cdot x_1 = \frac{k \cdot s}{m_1} + \frac{P}{m_1} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (2.8)$$

де ω_1 – власна частота коливань маси m_1 на пружному елементі жорсткістю k ,

P – гармонійна збуджувальна сила.

Для подальших розрахунків введем позначення:

$$\mu = m_1/m_2, \alpha = P/k, \sigma = s/\alpha, \tau = \omega t, \omega_1 = \sqrt{k/m_1}, \zeta = \omega_1/\omega.$$

$$\dot{x}_\tau = \frac{\dot{x}_t}{\omega}, \quad \ddot{x}_{\tau\tau} = \ddot{x}_{tt}/\omega^2$$

Звідси, отримаємо рівняння руху в безрозмірному вигляді:

$$\ddot{x}_1 + \zeta^2 \cdot x_1 = \zeta^2 \cdot \sigma + \zeta^2 \cdot \sin(\tau + \varphi), \quad (2.9)$$

де похідні взято за безрозмірною фазою τ .

Загальний розв'язок цього рівняння має вигляд:

$$x_1 = \sigma + \frac{\zeta^2}{\zeta^2+1} \cdot \sin(\tau + \varphi) + C \cdot \sin(\zeta \cdot \tau + \psi). \quad (2.10)$$

Оскільки імпульс протилежний позитивному напрямку осі ОХ, то умовою передачі імпульсу від маси m_1 до маси m_2 є:

$$U_1 - V_1 < 0 \quad (2.11)$$

Тоді, підставляючи загальний розв'язок (2.10.) у граничні умови для швидкостей, отримаємо:

- швидкість m_1 до удару:

$$U_1 = x_{1t}(2 \cdot \pi \cdot l) = a \cdot \omega \cdot \left\{ \frac{\zeta^2}{\zeta^2-1} \cdot \cos\varphi + C \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot l \cdot \zeta + \psi) \right\} \quad (2.12)$$

- швидкість m_1 після удару:

$$V_1 = x_{1t}(0) = a \cdot \omega \cdot \left\{ \frac{\zeta^2}{\zeta^2-1} \cdot \cos\varphi + C \cdot \cos\psi \right\} \quad (2.13)$$

а їх різниця тоді становить:

$$U_1 - V_1 = C \cdot a \cdot \omega \cdot \{ \cos(2 \cdot \pi \cdot l \cdot \zeta + \psi) - \cos\psi \} < 0 \quad (2.14)$$

Враховуючи граничні умови, отримаємо:

$$\cos(2 \cdot \pi \cdot l \cdot \zeta + \psi) = -\cos\psi. \quad (2.15)$$

Рівняння (2.15) дає змогу визначити значення фазового кута ψ , що відповідає початку коливання вантажу m_1 на частоті ω_1 , що залежить від жорсткості пружинного елемента, після співудару з масою m_2 .

Для визначення невідомих постійних x_c і C використовуємо рівняння удару:

$$x_c = -4 \cdot \pi \cdot l \cdot a \cdot \frac{\zeta^2}{\zeta^2-1} \cdot \cos\varphi \cdot \Theta, \quad (2.16)$$

$$C = -\frac{\zeta^2}{\zeta^2-1} \cdot \frac{\cos\varphi}{\cos\psi} \cdot \Xi, \quad (2.17)$$

де Θ і Ξ – коефіцієнти, що є функціями відношення мас μ і коефіцієнтів відновлення в ударних парах:

$$\Theta = \frac{\mu \cdot (1+\mu)(1+R_1)}{\Omega \cdot (1+2\mu-R_1) - \mu(1+R_2)(1+R_1)^2}, \quad (2.18)$$

$$\Xi = \frac{\frac{1}{1+R_2} + \frac{\mu(1+R_1)}{\Omega}}{\frac{1+2\mu-R_1}{(1+R_1)(1+R_2)} - \frac{\mu(1+R_1)}{\Omega}}, \quad (2.19)$$

$$\text{де } \Omega = (1 + \mu) \left(1 + \frac{1}{R_2}\right) + (1 - \mu \cdot R_1)(1 + R_2).$$

Таким чином, усі швидкості та координати елементів віброударної системи виражені через її параметри та параметри збуджувальної дії. Для усунення залежності всіх величин від кута φ скористаємося початковою умовою для координат мас, що стикаються, за умови $t = 0$:

$$\sin \varphi + (4 \cdot \pi \cdot l \cdot \Theta - \Xi \cdot \operatorname{tg} \psi) \cos \varphi = \frac{1 - \zeta^2}{\zeta^2} \sigma. \quad (2.20)$$

Отримане фазове рівняння має форму традиційну для віброударних систем; його розв'язання дало змогу визначити припустимі значення фазового кута φ і, підставляючи дані значення у формули координат і швидкостей, повністю розв'язати задачу.

2.2 Моделювання системи сталевих кульок із жорсткими границями

У конструкції КСЗ ударне навантаження передається від ударника через бойок, далі через замкнутий об'єм сталевих кульок і через упаковку сталевих стержнів до оброблюваної поверхні. Опис поширення ударного імпульсу в замкнутому об'ємі сталевих кульок, як у віброударній системі, показав неспроможність моделей послідовного зіткнення - величина енергії удару, що передається, була в сотні разів меншою від тієї, яку ми спостерігали в реальних пристроях, окрім цього, в такій моделі були відсутні стаціонарні періодичні режими в умовах обмеженого розповсюдження удару. Ці факти не дали змоги дати конкретні технологічні рекомендації щодо вибору конструкції інструменту і призначення режимів обробки.

Перші дослідження поведінки сипучих гранульованих середовищ під час статичного і динамічного навантаження проводилися в роботах, пов'язаних із вивченням поведінки ґрунтів. Під гранульованим [3] середовищем заведено розуміти тіло, що складається з окремих твердих зерен, що стикаються. Об'єм його складається з об'єму твердих зерен і пустот між ними, що заповнені повітрям або рідиною.

Прийнято вважати, що гранульовані середовища за своїми механічними властивостями перебувають у проміжному стані між твердими тілами і рідиною. Здатність одних зерен переміщатися відносно інших робить їх схожими на рідину. Водночас кожна частинка сипучого середовища, взята окремо, має всі властивості твердого тіла.

Поряд зі схожістю гранульовані середовища значною мірою відрізняються і від твердих тіл, і від рідин. Зсув таких середовищ обов'язково супроводжується збільшенням в об'ємі, чого не спостерігається при деформаціях зсуву в твердих тілах і рідинах. На відміну від твердих тіл, гранульовані середовища не сприймають розтягувальних зусиль.

Прості досліди з деформування замкнутого об'єму хаотично упакованих сталевих кульок демонструють його нелінійно-пружну поведінку. Стисливість, зумовлена за малих напружень взаємним проковзуванням частинок і заповненням вакансій, зі зростанням напружень регулюється вже пружними деформаціями самих частинок [21]. Досліджуючи залежність швидкості слабких звукових хвиль у випадковому пакуванні жорстких сфер від величини статичних стискальних напружень, Джонсон та ін. встановили, що за умови зростання напружень [22] енергія деформації є однозначною квадратичною функцією, яка не залежить від історії навантаження. Наявні та численні експерименти зі статичного навантаження замкнутого випадкового пакування сталевих кульок діаметром 1,5 мм показали, що збільшення гідростатичного тиску від 10 до 100 МПа призводить до зростання швидкості слабких поздовжніх звукових хвиль у 1,5 рази. Більш точні експерименти виявили утворення в здавленій хаотичній гранульованій упаковці двох взаємопроникаючих підрешіток: «жорсткої», що складається з силових містків, в основному перпендикулярних до поверхонь контакту гранул, та «м'якої» підрешітки, яка дисипує і формується силами, що призводять до проковзування контактів.

В останній після одноразового ударного навантаження на м'якій дюралюмінієвій пластині, що обмежує упаковку з протилежного до удару

боку, реєстрували відокремлені один від одного випадково розташовані пластичні відбитки, кількість яких становила 40-65% від загальної кількості частинок у шарі. Після заміни пластинки і нанесення нового удару картина відбитків змінювалася, але їхнє загальне число і сумарна площа відтворювалися з помилкою не більше 10%. Очевидно, в таких важливих для практики системах з періодичним ударним навантаженням гранульованого масиву згадані «несуча» і «дисипативна» підґратки руйнуватимуться і відтворюватимуться знову для кожного удару. Тож реакцію на кожен наступний стрибок напруги можна вважати однаковою. Додатково до внутрішньої дисипації в середовищі важливу роль відіграє сухе тертя частинок об обмежуючі стінки. Величина сили тертя, прикладеної з боку стінок до об'єму гранул, пропорційна нарузі в цьому об'ємі.

Перераховані вище результати досліджень створюють передумови побудови прийнятної моделі реакції масиву гранул на ударний одиничний або періодичний вплив. Така модель для одновісного стиснення обмеженого жорсткими осесиметричними границями масиву гранул може бути побудована на основі таких припущень:

- під дією стискаючих напружень середовище за рахунок взаємного проковзування частинок і заповнення вакансій деформується до певної граничної величини, що залежить від розміру частинок і певною мірою від форми обмежувальної поверхні. Причому в процесі наближення деформації до цієї граничної величини, що відповідає початку деформації самих частинок, напруги різко зростають;

- опір середовища розтягувальним напруженням відсутній;

- напруги в досить великому (порівняно з розміром частинки) елементарному об'ємі середовища можна вважати гідростатичними;

- процес деформування середовища не залежить від історії навантаження, - зняття навантаження повертає середовище в початковий стан;

- переміщення шару середовища супроводжується в'язким і сухим, лінійно залежним від стискаючих напружень у шарі, тертям. Очевидно, якщо

кількість частинок, що контактують із межею, багато менша за загальну, характеристики тертя можна вважати притаманними середовищу. В іншому ж випадку характеристики тертя будуть інтегральними.

2.3 Модель навантаження одиничного контакту сфери з пластичною перешкодою

Внаслідок того, що модельований механічний хвилевід є конструктивним елементом інструменту для ППД КСЗ, принципове значення мала можливість коректного врахування поглинання енергії удару пластично деформованою перешкодою. Відповідно до прийнятого феноменологічного підходу передбачалося, що всі кульки останнього прошарку зміщуються однаково і надають однаковий деформувальний вплив на підкладку. В умовах динамічного навантаження, що осцилює в часі, найбільш реалістичною є гістерезисна модель. Відповідно до неї (рисунок 2.3) процес первинного впровадження індентора відбувається за законом Герца [22], а розвантаження - по прямій, що повертається в точку, яка відповідає глибині пластичного відбитка. При повторному впровадженні навантаження йде по прямій аж до досягнутої раніше деформації, потім по Герцу і т.д.

Опір матеріалу пружно-пластичному проникненню відповідає закону Герца:

$$F_H(x) = K \cdot x^{\frac{3}{2}}. \quad (2.21)$$

Коефіцієнт жорсткості K визначений з експерименту становить, наприклад, $K=3 \times 10^8$ для АМГ-6 або $K=2 \times 10^{10}$ для Ст40Х.

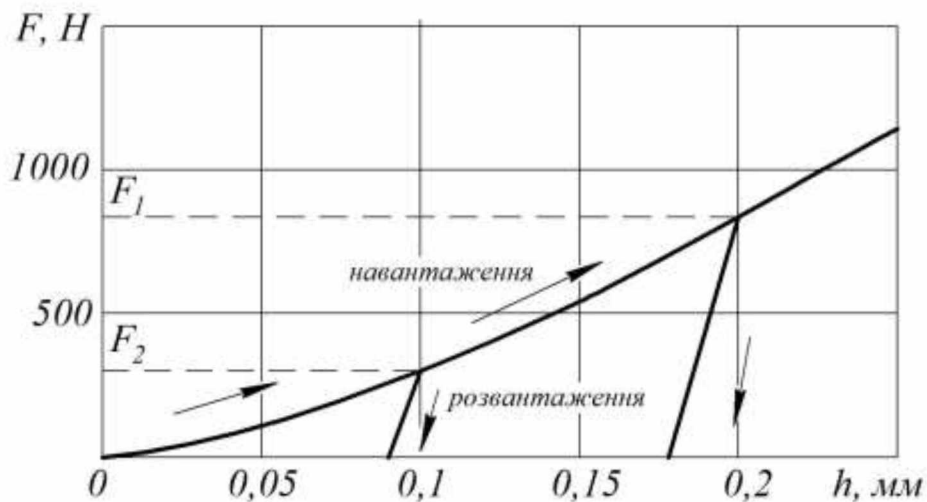


Рисунок 2.3 – Схема гістерезисного навантаження одиничного контакту сфери з пластичною перешкодою

Зняття навантаження з матеріалу, що деформується, відбувається по закону:

$$F_p = \delta \cdot 1,5 \cdot K \sqrt{a} (x-a) + K \cdot a^{3/2}, \quad (2.22)$$

де: δ – коефіцієнт, що показує яка частина залишкової глибини пластичного відбитка в повній глибині впровадження індентора, приймався 1 для Ст40Х (що становить 33% залишкової глибини відбитка) або 20/3 для АМТ-6 (90% залишкової глибини відбитка)

a – повна глибина впровадження, що досягнута в процесі навантаження.

2.4 Визначення мінімального діаметра кульок

Одна з головних переваг кульково-стержневих зміцнювачів перед традиційним інструментом для віброконтактного наклепу полягає в можливості обробки лекальних поверхонь без зменшення якості та продуктивності. Ця властивість забезпечується наявністю об'єму сталевих кульок, який може змінювати свою форму під спільною дією ударних навантажень з боку ударника і зусилля натягу, що виникає під час огинання нерівності поверхні. Очевидно, діаметр кульок не може бути більшим за діаметр стержнів, оскільки, у такому випадку, більша частка стержнів у пучку

не сприйматиме удару. Крім того, бажано мати можливість зменшити діаметр кульок, щоб збільшити рухливість і податливість кулькового середовища. На практиці зменшення розміру кульок обмежене, оскільки, незважаючи на розташування стержнів у щільному пакуванні, кульки потрапляють крізь канали між стержнями і висипаються. Наявні в пучку зазори, необхідні для вільного взаємного осьового зсуву стержнів, зсуваються в будь-якому напрямку й утворюють один або кілька розширених каналів, через які й відбувається втрата кульок.

Для визначення найбільшого діаметра каналу, який ми вважатимемо таким, що дорівнює мінімальному допустимому діаметру кульок, розглянемо схему пакування стержнів на рисунку 2.4, де зліва зображено як найщільніше пакування, а праворуч – пакування за наявності сумарних зазорів.

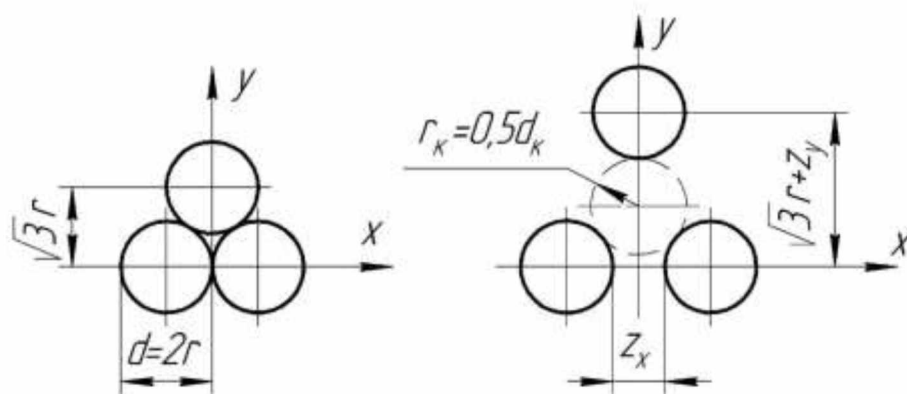


Рисунок 2.4 Схема для визначення мінімального діаметра кульки

Розмістимо стержні так, що навколо зображеної ділянки пучка упаковка гранично ущільнена, а координатні осі розташуємо, як показано на рисунку. Діаметр утвореного каналу, зображеного пунктиром, позначимо d_k , а радіус – r_k . Визначимо його, користуючись такими геометричними міркуваннями (2.23 - 2.6). Якщо задано три кола своїми рівняннями [23]:

$$\begin{cases} u_1 \equiv (x - a_1)^2 + (y - b_1)^2 - r_1^2 = 0 \\ u_2 \equiv (x - a_2)^2 + (y - b_2)^2 - r_2^2 = 0, \\ u_3 \equiv (x - a_3)^2 + (y - b_3)^2 - r_3^2 = 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

то кожна із трьох прямих ліній (так званих радикальної віссю двох кіл), рівняння яких: $U_i - U_j = 0$ ($i, j = 1, 2, 3$) перпендикулярна до прямої, що з'єднує

центри даних кіл і рівновіддалена від цих кіл. У найпростішому окремому випадку дотику двох кіл радикальна вісь являє собою просто загальну дотичну. Якщо центри згаданих трьох кіл не лежать на одній прямій, то три радикальні осі:

$$U_1 = U_2; U_2 = U_3; U_1 = U_3 \quad (2.24)$$

взяті для кожної пари кіл, що проходять через одну точку, яка називається радикальним центром цих трьох кіл. На розрахунковій схемі радикальним центром трьох сусідніх кіл (стержнів) буде центр каналу, в який вписано пунктирне коло. Даний факт дозволяє нам, знайшовши координати радикального центру, елементарно визначити радіус r_k .

Побудуємо рівняння радикальної осі для верхнього і нижнього правого стержня. Тоді, як впливає з міркувань симетрії, точка перетину цієї осі з віссю Y і буде радикальним центром. Підставляючи в одне зі співвідношень (2.23) рівняння двох кіл (2.24) із координатами центрів отримаємо:

$$x^2 + (y - z_y - r\sqrt{3})^2 - r^2 = y^2 + (x - r - z_x/2)^2 - r^2. \quad (2.25)$$

Вільний член в одержаному рівнянні прямої і дає ординату Y_{cm} радикального центру. Його абсциса, відповідно, дорівнює нулю. Після перетворень і введення безрозмірних одиниць отримаємо остаточний вираз для радіуса кульки:

$$r_k = r \cdot \left[\frac{3\left(1 + \frac{\varepsilon_y}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(1 + \frac{\varepsilon_x}{2}\right)^2}{2\sqrt{3}\left(1 + \frac{\varepsilon_y}{\sqrt{3}}\right)} - 1 \right], \quad (2.26)$$

$$\text{де } \varepsilon_x = \frac{z_x}{r}; \quad \varepsilon_y = \frac{z_y}{r}.$$

2.5 Методика дослідження процесу поширення одноразового ударного імпульсу в об'ємному середовищі сталевих кульок

Для розв'язання задачі передачі ударного імпульсу через замкнутий об'єм сталевих кульок використовувалася експериментальна установка, що наведена на рисунку 2.5.

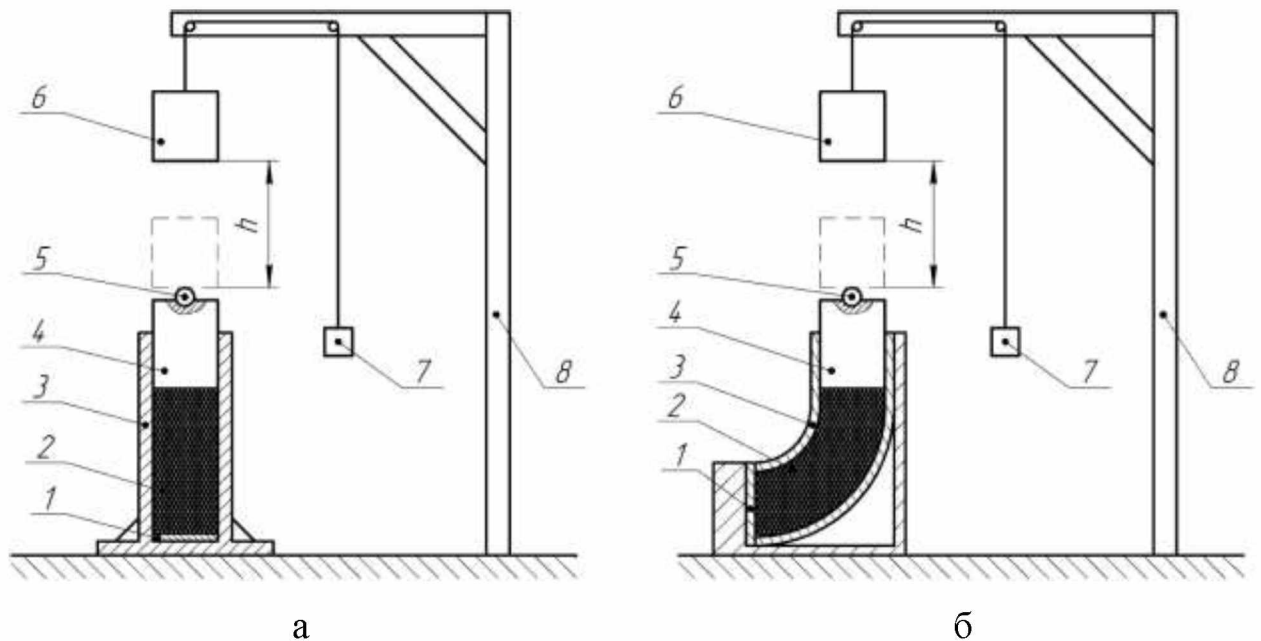


Рисунок 2.5 – Схема експериментальної установки для визначення передачі ударного імпульсу: а – пряма; б – загнутий

Установка складається із вертикально розташованого хвилевідводу 3 (пряма або загнута циліндрична труба діаметром 40 мм), на плоске дно якого вкладають круглу пластину з м'якого матеріалу 1. Всередину хвилевідводу засипають заздалегідь пораховану кількість загартованих сталевих кульок 2. Імпульсне навантаження об'єму сталевих кульок здійснюють падаючим вантажем 6 через центруючу кульку 5 та ударник 4, який ретельно підігнано до внутрішнього діаметру хвилевідводу. Вантаж 6 підвісили на нитці на стійці з кронштейном 8. До протилежного кінця нитки підвішували невелику протидію 7.

В експерименті використовувалися сталеві кульки трьох типорозмірів $d = 2, 3, 4$ мм. Масу вантажу 6 змінювали – $M_e = 3, 6, 1,2$ кг. Висоту підйому h

розраховували так, щоб величина кінетичної енергії в момент зіткнення була однаковою у всіх дослідах.

Висоти підймання вантажу різної маси залежно від необхідної кінетичної енергії в момент удару наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Висоти підймання вантажу

$E \backslash m$	6 кг	3 кг	1,2 кг
6 Дж	10 см	20 см	51 см
12 Дж	20 см	41 см	102 см
20 Дж	34 см	68 см	170 см

Кількість шарів кульок, засипаних у хвилевідвод, коливалася від 1 до 45. Залежно від розмірів досліджуваних кульок, їх кількість, що поміщаються в одному шарі хвилеводу $\varnothing 40$ мм, була неоднаковою (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Залежність кількості кульок в одному шарі від діаметра

Діаметр кульок	Кількість в одному шарі (шт.)
$\varnothing 2$ мм	330
$\varnothing 3$ мм	160
$\varnothing 4$ мм	85

Після одноразового імпульсного навантаження кульки з хвилевідводу висипалися і виймалася дюралюмінієва пластина. На її площині сформувалися сферичні відбитки (ямки), що з'явилися в результаті деформації поверхневого шару пластини кульками першого від пластини шару. Згодом усі отримані відбитки реєструвалися і за допомогою бінокулярної лупи (з ціною поділки 0,05 мм) вимірювалися їх діаметри.

На основі отриманих діаметрів відбитків, відповідно до теорії контактних деформацій Герца [22], визначали контактну силу, що діє на кульку під час її впровадження в досліджувану пластину залежно від

зближення тіл:

$$P = k \cdot h^{\frac{3}{2}}, \quad (2.27)$$

$$k = \frac{2}{3(1-\mu^2)} E \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}. \quad (2.28)$$

де: h – глибина впровадження кульки в дюралюмінієву пластину;

$E = 7,1 \times 10^{10}$ Па – модуль пружності дюралюмінієвої пластини;

$\mu = 0,36$ – коефіцієнт Пуассона дюралюмінієвої пластини.

R_1 – радіус кривизни кульки;

R_2 – радіус кривизни поверхні дюралюмінієвої пластини.

Для визначення глибини впровадження кульки в пластину скористаємося схемою, що наведена на рисунку 2.6.

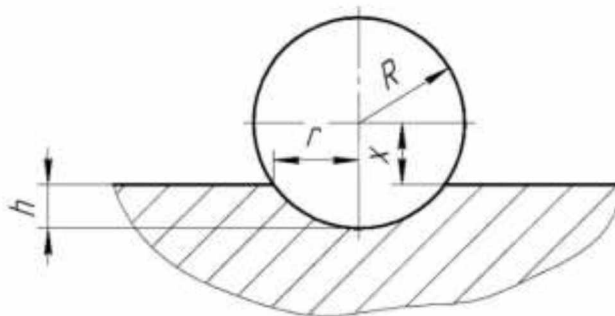


Рисунок 2.6 – Схема визначення глибини проникнення сталеві кульки в пластину

Залежність сили удару кульки від діаметра отриманого відбитка має вигляд:

$$P = \frac{E \cdot d^3}{12\sqrt{2}(1-\mu^2)D}. \quad (2.29)$$

Енергію, що витрачається кулькою на отримання відбитка діаметром d_{max} , визначаємо за формулою:

$$E_{уд} = \frac{E \cdot d_{max}^5}{120\sqrt{2}(1-\mu^2)D^2}. \quad (2.30)$$

2.6 Обладнання для нанесення регулярних мікрорельєфів на плоских і циліндричних поверхнях

Створення регулярної топографії відбитків можливе тільки під час руху пучка за жорстко заданою траєкторією. У цьому разі можливі тільки три режими нанесення регулярних мікрорельєфів (РМР):

- безперервна робота КСЗ - створення регулярної системи борозен;
- дискретне нанесення РМР-ямок, коли зсув пучка відносно поверхні та ударні експозиції чергуються;
- безперервне нанесення РМР-ямок, за якого рух пучка відносно поверхні та нанесення ударів синхронізовані.

Схеми взаємного переміщення поверхні та пучка при нанесенні ямок і борозен наведено на рисунку 2.7.

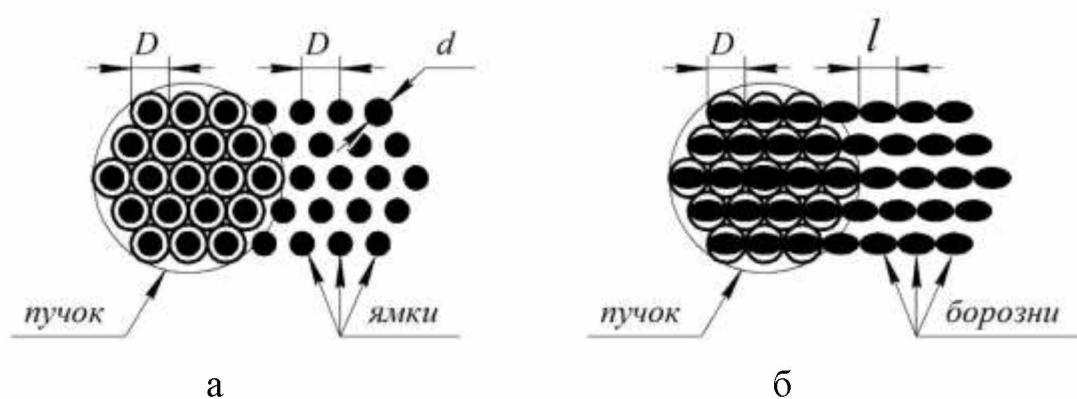


Рисунок 2.7 – Формування системи ямок (а) і борозен (б) у разі дискретного зміщення пучка

Нанесення РМР у безперервному режимі доцільно проводити на циліндричних і торцевих поверхнях деталей тіл обертання з використанням верстатів токарної групи, а на плоских поверхнях деталей - з використанням верстатів фрезерної групи.

Під час обробки плоских поверхонь використовували зразки, що вирізали із листа товщиною 6 мм із розмірами 300×60 мм. Зразок 3 кріпився на 6-8 болтів до основи 5 (рисунок 2.8 і 2.9) так, щоб уникнути зазору по всій його довжині.

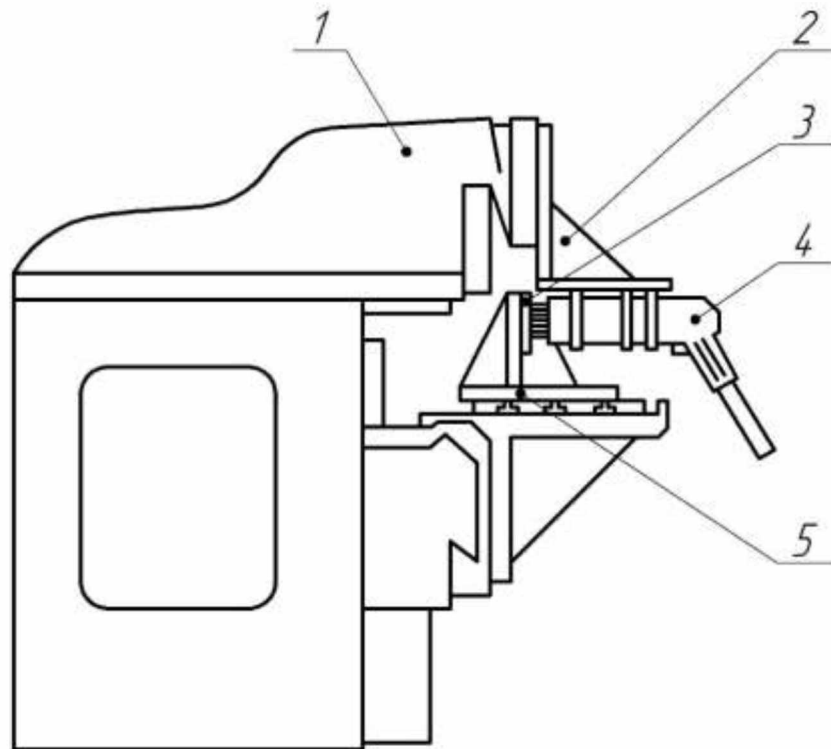


Рисунок 2.8 – Схема обладнання вертикально-фрезерного верстата для формування РМР на плоских поверхнях за допомогою КСЗ

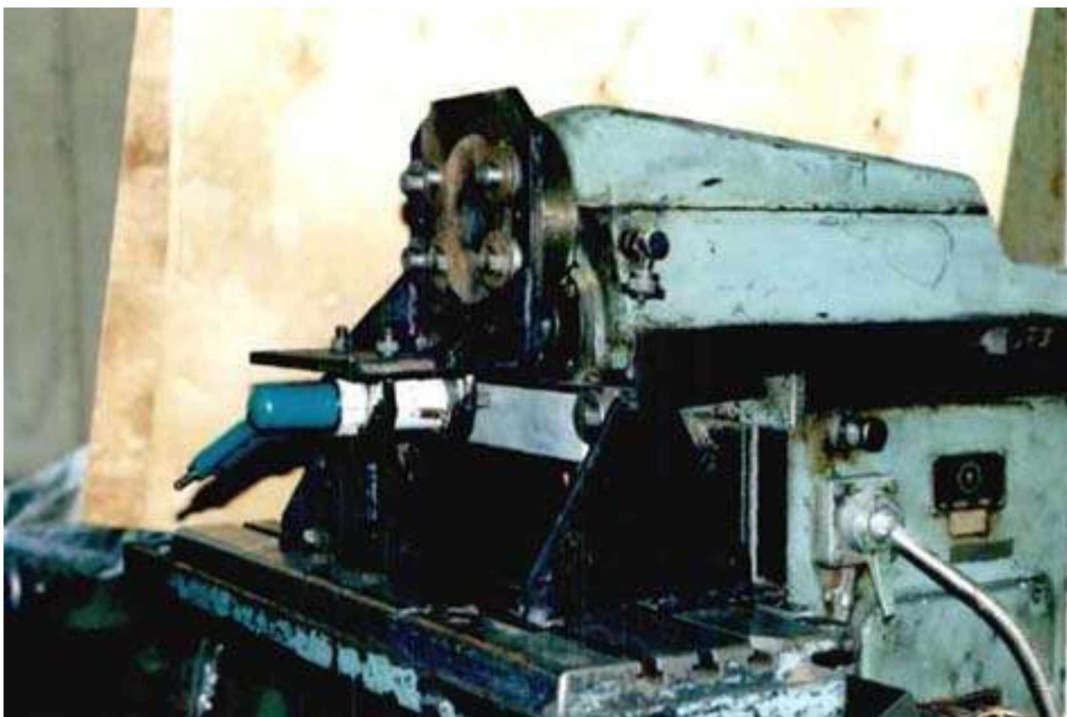


Рисунок 2.9 – Обладнання для нанесення регулярних мікрорельєфів на плоских поверхнях, використовуючи механізми подачі верстатів фрезерної групи

Висока жорсткість основи 5 давала змогу виключити втрати енергії на деформацію зразка 3. Інструмент 4 встановлювали на спеціальному кронштейні 2, який прикріплювали до горловини універсально-фрезерного верстата 1 за допомогою планшайби. Надійне кріплення КСЗ і висока жорсткість кронштейна і планшайби унеможлилювали віддачу інструменту під час роботи.

Перед нанесенням рельєфу за допомогою стрілочного індикатора основу виставляли так, щоб площина зразка відхилялася від лінії поздовжнього переміщення столу не більше, ніж на 0,2 мм. Це налаштування проводили для виключення впливу перемінного натягу, який міг змінюватися в разі непаралельності зразка поздовжньому ходу стола.

У дослідах використовувалися три різні інструменти:

- з 6-гранним пучком 19 стержнів;
- з 6-гранним пучком 92 стержня;
- з прямокутним пучком (80×18 мм) 140 стержнів.

Конструкція кріплення КСЗ до кронштейна давала змогу повертати пучок навколо власної осі в межах $\pm 30^\circ$. Для фіксації пучка в налаштованому положенні та унеможливлення його провороту відносно інструменту для кожного типорозміру пучка застосовували люнети, які закріплювали на кронштейні.

Коробка подач верстата забезпечувала вибір однієї з подач: 120, 160, 360 мм/хв. Нанесення РМР з дискретним зміщенням пучка відбувалось за рахунок лімби поздовжнього зміщення. Зсув пучка після відпрацювання поздовжньої полоси здійснювався вертикальним ходом столу. Натяг регулювали поперечним переміщенням хобота.

Обробку циліндричних поверхонь і плоских торцевих поверхонь тіл обертання проводили на токарно-гвинторізному верстаті 1А616. Для встановлення КСЗ був виготовлений спеціальний тримач (рисунок 2.10), що давав змогу обробити як циліндричні, так і торцеві поверхні завдяки повороту різцетримача. Розміри пристрою були підібрані таким чином, щоб забезпечити

перетин осей обертання шпинделя і пучка стержнів для всіх трьох типорозмірів інструменту, які використовувалися в дослідах.

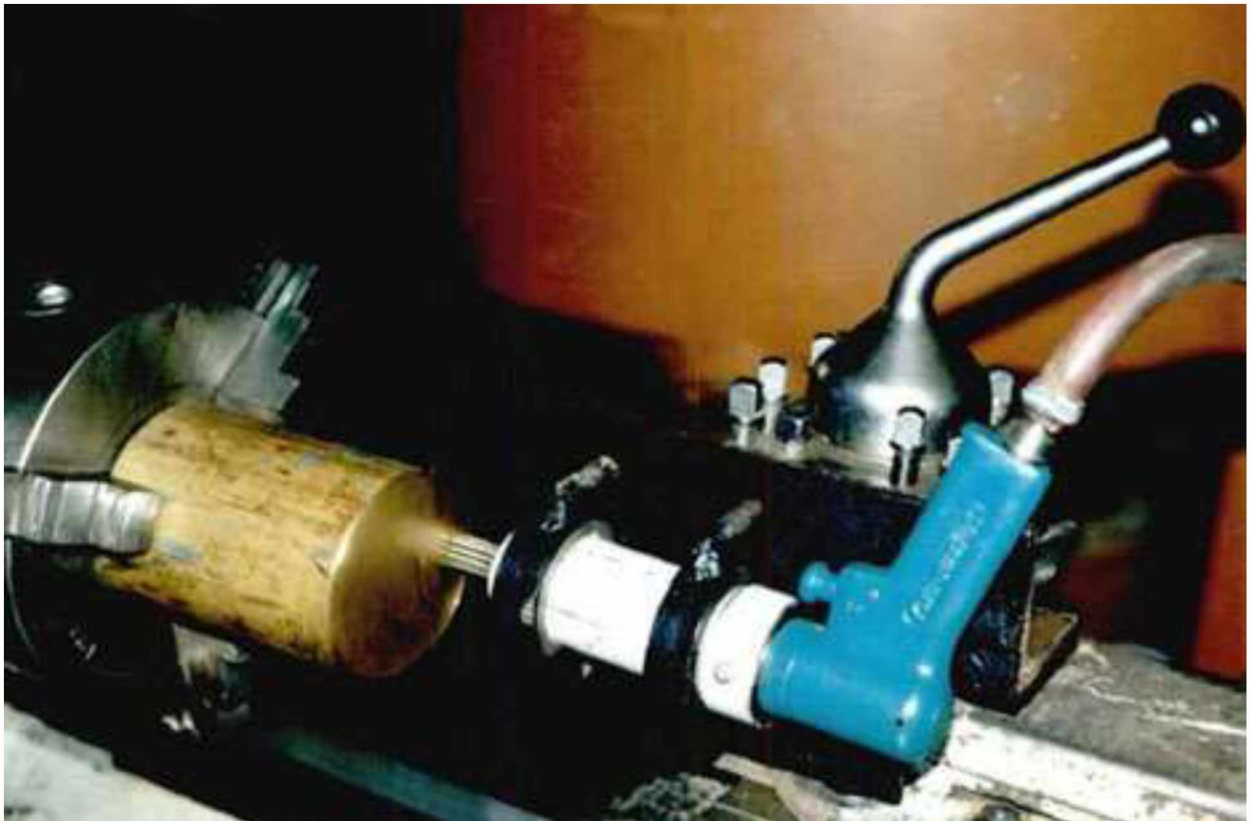


Рисунок 2.10 – Обладнання для нанесення регулярних мікрорельєфів на поверхнях тіл обертання із використанням верстатів токарної групи

Регулювання натягу здійснювалося за рахунок поперечного ходу різцетримача. Обробку циліндричних поверхонь проводили двома різними прийомами: без поздовжньої подачі для коротких зразків і з поздовжньою подачею для на довгих зразках. На торцевих поверхнях рельєф наносили, регулюючи натяг поздовжнім переміщенням різцетримача з механічною поперечною подачею .

Реєстрацію параметрів отриманого рельєфу поверхні проводили за допомогою бінокулярної лупи МБС-2, універсального вимірювального мікроскопа УИМ-21, інтерферометра і профілометра-профілографа.

2.7 Методика порівняльних триботехнічних та втомних випробувань

Випробування проводили на машині тертя СМЦ-2 (рисунок 2.11) при постійній частоті обертання зразка 500 об/хв, якій відповідала колова швидкість $v = 1$ м/с. Для змащення використовували моторну оливу М6-12Г, яку подавали в зону тертя зразків.

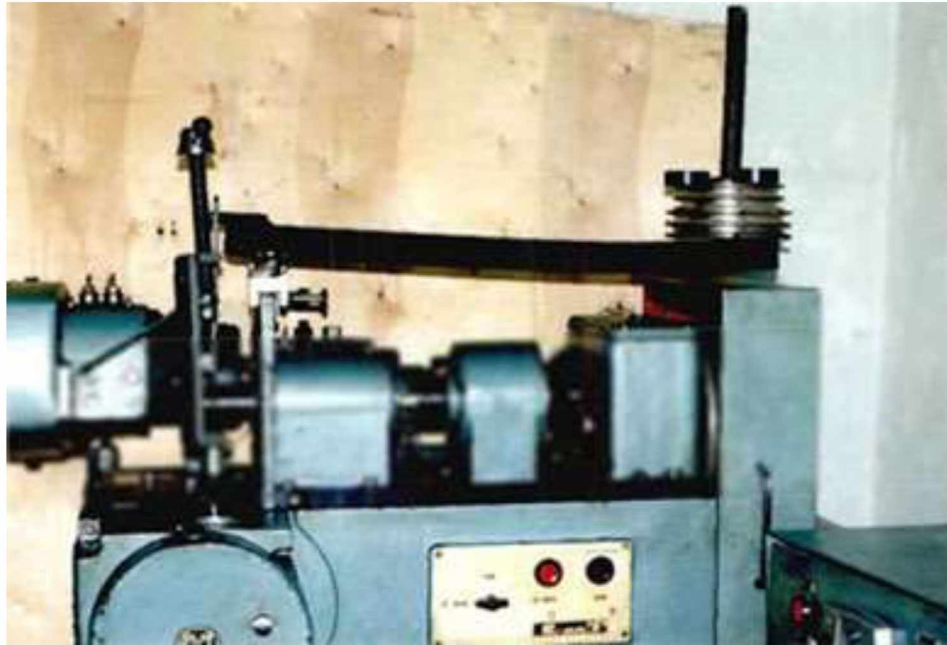


Рисунок 2.11 – Загальний вигляд машини тертя СМЦ-2 зі спеціальним тарувальним пристроєм

На рисунку 2.12 показано схему контакту зразків «ролик-колодка» і форму контртіла, що забезпечили постійність номінальної площі контакту. Для виключення взаємного перекосу зразків під час випробування, розточування контртіл-колодок проводили на спеціальній планшайбі, що дала змогу витримати непаралельність осей базових отворів з колодок до 0,02 мм і розбіжність радіусів ролика і колодки до 0,02 мм. Досліджувані ролики перед розточуванням колодок сортувалися на розмірні групи з точністю до 0,01 мм, а розточування колодок проводилося під кожну розмірну групу роликів окремо. Ці кроки дали можливість витримати відносну площу ділянки

контакту тіл тертя в межах 75-90% для всіх випробовуваних пар, тобто забезпечили досить високу стабільність вихідних умов експерименту.

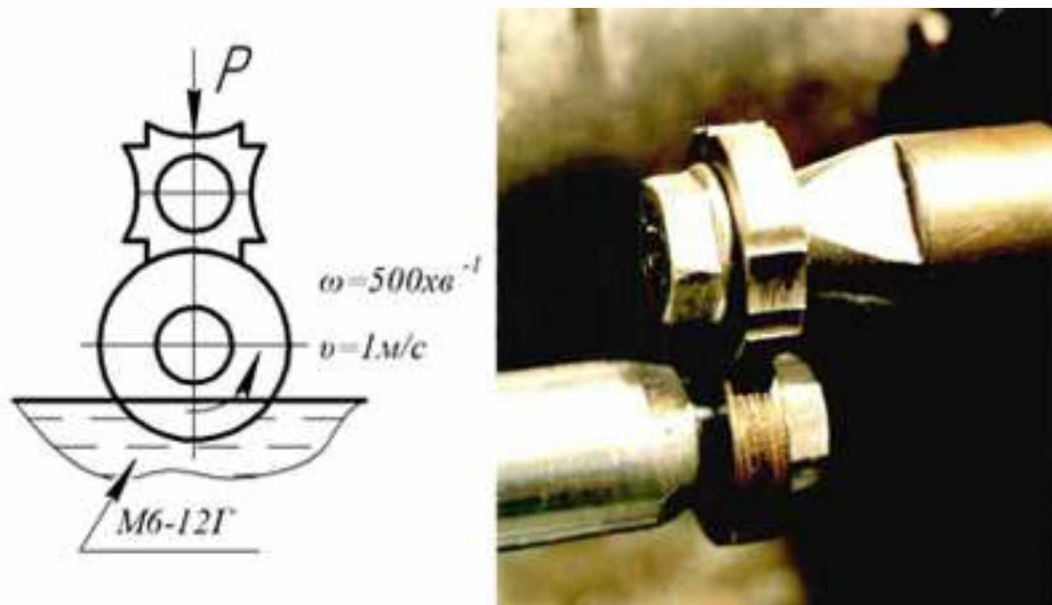


Рисунок 2.12 – Схема контакту зразків під час триботехнічних випробувань

Специфіка схеми випробування і форми зразків зумовили той факт, що РМР наносили тільки на ролики - поверхню колодок випробовували завжди тільки після розточування. Для забезпечення стабільного натягу при нанесенні РМР ролики виготовлялися з досить хорошими показниками некруглості, осьового і торцевого биття. Нанесення РМР здійснювали на токарно-гвинторізному верстаті 1А616 під час установа 6-8 зразків на виправлення, що підпирається заднім центром. Перший і останній зразки в пакеті були баластними та використовувались для входу і виходу інструменту. Із огляду на невеликий діаметр зразків, використовували вузький пучок стержнів КСЗ 6×3-19.

Радіус сферичних наконечників використовували рівним 4 мм. Траєкторія РМР – 6-ти західна циліндрична спіраль, що забезпечується налаштуванням верстата. Подачу встановили рівною кроку стержнів у пучку $S = 3$ мм/об, а частоту обертання шпинделя вибирали з умови формування ямок.

Матеріалом зразків була хромонікелева сталь 40ХНС2МА. Обрана сталь використовується у відповідальних деталях: колінчасті та розподільні вали, плунжери. Також, матеріалом зразків була бронза БРОФ7-0,2, яку використовують для виготовлення підшипників, втулок, шестерень високонавантажених механізмів.

У зв'язку з тим, що технологію нанесення регулярних мікрорельєфів вивчали і розробляли, як правило, для покращення триботехнічних характеристик поверхонь, втомні характеристики деталей з РМР залишалися поза увагою дослідників. Однак питання про втомну поведінку циклічно навантажуваної деталі, поверхня якої вкрита борознами або ямками, які можна розглядати як концентратори напружень, не має очевидної відповіді. З іншої сторони, багато деталей пар тертя (вали, торсіони, плунжери) функціонально зазнають інтенсивних циклічних і комбінованих навантажень. Ці факти обумовили необхідність проведення порівняльних втомних випробувань.



Рисунок 2.13 – Загальний вигляд втомної машини МУИ

Мікрометричний механізм регулювання давав змогу встановити

амплітуду $A = 8$ мм циклів із точністю 0,05 мм. Для виключення осьового навантаження на зразок, вагу кривошипно-шатунного механізму приводу компенсували за допомогою пружного елемента, який виконував також функцію автоматичного вимкнення двигуна внаслідок руйнування зразка. Тривалість випробування визначали за допомогою лічильника циклів. Навантаження проводилося з частотою 1500 об/хв.

Випробування проводилися з чотирма типами зразків:

- оригінальні після фрезерування Ra 1,6;
- оброблені КСЗ з нанесеними на поверхню концентратора поздовжніми борознами;
- оброблені КСЗ з нанесеними на поверхню концентратора регулярними ямками;
- оброблені в контейнері вібраційного верстата полірованими сталевими кульками (час обробки 1 година, шорсткість Rz 0,64).

Регулярні мікрорельєфи наносили на зразки, що були встановлені на фрезерному верстаті, як показано на рисунку 2.9. Борозни наносили по всій довжині концентратора уздовж зразка за безперервної поздовжньої подачі столу $S = 13$ мм/хв, їх крок забезпечувався розмірами пучка та становив 3 мм, ширина – 1,4 мм. Ямки наносили при фіксованому розташуванні КСЗ щодо зразка так, що пучок перекривав усю поверхню концентратора. Діаметр ямок склав 1,4 мм. Стержні КСЗ мали радіус наконечника 4 мм. Тривалість обробки становила 5 с та забезпечувала формування ямок без слідів валика і перенаклепу.

Висновки

1. Виконано аналітичне дослідження віброударної системи, що включає багатоконтактний віброударний інструмент. Встановлено, що основна частина енергії, що отримується робочою поверхнею, передається за допомогою удару бойка по обмеженим ланкам (кулькам і стержням) КСЗ. У процесі передачі енергії кульки відіграють роль демпфера (з в'язким або сухим тертям).

2. На основі теоретичних і експериментальних досліджень побудовано модель гранульованого середовища в прямому хвилеводі, що враховує стисливість середовища та описує поглинання енергії ударного навантаження у результаті пружнопластичної деформації оброблюваної поверхні.

3. Запропоновано класифікацію регулярних мікрорельєфів, що наносяться за допомогою КСЗ; визначено умови використання обладнання для нанесення РМР у вигляді систем борозен і ямок на плоских і циліндричних поверхнях. Визначено джерела геометричних і кінематичних нерегулярностей створюваного РМР. Встановлено їх зв'язок із параметрами пучка стержнів, стабільністю роботи інструменту та режимами роботи верстата.

4. Розроблено методику розрахунку режимів нанесення РМР багатоконтактним віброударним інструментом КСЗ.

Розділ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Поширення одноразового ударного імпульсу в механічному хвилевідводі

У процесі вимірювання та реєстрації відбитків були відзначені наступні особливості:

- незалежно від типу досліджуваного хвилевідводу (прямого або загнутого) на поверхні зразків було зафіксовано відбитків не більше 65% від кількості кульок в одному шарі;

- значення максимальних і мінімальних діаметрів відбитків, зафіксованих на поверхні одного зразка, могли відрізнятись у 2-3 рази, при чому основна частина відбитків найбільшого діаметра розташована на периферії зразка і з наближенням до середини розмір відбитків значно зменшується;

- із зменшенням швидкості падаючого вантажу масою 3 кг із 3,7 до 2,13 м/с кількість зареєстрованих відбитків зменшилася з 65% до 41%;

- із збільшенням маси вантажу за рівних швидкостей кількість відбитків зменшувалася з 65% до 32%.

Факт того, що кількість відбитків, отриманих на поверхні зразка, менша, ніж кількість кульок, що контактують із поверхнею зразка, підтверджує, що в об'ємному пакуванні жорстких гранул, як і в плоскому, передача імпульсного навантаження із меншими втратами здійснюється через ланцюжки містків розташованих у лінію.

Значний розкид розмірів відбитків на поверхні одного зразка теж підтверджує цю гіпотезу [24]. У реальному пакуванні сталевих кульок із жорсткими бічними межами неможливо домогтись абсолютно щільного пакування, а можливі лише ділянки об'єму з геометрично правильним

розташуванням частинок. Крім того, існують відгалуження від основних напрямків ланцюжків, що виникли внаслідок наявності радіальних складових сил взаємодії пар кульок.

Вплив збільшення швидкості на кількість відбитків пояснюється збільшенням кінетичної енергії ударника, а, отже, і енергією, що передається упаковці кульок.

Унаслідок того, що в конструкціях існуючих КСЗ на торець кожного стержня (індентора) впливає тільки одна кулька, то всі отримані закономірності зміни енергії наводяться усереднені для кульок кожного ряду.

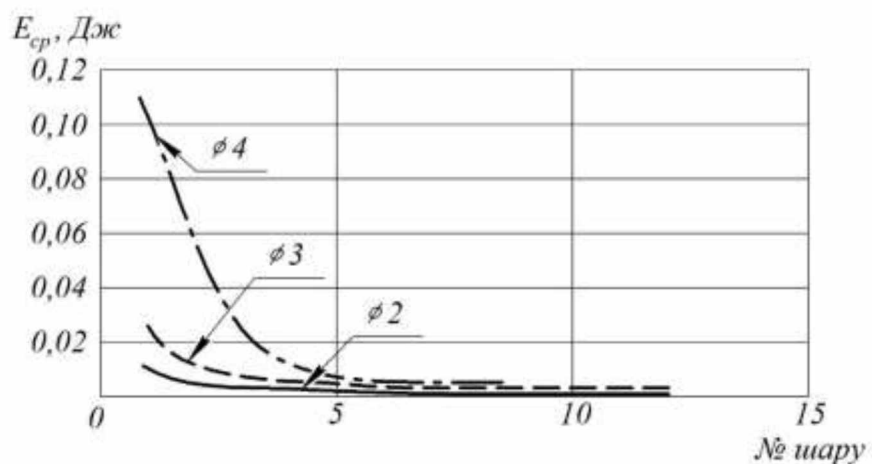


Рисунок 3.1 – Залежність переданої хвилевідводом енергії від кількості шарів кульок

Збільшення кількості шарів кульок будь-якого діаметра призводить до зниження енергії, що передається хвилеводом (рисунок 3.1). Інтенсивність втрат енергії по всій довжині хвилеводу нерівномірна. Найбільше зниження переданої енергії спостерігається в інтервалі від 1 до 4-6 шарів, за більшої кількості шарів спад енергії йде менш інтенсивно. Чим менша кількість енергії, що вводиться в систему та отримана кулькам першого шару, тим менше її загасання в перших шарах кульок (від 1 до 6).

Частина кінетичної енергії, що отримується об'ємом кульок від вантажу, що падає, залежить від в'язкопружних властивостей даного об'єму. Так під час падіння вантажу з енергією 13 Дж кожна кулька першого ряду $\phi 4$ мм отримує 0,116 Дж, кульок $\phi 3$ мм – 0,028 Дж, а кульки $\phi 2$ мм – 0,011 Дж.

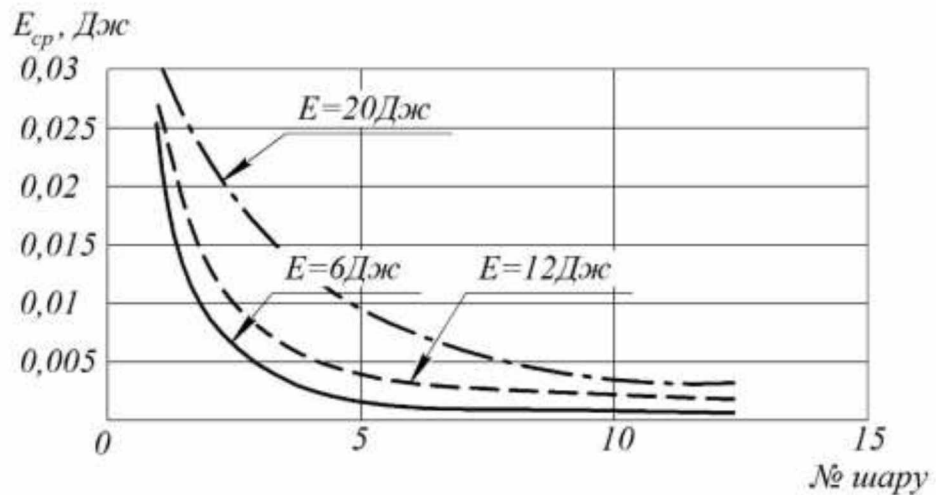


Рисунок 3.2 – Залежність переданої хвилевідводом енергії від кількості шарів кульок $\varnothing 3$ мм для різних енергій падаючого вантажу

Кількість енергії, що підводиться до системи падаючого вантажу, не здійснює суттєвого впливу на рівень її загасання під час проходження через механічний хвилевідвід (рисунок 3.2), а впливає лише на положення кривої відносно осі абсцис.

Залишається цікавою оцінка втрат енергії удару як функції довжини шляху, а не кількості шарів кульок. Ступінь загасання енергії удару в цьому випадку має ще більшу залежність від діаметра кульок. Енергія кульок 8-го шару в кульок більшого діаметру передається далі та з меншими втратами, ніж у кульок меншого діаметру.

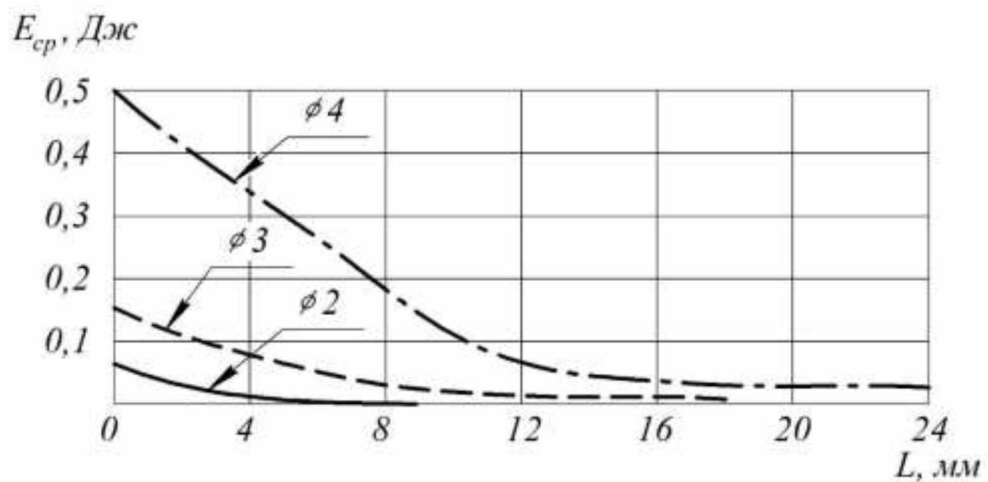


Рисунок 3.3 – Залежність переданої 8-ми шаровим хвилевідводом енергії від відстані для різних діаметрів кульок

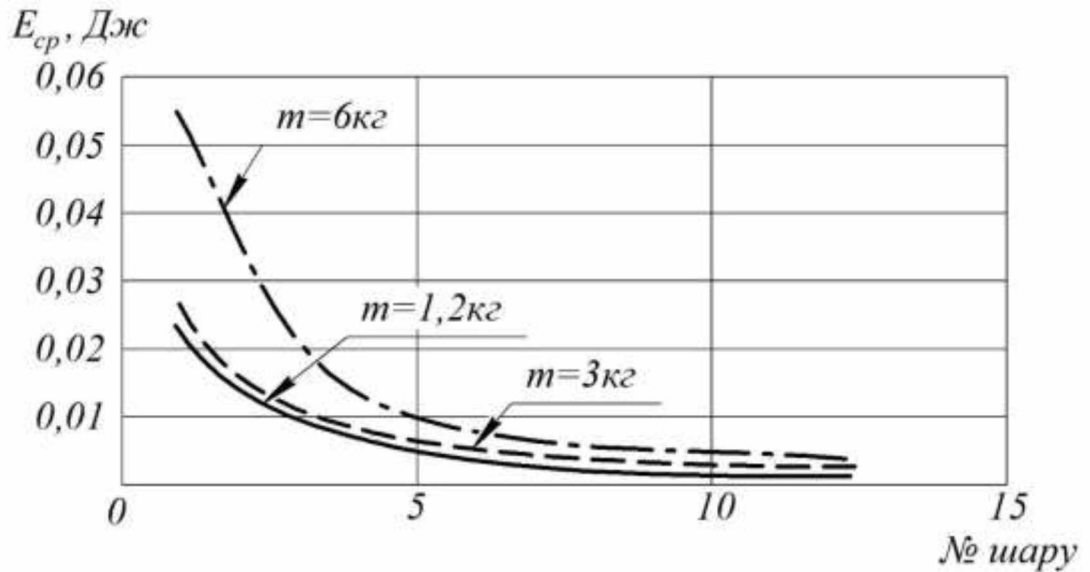


Рисунок 3.4 – Залежність переданої хвилеводом енергії від кількості шарів кульок $\varnothing 3$ мм для різних мас падаючого вантажу з однаковою величиною енергії

Збільшення маси падаючого вантажу помітно збільшує значення переданої енергії лише в перших шарах хвилевідводу до 4-6 разом зі ступенем її загасання. Передача енергії після 6-го шару відбувається однаково для різних досліджуваних мас падаючого вантажу.

Можливість змінити напрямок переданої енергії від її джерела до деформованої поверхні досліджували в загнутих циліндричних хвилевідводах $\varnothing 40$ мм із радіусом осі 60 мм. Досліджувані об'єми кульок піддавалися однаково ударному навантаженню як у прямому, так і в загнутому хвилевідводах. На рисунку 3.5 наведено результати досліджень для кульок діаметром 3 мм. Вони показують, що в умовах проведеного дослідження рівні об'єми кульок за однакових умов навантаження мають однакові властивості. Кількість отриманих відбитків на поверхні пластичних зразків під час проходження ударного імпульсу в прямому і загнутому хвилевідводах відрізняється не більше ніж на 2-5%. Енергія, що передається однаковими об'ємами кульок, відрізняється в межах похибки вимірювання пластичних відбитків.

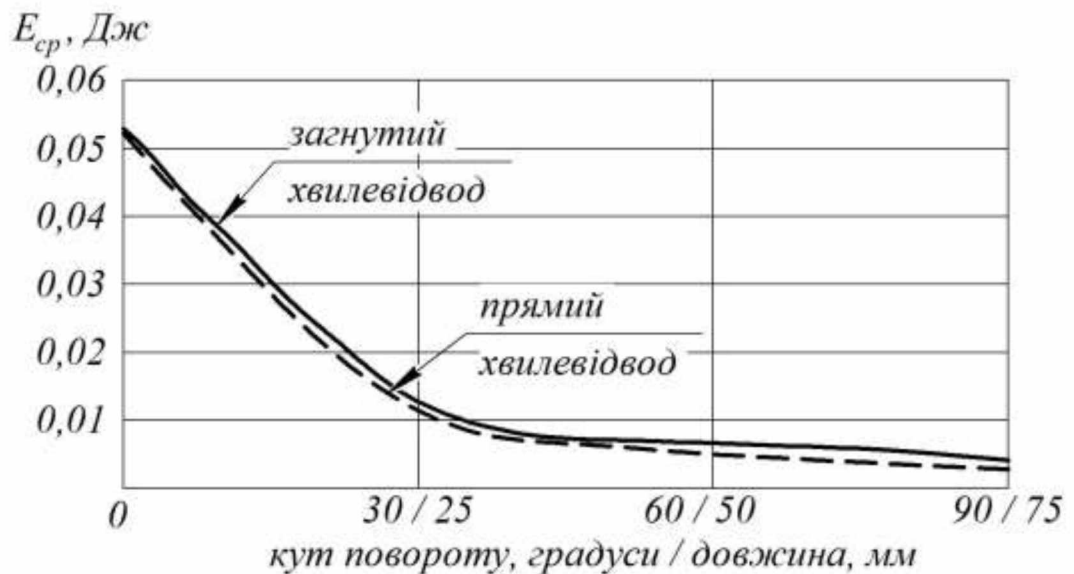


Рисунок 3.5 – Залежність переданої кульками кінетичної енергії від кута повороту хвилевідводу

Таким чином, здійснено спроби дослідження багаторазового імпульсного навантажування об'ємів кульок із 32 шарів \varnothing 3 мм та із 54 шарів \varnothing 2мм із частотою 40 Гц та енергією удару близько 2,5 Дж. Точно визначити енергію і кількість нанесених ударів не вдалося внаслідок того, що джерелом енергії виступав клепальний пневмомолоток КПМ-14, який утримували вручну. Однак, обидва досліджуваних об'єми кульок передають періодичне ударне навантаження, про що свідчили пластичні відбитки, які реєстрували на поверхні зразка, при чому зі збільшенням часу роботи пневмомолотка кількість і розмір цих відбитків збільшувалися.

3.2 Дослідження триботехнічних характеристик поверхонь

Досліди проводилися для двох пар тертя: «сталь по сталі» і «сталь по бронзі». Зміцнення наносили тільки на сталевий ролик, що обертається. Початкові експерименти виявили значне розкидання показників зносу в усьому діапазоні контактних навантажень, які становили 200-2000 Н/см². Тому при кожному навантаженні випробування проводили так, щоб отримати щонайменше три однорідних спостереження.

Процедура проведення експерименту включала початкове визначення критичного навантаження $P_{кр}$, за якого починається різке зростання ділянки контакту і зносу внаслідок руйнування граничного шару оливи, а потім визначення розмірного зносу за постійних навантажень як вихідних, так і оброблених зразків. Результати експериментів зображено на рисунку 3.6.

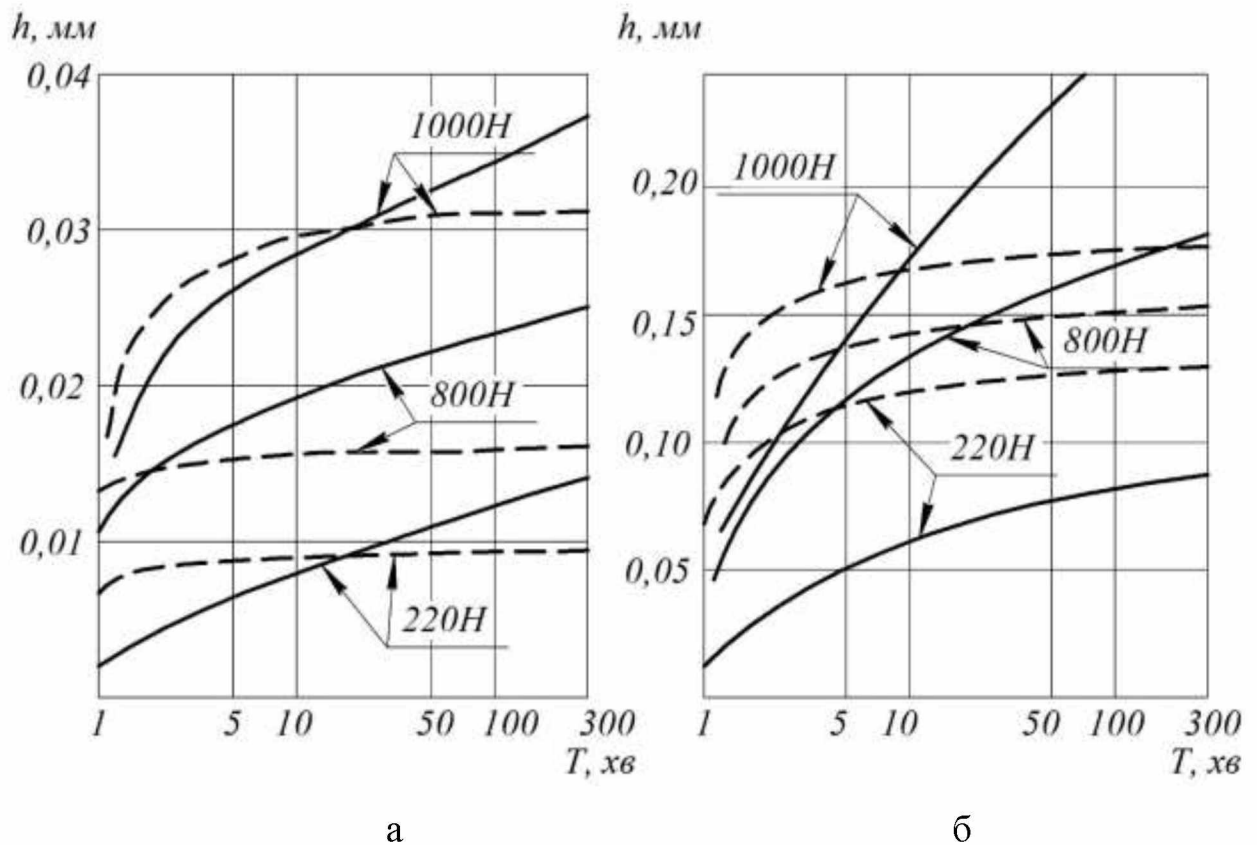


Рисунок 3.6 – Результати дослідження порівняльних характеристик розмірного зносу ролика із сталі 40XHC2MA (а) і колодки із бронзи БРОФ7-0,2 (б)

Критичне навантаження $P_{кр}$ визначали при ступінчастому підвищенні навантаження і реєстрували за різким збільшенням шуму, а на поверхні зразків - утворенням задирів («сталь по сталі») і перенесенням лусочок матеріалу колодки на ролик («сталь по бронзі»). Встановлено, що для пари «сталь по сталі» 40XHC2MA навантаження 1200 ± 250 Н відповідає початку задироутворення, а для пари «сталь по бронзі» 40XHC2MA+БРОФ7-0,2 при навантаженні 1000 ± 200 Н форсоване спрацювання відбувається із самого початку випробування. Таким чином, було визначено верхні межі

експериментальних навантажень. Вибір нижніх значень навантажень 220 Н зумовлений особливістю експериментальної установки - менше навантаження було складно підтримувати на постійному рівні через наявність періодичної складової зусилля, зумовленої биттям ролика щодо поверхні колодки.

Навантаження 800 Н цікаве тим, що, починаючи з нього, тимчасова зона зносу з постійною швидкістю зменшується практично до нуля, а зони припрацювання і форсованого зносу зникають.

Аналіз графічних залежностей зносу дає змогу встановити такі факти, що характеризують відмінності триботехнічних характеристик обробленої точінням і регуляризованої поверхонь. Дослідження контактних навантажень показало, що поверхня з РМР і контртіло швидше припрацьовуються від 3 до 10 разів. Причому різниця в періоді припрацювання поверхонь особливо помітна за малих навантажень (тобто за тих навантажень, які зазвичай мають місце в реальних вузлах тертя). У ряді випадків знос пари з РМР за малих шляхів тертя вищий, ніж у пари виточених поверхонь, що, ймовірно, пояснюється глибшим макрорельєфом поверхонь з РМР. За великих ступенів тертя знос пари з РМР зазвичай нижчий.

Зі зростанням контактних навантажень стають дедалі виразнішими тенденції значного зменшення (до 5 разів) швидкості зносу РМР-поверхні порівняно з виточеною і зниження інтегрального зносу. Цей факт можна пояснити тим, що під час підживлення граничного шару мастила із замкнутих об'ємів (западин РМР) запобігають різкому зростанню коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування та заїданню спряження завдяки виникненню якісно іншої картини процесу тертя.

Збільшення навантажень до моменту задироутворення виточеної поверхні показує, що за того самого навантаження знос РМР-поверхні має нормальний характер, відсутні сліди задирів і лусочки переносимої на сталь бронзи.

Поріг задироутворення РМР-поверхні не визначали, що було пов'язано з складністю підтримання стабільного температурного режиму пари тертя в

процесі випробування. Проте встановлено, що за навантажень 1400 Н (сталь на сталі) і 1250 Н (сталь на бронзі) на РМР-поверхнях і на поверхні контртіла відсутні сліди задироутворення, незважаючи на температуру контакту, вищу за точку кипіння оливи.

3.3 Порівняльні втомні випробування

Результати випробувань, проведених при навантаженні 400 Н/мм^2 , представлено у вигляді гістограми на рисунку 3.7, стовпчики якої відповідають кожному стану випробовуваних зразків. Вибір навантаження був обумовлений тим, що така його величина забезпечує мінімальний розкид показників довговічності [37, 38], характеризуючи в достатньому ступені властивості як мало-, так і багатоциклової втоми.

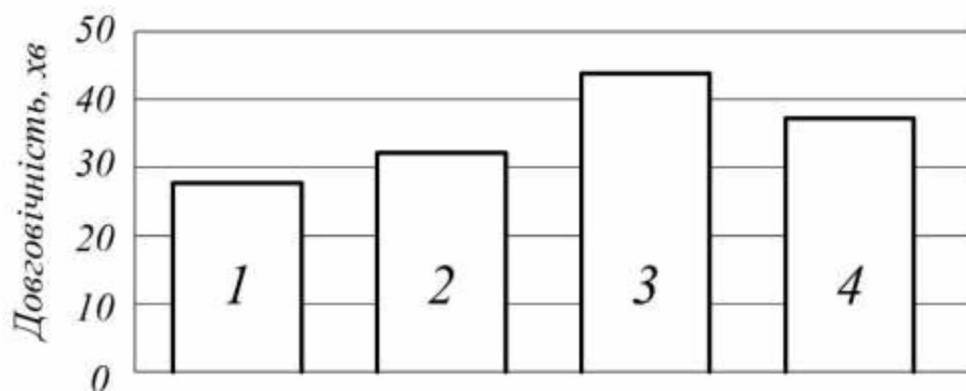


Рисунок 3.7 – Втомна довговічність зразків із сталі 40ХНС2МА за консольного поперечного вигину із напруженням 400 Н/мм^2 : 1 – оригінальні після фрезерування $Ra 1,6$; 2 – оброблені в контейнері вібраційного верстата сталевими кульками; 3 – оброблені КСЗ із нанесеними на поверхню зразка поздовжніми борознами; 4 – оброблені КСЗ із нанесеними на поверхню зразка регулярними ямкам

Аналіз отриманих діаграм показує значне збільшення довговічності зразків із нанесеним зміцнювальним рельєфом за деякого зростання розкиду довговічності. Зокрема, мінімальна довговічність, що відповідає вихідним зразкам, отриманим після фрезерування, зросла від 22 хв до 35 хв (для зразків РМР - борозни) і до 27 хв (для зразків РМР - ямки) при збільшенні амплітуди

розсіювання від 2 до 5 хв. Водночас необхідно зазначити, що збільшення розмаху показників довговічності відбулося за рахунок зразків, які показали майже вдвічі більшу довговічність. Це явище, ймовірно, зумовлене фундаментальною закономірністю втомних явищ, що виражається у збільшенні дисперсії довговічності зі зростанням самої довговічності [38] незалежно від причини зростання довговічності, що може бути зумовлено як використанням знижених навантажень, так і зміною фізико-механічних властивостей випробовуваних зразків.

Висновки

1. Випробування на стійкість зразків показали збільшення мінімальної втомної довговічності після нанесення регулярного мікрорельєфу на 40-60% (РМР-борозен) і на 20-45% (РМР-ямок). Зразки з нанесеним РМР мають більшу втомну довговічність, ніж зразки, що оброблені поверхневою вібраційною обробкою на 15-25%, що можна пояснити більш високим рівнем створюваних стискаючих залишкових напружень.

2. Розроблено методика вибору та розрахунку конструктивних параметрів КСЗ, що враховує геометричні та фізико-механічні характеристики оброблюваної поверхні.

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Екологічна експертиза

Збереження навколишнього середовища передбачено Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» (протокол № 1268-ХІІ від 26.06.1991 року, який був прийнятий Верховною Радою України, № 41, ст.547) [25].

Під час проведення технічного обслуговування та ремонту машин виконують роботи, що пов'язані із забрудненням атмосферного повітря, води та ґрунту шкідливими речовинами, відходами, використанням експлуатаційних матеріалів та енергоресурсів.

Величину впливу на екологію у ремонтних процесах визначається моделлю машини, періодичністю проведення таких робіт, рівнем надійності конструкції та переліком необхідного обладнання. Так, для ремонту тріщин у корпусних деталях, відновлення місць під підшипники, розгладжування поверхонь використовують полімерні клейові суміші на основі епоксидних смол. Токсичність таких речовин обумовлена особливостями самих полімерів та розчинників. При цьому виділяються шкідливі речовини: етилхлоргідрин, толуол, дибутилфталат, поліетиленполіамін.

Під час відновлення деталей невеликих розмірів, гладких і різьбових отворів діаметром менше 25 мм використовують ручне електродугове зварювання з електродами, що містять шлакоутворюючі (польовий шпат, кварцовий пісок), розкисляючі (феромарганець, феросиліцій, алюміній) і легуючі речовини. При зварюванні утворюється пил від окиснення парів металів, СО, NO_x, оксиди міді, марганцю, кремнію хрому), фтористі сполуки.

У процесі зварювання, наплавлення, паяння при виконанні операцій технічного обслуговування і поточного ремонту, повітря забруднюється зварювальним аерозолем, оксидами хрому та нікелю, оксидами азоту, вуглецю та іншими небезпечними речовинами.

У фарбувальних цехах токсичні речовини забруднюють повітря і воду. Вони виділяються в процесах знежирення поверхонь органічним розчинником, при підготовці лакофарбових матеріалів, їх нанесенні на поверхню виробу та сушінні покриття.

Для захисту навколишнього середовища застосовуються різні засоби і методи. Так, для очищення повітря від аерозолів у технологічних процесах обслуговування та ремонту машин використовуються:

- механічні обезпилюючі пристрої, в яких пил відокремлюється під дією сил тяжіння, інерції або відцентрової сили (пилоосаджувальні камери, циклони);

- мокрі, або гідравлічні апарати, в яких тверді частинки вловлюються рідиною (мокрі циклони, водяні, пінні фільтри);

- пористі фільтри (тканинні, волокнисті);

- електрофільтри, в яких частинки осаджуються в неоднорідному електричному полі високої напруженості.

Доцільність використання того чи іншого типу пиловловлювача визначається необхідним ступенем очищення, а також конкретними технологічними умовами, що існують на підприємстві, його економічними можливостями.

Серед інших заходів екологічної безпеки у господарствах є:

1. Переведення котельні з мазуту на газ та встановлення систем нейтралізації оксидів азоту.

2. Заборона використання ціаністих солей у гальванічному виробництві.

3. Виділення твердих опадів гальванічних стоків.

4. Заміна загартованих олив у ковальському виробництві на водні розчини з полімерними добавками.

5. Використання фільтрів при очищенні оливи та охолоджуючих рідин у механічних цехах, у травильних ваннах гальванічного цеху.

При очищенні стічних вод транспортних та дорожніх підприємств найбільшого поширення набули процеси проціджування, відстоювання, обробки у полі дії відцентрових сил, фільтрування.

Проціджування реалізують у ґратах (вертикальних або похилих) із шириною пазів 15...20 мм. Осад видаляють вручну або механічно і потім обробляють. Зазвичай застосовують комбіновані ґрати-дробилки, які не тільки вловлюють великі частинки, а й подрібнюють їх до 10 мм і менше.

Відстоювання засноване на вільному осіданні (спливанні) домішок із щільністю більше (менше) густини води. Процес реалізують у пісковловлювачах, відстійниках і жируловлювачах.

Пісколовки (використовуються для очищення стічних вод від частинок металу та піску розміром більше 0,25 мм) бувають горизонтальні з прямолінійним та круговим рухом води, вертикальні та аеровані.

Відстійники (використовуються для очищення стічних вод від механічних частинок розміром до 0,25 мм та нафтопродуктів) бувають горизонтальні, радіальні та комбіновані. При розрахунку відстійників визначають їх довжину та ширину для заданої витрати стічних вод.

Очищення стічних вод у полі дії відцентрових сил здійснюють у відкритих або напірних гідроциклонах та центрифугах. Відкриті гідроциклони застосовують виділення зі стічних вод великих домішок зі швидкістю осадження понад 0,02 м/с.

Фільтрування виконують для очищення вод від тонкодисперсних домішок з малою концентрацією як на початковій стадії, так і після застосування деяких методів фізико-хімічної та біологічної очистки, що супроводжуються виділенням у воду зважених речовин.

Найбільш поширені наступні види фільтрів:

- зернисті – насадки незв'язаних пористих матеріалів;

- мікрофільтри, фільтроелементи яких виготовляють із пористих матеріалів.

Для очищення стічних вод від оливо використовують як фільтрувальний матеріал пінополіуретан, який забезпечує ефективність очищення 97...99% при швидкості фільтрування до 0,01 м/с.

4.2 Охорона праці

Загальні вимоги прав робітників на охорону життя та здоров'я під час виконання трудових обов'язків, на безпечні, якісні та здорові умови роботи передбачені законодавством України, у тому числі Законом України «Про охорону праці», що був прийнятий Верховною Радою наказом № 2695-ХІІ від 14.10.92 р. [26]. Даний Закон, за сприянням відповідальних органів державної влади, регулює відносини між найманим працівником і роботодавцем у питаннях гігієни, безпеки праці та виробничого середовища; встановлює загальний порядок організації безпеки праці на підприємстві.

Організація робіт у ремонтно-механічних майстернях вимагає дотримання безлічі взаємозалежних норм і правил техніки безпеки та охорони праці.

Одним із найбільш завантажених виробничих вузлів у ремонтно-механічних майстернях є ділянки поточного ремонту. Такі робочі місця обладнані підйомниками для огляду техніки і оглядовими ямами. Для забезпечення максимальної безпеки проведення ремонтних робіт усі оглядові пристрої розроблені із максимальними заходами охорони праці. Особливу увагу потрібно звертати на техніку безпеки під час роботи на оглядовій ділянці з підйомником. Необхідно пам'ятати, що безпека роботи на підйомнику залежить не тільки від його конструкції, а й від правильних дій обслуговуючого робітника, а також водія транспортного засобу.

Кількість машин та агрегатів, що знаходяться на монтажному майданчику ремонтно-механічної майстерні, не повинна перевищувати

необхідної кількості для забезпечення проведення денних робіт. Усі вузли, агрегати та матеріали повинні зберігатися на стелажах та шафах. При використанні підвісних стелажів для забезпечення вимог техніки безпеки обов'язковим є використання надійного кріплення. Не рекомендується підлогове зберігання вузлів та агрегатів.

Конструкція обладнання повинна давати можливість виконання операцій виробничого характеру таким чином, щоб це було зручно для робітника. Положення рук та ніг працівника при виконанні даних операцій має відповідати фізіологічній будові людського тіла та має відповідати найменш стомлюючій позі.

Для виконання норм охорони праці та техніки безпеки на робочому місці проведення зварювальних робіт повинні відокремлюватися спеціальними захисними екранами від інших робочих місць. Такі екрани захищають інших робітників від шкідливого впливу випромінювання, що виділяються під час зварювання. Відповідно до вимог техніки безпеки таке обладнання має комплектуватися захисними чохлами та кожухами.

Якість освітлення робочого місця впливає на здоров'я працівника і продуктивність його праці. Впливаючи на очі, світло діє весь організм людини. При незадовільному освітленні зорова здатність ока знижується, і в людини можуть з'являтися короткозорість, опіки від світла, різь в очах і розвинути катаракта. Незадовільна освітленість часто є причиною виробничого травматизму.

4.3 Техніко-економічне обґрунтування досліджень

Техніко-економічна оцінка визначається як сума затрат на виготовлення обладнання, загальну економічну ефективність вкладень та річні економічні ефекти.

Затрати на виробництво конструкції пристрою залежать від майстерні для виконання робіт. Оскільки роботи по розробці конструкції виконуються в

майстерні для ремонту машин і обладнання, для якої вона призначена, то затрати на виготовлення пристрою підраховуємо наступним чином [27]:

$$C_{\text{вк}} = C_{\text{од}} + C_{\text{вд}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{вв}} + C_{\text{вд}}, \quad (4.1)$$

де $C_{\text{вд}}$ – вартість оригінальних деталей, грн;

$C_{\text{зп}}$ – повна зарплата, грн;

$C_{\text{вв}}$ – загальні витрати на виготовлення пристрою, грн;

$C_{\text{вд}}$ – вартість виготовлення деталей, грн;

До вартості купованих деталей включаємо і вартість деталей, які виконуються на замовлення (прокат, гайки).

Вартість виготовлення корпусних деталей:

$$C_{\text{вд}} = Q \cdot C_{\text{гд}}, \quad (4.2)$$

де Q – маса матеріалу, що використали на виготовлення корпусних деталей.

$C_{\text{гд}}$ – середня вартість 1 кг готових деталей.

Вартість виготовлення оригінальних деталей визначаємо за формулою:

$$C_{\text{од}} = C_{\text{зп п}} + C_{\text{мз}}, \quad (4.3)$$

де $C_{\text{зп п}}$ – заробітна плата працівників, що зайняті на розробці оригінальних деталей, грн.;

$C_{\text{мз}}$ – вартість матеріалу для оригінальних деталей, грн.

Заробітну плату $C_{\text{зп п}}$ підраховуємо за формулою:

$$C_{\text{зп п}} = C_{\text{пр}} + C_{\text{д}} + C_{\text{соц}}, \quad (4.4)$$

де $C_{\text{пр}}$ і $C_{\text{д}}$ – основна і додаткова зарплата працівників, грн.;

$C_{\text{соц}}$ – нарахування до єдиного фонду держстрахування, грн.

Економічну ефективність капітальних вкладень для виготовлення пристрою визначаємо за формулою:

$$E_c = \frac{E_z}{C_{\text{ч.кон}}}, \quad (4.5)$$

де E_z – річна економія від зниження собівартості при впровадженні пристрою, грн.;

$$E_z = (C_1 - C_2) \cdot N_z, \quad (4.6)$$

де C_1 і C_2 – собівартість продукції до і після капітальних вкладень, грн.;

N_2 – річна програма ремонту, шт.

Співставивши знайдену економічну ефективність із відповідними нормативами $E_n = 0,15$, бачимо, що $E_c > E_n$, а отже, капітальні вкладення є ефективними.

Строк окупності капітальних вкладень визначаємо за формулою:

$$O_2 = \frac{C_{ц.кон}}{E_2}, \quad (4.7)$$

Знайдені техніко-економічні показники зводимо до таблиці.

Таблиця 4.1 – Техніко-економічні показники розробки

Показники	Значення
Вартість корпусних деталей, грн.	3257,6
Вартість оригінальних деталей, грн.	450,8
Накладні витрати, грн.	19,48
Загальна вартість конструкції, грн.	3727,88
Програма зміцнення із застосуванням пристрою, шт.	500
Строк окупності, років	1,61

Висновки

1. Техніко-економічне обґрунтування результатів роботи свідчать про те, що термін окупності запропонованої технології склала 1,61 років при програмі зміцнення 500 свердл.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на розширення технологічних можливостей процесу оздоблювально-зміцнювальної обробки багатоконтактним віброударним інструментом КСЗ.

2. Виконано аналітичне дослідження віброударної системи, що включає багатоконтактний віброударний інструмент. Встановлено, що основна частина енергії, що отримується робочою поверхнею, передається за допомогою удару бойка по обмеженим ланкам (кулькам і стержням) КСЗ. У процесі передачі енергії кульки відіграють роль демпфера (з в'язким або сухим тертям).

3. На основі теоретичних і експериментальних досліджень побудовано модель гранульованого середовища в прямому хвилеводі, що враховує стисливість середовища та описує поглинання енергії ударного навантаження у результаті пружнопластичної деформації оброблюваної поверхні.

4. Запропоновано класифікацію регулярних мікрорельєфів, що наносяться за допомогою КСЗ; визначено умови використання обладнання для нанесення РМР у вигляді систем борозен і ямок на плоских і циліндричних поверхнях. Визначено джерела геометричних і кінематичних нерегулярностей створюваного РМР. Встановлено їх зв'язок із параметрами пучка стержнів, стабільністю роботи інструменту та режимами роботи верстата.

5. Розроблено методику розрахунку режимів нанесення РМР багатоконтактним віброударним інструментом КСЗ. Експериментальні дослідження геометричних параметрів утворених регулярних мікрорельєфів підтвердили придатність методик для призначення схем і режимів нанесення РМР за допомогою КСЗ встановленого на верстатах.

6. Випробування на стійкість зразків показали збільшення мінімальної втомної довговічності після нанесення регулярного мікрорельєфу на 40-60% (РМР-борозен) і на 20-45% (РМР-ямок). Зразки з нанесеним РМР мають більшу втомну довговічність, ніж зразки, що оброблені поверхневою

вібраційною обробкою на 15-25%, що можна пояснити більш високим рівнем створюваних стискаючих залишкових напружень.

7. Розроблено методику вибору та розрахунку конструктивних параметрів КСЗ, що враховує геометричні та фізико-механічні характеристики оброблюваної поверхні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковалевський С.В., Матвієнко С.А., Лукічов О.В. Аналіз стану проблеми реновації деталей автомобілів технологічними методами. *Вісник ЖДТУ*. 2012. № 3 (62). С. 74-79.
2. Погребна Н. Е., Куцова В. З., Котова Т. В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. Дніпро: *НМетАУ*, 2021. 89 с.
3. Фесенко А. Г., Бечке К. В., Манжеліївський С. В., Убизький М. М., Кулик О. В., Хуторний В. В. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин : навч. посіб. Дніпропетровськ : *РВВ ДНУ*, 2015. 104 с.
4. Попович В., Кондир А., Плешаков Е. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Практикум. Львів : *Видавництво «Світ»*, 2009. 552 с.
5. Опальчук А. С., Котречко О. О., Роговський Л. Л., Семеновський О. Є., Роговський І. Л. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Лабораторний практикум: посібник для вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації. Київ : *НУБіПУ*, 2015. 428 с.
6. Дудніков А. А., Іванкова О. В., Бурлака О. А., Канівець О. В., Дудник В. В. Роль поверхневого деформування деталей у підвищенні їх ресурсу. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк. 2021. №71. С. 191-195.
7. Дудніков А. А., Дудніков І. А., Дудник В. В., Бурлака О. А. Способи відновлення деталей сільськогосподарських машин. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 2021. №2. С. 280-285.
8. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Навч. посібник. Харків: *ХНУРЕ*, 2016. 188 с.
9. Ковалевський С.В., Матвієнко С.А., Лукічов О.В. Технологічне забезпечення зносостійкості поверхневого шару деталей автомобілів при фінішній зміцнювальній віброобробці в пружному середовищі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського*

господарства імені Петра Василенка. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. Харків : ХНТУСГ, 2012. Вип. 122. С. 122-127.

10. Яхно Б. О. Чисельне моделювання залишкових напружень і пошкоджувальність після дорнування технологічних отворів в авіаційному сплаві Д16ЧТ. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць*, 2015. № 1(73). С. 96-99.

11. R. I. Sivak, O. V. Serdiuk, and S. Z. Yablonska Evaluation of the metal surface layer plasticity in the process of surface plastic deformation. *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi. Sectia: Stiinta si ingineria materialelor*, 2009. Tomul LV (LIX). Fasc. 3. pp. 201-204.

12. Титов А. В. Повышение эффективности выглаживания различных конструкционных материалов за счет управления скоростными и силовыми параметрами нагружения инструмента. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування*, 2010. С. 121-125.

13. Швець С. В., Швець У. С., Борисюк В. М. Моделювання мехатронної ковальсько-пресової системи : навчальний посібник. Суми : Сумський державний університет, 2022. 177 с. – карбування

14. Косарчук В. В., Кульбовський І. І., Агарков О. В. Сучасні методи зміцнення і підвищення зносостійкості пар тертя. *Вісник Національного транспортного університету*. К.: НТУ, 2014. Вип. 31. 6 с.

15. Мордюк Б. М. Ультразвукова ударна обробка конструкцій і споруд транспортного машинобудування: монографія; за ред. д-ра техн. наук, проф. Г. І. Прокопенка. Суми: Університетська книга, 2020. 309 с.

16. Turych V., Weselowskaya N., Rutkevych V., Shargorodskiy S. Investigation of the process of thread extrusion using the ultrasound. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, Issue 1 (90). P. 60-68. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114564

17. Сивак Р. И., Нахайчук О. В., Сивак И. О. Влияние геометрии траектории нагружения на пластичность. *Обработка материалов давлением*, 2011. №1 (26), С. 22-25.
18. Огородніков В. А., Сивак Р. І. Особливості оцінки пластичності металів і механіки немонотонного пластичного деформування. *X МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії»*, Харків: НТУ «ХП». 21-23 листопада 2018. С. 76-77.
19. Алиева Л. И. Моделирование процесса комбинированного выдавливания фланцев на полых деталях. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування*, 2016. № 1(76). С. 20-30.
20. Гурський В. М. Порівняльний аналіз віброударних резонансних систем дво- та тримасової структури з лінійним тертям. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*, 2016. Вип. 50. С. 25-32.
21. Gursky V., Kuzio I., Korendiy V. Optimal synthesis and implementation of resonant vibratory systems. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 2018. Vol. 6, No. 2. P. 38-46.
22. Баженов В.А., Погорелова О.С., Постникова Т.Г., Лукьянченко О.А. Численные исследования динамических процессов в виброударных системах при моделировании удара силой контактного взаимодействия. *Проблемы прочности*, 2008. № 6. С. 82-90.
23. Цуркан О. В., Горбатюк Р. М. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів вібромашини для поверхневого відновлення робочих органів ґрунтообробних агрегатів. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки»*. Кропивницький, 1-3 листопада 2017 р. С. 298-299.
24. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник. Львів: *ЛьвДУВС*, 2017. 292 с.

25. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 26.06.91 р. № 1268-ХІІ. Дата оновлення: 01.01.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (дата звернення: 29.09.2022).

26. Про охорону праці : Закон України від 14.10.92 р. № 2695-ХІІ. Дата оновлення: 14.08.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 29.09.2022).

27. Тіхонов О. В., Рибалко І. М., Колпаченко Н. М. Техніко-економічна оцінка конструкторської розробки пристосування. *Методичні вказівки до виконання практичної роботи студентам, які навчаються за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. Харків. нац. техн ун-т сіл. госп-ва ім. П. Василенка, 2021. 22 с.*