

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

**КОСТЮК САВА АНДРІЙОВИЧ**

УДК 621.787

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ  
ПАЛЬЦІВ СФЕРИЧНИХ ШАРНІРІВ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОЮ  
ОБРОБКОЮ**

05.02.08 – технологія машинобудування

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2021

Дисертація на правах рукопису

Роботу виконано в Хмельницькому національному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Косіюк Микола Миколайович,**  
Хмельницький національний університет,  
доцент кафедри технології машинобудування

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, доцент  
**Васильків Василь Васильович,**  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя, професор кафедри інжинірингу  
машинобудівних технологій;

кандидат технічних наук, доцент  
**Гурей Володимир Ігорович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри робототехніки та інтегрованих  
технологій машинобудування.

Захист відбудеться «21» грудня 2021 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.03 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56, аудиторія 79.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська 56, корпус №2.

Автореферат розіслано « 19 » листопада 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

А.Є. Дячун

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Розвиток сучасного машинобудування характеризується створенням високошвидкісних машин нового покоління підвищеної потужності та точності. Тому однією із прикладних проблем машинобудування є розробка заходів з підвищення працездатності, надійності та довговічності механізмів і машин. Вирішення цих задач можливе завдяки підвищенню експлуатаційних властивостей поверхневого шару деталей машин комбінованими методами структурної модифікації і поверхневого зміцнення. Розвиток нових прогресивних методів зміцнення сприяє розробці сучасного обладнання та енергоефективних технологічних машин.

В сучасній техніці широке застосування отримали сферичні шарніри (СШ) ковзання, які використовуються для просторових переміщень виконавчих ланок із заданою точністю. Встановлено, що більшість таких шарнірів працюють в умовах циклічного, динамічного навантаження при граничному змащуванні, що призводить до передчасного зношування поверхневого шару робочих поверхонь. Особливі вимоги висуваються до якості та фізико-механічних властивостей неповної сферичної поверхні (НСП) кульового пальця. Зміцнення НСП методами поверхнево-пластичного деформування (ППД) з можливістю формування геометрично визначеного мастило-утримуючого профілю – складна і маловивчена задача.

Тому розроблення спеціального технологічного устаткування для біполярного статико-імпульсного зміцнення та обґрунтування параметрів і режимів роботи формує науково-прикладну задачу, яка потребує вирішення і є актуальною для різних галузей машинобудування.

### **Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.**

Вибраний напрямок досліджень тісно пов'язаний з основними науковими напрямами та темами науково-технічних (експериментальних) розробок Міністерства освіти і науки України на період 2019–2021 рр., затверджених Наказом Міністерства освіти і науки України №1466 від 28.12.2018 р.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до тематик наукового напрямку Хмельницького національного університету в рамках науково-дослідних держбюджетних тем: «Теоретико-експериментальні методи та комп'ютерні моделі забезпечення живучості циліндричних трибосистем ковзання при нормальному і швидкісному терті» (№ державної реєстрації 0116U001549); «Неруйнівний контроль, діагностування та прогнозування технічного стану електронних систем методом акустичної емісії у виробках військової і невійськової техніки» (№ державної реєстрації 0120U102069).

Комп'ютерне моделювання та інженерний аналіз механізмів у системі SolidWorks, проводились за грантової підтримки авторизованого представника SolidWorks в Україні – компанії «Інтерсед Україна».

**Мета роботи й завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів біполярною статико-імпульсною обробкою з обґрунтуванням конструкторсько-технологічних параметрів запропонованого процесу.

Поставлена мета досягається шляхом розв'язання наступних завдань:

- провести аналіз існуючих способів та конструкцій пристроїв для зміцнення НСП методами ППД та пошук напрямків підвищення працездатності СШ ковзання;

- дослідити вплив динамічних та статичних факторів на формування функціональних властивостей поверхневого шару поверхнево-пластичним зміцненням;

- вдосконалити комбінований метод ППД для біполярного зміцнення НСП деталей машин з формуванням геометрично визначеного мікрорельєфу та мастилоутримуючого профілю, розробити схему процесу обробки;

- обґрунтувати вибір конструктивно-технологічних параметрів для статико-імпульсного зміцнення (СІЗ). Розглянути вплив технологічних параметрів на величину подачі деформуючого інструмента та побудувати математичні залежності для визначення режимів обробки з врахуванням коефіцієнта перекриття;

- розробити конструкцію генератора механічних імпульсів (ГМІ) та провести розрахунок конструктивно-технологічних параметрів устаткування. Розглянути цикл роботи ГМІ та побудувати математичну модель його роботи;

- розробити експериментальне устаткування для реалізації біполярного СІЗ деталей машин з НСП;

- розглянути вплив параметрів СІЗ на формування мікрорельєфу поверхні;

- для підтвердження працездатності зміцнених зразків провести експериментальні випробування;

- запропонувати конструкцію технологічного устаткування для біполярного СІЗ зовнішніх циліндричних і неповних сферичних поверхонь деталей машин та обґрунтувати режими його роботи.

*Об'єкт дослідження* – технологічний процес біполярного статико-імпульсного зміцнення зовнішніх поверхонь обертання деталей машин.

*Предмет дослідження* – взаємозв'язок параметрів процесу біполярного статико-імпульсного зміцнення зовнішніх неповних сферичних поверхонь з функціональними властивостями поверхневого шару.

*Методи дослідження.* Методологію досліджень розроблено на базі сучасних методів і основних положень поверхнево-пластичного зміцнення, інженерії поверхні, механіки контактної взаємодії, основ творення машин. В теоретичних дослідженнях використано методи планування факторного експерименту, хвильової теорії деформування, теорії трибологічних випробувань, моделювання контактної взаємодії методом скінченних елементів. Аналіз процесів зміцнення робочих

поверхонь проведено на основі експериментальних випробувань та комп'ютерних досліджень.

Побудова аналітичних залежностей для встановлення параметрів технологічного устаткування здійснювалось шляхом розв'язування системи диференціальних рівнянь за умови, що перехідні процеси завершилися і рух приводу усталений.

Експериментальні дослідження параметрів ударного навантаження, динамічних та кінематичних характеристик руху елементів ударної системи проведено на спеціально розроблених експериментальних установках.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. *Вперше* теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено вимоги до параметрів біполярного статико-імпульсного зміцнення, чим забезпечується оптимальна форма ударного імпульсу в зоні деформації, що дозволяє підвищити коефіцієнт використання енергії удару та енергоефективність технологічного устаткування.

2. *Вперше* теоретично доведено взаємозв'язок між параметром шорсткості зміцненої поверхні та коефіцієнтом перекриття пластичних відбитків, що дозволяє проводити вибір параметрів статико-імпульсного зміцнення, які б забезпечували задані показники якості поверхневого шару.

3. *Вперше* для біполярного статико-імпульсного зміцнення неповних сферичних поверхонь виведено математичні залежності для розрахунку режимів роботи устаткування з використанням коефіцієнта перекриття пластичних відбитків, які на відміну від існуючих враховують вихідні параметри зміцненого поверхневого шару, що дозволяє керувати процесом зміцнення і формувати регулярний геометрично визначений мікрорельєф.

4. *Вперше* побудовано математичну та імітаційну моделі ударної системи генератора механічних імпульсів для біполярного статико-імпульсного зміцнення, які включають аналітичні залежності зв'язку конструктивно-технологічних та вихідних параметрів устаткування, що дозволило розробити інженерну методику проектування ударних систем технологічного устаткування для зміцнення.

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішено науково-прикладну задачу з підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів ковзання шляхом біполярного статико-імпульсного зміцнення робочих поверхонь.

Розроблено нове технологічне устаткування для біполярного статико-імпульсного зміцнення зовнішніх циліндричних та неповних сферичних поверхонь деталей машин з наступним формуванням геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю, технологічне спорядження для точіння зовнішніх сферичних поверхонь.

Експериментально підтверджено теоретичні залежності для визначення впливу конструктивних та технологічних параметрів на процес зміцнення неповних

сферичних поверхонь. Розроблено методику вибору технологічних режимів обробки.

Запропоновані рекомендації щодо проектування конструкцій ударних систем та генератора механічних імпульсів, які є складовими елементами технологічного устаткування для біполярного статико-імпульсного зміцнення.

Результати отримані в роботі доведені до практичного використання і захищені патентами України на корисні моделі.

Технологію лезової та зміцнювальної обробки неповних сферичних поверхонь, методику вибору технологічних режимів та технологічне спорядження (пристрій для точіння зовнішніх сферичних поверхонь; пристрій для зміцнення неповних сферичних поверхонь статико-імпульсною обробкою) передано до впровадження у ремонтному виробництві сферичних шарнірів спецтехніки, м. Хмельницький «СТО Зварювання».

Наукові положення та методики впровадженні у навчальному процесі кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету при проведенні лабораторних і практичних занять з дисципліни «Експлуатація та обслуговування машин», а також на кафедрі трибології, автомобілів та матеріалознавства при проведенні лабораторних занять з дисципліни «Основи технічної діагностики автомобілів».

**Особистий внесок здобувача.** Результати проведених досліджень отримано автором самостійно. Постановка задач досліджень, розробка методології та підходів до їх вирішення здійснювались спільно з науковим керівником. З робіт, які опубліковані зі співавторами, використовуються тільки ті результати, що одержані здобувачем особисто і наведені у переліку публікацій.

У спільних публікаціях автору належить: [1] – розробка методики діагностування сферичних шарнірів та класифікація факторів впливу на працездатність; [2, 18] – розробка конструкції пристрою для токарної обробки неповних сферичних поверхонь та методика розрахунку режимів обробки; [3, 4, 12] – моделювання напружено-деформованого стану елементів сферичного шарніра, розробка схеми процесу біполярного зміцнення неповних сферичних поверхонь; [5 – 7, 13, 14] – розробка конструкції ударної системи і генератора механічних імпульсів, побудова математичної моделі його роботи, методика комп'ютерного моделювання процесу біполярного зміцнення та дослідження параметрів ударного імпульсу, ідея створення головних вузлів технологічного устаткування; [8] – дослідження формування мікрорельєфу на сферичній поверхні та побудова геометричної моделі формування мікропрофілю; [9] – розроблення конструкції шарніра; [10, 11] – ідея створення пристрою; [15, 16] – комп'ютерне моделювання процесу зміцнення; [17] – удосконалення технології зміцнення неповних сферичних поверхонь; [19] – запропоновано технологію біполярного статико-імпульсного зміцнення деталей з неповними сферичними поверхнями.

**Апробація матеріалів дисертації.** Результати роботи доповідалися та обговорювалися на: VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів

та молодих науковців «Перші наукові кроки – 2014» (м. Кам'янець-Подільський, 2014); IX Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій (АПКТ-2015)» (м. Хмельницький, ХНУ, 2015); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «АВІА-2017» (м. Київ, НАУ, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «VIII Українсько-Польські діалоги 2019» (м. Кам'янець-Подільський, 2019).

У повному обсязі дисертація доповідалась на розширеному засіданні міжкафедрального наукового семінару факультету інженерної механіки Хмельницького національного університету (Хмельницький, 15.06.2021 р.), а також на засіданні розширеного наукового семінару кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» (Львів, 06.10.2021 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 19 наукових праць, з них 7 статей у фахових виданнях, 1 стаття у закордонному виданні, 5 тез та матеріалів конференцій, 6 патентів України на корисні моделі.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Повний обсяг роботи становить 236 сторінок друкованого тексту, основний текст – 158 стор., список із 140 використаних джерел, додатки – 42 стор. Дисертація містить 99 рисунків та 25 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено обґрунтування актуальності теми дисертаційного дослідження, характеристику дисертації, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено дані щодо апробації дисертації її структури та кількості опублікованих праць.

У **першому розділі** наведено огляд літературних джерел за темою дисертаційної роботи. Наведено ряд прикладів використання сферичних шарнірів у різних галузях сучасного машинобудування. Розглянуто основні чинники, які впливають на зниження працездатності шарнірів. Аналіз літературних джерел показав, що в більшості випадків працездатність та довговічність СШ визначається зносостійкістю контактуючих поверхонь пари тертя.

Проблемами підвищення працездатності та довговічності деталей машин методами поверхнево-пластичного зміцнення займались: І.С. Автаназів, В.А. Горохов, М.С. Дрозд, А.В. Кірічек, А.Г. Лазуткін, Л.Г. Одінцов, Д.Д. Папшев, В.В. Петросов, М.І. Пилипець, І.В. Гурей, Д.Л. Соловійов, В.М. Смелянський, А.Г. Суслов, А.М. Сулима, П.А.Чепа та ін.

Огляд існуючих способів зміцнювальної обробки показав, що найбільшою ефективністю характеризуються комбіновані методи, які дозволяють проводити зміцнення поверхневого шару з можливістю формування мастилоутримуючого профілю. Відомо низку суттєвих переваг способу статико-імпульсного зміцнення (СІЗ). Суть методу полягає у тому, що інструмент знаходиться у постійному контакті з оброблюваною поверхнею завдяки статичному навантаженню, вектор дії

якого збігається з напрямком дії ударного імпульсу, за рахунок чого досягається стабільність процесу зміцнення та зменшення втрат енергії удару. Даний спосіб дозволяє варіювати в широких межах міцністю та зносостійкістю поверхневого шару, створювати сприятливі стискаючі залишкові напруження, а також формувати структуру з ділянками низької та високої твердості подібну за властивостями до гетерогенної. Розвитком даного способу займались: А.В. Кірічек, Д.Л. Соловйов, А.Г. Лазуткін, С.В. Барінов та ін.

Аналіз літератури показав, що одним із простих та ефективних способів підведення та тривалого утримання мастила в зоні фрикційного контакту є нанесення на робочі поверхні контактуючих деталей спеціального мастилоутримуючого профілю, різні варіанти формування якого запропоновано в роботах А.С. Радчика, Ю.Г. Шнейдера, Л.Г. Одінцева, А.Г. Кузьменка, О.В. Дихи, О.П. Бабака.

Проведено патентний пошук та аналіз способів і обладнання для зміцнення сферичних поверхонь. Встановлено, що процес біполярного СІЗ НСП є малодослідженим, а технологічні можливості існуючого обладнання не забезпечують його реалізацію. Тому при створенні технологічного устаткування для біполярного СІЗ НСП необхідні додаткові як теоретичні, так і експериментальні дослідження.

За результатами виконання першого розділу визначено наукові підходи та напрямки подальших досліджень в якості вихідних для вирішення поставлених в роботі задач.

**У другому розділі** описана загальна методологія роботи, що здійснюється на базі застосування системного підходу до вирішення поставленої науково-технічної задачі, яка передбачає теоретичні та експериментальні дослідження, комп'ютерне моделювання, аналіз і формування множини стратегій вибору оптимальних параметрів процесу зміцнення.

Наведено методику початкових досліджень оптимального енергетичного діапазону та величини зусилля статичного навантаження інструменту на процес зміцнення. Встановлено взаємозв'язок між величинами радіуса сфери деформуємого елемента (ДЕ) і енергією одиничного удару.

Розглянуто теоретичні основи перебігу хвильових процесів в ударній системі при СІЗ та запропоновано нову модель ударної системи механічного генератора імпульсів з статичним навантаженням інструмента та комбінованим навантаженням бойка, конструктивна схема якої представлена на рис. 1.

Розглядається випадок формування ударного імпульсу при СІЗ, коли геометричні співвідношення бойка та інструмента (хвилевода) не співрозмірні.

Статичне та динамічне навантаження бойка забезпечується за рахунок енергії пружно деформованого тіла (стисненої пружини). Характеристика пружини підбирається таким чином, щоб частина її потенціальної енергії перетворювалась в кінетичну енергію бойка ( $W_{y0}$ ), а інша її частина витрачалась на статичне навантаження бойка ( $F_{cm1}$ ), і унеможлиблювала його відрив (відскок) від інструмента.



Для досліджень параметрів ударного імпульсу в зоні деформації запропоновано методику та вимірювальний комплекс оригінальної конструкції (рис. 2), який складається з ударної, вимірювальної та реєструючої систем і дозволяє моделювати процес ударного навантаження з різними початковими умовами та реєструвати параметри ударного імпульсу.

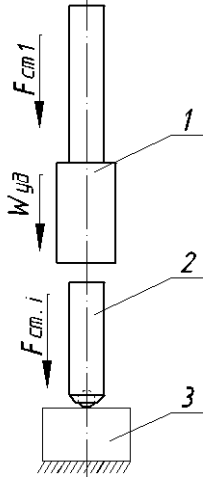


Рис. 1. Схема ударної системи з статичним навантаженням інструмента та комбінованим навантаженням бойка:  
1 – боек; 2 – інструмент; 3 – деталь



Рис. 2. Експериментально-вимірювальний комплекс:  
1 – ударна система; 2 – наковальня;  
3 – датчик; 4 – блок підсилення та обробки сигналу; 5 – персональний комп'ютер

Під час досліджень використовувались ДЕ у вигляді кульок радіусами  $R_i = 1 - 4$  мм, виготовлених зі сталі ШХ 15 (61 HRC,  $R_a = 0,1$  мкм). Зразки зі сталі 40X нормалізованої, піддавались ударному навантаженню з різною енергією удару, в результаті чого на поверхні формувались відповідно відбитки з різною твердістю.

Оцінка точності отриманих результатів при визначенні параметрів ударного імпульсу здійснювалась шляхом порівняння експериментальних результатів та результатів отриманих в ході комп'ютерного моделювання.

На рис. 3 наведено контурний графік розподілу напружень за Мізісом в момент зупинки інструмента після удару ( $v_i = 0$  м/с), а на рис. 4 – відгук хвильової (навантаженої) поверхні для одного із кроків експерименту.

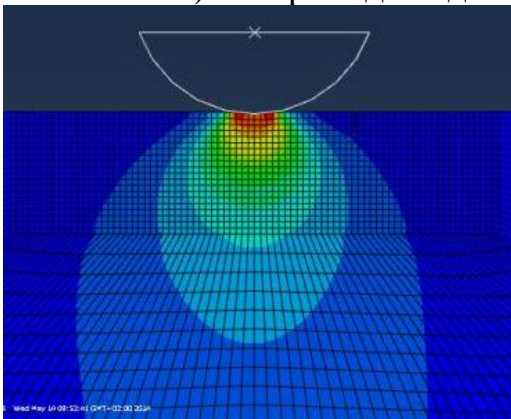


Рис. 3. Розподіл напружень при одиничному ударі

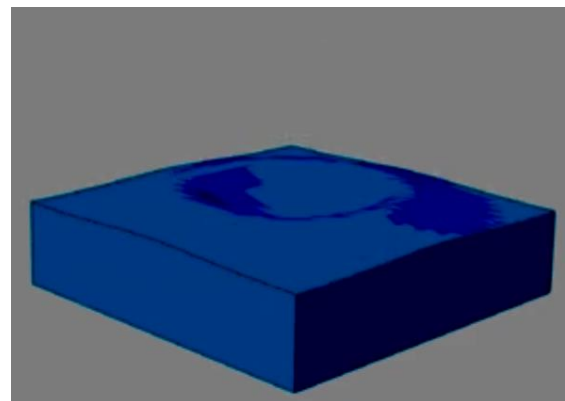


Рис. 4. Відгук хвильової (навантаженої) поверхні для одного із кроків експерименту

Для виявлення взаємодії між факторами (параметрами), які впливають на процес зміцнення розроблено методику проведення багатофакторного експерименту (згідно плану  $2^3$ ). Результати аналізу математичного моделювання необхідні для конструювання та налаштування технологічного устаткування.

Для експериментальної перевірки адекватності висунутих положень щодо біполярного СІЗ НСП, які лягли в основу створення технологічного устаткування для біполярного СІЗ зовнішніх НСП з можливістю формування геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю було виготовлено експериментальну установку (рис. 5), яка встановлювалась на напрямні токарно-гвинторізного верстата мод. IT1-М.

Для досліджень використовувались пальці СШ виготовлені зі сталі 40Х з діаметром сферичної поверхні 25 мм. Зразки зміцнювали з коефіцієнтами перекриття:  $K = 0$ ;  $K = 0,3$ ;  $K = 0,5$ ;  $K = 0,7$ ;  $K = 0,9$ . Для дослідження мікроструктури та розподілення твердості за глибиною на сферичних поверхнях зразків готувались мікрошліфи, за схемою (рис. 6) з кроком по глибині 50 мкм.



Рис. 5. Експериментальна установка

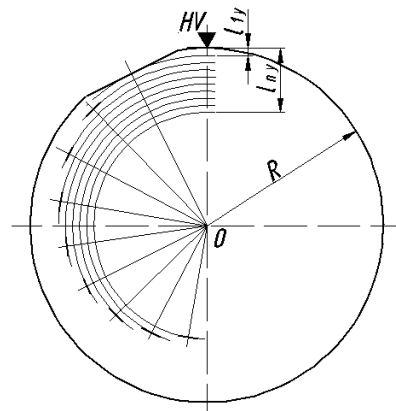


Рис. 6. Схема розташування мікрошліфів на сферичній поверхні

У третьому розділі наведені результати експериментальних досліджень впливу енергії удару на поверхневу твердість зміцненого шару (рис. 7) та величини статичного навантаження інструмента на поверхневу твердість і діаметр пластичного відбитка (рис. 8).

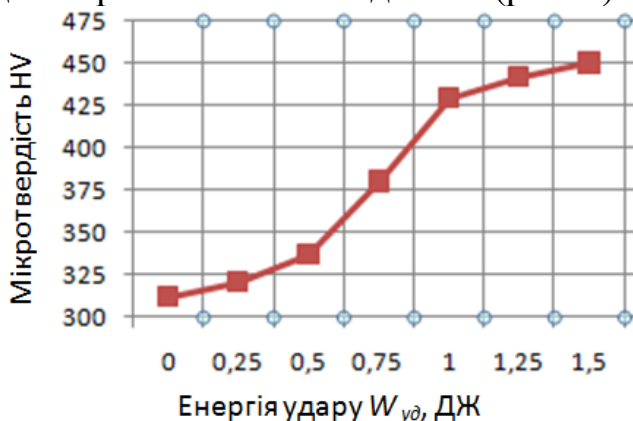


Рис. 7. Залежність зміни мікротвердості від енергії одиничного удару, при радіусі ДЕ –  $R_i = 1$  мм

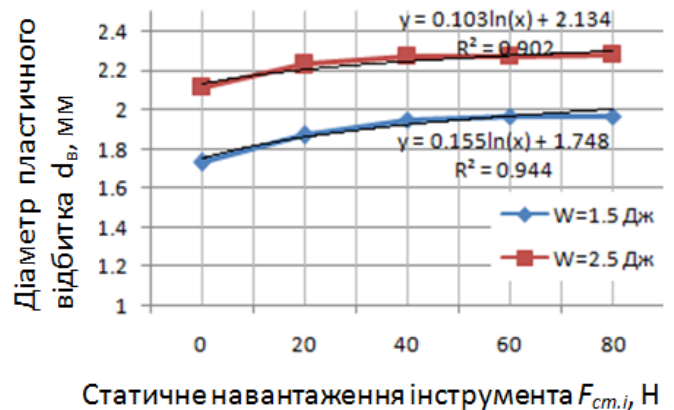


Рис. 8. Залежності діаметра пластичного відбитка від статичного навантаження інструмента

З графіка (рис. 7) видно, що в енергетичному діапазоні  $0,5 \leq W_{y\delta} \leq 1,5$  Дж спостерігається стрімке зростання мікротвердості. Подальше збільшення енергії удару призводить до надмірних напливів навколо пластичного відбитка і в меншій мірі впливає на зростання мікротвердості.

Аналіз результатів експериментальних досліджень впливу величини статичного навантаження інструмента на поверхневу твердість та діаметр пластичного відбитка показав, що сприятливі умови передачі енергії удару ( $W_{y\delta} = 1 - 5$  Дж) в кратер деформації створюються при статичному навантаженні інструмента  $F_{cm.i} = 20 - 60$  Н. Подальше збільшення статичного навантаження в меншій мірі впливає на процес передачі енергії.

Дослідження параметрів ударного імпульсу в зоні деформації при поверхнево-пластичному зміцненні проводились з використання експериментально-вимірювального комплексу (рис. 2). Початкові умови навантаження та результати експериментальних досліджень наведені в табл.1.

Таблиця 1

## Результати експериментальних досліджень

Початкові умови		Результати експериментальних досліджень		
Схема, номер	Умови навантаження	$d_b$ , мм	HV <sup>100</sup>	Форма імпульсу
1)	 $W_{y\delta} = 2,35$ Дж $F_{cm.i} = 40$ Н; $R_i = 1,5$ мм	2,23	412	
2)	 $W_{y\delta} = 2,35$ Дж $F_{cm.i} = 40$ Н; $F_{cm1} = 150$ Н; $R_i = 1,5$ мм	2,28	430	

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що в ударній системі формується пролонгований ударний імпульс, який складається з основної та додаткової (хвостової) частини. Встановлено, що форма імпульсу формується за

рахунок рекуперації відбитих хвиль, геометричних співвідношень елементів ударної системи та оптимального статичного навантаження бойка й інструмента.

За отриманими експериментальними даними побудовані діаграми, які відображають вплив статичного навантаження бойка та інструмента на мікротвердість зміцненого шару зразка, рис. 9.

Аналіз отриманих результатів показав, що схема з використанням статичного навантаження бойка  $F_{cm1}$  та інструмента з ДЕ радіуса  $R_i$  за однакової енергії удару забезпечує підвищення мікротвердості до 20 % у порівнянні із схемою обробки (без статичного навантаження), що вказує на зростання коефіцієнта використання енергії удару.

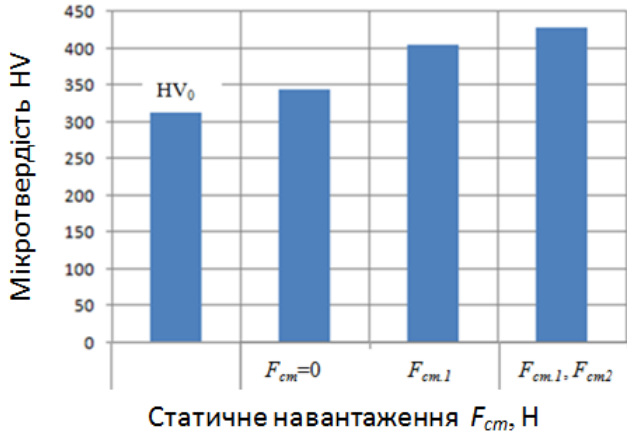


Рис.9. Вплив статичного навантаження бойка та інструмента на зміну мікротвердості поверхневого шару

модель виду:

$$y(HV) = 418,25 + 25,75W_{y\delta} + 5,75F_{cm1} + 2,5F_{cm2} - 2,5W_{y\delta}F_{cm1}, \quad (1)$$

де  $y(HV)$  – мікротвердість зміцненої поверхні.

Розглянуто процес формування зміцненого поверхневого шару та розроблено геометричну модель формування мікропрофілю поверхні (рис.10).

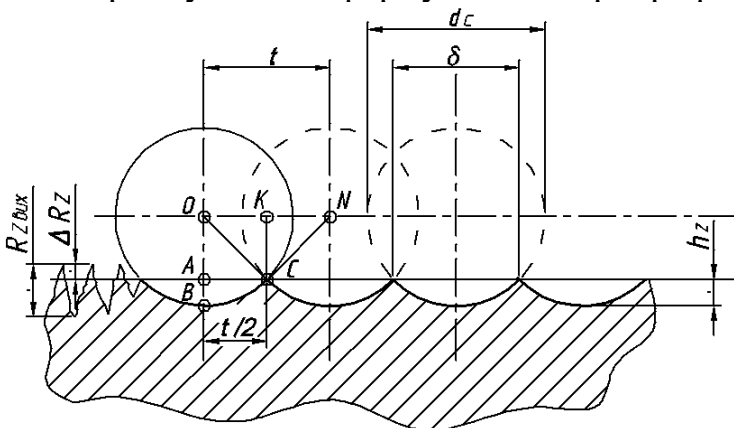


Рис. 10. Геометрична модель формування мікропрофілю

Проведено дослідження коефіцієнта корисної дії (ККД) ударної системи залежно від геометричних та акустичних властивостей і умов навантаження. Встановлено, що кращий результат ( $\eta = 83\%$ ) зафіксовано для схеми 2, табл.1, найменше значення ( $\eta = 74\%$ ) відповідає схемі без статичного навантаження.

Проведено дослідження енергетичних параметрів процесу статико-імпульсного зміцнення математичним плануванням експерименту, побудовано регресійну

математичну залежність для визначення висоти мікрорельєфу  $h_z$  з урахуванням коефіцієнта перекриття  $K$  і діаметра деформуючого інструмента  $d_i$ :

$$h_z = \frac{d_i}{2} - \sqrt{(d_i/2)^2 - ((1-K)\delta/2)^2}, \quad (2)$$

де  $\delta$  – діаметр пластичного відбитка.

Залежно від величини коефіцієнта перекриття можливе утворення мікрорельєфу поверхні, (рис. 11): структура з локальними

відбитками  $K \ll 0$  ( $t > \delta$ ); структура з відбитками, що дотикаються  $K = 0$  ( $t = \delta$ ); структура з взаємним перекриттям відбитків  $0 < K < 1$ , ( $t < \delta$ ), де  $t$  – крок пластичних відбитків.

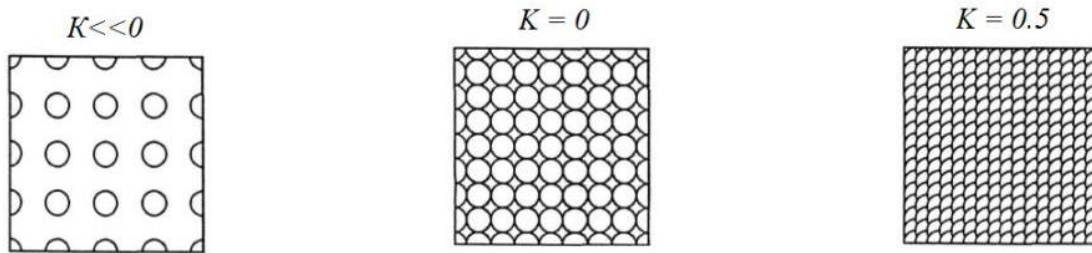


Рис. 11. Види мікрорельєфу при різних значеннях  $K$

Розглянуто можливість двостадійної обробки поверхонь, яка передбачає зміцнення з наступним формуванням геометрично визначеного на поверхні мастило утримуючого профілю.

У четвертому розділі проведено конструювання основних вузлів технологічного устаткування для біполярного СІЗ та обґрунтування параметрів його роботи. Запропоновано нову модель ударної системи ГМІ біполярної дії з додатковим статичним навантаженням ступінчатого бойка. Принципова схема біполярного СІЗ наведена на рис. 12.

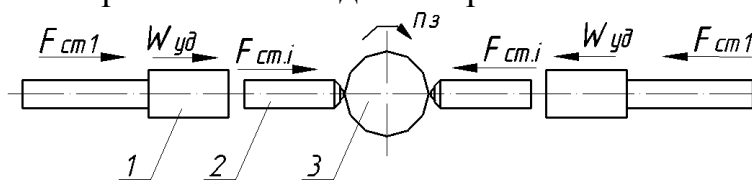


Рис.12.Схема біполярного СІЗ:

1 – боек; 2 – інструмент; 3 – заготовка

За такої схеми обробки деталь одночасно сприймає дві зустрічні деформаційні хвилі, направлені з двох діаметрально протилежних полюсів, завдяки чому формуються симетричні стискаючі залишкові напруження, а

діаметрально протилежні згинальні моменти компенсуються, що дозволяє проводити рівномірне зміцнення та мінімізує викривлення заготовки. Підвищується продуктивність, енергія удару використовується максимально і не поглинається масивною наковальнею, що значно знижує металоємкість конструкції устаткування.

Проведені дослідження процесу біполярного СІЗ у програмному комплексі Abaqus. На рис. 13 наведено контурні графіки розподілу напружень при зміцненні зразків прямокутного та круглого сичення для одного із кроків експерименту.

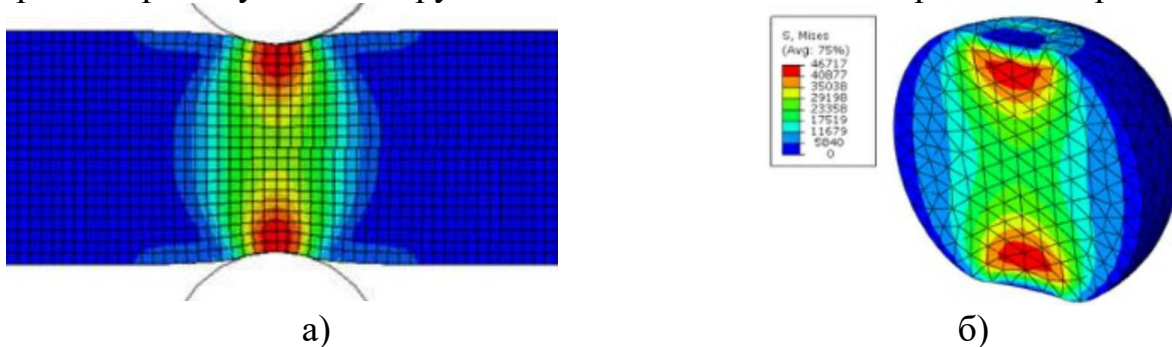


Рис. 13. Розподіл еквівалентних напружень за об'ємом під дією біполярного ударного навантаження:

а – зразок прямокутного сичення; б – зразок сферичної форми

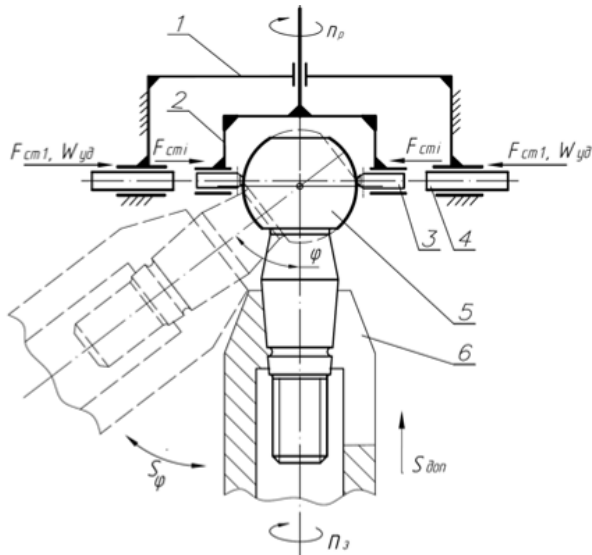


Рис. 14. Схема біполярного СІЗ НСП:  
1 – корпус; 2 – ротор; 3 – інструмент;  
4 – бойок; 5 – заготовка; 6 – оправка

заготовки забезпечується за рахунок повороту заготовки у площині інструментів на деякий кут  $\alpha$  і розраховується за формулою:

$$S_{\alpha} = \frac{360^{\circ}(1-K)\delta}{\pi d_c} \quad (4)$$

Розглянуто процес формування мікрорельєфу на НСП пальця (рис. 15) та виведено математичну залежність для визначення колової подачі деталі  $S_{ik}$  на один деформуючий елемент (мм/об на одну кульку):

$$S_{ik} = \frac{d_n \delta z k (1-K)}{2d_c z_i} \quad (5)$$

де  $d_n$  – діаметр  $n$ -го січення,  $z_i$  – кількість деформуючих кульок (інструментів),

$$d_n = 2\sqrt{h_n(d_c - h_n)} \quad (6)$$

де  $h_n$  – відстань  $n$ -го січення від полюса сфери.

На графіку (рис. 16) відображені результати проведених досліджень зміни величини подачі залежно від діаметрів в  $n$ -х нормальних січеннях сферичної поверхні кульового пальця.

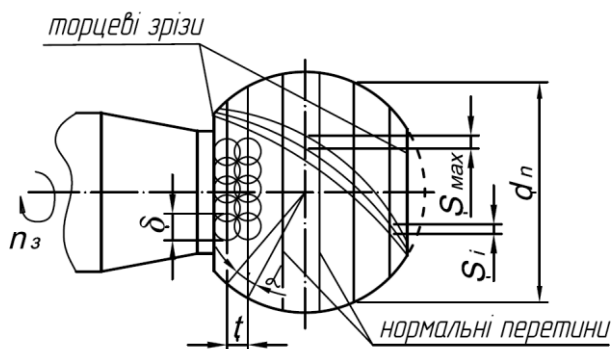


Рис. 15. Схема утворення мікрорельєфу на НСП

Запропоновано схему процесу біполярного СІЗ НСП, рис. 14.

Подані математичні залежності для визначення параметрів обробки з врахуванням коефіцієнта перекриття пластичних відбитків  $K$ . Частота обертання заготовки  $n_3$  визначається:

$$n_3 = (1-K) \frac{\delta n_i z k}{2\pi d_c} \quad (3)$$

де  $z$  – кількість кулачків механічного генератора імпульсів;  $k$  – кількість бойків;  $d_c$  – діаметр оброблюваної сфери;  $\delta$  – діаметр пластичного відбитка;  $n_i$  – частота обертання інструмента.

Кутова подача  $S_{\alpha}$ , на один оберт

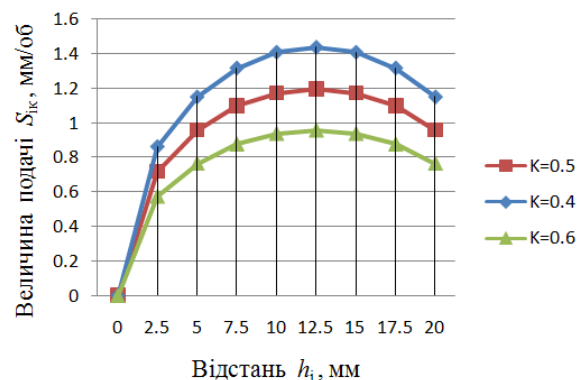


Рис. 16. Зміна величини подачі залежно від технологічних параметрів процесу обробки

За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано конструкцію генератора механічних імпульсів біполярної дії з статичним навантаженням інструмента  $F_{cm,i}$  та бойка  $F_{cm1}$  (рис. 17). В основі генератора використовується кулачковий ударний механізм, здатний здійснювати серію ударів за один оберт кулачка.

Переміщення бойка залежно від кута повороту кулачка описується залежністю:  $x_2 = \varphi_x(\varphi)$ , де  $x_2$  – прямолінійне переміщення бойка при повороті кулачка на кут  $\varphi$ .

Розглянуто робочий цикл руху бойка  $T_u$ , рис. 18.

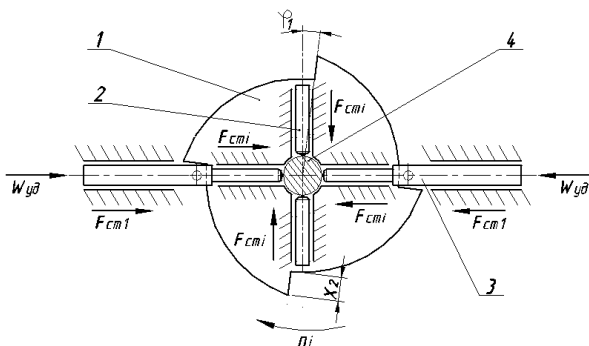


Рис. 17. Схема генератора механічних імпульсів біполярної дії:

- 1 – кулачок; 2 – інструмент;  
3 – боек; 4 – заготовка

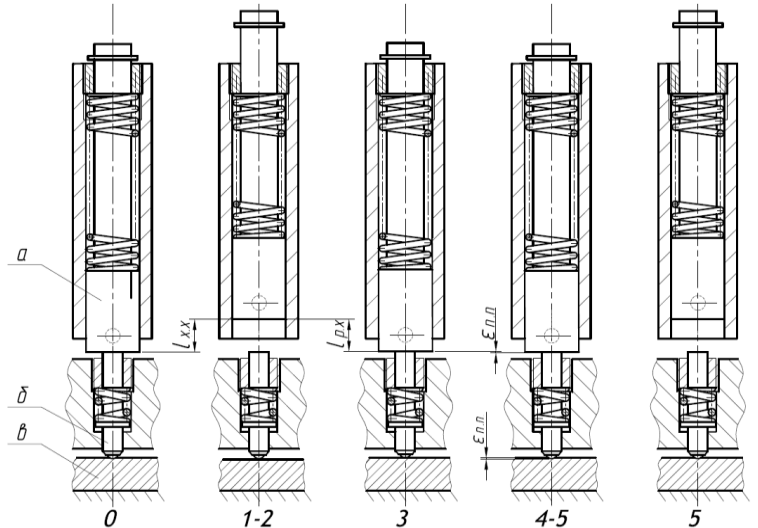


Рис. 18. Схема циклу роботи бойка: а – боек; б – інструмент; в – зразок

Побудовано математичні моделі для періодів взведення та розгону бойка:

$$M_{зв} = \frac{d}{d\varphi} \left( \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} + k(x_1 + x_2)x_2 \sin \theta \mu \right), \quad (7)$$

де  $M_{зв}$  – зведений крутний момент;  $x_1$  – величина стиску пружини регулювальною втулкою;  $x_2$  – переміщення бойка при повороті кулачка на кут  $\varphi$  (величина стиску пружини);  $k$  – жорсткість пружини;  $\theta$  – кут підйому кулачка;  $\mu$  – коефіцієнт тертя.

Час розгону бойка  $t_{роз}$  визначається:

$$dt = \frac{dx_2}{\left( (x_2^2 + 2x_1x_2)k/m \right)^{1/2}}, \quad (8)$$

де  $m$  – маса бойка.

Максимальна кутова швидкість повороту кулачка визначається:

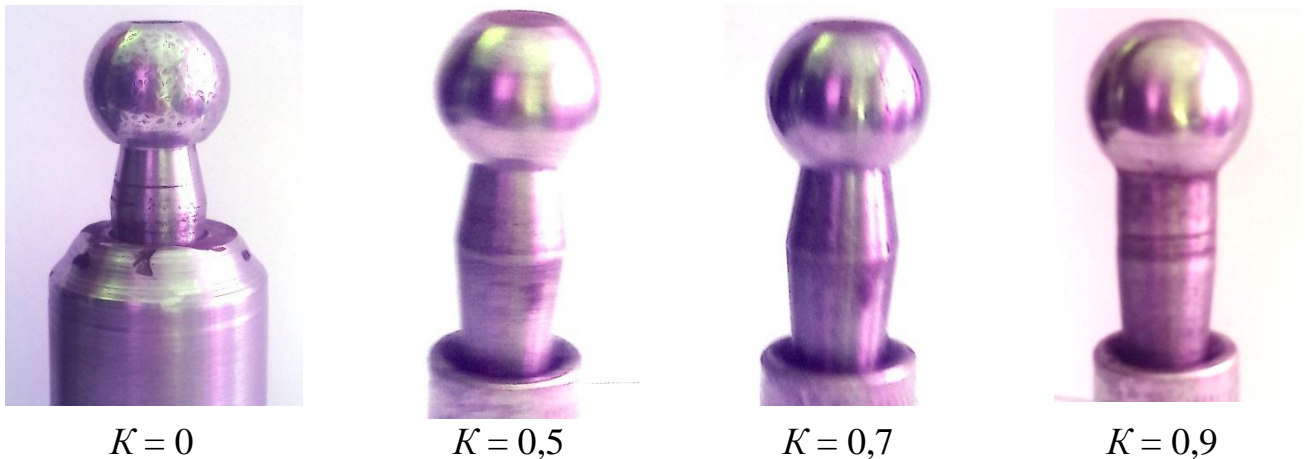
$$\omega_{\max} = \frac{d\varphi_i \left( (x_2^2 + 2x_1x_2)k/m \right)^{1/2}}{dx}, \quad (9)$$

де  $\varphi_i$  – кут повороту кулачка.

Для перевірки працездатності запропонованої моделі ГМІ та дослідження оптимального частотного ряду обертів привода ротора, а також фазового кута випередження  $\varphi_1$  розроблено комп'ютерну імітаційну модель ГМІ та проведено моделювання у середовищі SolidWorks з використанням системи для проведення кінематичного та динамічного аналізу технічних систем SolidWorks Motion. Виявлено оптимальний діапазон частоти обертання ротора (10 – 630 об/хв).

У п'ятому розділі проведена апробація способу біполярного СІЗ та експериментального устаткування для зовнішніх НСП з можливістю формування геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю.

Проведено експериментальні дослідження впливу коефіцієнта перекриття на розподіл мікротвердості за глибиною. Зразки зі сталі 40Х (рис. 19) зміцнювались з коефіцієнтами перекриття:  $K = 0 - 0,9$ , після чого проводились дослідження мікрорельєфу (рис. 20), мікроструктури та розподілення твердості за глибиною.



$K = 0$

$K = 0,5$

$K = 0,7$

$K = 0,9$

Рис. 19. Зміцненні експериментальні зразки при різних значеннях  $K$



$K = 0$

$K = 0,5$

$K = 0,7$

$K = 0,9$

Рис. 20. Текстура поверхні зміцнених зразків при різних значеннях  $K$

За результатами експериментальних досліджень побудовано графіки залежності величини зміни поверхневої мікротвердості та мікротвердості за глибиною при різних значеннях коефіцієнта перекриття  $K$  (рис. 21, рис. 22).

На основі аналізу результатів експериментальних досліджень встановлено, що при зміцненні з коефіцієнтом перекриття  $K = 0 - 0,9$  – степінь зміцнення лежить в межах 37,5 – 79,5 %. Відомо, що при зміцненні з коефіцієнтом перекриття ( $0,35 \leq K \leq 0,5$ ) формується структура зміцненого поверхневого шару з ділянками високої та низької твердості подібна за своїми властивостями до гетерогенних матеріалів. Натомість при зміцненні з коефіцієнтом перекриття  $K = 0,7 - 0,9$  –



формується рівномірно-зміцнений поверхневий шар, причому із зростанням величини  $K$  параметр шорсткості зменшується, а твердість збільшується.

Аналіз результатів експериментальних досліджень на розтяг показав, що механічні властивості матеріалу зміцнених зразків характеризуються позитивним приростом у порівнянні з еталонним (без зміцнення). Спостерігається підвищення межі текучості та міцності, але зменшується залишкове видовження після руйнування. Матеріал стає більш пружним та міцнішим, але втрачає пластичність.

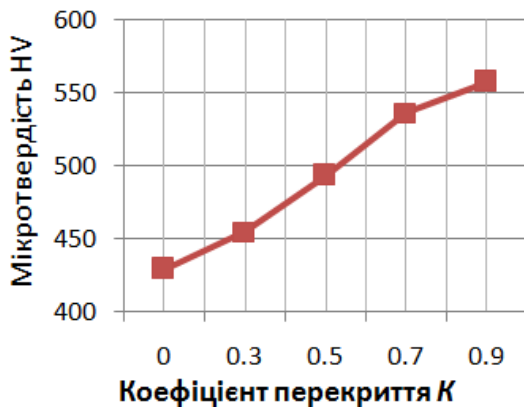


Рис. 21. Зміна поверхньої мікротвердості від коефіцієнта перекриття  $K$

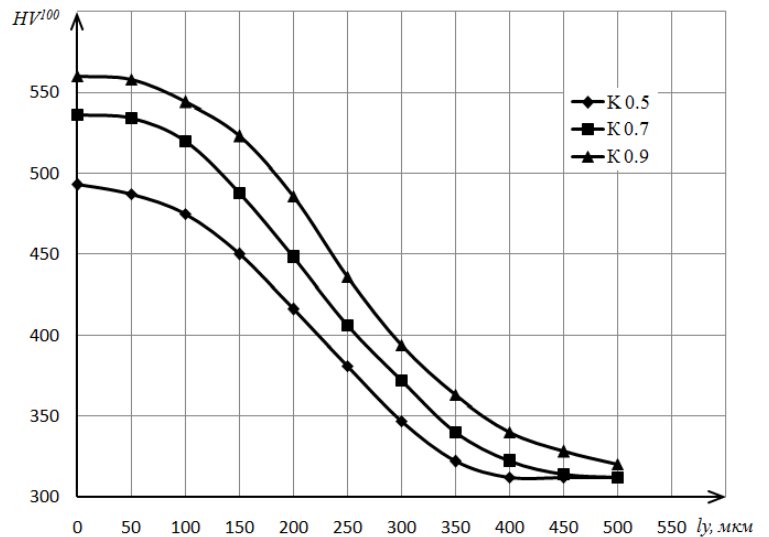


Рис. 22. Зміна мікротвердості за глибиною від величини коефіцієнта перекриття  $K$

Для перевірки ефективності запропонованої технології проведено дослідження впливу параметрів СІЗ на зносостійкість зміцнених зразків за відомою методикою «сфера–фаска». Випробування проводились в режимі зворотно-обертового руху, який моделює відносні переміщення деталей шарніра під час експлуатації. Результати лабораторних випробувань показали, що зносостійкість шарніра із пальцем зі сталі 40Х, зміцненим запропонованим способом при  $K = 0,7 - 0,9$  зросла до 20 % у порівнянні з обкочуваним.

Для перевірки працездатності зміцненого пальця СШ в реальних умовах експлуатації, ним було оснащено автомобільний кульовий шарнір оригінальної конструкції.

Шарніри були встановлені на автомобілі DAEWOO nexia. На даний момент напрацювання становить більше 45000 км пробігу і ознак параметричних відмов не спостерігається.

Практичний досвід експлуатації СШ свідчить, що суттєвий вплив на їх довговічність чинить параметр відхилення від сферичності робочої поверхні пальця. Для отримання заготовок з НСП розроблено та виготовлено пристрій для токарної обробки НСП.

Запропоновано і захищено патентом спосіб підвищення ресурсу пальця СШ, який передбачає обробку НСП пальця (біполярним СІЗ), в результаті чого на

сферичній поверхні формується зміцнений поверхневий шар з геометрично визначеним мікрорельєфом.

На основі результатів, отриманих в роботі, запропоновано машину модульної конструкції для біполярного СІЗ зовнішніх циліндричних та НСП деталей машин з можливістю формування геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю, загальний вигляд якої наведено на рис. 23.

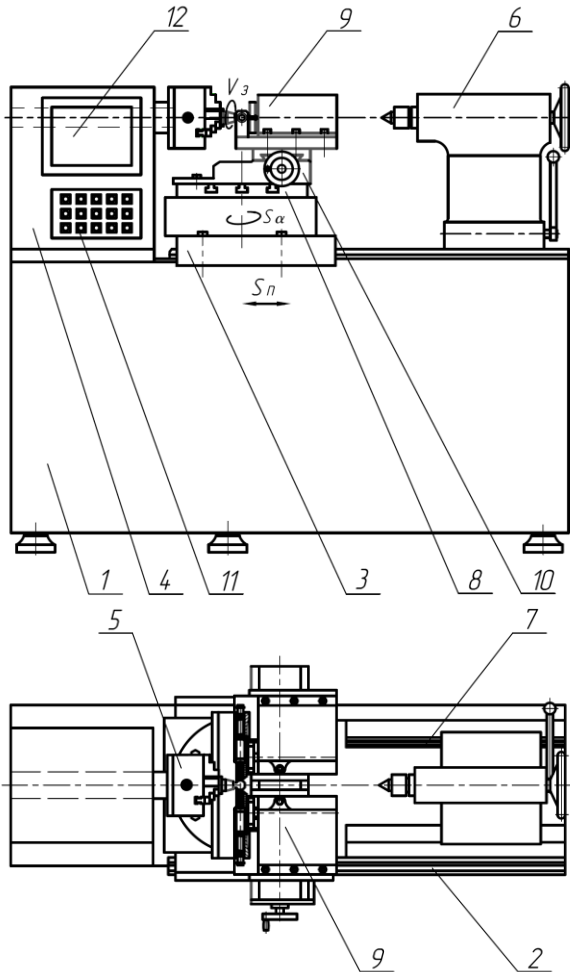


Рис. 23. Схема машини для біполярного СІЗ

переміщення супорта 3 забезпечується механізмом подачі (не показано), оснащеного безступінчастим приводом. Керування машиною здійснюється за допомогою системи з ЧПК, вбудованого пульта керування 11 та панелі індикації 12. Технічні характеристики машини наведені в табл. 2.

Робота машини здійснюється наступним чином. При обробці заготовку закріплюють за допомогою пристрою 5 (і задньої бабки 6). Надають обертовий рух заготовці  $V_z$  і поздовжню подачу  $S_n$  для підведення сферичної поверхні заготовки до контакту з ДЕ інструментів головок 9. Кутова подача  $S_\alpha$  забезпечується завдяки повороту стола 8 на кут  $\alpha$ . Під дією ударної системи інструментальних головок 9 формується біполярне статико-імпульсне навантаження на сферичну поверхню заготовки.

Машина для біполярного зміцнення містить станину 1 на напрямних 2 якої встановлено супорт поздовжніх переміщень 3, передню бабку 4, в якій встановлено привід (не показано) і пристрій для закріплення і обертання заготовки 5, задню бабку 6, яка встановлена на напрямні 7. На супорті поздовжніх переміщень 3 встановлено поворотний стіл 8 з індивідуальним приводом (не показано). Дві інструментальні головки 9, закріплені на платформі пристрою 10, який оснащено механізмом регулювання і встановлено на поворотному столі 8 таким чином, що осі інструментів з деформуючими елементами головок 9 і вісь обертання поворотного стола 8 збігається з віссю обертання пристрою для закріплення заготовки 5. Інструментальні головки 9, оснащені механічними генераторами імпульсів з синхронізованими безступінчастими приводами (не показано). Поздовжнє

Технічні характеристики машини для біполярного СІЗ

Технічні характеристики машини	Параметри
Діаметр оброблюваної заготовки $d_3$ , мм	20 – 150
Міжцентрова відстань $L_{max}$ , мм	750
Радіус деформуючого тіла $R_i$ , мм	1,5 – 2,5
Енергія удару $W$ , Дж	0,5 – 4
Статичне навантаження інструмента $F_{cmi}$ , Н	40 – 80
Статичне навантаження бойка $F_{cm1}$ , Н	60 – 200
Частота ударів $f$ , Гц	до 25
Частота обертання ротора кулачка $n$ , хв <sup>-1</sup>	10 – 630
Маса бойка $m_1$ , кг	0,3
Жорсткість пружини $k$ , Н·м	50000
Потужність, кВт	3,5
Габарити, мм	1800x800x1050
Маса, кг	470

На першій стадії обробки система керування машини (за алгоритмом) забезпечує зміцнення всієї сферичної поверхні з заданим коефіцієнтом перекриття пластичних відбитків, з формуванням геометрично визначеного мікрорельєфу. На другій стадії формується геометрично визначений мастилоутримуючий профіль у вигляді дискретних лунок.

Запропонована машина дозволяє підвищити продуктивність, точність, стабільність і рівномірність процесу зміцнення, а також керувати глибиною зміцненого шару, ступенем зміцнення і мікрорельєфом в автоматичному режимі за алгоритмом.

Запропоновано технологічне устаткування і технологію виготовлення деталі типу «палець СШ», річна ефективність від впровадження якої складає 208460 грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача машинобудування, яка полягає у розробленні технологічного забезпечення з обґрунтуванням параметрів обробки для підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів біполярним статико-імпульсним зміцненням.

На основі отриманих наукових та практичних результатів сформульовано такі висновки:

1. Аналіз технологічних можливостей методів, способів та конструкцій обладнання для зміцнення НСП показав, що перспективним напрямком підвищення експлуатаційних властивостей робочої поверхні є створення зміцненого

поверхневого шару з геометрично визначеним на поверхні мастилоутримуючим профілем комбінованими способами ППД.

2. Досліджено зміну мікротвердості зміцненого шару залежно від величини енергії одиничного удару та встановлено взаємозв'язок між величинами радіуса сфери деформуючого тіла і необхідної енергії, а також визначено оптимальні величини статичного навантаження інструмента. На основі проведених досліджень запропоновано нову модель ударної системи із статичним навантаженням інструмента та комбінованим навантаженням бойка, ефективність використання якої підтверджена експериментально. При зміцненні зразків зі сталі 40Х з параметрами обробки ( $W_{y\delta} = 2,35$  Дж;  $F_{cmi} = 60$  Н;  $F_{cm1} = 120$  Н;  $R_i = 1,5$  мм;  $K = 0,9$ ) спостерігається підвищення мікротвердості зміцненого шару до 20 % у порівнянні з традиційною схемою обробки (без статичного навантаження), що вказує на зростання коефіцієнта використання енергії удару до 83 %.

3. Запропоновано спосіб біполярного статико-імпульсного зміцнення та нову модель ударної системи біполярної дії з комбінованим навантаженням ступінчатого бойка (співвідношення довжин інструмента з деформуючим елементом та бойка знаходиться в межах 1/3), завдяки чому досягається підвищення коефіцієнта використання енергії до 83 %, продуктивності процесу обробки у два рази та зниження металоємкості конструкції пристрою на 30 %.

4. Розроблено схему біполярного СІЗ НСП кульового пальця, проведено дослідження впливу технологічних параметрів на процес формування мікрорельєфу та виведено математичні залежності для визначення режимів обробки з врахуванням коефіцієнта перекриття. Для теоретичного визначення висоти мікронерівностей та оцінки впливу коефіцієнта перекриття розроблено геометричну модель, а також виведено математичні залежності параметра шорсткості від технологічних параметрів обробки. При технологічних параметрах ( $W_{y\delta} = 2,35$  Дж;  $F_{cmi} = 60$  Н;  $F_{cm1} = 120$  Н;  $R_i = 1,5$  мм;  $K = 0,9$ ) формується поверхневий шар зміцнений до твердості  $HV = 558$  одиниць з ступенем зміцнення – 78,7 % та шорсткістю  $R_z = 3,2$  мкм.

5. Запропоновано конструкцію ГМІ та проведено розрахунок конструкторсько-технологічних параметрів устаткування. Розглянуто цикл роботи ГМІ та побудовано математичну модель його роботи на першому етапі робочого циклу (який відповідає періоду взведення), а також рівняння, що описують рух бойка для третього етапу роботи (тобто етапу розгону бойка) та рівняння для визначення часу, відведеного на розгін бойка і максимально допустимої кутової швидкості кулачка.

6. Досліджено вплив коефіцієнта перекриття на твердість а також розподіл мікротвердості по глибині для зразків із сталі 40Х. Встановлено, що при зміцненні з коефіцієнтом перекриття  $K = 0 - 0,9$  – ступінь зміцнення лежить в межах 37,5 – 78,7 %, мікротвердість  $HV^{100}$  (429 – 558) відповідно. Проведено дослідження впливу параметрів СІЗ на працездатність деталей пари тертя (палець-вкладиш) за відомою методикою по схемі «сферична поверхня – фаска». Аналіз отриманих

результатів свідчить про підвищення зносостійкості зміцненого пальця при  $K = 0,7 - 0,9$ , до 20%.

7. В результаті проведеної роботи запропоновано машину модульної конструкції для біполярного СІЗ деталей з зовнішніми циліндричними та неповними сферичними поверхнями. Рекомендовано наступні режими роботи приводу: частота обертання ротора  $n = 600 \text{ хв}^{-1}$ ; енергія удару  $W_{\text{уд}} = 2,35 \text{ Дж}$ ; статичне навантаження інструмента  $F_{\text{cmi}} = 60 \text{ Н}$ ; статичне навантаження бойка  $F_{\text{cm1}} = 120 \text{ Н}$ .

8. На основі проведеного комплексу теоретичних і експериментальних досліджень створено конкурентоздатне технологічне устаткування та технологію виготовлення деталі типу «палець СШ». Новизна запропонованих технічних рішень захищена 6-ма патентами України на корисні моделі. Розрахунковий річний економічний ефект від впровадження технологічного процесу виготовлення пальця складає 208460 грн. Технологічні процеси впровадженні у ремонтному виробництві на приватному підприємстві «СТО Зварювання» (м. Хмельницький).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *У фахових виданнях України*

1. Костюк С.А. Підвищення довговічності сферичних шарнірних з'єднань / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 2. – С. 47-51. *(Здобувачем запропоновано методика діагностування сферичних шарнірів та встановлені основні фактори впливу на працездатність сферичних шарнірів)*

2. Косіюк М.М. Формоутворення неповних сферичних поверхонь на універсальних верстатах токарної групи / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 3. – С. 47-52. *(Здобувачем запропоновано методика розрахунку режимів обробки та конструкцію пристрою для обточування неповних сферичних поверхонь).*

3. Костюк С.А. Удосконалення конструкції кульового шарніра підвіски автомобіля / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 4. – С. 20-25. *(Здобувачу належить розробка конструкції саморегульованого сферичного шарніра та методика комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану його елементів).*

4. Костюк С.А. Удосконалення конструкції та технології виготовлення кульової опори підвіски автомобіля / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – Житомир, 2017. – № 2. – С.153-158. *(Здобувачу належить розробка схеми процесу біполярного зміцнення неповних сферичних поверхонь).*

5. Костюк С.А. Підвищення ефективності використання енергії удару при статико-імпульсному зміцненні поверхневим пластичним деформуванням / С.А.

Костюк, М.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 4. – С.48-56. *(Здобувачу належить розробка конструкції ударної системи генератора механічних імпульсів, побудова математичної моделі його роботи, методика комп'ютерного моделювання процесу біполярного зміцнення).*

6. Костюк С.А. Механічний генератор імпульсів машини ударної дії для статико-імпульсного зміцнення / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 5. – С. 302-308. *(Здобувачу належить розробка конструкції генератора механічних імпульсів, дослідження робочого циклу та побудова математичної моделі його роботи).*

7. Костюк С.А. Машина для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання статико-імпульсною обробкою / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2020. – № 6. – С. 101-106. *(Здобувачу належить розробка методики дослідження параметрів ударного імпульсу та ідея створення вузлів технологічного устаткування для біполярного зміцнення).*

#### *У фахових іноземних виданнях*

8. Костюк С.А. Підвищення довговічності сферичних шарнірів зміцненням кульових пальців статико-імпульсною обробкою / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // WORLD SCIENCE. DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws) RSGlobalSp. zO.O., – Warsaw, Poland, 2019. – № 5(45) Vol.1. – Р. 4-12. *(Здобувачу належать результати дослідження формування мікрорельєфу на сферичній поверхні та побудова геометричної моделі формування мікропрофілю).*

#### *Патенти на корисні моделі*

9. Пат. № 116145 Україна: МПК F16C11/06 Кульовий шарнір / С.А. Костюк, М.М. Косіюк; заявник і патентовласник – Хмельниц. нац. університет – №u201611725; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. *(Частка всіх авторів однакова).*

10. Пат. 116147 Україна: МПК B23B5/00 Пристрій для точіння зовнішніх сферичних поверхонь / С.А. Костюк, М.М. Косіюк; заявник і патентовласник – Хмельниц. нац. університет – №u201611728; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. *(Частка всіх авторів однакова).*

11. Пат. 116148 Україна: МПК B23B5/00 Пристрій для зміцнення сферичних поверхонь / С.А. Костюк, М.М. Косіюк; заявник і патентовласник – Хмельниц. нац. університет – №u201611738; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. *(Частка всіх авторів однакова).*

12. Пат. 132728 Україна: МПК F16C11/06 Спосіб збільшення ресурсу сферичного шарніра / С.А. Костюк, М.М. Косіюк; заявники і патентовласники С.А.

Костюк, М.М. Косіюк – №u201809330; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5. *(Частка всіх авторів однакова).*

13. Пат. 132726 Україна: МПК В24В 5/00 Пристрій для зміцнення неповних сферичних поверхонь статико-імпульсною обробкою / С.А. Костюк, М.М. Косіюк; заявники і патентовласники С.А. Костюк, М.М. Косіюк – №u201809328; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5. *(Частка всіх авторів однакова).*

14. Пат 147855 Україна: МПК В23В5/00 Машина для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання статико-імпульсною обробкою / С.А. Костюк, М.М. Косіюк, М.А. Костюк; заявники і патентовласники С.А. Костюк, М.М. Косіюк – №u202100056; заявл. 11.01.2021; опубл. 16.06.2021, Бюл. № 24. *(Частка всіх авторів однакова).*

### *Матеріали науково-технічних конференцій*

15. Костюк С.А. Зміцнення неповних сферичних поверхонь поверхневим пластичним деформуванням / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців «Перші наукові кроки» 23-24 квітня 2014 р. : тези допов. – Кам'янець-Подільський, 2014. – С. 183. *(Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання процесу зміцнення).*

16. Костюк С.А. Комп'ютерне моделювання зміцнення поверхневого шару металевих деталей пластичним деформуванням / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Збірник наукових праць за матеріалами дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції «актуальні проблеми комп'ютерних технологій (АПКТ-2015)» 21-22 травня 2015 р. : тези допов. – Хмельницький: ХНУ, 2015. – С. 128-132. *(Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання процесу зміцнення).*

17. Костюк С.А. Підвищення зносостійкості поверхневого шару неповних сферичних поверхонь / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2017» 19-21 квітня 2017 р. : тези допов. – Київ, 2017. – С. 100-103. *(Здобувачу належить ідея вдосконалення технології зміцнення неповних сферичних поверхонь).*

18. Костюк С.А. Пристрій для обточування неповних сферичних поверхонь / С.А. Костюк, М.А. Костюк, М.М. Косіюк // Збірник наукових праць «Технічна творчість» 18 липня 2018р. : тези допов. – Хмельницький: ХНУ, 2018. – С. 6-7. *(Здобувачу належить ідея створення пристрою).*

19. Костюк С.А. Підвищення довговічності сферичних шарнірів ковзання поверхнево-пластичним деформуванням / С.А. Костюк, М.А. Костюк, М.М. Косіюк // Тези наукових праць VIII міжнародної наукової конференції «Українсько-Польські діалоги» 16-19 жовтня 2019 р. : тези допов. – Кам'янець-Подільський, 2019. – С. 95-97.

*(Здобувачем запропонована технологія біполярного статико-імпульсного зміцнення поверхневого шару деталей з неповними сферичними поверхнями).*

## АНОТАЦІЯ

*Костюк С.А.* Технологічне забезпечення підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів статико-імпульсною обробкою. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 «Технологія машинобудування». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

У дисертації вирішено науково-прикладну задачу підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів статико-імпульсною обробкою за рахунок формування покращених властивостей зміцненої поверхні. Розроблено теоретичні передумови та проведено ряд експериментальних досліджень, на основі яких запропоновано спосіб біполярного статико-імпульсного зміцнення зовнішніх неповних сферичних та циліндричних поверхонь тіл обертання.

Проведено обґрунтування та вибір конструктивно-технологічних параметрів устаткування для статико-імпульсної обробки. Розглянуто вплив технологічних параметрів на величину подачі деформуючого інструмента та побудовано математичні залежності для визначення режимів обробки з врахуванням коефіцієнта перекриття пластичних відбитків.

Запропоновано конструкцію генератора механічних імпульсів біполярної дії та проведено розрахунки конструктивно-технологічних параметрів устаткування. Розглянуто цикл роботи генератора механічних імпульсів та побудовано математичну модель його роботи. Розглянуто вплив параметрів процесу статико-імпульсного зміцнення на формування мікропрофілю поверхні.

Запропоновано технологічне устаткування та технологію виготовлення деталі типу «палець СШ», річна ефективність від впровадження якої складає 208460 грн у порівнянні з базовою.

В результаті проведеної роботи для біполярної статико-імпульсної обробки зовнішніх неповних сферичних та циліндричних поверхонь запропоновано машину модульного типу з числовим програмним керуванням, яка дозволяє варіювати технологічними параметрами обробки.

**Ключові слова:** технологічне устаткування, процес, сферичний шарнір, працездатність, статико-імпульсне зміцнення, коефіцієнт перекриття, кульовий палець, мікропрофіль, генератор механічних імпульсів, пластична деформація.

## АННОТАЦИЯ

*Костюк С.А.* Технологическое обеспечение повышения работоспособности пальцев сферических шарниров статико-импульсной обработкой. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 «Технология машиностроения». – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2021.



В диссертации решена научно-прикладная задача повышения работоспособности пальцев сферических шарниров статико-импульсной обработкой за счет формирования улучшенных свойств упрочненной поверхности. Разработаны теоретические предпосылки и проведен ряд экспериментальных исследований, на основании которых предложен способ и разработана схема процесса биполярного статико-импульсного упрочнения внешних неполных сферических и цилиндрических поверхностей тел вращения.

Обосновано выбор конструктивно-технологических параметров оборудования для статико-импульсной обработки. Рассмотрено влияние технологических параметров на величину подачи деформирующего инструмента и выведены математические зависимости для определения режимов обработки с учетом коэффициента перекрытия пластических отпечатков.

Разработана конструкция генератора механических импульсов биполярного действия, рассмотрен цикл его работы, построена математическая модель и проведены расчеты конструктивно-технологических параметров.

Предложено технологическое оборудование и технология изготовления детали типа «палец СШ» годовая эффективность, от внедрения которой составляет 208460 грн по сравнению с базовой.

Для биполярной статико-импульсной обработки внешних неполных сферических и цилиндрических поверхностей предложена машина модульного типа с числовым программным управлением, которая позволяет изменять технологические параметры обработки в широком диапазоне.

**Ключевые слова:** технологическое оборудование, процесс, сферический шарнир, работоспособность, статико-импульсное упрочнение, коэффициент перекрытия, шаровой палец, микропрофиль, генератор механических импульсов, пластическая деформация.

## ANNOTATION

*Kostyuk S.A.* Technological support for increasing the working capacity of the fingers of spherical joints by static-impulse processing. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Ph. D. thesis in Engineering Science by specialty 05.02.08 “Mechanical Engineering Technology”. – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021.

The dissertation solves the scientific and applied problem of increasing the working capacity of the fingers of spherical joints by static-impulse processing due to the formation of improved properties of the hardened surface.

In modern mechanical engineering, spherical sliding hinges are widely used to improve the performance of which it is recommended to harden the working surfaces of the fingers with the possibility of forming a geometrically defined oil-retaining profile.

Therefore, the creation of special technological equipment for bipolar static-pulse hardening, the substantiation of the parameters and operating modes, in fact, forms a

scientific and applied problem that requires a solution and is relevant for various branches of mechanical engineering.

The scope of application and various design options for the execution of spherical hinges, their life cycle is considered, and a classification of factors that affect its performance is presented. A comparative analysis of the requirements for materials for the manufacture of spherical hinge pins is presented.

The existing options for the formation of an oil-retaining profile on the outer incomplete spherical surface are considered. The analysis of methods of hardening of spherical surfaces is carried out on the basis of which scientific directions of research are determined and recommendations for the creation of technological equipment of bipolar action are developed.

Theoretical prerequisites have been developed and a number of experimental studies have been carried out, on the basis of which a method and scheme of bipolar static-pulse hardening has been proposed. A schematic diagram of the process of bipolar static-pulse processing of incomplete spherical surfaces has been developed, which was taken as the basis for the design of technological equipment.

The influence of technological parameters on the value of the deforming tool feed is considered and mathematical dependences are derived to determine the processing modes taking into account the coefficient of overlapping of plastic imprints.

The design of the generator of mechanical pulses of bipolar action is proposed and the calculations of the design and technological parameters are carried out. The cycle of operation of the generator of mechanical impulses is considered and a mathematical model of its operation is constructed.

The influence of static-pulse hardening process parameters on the formation of the surface microprofile is considered and experimental equipment for the implementation of bipolar static-pulse machining of machine parts with incomplete spherical surfaces is developed.

To confirm the performance of hardened samples, experimental tests were carried out, as well as proposed innovative design and technological solutions aimed at improving the performance of the ball joint.

The technological equipment and technology of manufacturing of a part like "finger of a spherical hinge" whose annual efficiency from introduction makes 208460 UAH in comparison with base is offered.

As a result of this work, a modular type CNC machine for bipolar static-pulse processing of external incomplete spherical and cylindrical surfaces of machine parts is proposed.

**Key words:** technological equipment, process, spherical hinge, efficiency, static-pulse hardening, overlap coefficient, ball finger, microprofile, mechanical pulse generator, plastic deformation.