

## ENGINEERING SCIENCES

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ СФЕРИЧНИХ ШАРНІРІВ ЗМІЦНЕННЯМ КУЛЬОВИХ ПАЛЬЦІВ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ**

к.т.н., доц. *Косіюк М. М.*, аспірант *Костюк С. А.*  
Україна, Хмельницький національний університет

DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/31052019/6507](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31052019/6507)

**ARTICLE INFO**

**Received:** 18 March 2019  
**Accepted:** 20 May 2019  
**Published:** 31 May 2019

**KEYWORDS**

durability, wear, spherical joint, strengthening, static-pulse processing, mechanical pulse generator, bipolar shock, microrelief retaining lubricant

**ABSTRACT**

The possibility of improving the durability of spherical sliding hinges due to the strengthening of the incomplete spherical surface of ball fingers by static-pulse processing is considered. The review of recent researches and publications was carried out and promising directions for increasing the durability of ball joints were established. The influence of the shock system parameters on the shape and amplitude of the impact pulse is analyzed. The recommended range of correlations of the geometric parameters of the elements of the shock system is established. On the basis of theoretical and experimental studies, a model of shock system with static load of the boom and tool, as well as a bipolar shock treatment scheme is proposed. The method of calculating the parameters of the shock system and the mathematical dependences have been developed. The model of the mechanical impulse generator of shock impact machine with static load of the boom and the tool according to the bipolar impact processing scheme is proposed. The method and algorithm of calculation of parameters of the generator of mechanical impulses of the device for strengthening of incomplete spherical surfaces is developed.

**Citation:** Косіюк М. М., Костюк С. А. (2019) Pidvyshchennia Dovhovichnosti Sferychnykh Sharniriv Zmitsnenniam Kulovykh Paltsiv Statyko-Impulsnoiu Obrobkoiu. *World Science*. 5(45), Vol.1. doi: 10.31435/rsglobal\_ws/31052019/6507

**Copyright:** © 2019 **Косіюк М. М., Костюк С. А.** This is an open-access article distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

**Вступ.** Однією із прикладних проблем машинознавства є розробка заходів з підвищення працездатності, надійності і довговічності механізмів і машин. В сучасній техніці більше 60% деталей машин відносяться до вузлів ковзання, які займають особливе місце в машинобудуванні. Серед них широко застосовуються сферичні шарніри (СШ) ковзання, які використовуються в різноманітних галузях. Існує проблема передчасного виходу з ладу СШ, через нерівномірне зношування та руйнування поверхневого шару сферичної поверхні кульового пальця під дією циклічних та динамічних навантажень [1]. Встановлено, що в більшості випадків довговічність СШ визначається зносостійкістю контактуючих поверхонь пари тертя.

Для підвищення ресурсу шарніра доцільно проводити зміцнення сферичної поверхні кульового пальця з одночасним формуванням мастилоутримуючого мікрорельєфу [2 – 3].

Найбільшу ефективність при цьому показали комбіновані методи поверхнево-пластичного деформування (ППД), які дозволяють керувати параметрами зміцненого поверхневого шару.

У зв'язку з цим розробка і удосконалення способів поверхневого пластичного зміцнення неповних сферичних поверхонь (НСП), а також розробка технології і оснащення для їх реалізації, що забезпечують необхідні показники якості та точності обробленої поверхні при високій продуктивності, є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В наш час процес зміцнення поверхнево-пластичним деформуванням широко досліджується як іноземними так і вітчизняними науковцями [4–10]. В роботах [11, 12] та ін. відмічена висока ефективність зміцнення поверхневого шару деталей машин комбінованими методами ППД.

З літературних джерел відомо низку суттєвих переваг способу статико-імпульсної обробки (СІО), який дозволяє варіювати в широких межах міцністю та зносостійкістю поверхневого шару, створювати сприятливі стискаючі залишкові напруження, а також формувати гетерогенну структуру та мастилоутримуючий мікрорельєф [11–13]. Технологія СІО включає наступні етапи: попереднє статичне і подальше циклічне (імпульсне) навантаження інструменту. Попереднє статичне навантаження створює сприятливі умови для більш повної передачі енергії ударного імпульсу необхідної форми в зону деформації. Крім того, під дією статичного навантаження відбувається згладжування меж пластичних відбитків.

Аналіз способів зміцнення НСП методами ППД вказує на доцільність застосування СІО та проведення заходів з підвищення ефективності використання енергії удару, а також розроблення устаткування, для формування зміцненого поверхневого шару з одночасним нанесенням геометрично визначеного на НСП мастило утримуючого мікрорельєфу та інженерної методики розрахунку режимів обробки.

**Метою роботи є:** підвищення довговічності сферичних шарнірів шляхом статико імпульсного зміцнення поверхневого шару НСП кульового пальця з одночасним утворенням мастило утримуючого мікрорельєфу.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** При СІО застосовуються машини ударної дії з статичним навантаженням інструмента (рис.1), вектор дії якого збігається з напрямком дії ударного імпульсу, за рахунок чого досягається стабільність процесу зміцнення та зменшення втрат енергії удару.

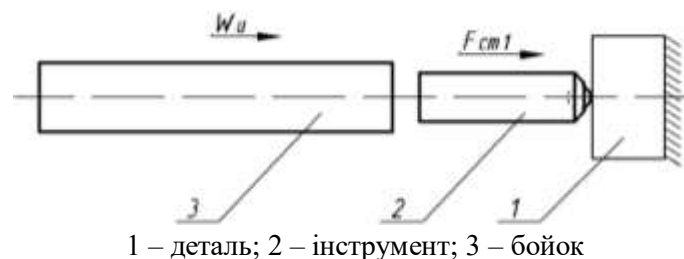


Рис. 1. Схема ударної системи

Враховуючи особливості СІО ударні пристрої повинні забезпечувати передачу енергії удару в зону деформації з максимальним ККД, що досягається раціональним співвідношенням геометричних параметрів ударної системи (бойок-інструмент) [14] і мати низьку металоємність. Це дозволить встановлювати ударні пристрої на металооброблювальні верстати (токарні, фрезерні та інші).

Авторами запропонована технологія біполярної СІО НСП кульових пальців для реалізації якої потрібно було вирішити низку завдань:

- 1 Розрахувати параметри ударної системи для реалізації керованого імпульсного зміцнення НСП;
- 2 розробити устаткування для реалізації способу біполярної СІО НСП;
- 3 розробити рекомендації з використання СІО для обробки НСП кульових пальців.

*Перше завдання* – розрахунок ударної системи, вирішувалося відповідно з методикою викладеною в [15]. Для вирішення поставленої задачі в роботі запропоновано нову модель ударної системи генератора механічних імпульсів (ГМІ) з статичним навантаженням ступінчатого бойка та інструмента (рис. 2).

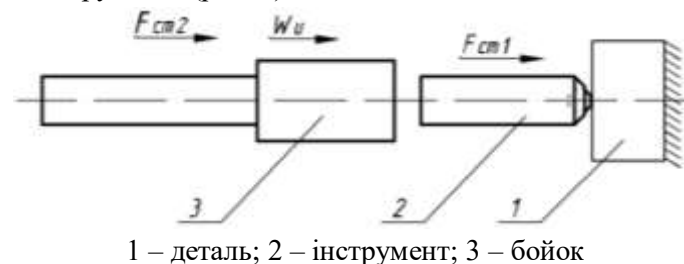
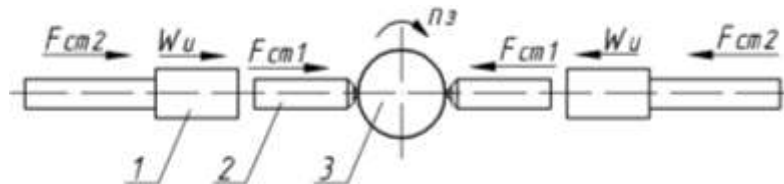


Рис. 2. Конструктивна схема ударної системи з статичним навантаженням бойка та інструмента

Статичне та динамічне навантаження бойка ГМІ забезпечується за рахунок енергії пружно-деформованого тіла (стисненої пружини), параметри якої розраховуються так, щоб частина її потенціальної енергії перетворювалась в кінетичну енергію бойка  $W_u$ , а інша витрачалась на статичне навантаження бойка  $F_{cm2}$ , і унеможлилювала його відскок.

На основі запропонованої схеми (рис 2) з метою підвищення продуктивності процесу обробки та коефіцієнта використання енергії запропоновано схему біполярного зміцнення, (рис 3). За такої схеми обробки деталь одночасно сприймає дві зустрічні деформаційні хвилі, енергія яких з максимальною ефективністю використовується для ППД заготовки і не поглинається масивною наковальнею, відсутність якої знижує металоємкість конструкції пристрою.



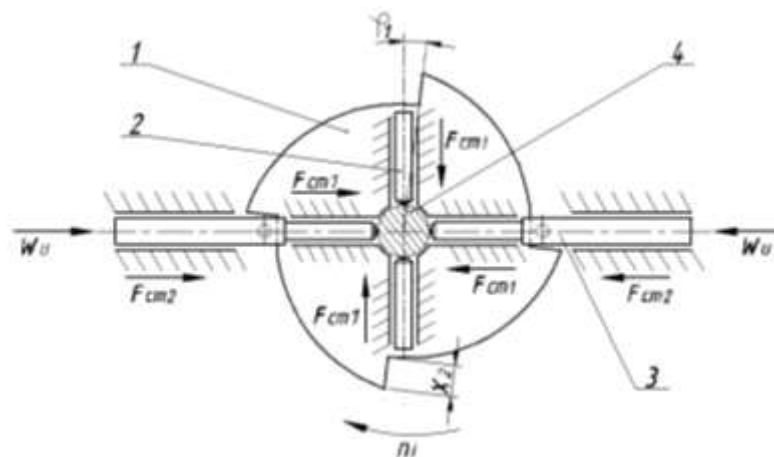
1 – бойок; 2 – інструмент; 3 – заготовка

Рис. 3. Схема біполярного зміцнення

Під час зміцнення поверхневого шару з одночасним формуванням геометрично визначеного мастило утримуючого мікрорельєфу висуваються додаткові вимоги до глибини та діаметра пластичних відбитків, величина яких залежить від радіуса сфери деформуючого елемента (ДЕ), питомої енергії ударного навантаження та коефіцієнта перекриття пластичних відбитків  $K$ . Отже виникає необхідність в отриманні залежності, для визначення енергії одиничного ударного навантаження, при зміні радіуса сфери ДЕ, за умови забезпечення сталої мікротвердості. Враховуючи складність теоретичного описання ударної хвилі, яка формується при переході через інструмент в деталь, перевагу надають експериментальним дослідженням [16]. Які проводились за відомим методом експериментально-теоретичної рівноваги і детально описані в роботі [15].

Друге завдання – розробка конструкції устаткування для реалізації СЮ, вирішувалось з урахуванням геометричних параметрів ударної системи, які розраховувались згідно до методики [15].

Для генерування імпульсного навантаження запропоновано конструкцію генератора механічних імпульсів біполярної дії. В основі запропонованого генератора (рис.4) використовується кулачковий ударний механізм здатний здійснювати серію ударів за один оберт кулачка та нова модель ударної системи [18].



1 – кулачок; 2 – інструмент; 3 – бойок; 4 – заготовка.

Рис. 4. Схема генератора механічних імпульсів біполярної дії:

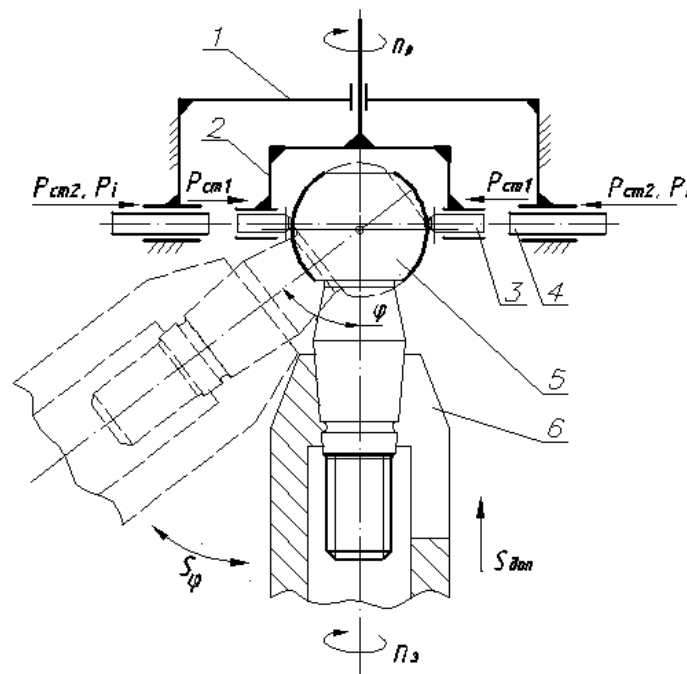
Генератор містить кулачок 1 з інструментальною головкою, з статично навантаженими інструментами 2 (виконаними з можливістю переміщення у напрямку перпендикулярному до осі обертання кулачка 1) та ударні механізми 3 прикріплені на корпусі ГМІ (не показано).

Взведення підпружинених бойків 3 здійснюється кулачком 1, який обертається з частотою  $n_i$  та має з ними кінематичний зв'язок. Під час робочого ходу бойка маси  $m$

відбувається перетворення потенціальної енергії стисненої пружини в кінетичну енергію бойка, який розганяється до передударної швидкості  $V$ . В момент удару бойка відбувається передача механічної енергії статично навантаженому інструменту 2, які в подальшому набувають спільної швидкості  $V_u$ , чим забезпечується статико-імпульсне деформаційне навантаження на оброблювану поверхню заготовки 4. ГМІ такої конструкції дозволяє забезпечити ефективне використання енергії удару, а також підвищити продуктивність процесу обробки.

Відповідно до запропонованої конструкції ведучою ланкою є кулачок, а виконавчим органом (вихідною ланкою) бойок (штовхач) з центральним розташуванням (роликівим наконечником). Переміщення бойка описується залежністю:  $x_2 = \varphi_x(\varphi)$ , де  $x_2$  – прямолінійне переміщення бойка при повороті кулачка на кут  $\varphi$ . Під час повороту кулачка (в період віддалення) бойок в напрямних рухається прямолінійно, а в період наближення розганяється до передударної швидкості за рахунок потенціальної енергії стисненої пружини. В період ближнього стояння здійснюється удар бойка по інструменту з наступним вистоем. Результати детальних досліджень робочого циклу ГМІ, математична модель роботи, а також комп'ютерне моделювання робочих циклів генератора проведено з використанням системи для кінематичного та динамічного аналізу технічних систем SOLIDWORKS Motion наведені в [17].

Розроблено кінематичну схему пристрою для біполярної СІО НСП, яка наведена на рис.5.



1 – корпус; 2 – ротор; 3 – деформуючий елемент; 4 – бойок; 5 – заготовка; 6 – пристосування для закріплення заготовки

Рис.5. Кінематична схема пристрою біполярної статико-імпульсної обробки НСП

Згідно до кінематичної схеми ротору деформуючої головки надається обертовий рух відносно осі ZZ з частотою  $n_i$ , об/хв. Кульовий палець обертається з частотою  $n_3$ , об/хв навколо власної осі від індивідуального приводу та відхиляється у процесі обробки на деякий кут  $\alpha$  у площині деформуючих елементів (кутова подача).

Сферична поверхня пальця знаходиться у постійному контакті з статично навантаженими інструментами силою  $F_{cm1}$ . Періодичне імпульсне навантаження  $W_u$ , генерується ударною системою, тобто ударами бойків по інструментам з періодичністю заданою механічним генератором імпульсів. Схема формування мікрорельєфу на НСП при біполярному зміцненні зображена на рис. 6.

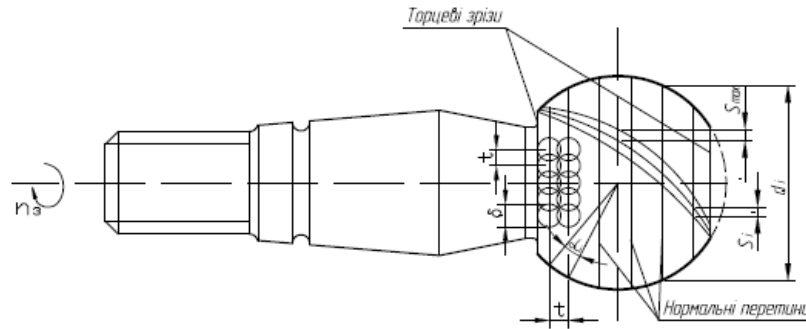
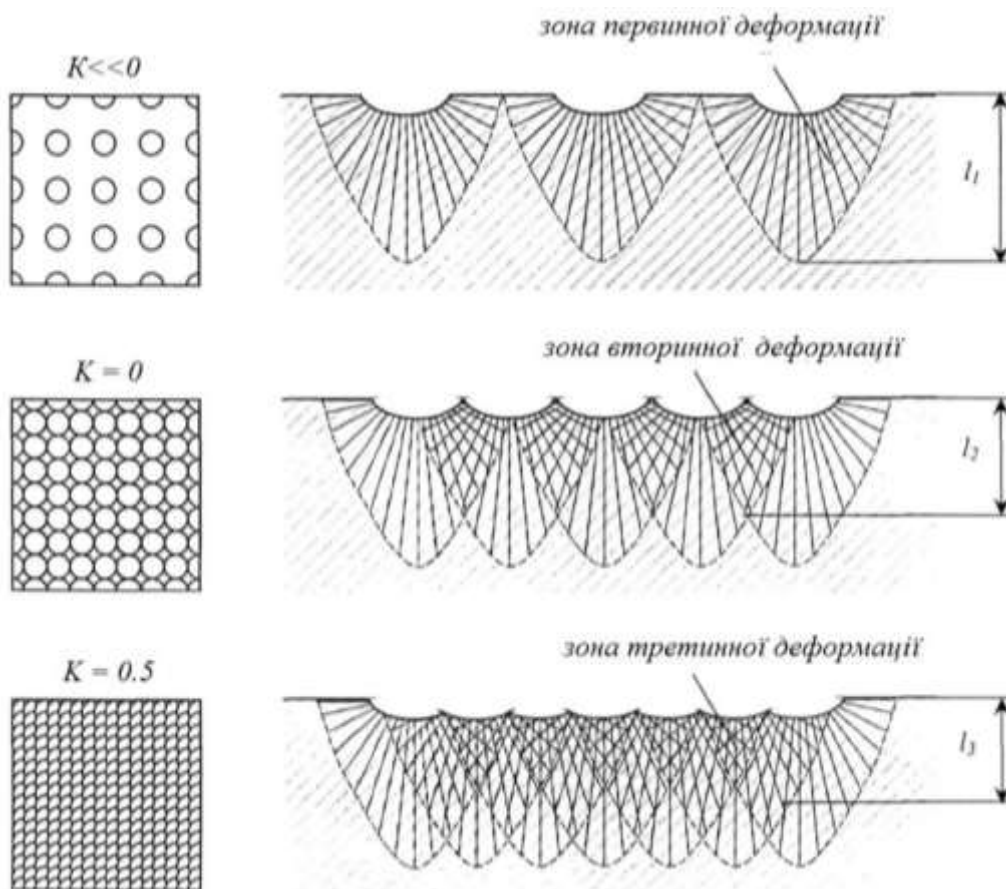


Рис. 6. Схема утворення мікрорельєфу на сферичній поверхні

В залежності від режимів обробки на сферичній поверхні заготовки формується зміцнений поверхневий шар з геометрично визначеним мікрорельєфом тип якого задається величиною коефіцієнта перекриття  $K$ . Деякі типи мікрорельєфу та відповідні зони залягання деформації відображені на рис. 7.



$l_1$  – глибина зони первинної деформації;  $l_2$  – глибина зони вторинної деформації;  $l_3$  – глибина зони третинної деформації

Рис. 7. Типи мікрорельєфу та зони залягання деформації в поверхневому шарі деталі залежно від коефіцієнта перекриття  $K$

Розглянуто формування мікрорельєфу в залежності від величини коефіцієнта перекриття пластичних відбитків. Для визначення висоти мікронерівностей та оцінки впливу коефіцієнта перекриття розроблено геометричну модель (рис. 8), де формування мікропрофілю розглядається як слід утворений робочим ходом інструмента.

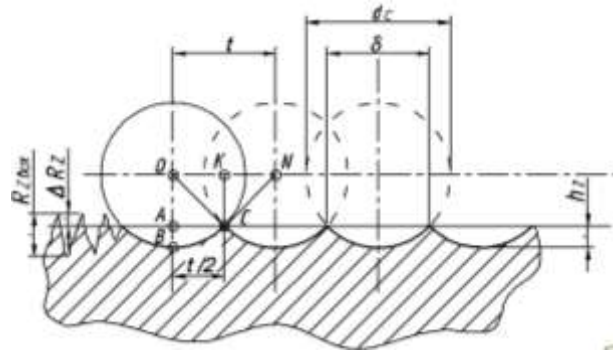


Рис. 8. Геометрична модель формування мікропрофілю

Згідно до розрахункової схеми (рис. 8) висота мікрориступів може бути визначена за формулою:

$$h_z = OB - OA = OB - \sqrt{OC^2 - AC^2} = OB - \sqrt{OC^2 - (t/2)^2}, \quad (1)$$

де  $t$  – крок між відбитками який визначається за формулою:

$$t = (1 - K)\delta, \quad (2)$$

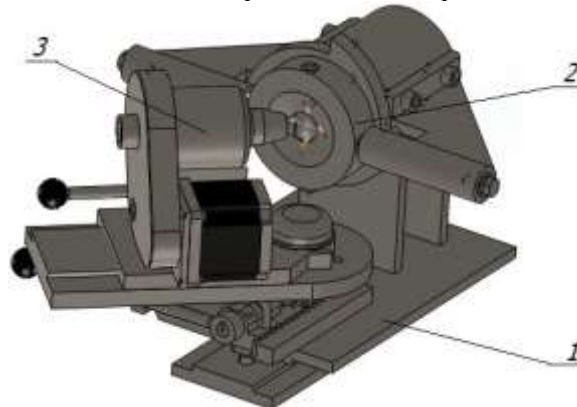
де  $\delta$  – діаметр пластичного відбитка.

Отже формула (1) з врахуванням (2) матиме вигляд:

$$h_z = \frac{d_i}{2} - \sqrt{(d_i/2)^2 - ((1-K)\delta/2)^2} = \frac{d_i - \sqrt{d_i^2 - ((1-K)\delta)^2}}{2}, \quad (3)$$

де  $d_i$  – діаметр інструмента.

На основі проведених досліджень та кінематичної схеми (рис. 5) розроблено пристрій для біполярної СІО НСП, 3D модель якого представлено на рис. 9.



1 – платформа; 2 – інструментальна головка для статико-імпульсного деформування; 3 – поворотний пристрій для закріплення заготовки з індивідуальним приводом

Рис. 9. 3D модель пристрою для біполярного статико-імпульсного зміцнення НСП пальця сферичного шарніра

Пристрій встановлюється на призматичних напрямних станини токарного верстата. Інструментальна головка містить ротор, який приводиться в рух від шпинделя верстата. На роторі розміщені статично навантажені деформуючі елементи. Ударні механізми інструментальної головки мають кінематичний зв'язок з генератором механічних імпульсів, виконаним у вигляді кулачкового механізму, встановленого на роторі. Це забезпечує статико-імпульсне навантаження на сферичну поверхню кульового пальця, закріпленого у поворотному пристрої з індивідуальним приводом. Причому поворотний стіл кінематично зв'язаний із супортом верстата.

Запропоноване рішення розширює технологічні можливості поверхневого пластичного зміцнення завдяки використанню біполярного статико-імпульсного ППД, що підвищує продуктивність і точність обробки та дозволяє керувати глибиною зміцненого шару, ступенем зміцнення і мікрорельєфом сферичної поверхні кульового пальця.

Для вирішення *третього завдання* необхідно здійснити вибір технологічних та конструктивно-технологічних параметрів процесу обробки, а також підібрати параметри генератора механічних імпульсів. Для цього в роботі розроблена методика розрахунку і призначення режимів обробки, заснована на експериментальних дослідженнях та теоретичних і комп'ютерних моделях. Блок-схема алгоритму розрахунку параметрів процесу зміцнення відображена на рис. 10.

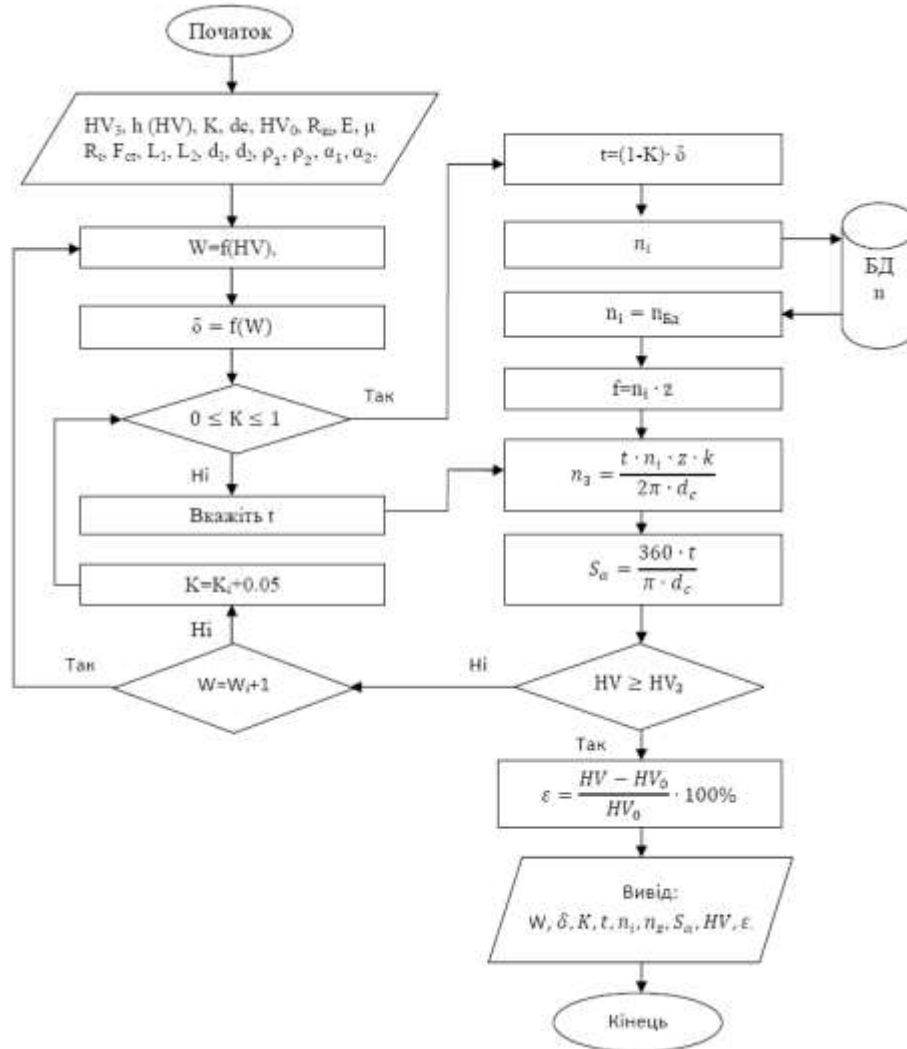


Рис.10. Алгоритм розрахунку параметрів процесу зміцнення деталей з НСП

Алгоритм працює наступним чином:

1 вводяться вихідні дані для розрахунку:

- необхідні параметри зміцненого поверхневого шару ( $HV, h(HV)$ )

- коефіцієнт перекриття  $K$  ;

- параметри оброблюваної деталі ( $d_c$ ), марка сталі та характеристики оброблюваного матеріалу ( $HV_0, R_m, E, \mu$ );

- конструктивно-технологічні параметри ударної системи ( $R_i, F_{ct}, L_1, L_2, d_1, d_2, \rho_1, \rho_2, \alpha_1, \alpha_2, z, k$ ).

1.1 визначення по експериментальним залежностям значення енергії одного удару  $W$  і діаметр пластичного відбитка  $\delta$ ;

1.2 перевірка умови коефіцієнта перекриття  $0 \leq K \leq 1$  та визначення кроку відбитків  $t$ , а також типу мікрорельєфу;

2 Визначення основних параметрів режимів обробки:

2.1 Прийняття частоти обертання інструменту  $n_i$  із стандартного ряду частот обертання шпинделя верстата;

2.2 Визначення частоти ударів по інструменту  $f_i$ ;

2.3 Визначення частоти обертання заготовки  $n_3$ ;

2.4 Визначення кутової подачі  $S_\alpha$ , на один оберт заготовки.

3 Перевірка отриманих параметрів поверхневого шару:

3.1 порівняння базових значень мікротвердості із заданими  $HV \geq HV_3$  та визначення ступеня зміцнення  $\varepsilon$ . Якщо умова виконується, то перехід на наступний рівень, а якщо ні – то необхідно збільшити коефіцієнт перекриття.

4 вивід результатів:

4.1 вивід скоригованих значень характеристик зміцненого поверхневого шару  $HV, h(HV)$  та конструктивних і конструктивно-технологічних параметрів СЮ та ГМІ.

Для встановлення ефективності запропонованих рішень проведено експериментальні дослідження оцінки довговічності СШ за критерієм зносостійкості деталей пари тертя (палець-вкладиш), за відомою методикою по схемі «сферична поверхня-фаска» [18]. Порівняння результатів випробувань показали, що довговічність шарніра із пальцем з сталі 40Х зміцненим запропонованим способом, при  $K=0.7...0.9$  зросла на 20% у порівнянні з обкатаним.

**Висновки.** Розглянуто способи зміцнення поверхневого шару деталей машин методами ППД та шляхи підвищення ефективності використання енергії удару при статико-імпульсному зміцненні. Запропоновано нову модель ударної системи з статичним навантаженням бойка та інструмента, а також схему обробки біполярним ударом.

Розроблено модель генератора механічних імпульсів та пристрій для зміцнення НСП. Досліджено процес формування мікрорельєфу в залежності від коефіцієнта перекриття, а також розроблено геометричну модель формування шорсткості. Виведено рівняння для визначення висоти мікрорельєфу в залежності від параметрів процесу обробки.

Розроблено методику та алгоритм розрахунку параметрів ГМІ.

Проведено експериментальні дослідження оцінки довговічності СШ за критерієм зносостійкості деталей пари тертя (палець-вкладиш). Встановлено, що довговічність шарніра із пальцем з сталі 40Х, зміцненим при  $K=0.7...0.9$  зросла на 20% у порівнянні з обкатаним.

Таким чином запропоновані рішення розширюють технологічні можливості поверхневого пластичного зміцнення завдяки використанню біполярного статико-імпульсного ППД, що підвищує продуктивність і точність обробки та дозволяє керувати глибиною зміцненого шару, ступенем зміцнення і мікрорельєфом сферичної поверхні кульового пальця.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виявлення параметрів СЮ, які найбільше впливають на якість робочої поверхні пальця, та встановлення взаємозв'язків між параметрами обробки і геометричними параметрами мастило утримуючої лунки.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Косіюк М.М. Підвищення довговічності рухомих сферичних шарнірних з'єднань / М.М. Косіюк, С.А. Костюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 2. – С. 47-51.
2. Дыха А. В. Повышение несущей способности подшипника скольжения с маслоудерживающими канавками / А.В. Дыха, О.П. Бабак // Проблемы трибологии. – 1997. – № 1. – С. 25-27.
3. Бабак О.П. Повышение износостойкости трибосопряженной путем формирования маслоудерживающего профиля / О.П. Бабак, А.Г. Кузьменко А.Г., Пасечник А.А. // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – № 4 Ч.1. – С. 7-12.
4. Киричек А.В. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // СТИН. – 2007. – № 12. – С. 28-31.
5. Степанов Г.В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении / Г.В. Степанов – Киев: Наукова Думка, 1991. – 288 с.
6. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением / Ю.Г. Шнейдер. – Справочник. СПб.: Политехника, 1998. – 414 с.
7. Зайдес С.А. Современное состояние отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / С.А. Зайдес // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – Т. 20, № 10. – С. 28-34.
8. Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.



9. Xiaolei Wu, Muxin Yang, Fuping Yuan, Guilin Wu, Yujie Wei, Xiaoxu Huang, and Yuntian Zhu. Heterogeneous lamella structure unites ultrafine-grain strength with coarse-grain ductility. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2015;112:14501–14505.
10. Muxin Yang, Dingshun Yan, Fuping Yuan, Ping Jiang, Evan Ma, and Xiaolei Wu. Dynamically reinforced heterogeneous grain structure prolongs ductility in a medium-entropy alloy with gigapascal yield strength. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2018 Jul 10; 115(28): 7224–7229. doi:10.1073/pnas.1807817115;: PMC 6048477.
11. Бойцов А.Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.А. Смоленцев, Л.А. Хворостухин. – М.: Машиностроение, 1991. – 144 с.
12. Киричек А.В. Перспективы статико-импульсного упрочнения и формообразования шлицев. / А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения – Технология – 2002: Мат. III междунар. научн.-техн. конф. Орел: 2002. – С.167-170.*
13. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008 – 320 с.
14. Киричек А.В. закономерности волнового деформационного нагружения очага деформации / А. В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева* 2017. №2 (41). С – 144-147.
15. Костюк С.А. Підвищення ефективності використання енергії удару при статико-імпульсному зміцненні поверхневим пластичним деформуванням / С.А Костюк, М.М. Косіюк // *Вісник ХНУ. – 2018. – № 4. – С.48-56.*
16. Алимов О.Д. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц, Ю.В. Невенчаный – Фрунзе: ИЛИМ, 1980. – 200 с.
17. Костюк С.А. Механічний генератор імпульсів машини ударної дії для статико-імпульсного зміцнення / С.А Костюк, М.М. Косіюк // *Вісник ХНУ – 2018 – № 5. – С. 302-308.*
18. Кузьменко А.Г. Износ и надежность шаровых опор подвески переднего колеса автомобиля (расчеты и испытания)// *Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2009. – № 3. – С. 29–52.*