ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ІВАНА ПУЛЮЯ
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОСТЮК САВА АНДРІЙОВИЧ

УДК 621.787

ДИСЕРТАЦІЯ

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПАЛЬЦІВ СФЕРИЧНИХ ШАРНІРІВ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело С.А. Костюк

Науковий керівник: Косіюк Микола Миколайович, кандидат технічних наук, доцент

Хмельницький – 2021

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». – Хмельницький національний університет, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2021.

У Дисертації вирішено науково-прикладну задачу підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів статико-імпульсною обробкою за рахунок формування покращених властивостей зміцненої поверхні.

В сучасному машинобудуванні отримали широке застосування сферичні шарніри ковзання для підвищення працездатності, яких пропонується проводити зміцнення робочих поверхонь пальців з можливістю формування геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю. 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.

Розглянуто область застосування різних конструктивних варіантів виконань сферичних шарнірів, проаналізовано їх життєвий цикл та проведено класифікацію чинників, які впливають на працездатність.

Проведено порівняльний аналіз вимог до матеріалів для виготовлення пальців сферичних шарнірів. Розглянуто технології формоутворення та отримання заготовок з неповними сферичними поверхнями.

Проведено огляд існуючих способів зміцнювальної обробки та обґрунтовано доцільність застосування способу статико-імпульсного зміцнення. Розглянуто існуючі варіанти формування на зовнішній неповній сферичній поверхні мастилоутримуючого профілю.

На підставі аналізу існуючих способів і обладнання для зміцнення сферичних поверхонь встановлено, що процес біполярного статико-імпульсного зміцнення неповних сферичних поверхонь є малодослідженим, а технологічні можливості існуючого обладнання не забезпечують його реалізацію. Тому для створення спеціального технологічного обладнання необхідні додаткові як теоретичні, так і експериментальні дослідження.

За результатам виконання першого розділу визначено наукові підходи та напрямки подальших досліджень.

Вирішення наукових завдань здійснювалось відповідно до запропонованої методології, що передбачає теоретичні та експериментальні дослідження, комп'ютерне моделювання, аналіз і формування множини стратегій вибору оптимальних параметрів процесу зміцнення, які необхідні при проектуванні технологічного устаткування.

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.

Розглянуто теоретичні основи перебігу хвильових процесів в ударній системі при статико-імпульсному зміцнені та запропоновано нову модель ударної системи механічного генератора імпульсів з статичним навантаженням інструмента, та комбінованим навантаженням бойка. Розглянуто випадок формування ударного імпульсу при статико-імпульсному зміцнені коли геометричні співвідношення бойка та інструмента (хвилевода) не співрозмірні.

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

Оцінка точності отриманих результатів при визначені параметрів ударного імпульсу здійснювалась шляхом порівняння результатів отриманих експериментально

та в ході комп’ютерного моделювання процесу зміцнення, в програмному комплексі Abaqus.

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.

Розглянуто процес формування зміцненого поверхневого шару та розроблено геометричну модель формування мікропрофілю поверхні. Виведено математичну залежність для визначення висоти мікровиступів з урахуванням коефіцієнта перекриття і діаметра деформуючого інструмента.

Розроблено спосіб та принципову схему процесу біполярного статико-імпульсного зміцнення неповних сферичних поверхонь, яку було покладено в основу при конструюванні устаткування, а також проведені дослідження процесу біполярного статико-імпульсного зміцнення у програмному комплексі Abaqus.

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. Проведено дослідження роботи генератора механічних імпульсів за допомогою системи для інженерного аналізу SOLIDWORKS Motion та встановлено оптимальний діапазон частоти обертання ротора.

Розглянуто вплив параметрів процесу статико-імпульсного зміцнення на формування мікропрофілю поверхні, а також розроблено і виготовлено

експериментальне устаткування для реалізації біполярної статико-імпульсної обробки деталей машин з неповними сферичними поверхнями.

Проведено експериментальні дослідження впливу параметрів процесу зміцнення на зміну фізико-механічних властивостей матеріалу.

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

В результаті проведеної роботи для біполярної статико-імпульсної обробки зовнішніх неповних сферичних та циліндричних поверхонь запропоновано машину модульної конструкції з числовим програмним керуванням, яка дозволяє змінювати технологічні параметри обробки в широкому діапазоні.

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 одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає у тому, що отримав подальший розвиток метод поверхнево-пластичного деформування. 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, а також для зміцнення неповних сферичних поверхонь статико-імпульсною обробкою.

Експериментально підтверджено теоретичні залежності для визначення впливу конструктивних та технологічних параметрів на процес зміцнення неповних сферичних поверхонь, а також 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 впроваджені 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».

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

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані у 19 наукових працях, перелік яких наведено нижче.

У фахових виданнях України

1. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення довговічності сферичних шарнірних з'єднань. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2017. № 2. Ч1. Т1. С. 47–51.

2. Косіюк М.М., Костюк С.А. Формоутворення неповних сферичних поверхонь на універсальних верстатах токарної групи. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2017. № 3. С. 47–52.

3. Костюк С.А., Косіюк М.М. Удосконалення конструкції кульового шарніра підвіски автомобіля. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2017. № 4. С. 20 – 25.

4. Костюк С.А., Косіюк М.М. Удосконалення конструкції та технології виготовлення кульової опори підвіски автомобіля. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки*. Житомир, 2017. № 2. С. 153–158.

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

Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Хмельницький, 2018. № 4. С.48–56.

6. Костюк С.А., Косіюк М.М. Механічний генератор імпульсів машини ударної дії для статико-імпульсного зміцнення. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* Хмельницький, 2018. № 5. С. 302–308.

7. Костюк С.А., Косіюк М.М. Машина для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання статико-імпульсною обробкою. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2020. № 6. С. 101–106.

У фахових іноземних виданнях

8. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення довговічності сферичних шарнірів зміцненням кульових пальців статико-імпульсною обробкою. *WORLD SCIENCE. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws RSGlobalSp. zO.O.,* Warsaw, Poland, 2019. № 5(45) Vol.1. May 2019. P. 4–12.

Патенти на корисну модель

9. Кульовий шарнір: пат. 116145 Україна: МПК F16C11/06. №u201611725; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

10. Пристрій для точіння зовнішніх сферичних поверхонь: пат 116147 Україна: МПК B23B5/00. №u201611728; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

11. Пристрій для зміцнення сферичних поверхонь: пат 116148 Україна: МПК B23B5/00. №u201611738; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

12. Спосіб збільшення ресурсу сферичного шарніра: пат 132728 Україна: МПК F16C11/06. №u201809330; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5.

13. Пристрій для зміцнення неповних сферичних поверхонь статико-імпульсною обробкою: пат 132726 Україна: МПК B24B 5/00. №u201809328; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5.

14. Машина для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання статико-імпульсною обробкою: пат 147855 Україна: МПК B23B5/00. №u202100056; заявл. 11.01.2021; опубл. 16.06.2021, Бюл. № 24.

Матеріали науково-технічних конференцій

15. Костюк С.А., Косіюк М.М. Зміцнення неповних сферичних поверхонь поверхневим пластичним деформуванням. *Перші наукові кроки:* матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (м. Кам'янець-Подільський 23-24 квітня 2014 р.). Кам'янець-Подільський, 2014. С.183.

16. Костюк С.А., Косіюк М.М. Комп'ютерне моделювання зміцнення поверхневого шару металевих деталей пластичним деформуванням. *Актуальні проблеми комп'ютерних технологій (АПКТ-2015)*: збірник наукових праць за матеріалами дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції (м. Хмельницький 21-22 травня 2015 р.). Хмельницький, 2015. С.128–132.

17. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення зносостійкості поверхневого шару неповних сферичних поверхонь. *АВІА-2017: матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції* (м. Київ 19-21 квітня 2017р.). Київ, 2017. С.100–103.

18. Костюк С.А., Косіюк М.М., Костюк М.А. Пристрій для обточування неповних сферичних поверхонь. *Технічна творчість:* збірник наукових праць (м. Хмельницький 18 липня 2018р.). Хмельницький, 2018. С.6–7.

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

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 "Technology of mechanical engineering". – Khmelnytsky National University, 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 working capacity of which it is proposed 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 and substantiation of parameters and modes of operation, in fact, forms a scientific and applied problem that needs to be solved and is relevant for various branches of mechanical engineering.

The field of application of various constructive variants of execution of spherical hinges is considered. The life cycle of a spherical hinge is considered and the classification of the factors influencing its working capacity is carried out.

A comparative analysis of the requirements for materials for the manufacture of spherical hinge pins is carried out. The technologies of shaping and production of blanks with incomplete spherical surfaces are considered.

The review of the existing methods of hardening treatment is carried out and the expediency of application of the method of static-pulse hardening is substantiated.

The existing variants of forming on the outer incomplete spherical surface of the lubricating profile are considered.

A patent search and analysis of methods and equipment for strengthening spherical surfaces was carried out. It is established that the process of bipolar static-pulse hardening of incomplete spherical surfaces is poorly studied, and the technological capabilities of existing equipment do not ensure its implementation. Therefore, to create special technological equipment requires additional both theoretical and experimental research.

On the basis of the conducted analysis the scientific approaches and directions of researches as initial, for the decision of the set tasks are defined. The solution of scientific problems was carried out in accordance with the proposed methodology, which includes theoretical and experimental research, computer modeling, analysis and formation of many strategies for selecting the optimal parameters of the hardening process, which are necessary for the design of process equipment.

Theoretical preconditions are developed and a number of experimental researches on the basis of which the way of bipolar static-pulse strengthening of external incomplete spherical and cylindrical surfaces of bodies of rotation is offered.

The theoretical bases of the course of wave processes in the shock system at static-pulse hardening are considered and a new model of the shock system of a mechanical pulse generator with static tool load and combined striker load is proposed.

The case of shock pulse formation during static-pulse amplification when the geometric ratios of the striker and the tool (waveguide) are not proportional is considered.

To study the parameters of the shock pulse in the deformation zone, the method and measuring complex of the original design is proposed, which consists of shock, measuring and recording systems and allows to simulate the process of shock load with different initial conditions and record the shock pulse parameters.

Evaluation of the accuracy of the obtained results in determining the parameters of the shock pulse was carried out by comparing the results obtained experimentally and during computer simulation of the hardening process, in the software package Abaqus.

Analysis of the results of experimental studies showed that the shock system generates a prolonged shock pulse, which consists of the main and additional (tail) part. It is established

that the pulse shape is formed due to the recovery of the reflected waves, the geometric ratios of the elements of the shock system and the optimal static load of the striker and the tool.

The process of formation of the strengthened surface layer is considered and the geometrical model of formation of a microprofile of a surface is developed.

A mathematical dependence for determining the height of microprojections taking into account the overlap coefficient and the diameter of the deforming tool is derived.

The method and schematic diagram of the process of bipolar static-pulse hardening of incomplete spherical surfaces which was the basis for the design of equipment, as well as studies of the process of bipolar static-pulse hardening in the software package Abaqus.

Substantiation and selection of design and technological parameters of equipment for static-pulse processing are carried out. The influence of technological parameters on the supply value of the deforming tool is considered and mathematical dependences for determination of processing modes taking into account the coefficient of overlap of plastic prints are constructed.

The design of the generator of mechanical pulses of bipolar action is offered and calculations of constructive-technological parameters of equipment are carried out. The cycle of work of the generator of mechanical impulses is considered and the mathematical model of its work is constructed. A study of the operation of the mechanical pulse generator using the system for engineering analysis SolidWorks Motion and set the optimal frequency range of the rotor.

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

Experimental studies of the influence of the parameters of the hardening process on the change of physical and mechanical properties of the material have been carried out.

The design of a modular type machine with numerical program control for bipolar static-pulse hardening of external cylindrical and incomplete spherical working surfaces of machine parts is proposed.

Scientific novelty of the obtained results.

1. *For the first time* the requirements to the parameters of bipolar static-pulse hardening are theoretically substantiated and experimentally confirmed, which ensures the optimal shape of the shock pulse in the deformation zone, which allows to increase the impact energy utilization factor and energy efficiency of technological equipment.

2. *For the first time* the relationship between the roughness parameter of the hardened surface and the coefficient of overlap of plastic impressions is theoretically proved, which allows to select the parameters of static-pulse hardening, which would provide the specified quality indicators of the surface layer.

3. *For the first time* for bipolar static-pulse hardening of incomplete spherical surfaces mathematical dependences for calculation of operating modes of the equipment with use of coefficient of overlapping of plastic prints which unlike existing consider initial parameters of the strengthened surface layer that allows to control process of hardening and to form regular microrelief.

4. *For the first time* a mathematical and simulation model of the impact system of a mechanical pulse generator for bipolar static-pulse hardening was built, which includes analytical dependences of the connection of structural-technological and initial parameters of equipment, which allowed to develop engineering methods for designing shock systems.

The practical significance of the obtained results. The practical value of the work is that the method of surface-plastic deformation was further developed. On the basis of the performed theoretical and experimental researches the scientific and applied problem on increase of working capacity of fingers of spherical sliding hinges by bipolar static-pulse strengthening of working surfaces is solved.

New technological equipment has been developed for bipolar static-pulse hardening of the outer cylindrical and incomplete spherical surfaces of machine parts with the subsequent

formation of a geometrically defined lubricating profile, technological equipment for turning the outer spherical surfaces, as well as for hardening incomplete spherical surfaces.

Theoretical dependences for determination of influence of constructive and technological parameters on process of strengthening of incomplete spherical surfaces are experimentally confirmed, and also the technique of a choice of technological modes of processing is developed.

Recommendations for the design of structures of shock systems and a mechanical impulse generator, which constitute the elements of technological equipment for bipolar static-impulse strengthening, are proposed.

The results obtained in the work are brought to practical use and protected by patents of Ukraine for a utility model.

The technology of blade and hardening treatment of incomplete spherical surfaces, methods of selection of technological modes and technological equipment (device for turning external spherical surfaces; device for strengthening incomplete spherical surfaces by static-pulse processing) were transferred to the introduction in the repair production of spherical hinges of special equipment, Khmelnitsky «Service Station Welding».

Scientific provisions and methods have been introduced in the educational process of the Department of Mechanical Engineering Technology of Khmelnytsky National University during laboratory and practical classes in the discipline «Operation and Maintenance of Machines», as well as at the Department of Tribology, Automobiles and Materials Science in conducting laboratory classes in the discipline «Fundamentals of Technical Diagnostics of Automobiles».

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

The main results of dissertation research have been published in 19 scientific papers, the list of which is given below.

In professional publications of Ukraine

1. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Increasing the durability of spherical hinges. *Herald of Khmelnytskyi National University.* Technical sciences. 2017. № 2. P. 71–73.

2. Kosiyuk M.M., Kostyuk S.A. Formation of incomplete spherical surfaces on universal lathes of the turning group. *Herald of Khmelnytskyi National University*. Technical sciences. 2017. № 3. P. 47–52.

3. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Improving the design of the ball joint of the car suspension. *Herald of Khmelnytskyi National University*. Technical sciences. 2017. № 4. P. 20–25.

4. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Improving the design and technology of manufacturing the ball bearing of the car suspension. *Herald of Zhytomyr State Technological University*. Technical sciences. 2017. № 2. P. 153–158.

5. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Improving the efficiency of the use of impact energy during static-pulse hardening by surface plastic deformation. *Herald of Khmelnytsky National University*. Technical sciences. 2018. № 4. P.48–56.

6. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Mechanical pulse generator of percussion machine for static-pulse hardening. *Herald of Khmelnytsky National University.* Technical sciences. 2018. № 5. P. 302–308.

7. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Machine for strengthening the outer surfaces of rotation by static-pulse processing. *Herald of Khmelnytsky National University*. Technical sciences. 2020. № 6. P. 101–106.

In professional foreign publications

8. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Increasing the durability of spherical hinges by strengthening the ball fingers by static-pulse processing. WORLD SCIENCE DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws RS Global Sp. z O.O., Warsaw, Poland, 2019, № 5(45) Vol.1, May 2019. P. 4–12.

Patents

9. Ball joint: pat 116145 Ukraine: IPC F16C 11/06; declared 21/11/2016; publ. 10.05.2017, Bull. № 9.

10. Device for turning external spherical surfaces: Pat 116147 Ukraine: IPC B23B5/00; declared 21/11/2016; publ. 10.05.2017, Bull. № 9.

11. Device for strengthening spherical surfaces: US Pat. No. 116148: IPC B23B5 / 00; declared 21/11/2016; publ. 10.05.2017, Bull. № 9.

12. The method of increasing the resource of the spherical hinge: US Pat. No. 132728, IPC F16C11/06; declared 10/01/2018; publ. 11/03/2019, Bull. № 5

13. Device for strengthening incomplete spherical surfaces by static-pulse treatment: pat 132726 Ukraine: IPC B24B5/00; declared 01/10/2018; publ. 11/03/2019, Bull. № 5.

14. Machine for strengthening the outer surfaces of rotation by static-pulse processing: pat 147855 Ukraine: IPC B23B5/00; declared 11/01/2021; publ. 16/06/2021, Bull. № 24.

Proceedings and abstracts of conferences

15. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Hardening of incomplete spherical surfaces by surface plastic deformation. *The first scientific steps. Proceedings of the VIII All-Ukrainian scientific-practical conference of students and young scientists*: (Kamyanets-Podilsky April 23-24, 2014). Kamyanets-Podilsky 2014. P.183.

16. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Computer modeling of strengthening of a surface layer of metal details by plastic deformation. *Current issues of computer technology (APKT-2015). Proceedings of the Ninth International Scientific and Technical Conference*. Khmelnytsky, KhNU, 2015. P.128–132.

17. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M. Increasing the wear resistance of the surface layer of incomplete spherical surfaces. AVIA-2017. Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference (April 19-21). Kyiv, NAU, 2017. P. 100–103.

18. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M., Kostyuk M.A. Device for turning incomplete spherical surfaces. *Technical creativity.* Collection of scientific works 2018. № 3 P. 6–7.

19. Kostyuk S.A., Kosiyuk M.M., Kostyuk M.A. Increasing the durability of spherical sliding joints by surface-plastic deformation. *Ukrainian-Polish dialogues. Abstracts of scientific works of the VIII international scientific conference (*Kamyanets-Podilsky. October 16-19, 2019). Kamenets-Podolsky 2019. P.95–97.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ……. 21
ВСТУП…… 22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СФЕРИЧНИХ ШАРНІРІВ КОВЗАННЯ, ПРИСТРОЇВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВО-ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ…….. 28
1.1. Застосування сферичних шарнірів ковзання в машинах…… 28
1.1.1. Технічні вимоги до пальців сферичних шарнірів легкових автомобілів …… 35
1.1.2. Технічні вимоги до пальців сферичних шарнірів легкових автомобілів …….. 37
1.1.3. Методи отримання заготовок та способи формоутворення неповних сферичних поверхонь ……..... 39
1.2. Аналіз робіт та способів зміцнення методами поверхнево-пластичного деформування……. 42
1.3. Суть методу статико-імпульсного зміцнення…….. 47
1.3.1 Параметри статико-імпульсного зміцнення……... 52
1.4. Огляд та аналіз конструкцій пристроїв і обладнання для зміцнення неповних сферичних поверхонь деталей машин методами поверхнево-пластичного деформування …… 55
1.5. Рекомендації по кінематиці та вузлам машини для біполярного зміцнення…… 59
Висновки до першого розділу та завдання досліджень……. 61
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ОБДАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ…… 63
2.1. Методика дослідження впливу енергії удару на поверхневу твердість зміцненого шару…… 63
2.2. Методика дослідження оптимальної величини статичного навантаження при статико-імпульсному зміцненні …….. 64

2.3. Методика дослідження взаємозв'язку між величинами радіуса сфери деформуючого тіла та енергією одиничного удару……... 66
2.4. Методика вимірювання мікротвердості…….. 68
2.5. Теоретичні основи перебігу хвильових процесів в ударній системі при статико-імпульсному зміцненні……... 70
2.6. Теоретичні дослідження ударної системи механічного генератора імпульсів…… 73
2.7. Методика експериментальних досліджень параметрів ударного імпульсу в зоні деформації……... 78
2.7.1. Способи перетворення механічних коливань в електричний сигнал…… 80
2.7.2. Моделювання умов навантаження зразка з використанням програмного комплексу Abaqus……. 84
2.7.2.1. Побудова геометричної тривимірної моделі ударної системи… 87
2.7.2.2. Визначення кінематичних параметрів для моделювання процесу зміцнення в умовах одиничного навантаження…… 88
2.7.3. Тарування вимірювального комплексу……. 90
2.8. Методологія моделювання параметрів процесу статико-імпульсного зміцнення методом планування факторного експерименту……. 94
2.9. Методика та устаткування для проведення експериментальних досліджень біполярного статико-імпульсного зміцнення неповних сферичних поверхонь……. 100
2.10 Методика дослідження механічних властивостей зразків зі сталі 40Х на розтяг……. 102
2.11 Методика дослідження працездатності пальців сферичних шарнірів…. 105
Висновки до другого розділу…… 106
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ …….. 107
3.1. Дослідження впливу енергії одиничного удару на поверхневу твердість зміцненого шару …….. 107

3.2. Дослідження впливу величини статичного навантаження інструмента на поверхневу твердість та діаметр пластичного відбитка …… 109

3.3. Дослідження взаємозв'язку між величинами радіуса сфери деформуючого елемента та енергією одиничного удару ……. 111

3.4. Дослідження параметрів ударного імпульсу в зоні деформації при поверхнево-пластичному зміцненні ……... 112

3.5. Дослідження енергетичних параметрів процесу статико-імпульсного зміцнення математичним плануванням експерименту ……. 117

3.6 Розроблення пристрою для обточування неповних сферичних поверхонь …….. 121

3.7. Формування мікрорельєфу поверхні при статико-імпульсному зміцненні ……. 125

Висновки до третього розділу…….. 130

РОЗДІЛ 4. КОНСТРУЮВАННЯ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ БІПОЛЯРНОГО СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО РОБОТИ…… 131

4.1. Кінематичний аналіз процесу зміцнювальної обробки зовнішніх неповних сферичних поверхонь ……. 131

4.1.1. Зв'язок колової подачі і технологічних параметрів при біполярному статико-імпульсному зміцненні зовнішніх неповних сферичних поверхонь……..... 135

4.2. Конструктивно-технологічні параметри статико-імпульсної обробки… 138

4.2.1 Визначення оптимальних параметрів ударної системи…… 139

4.3. Проектування генератора імпульсів устаткування для біполярного статико-імпульсного зміцнення з механічним приводом ……. 141

4.3.1. Побудова математичної моделі роботи генератора механічних імпульсів ……. 142

4.4. Експериментальне устаткування для біполярного статико-імпульсного зміцнення зовнішніх неповних сферичних поверхонь…….. 149

Висновки до четвертого розділу…….. 152

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЯГНУТИХ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ……. 154
5.1. Апробація способу біполярного статико-імпульсного зміцнення та експериментального устаткування …..... 154
5.2. Дослідження впливу параметрів біполярного зміцнення на механічні властивості зразків із сталі 40Х…… 158
5.3. Дослідження працездатності зміцненого пальця сферичного шарніра… 161
5.4. Машина для біполярного статико-імпульсного зміцнення …….. 162
5.5. Удосконалення конструкції та технології виготовлення пальця сферичного шарніра…….. 169
5.5.1 Удосконалення конструкції пальця кульової опори……. 169
5.5.2 Технологічний маршрут процесу виготовлення деталі палець …….. 170
5.5.3 Технологічний маршрут процесу виготовлення деталі палець (експериментальне виробництво «БелМаг»)…….. 173
5.6 Економічна ефективність від удосконалення технологічного маршруту.. 175
Висновки до п’ятого розділу…… 178
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……. 179
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……. 181
ДОДАТКИ…….. 194
Додаток А. Аналіз відомих конструкцій сферичних шарнірів……. 195
Додаток Б. Журнал даних з пк abaqus…… 197
Додаток В. Дослідження енергетичних параметрів генератора механічних імпульсів машини математичним плануванням експерименту… 199
Додаток Г. Розрахунок елементів генератора механічних імпульсів……. 206
Додаток Д. Модернізація конструкції кульового шарніра…… 215
Додаток Е. Список публікацій за темою дисертаційної роботи……... 223
Додаток Є. Патенти та акти впроваджень …… 227

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

НСП – неповна сферична поверхня;

СІЗ – статико-імпульсне зміцнення;

ГМІ – генератор механічних імпульсів;

СШ – сферичний шарнір;

ЧПК – числове програмне керування;

К – коефіцієнт перекриття;

КВЕ – коефіцієнта використання енергії;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ДЕ – деформуючий елемент;

МСЕ – метод скінчених елементів;

ППД – поверхнево-пластичне деформування.

ВСТУП

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 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 сучасних машин та енергоефективного технологічного устаткування.

В сучасній техніці широке застосування отримали сферичні шарніри 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, тому особливі вимоги висуваються до якості та фізико-механічних властивостей неповної сферичної поверхні (НСП) кульового пальця. Зміцнення НСП з можливістю формування геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю – складна і маловивчена задача.

Тому створення спеціального технологічного устаткування для біполярного СІЗ та обґрунтування параметрів і режимів роботи, власне і 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 виробах військової і невійськової техніки»
(№ державної реєстрації 0120U102069).

Проведення комп'ютерного моделювання та інженерного аналізу механізмів, які розглядаються у дисертаційній роботі, виконувалось у системі SolidWorks за грантової підтримки авторизованого представника SolidWorks в Україні – компанії «Інтерсед Україна».

Мета і задачі 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 дослідження 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 скінчених 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 диференційних рівнянь, за умови, що перехідні процеси пройшли і рух усталений.

Експериментальні дослідження параметрів ударного навантаження, динамічних та кінематичних характеристик руху елементів ударної системи проведено на

спеціально розроблених експериментальних установках з використанням ємнісних датчиків включених в коливальний контур генератора високої частоти засобів реєстрації даних.

Наукова новизна одержаних 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 одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає у тому, що отримав подальший розвиток метод поверхнево-пластичного деформування. 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, а також для зміцнення неповних сферичних поверхонь статико-імпульсною обробкою.

Експериментально підтверджено теоретичні залежності для визначення впливу конструктивних та технологічних параметрів на процес зміцнення неповних сферичних поверхонь, а також 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 корисну модель.

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 впроваджені 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 задачі досліджень, розробка методології та підходів до її вирішення здійснювались спільно з науковим керівником. З робіт, які опубліковані зі співавторами, використовуються тільки ті наукові результати, що одержані здобувачем особисто і відображенні у переліку публікацій.

Апробація результатів 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 Інституту механічної інженерії та транспорту 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, з них анотація – 16 стор., зміст – 4 стор., основний текст – 158 стор., список із 140 використаних джерел – 13 стор., додатки – 42 стор. Дисертація містить 99 рисунків та 25 таблиць.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СФЕРИЧНИХ ШАРНІРІВ КОВЗАННЯ, ПРИСТРОЇВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВО-ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

1.1. Застосування сферичних шарнірів ковзання в машинах

В сучасній техніці більше 60% деталей машин відносяться до вузлів ковзання, які займають важливе місце в машинобудуванні. Шарніри ковзання характеризуються вібростійкістю та безшумністю, працюють в широкому температурному діапазоні та хімічно активних середовищах, зберігаючи при цьому задану працездатність [1–7]. Серед них широко застосовуються сферичні шарніри (СШ) ковзання, які використовуються в різноманітних механізмах автомобільної, будівельної, гірничодобувної, суднової, робототехнічної, сільськогосподарської вимірювальної, медичної, авіаційної техніки, системах навігації, механізмах прогресивного технологічного обладнання, у багатокоординатних верстатах паралельної структури для забезпечення просторових рухів виконавчих ланок [8–17]. Застосування СШ у вузлах машин наведено на рис. 1.1. Незважаючи на різноманітність конструктивних виконань та місце застосування в механізмах машин тієї чи іншої галузі СШ складається з контактуючих деталей з робочою опуклою та ввігнутою сферичними поверхнями і утворює вищу кінематичну пару з трьома або двома ступенями вільності та застосовується в механізмах для забезпечення просторових рухів виконавчих ланок.

Деталі з ввігнутою сферичною поверхнею переважно виготовляють у вигляді вкладишів в основному з полімерних або керамічних матеріалів та рідше зі зносостійких металів, які встановлюються та фіксуються в корпусі шарніра [18,19].

Деталі з конструктивним елементом у вигляді опуклої сферичної поверхні (пальці) як правило виготовляють з легованих сталей.

Рис.1.1. Приклади застосування сферичних шарнірів в машинах

Особливістю роботи таких вузлів є забезпечення просторового зворотно-коливального руху пальця, що супроводжується нерівномірним зносом вздовж твірної робочих криволінійних поверхонь, який спричинений нерівномірністю розподілення контактного тиску, відносної швидкості ковзання та навантажень циклічного характеру, які в свою чергу призводять до додаткових пластичних деформацій, зміни геометрії профілю, контактного та втомного руйнування в наслідок чого виникає процес мікрорізання. Так як більшість СШ працюють в умовах граничного змащування то вище перераховані чинники досить швидко призводять до передчасного виходу з ладу контактуючих поверхонь деталей вузла та втрати працездатності машини в цілому [20–22].

Задача з підвищення працездатності шарнірів, які експлуатуються в умовах багатокомпонентного динамічного навантаження та вібрацій вимагає комплексного підходу до її вирішення, та вивчення процесів пошкодження робочих поверхонь.

Проблемами підвищення працездатності та довговічності вузлів ковзання за рахунок підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей методами поверхнево-пластичного зміцнення займались: Автаназів І.С, Горохов В.А., Дрозд М.С., Чепа П.А., Кірічек А.В., Лазуткін А.Г., Одінцов Л.Г., Папшев Д.Д., Петросов В.В., Пилипець М.І., Соловйов Д.Л., Смелянський В.М., Суслов А.Г., Сулима А.М., та ін., [23–30].

Модифікації та розробці композиційних матеріалів для виготовлення вкладишів СШ присвячені роботи: [31–38]. Також підвищення ресурсу шарнірів можливе за рахунок вдосконалення системи змащування та підбору мастильного матеріалу. Даний напрямок ґрунтовно розглянутий в наукових працях [39–44].

Аналіз науково-технічної літератури показав, що одним із простих та ефективних способів підведення й тривалого утримання мастила в зоні фрикційного контакту є формування на робочих поверхнях деталей спеціального мастилоутримуючого профілю, різні варіанти виконання якого запропоновано в роботах Радчика С., Шнейдера Ю.Г., Одінцова Л.Г., Кузьменка А.Г., Дихи О.В., Бабака О.П. та ін., [45–50]. Основою розробки ефективних рекомендацій щодо геометричних параметрів і характеристик мікрорельєфу є дослідження механіки руху мастила по поверхні [51]. Питання, що пов'язані зі створенням регулярних рельєфів детально вивчені в роботах [52–54] та інших.

Для подальших досліджень з підвищення працездатності СШ в роботі за типового представника розглянутої групи прийнято СШ передньої підвіски легкового автомобіля, який містить сферичну пару тертя (метал-полімер) і працює в умовах багатокомпонентного динамічного навантаження вектор дії якого постійно змінюється.

СШ складається з корпуса в якому встановлений вкладиш із композиційного матеріалу, що охоплює сферичну поверхню пальця. Герметизація шарніра забезпечується встановленням захисного пильовика. При збирані шарнір заповнюється мастилом ШРБ–4, яке розраховане на весь строк служби вузла (за умови збереження герметичності). На рис. 1.2 наведено типову конструкцію СШ автомобіля.

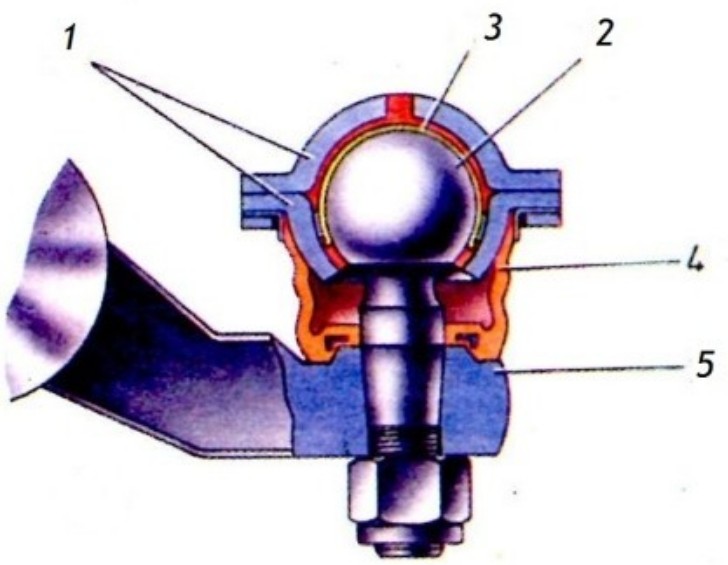


Рис. 1.2. Загальний вигляд СШ:
1 – корпус; 2 – палець; 3 – вкладиш підшипника ковзання; 4 – захисний армований пильовик; 5 – кронштейн маточини

Функціональне призначення СШ в конструкції підвіски автомобіля – забезпечувати з'єднання маточини підшипникового вузла колеса з важелем, а також обертальні і лінійні переміщення в усіх напрямках у площині свого кріплення з одночасною передачею зусиль, що виникають під час руху.

Кульовий палець, НСП якого охоплена полімерним вкладишем закріпленим у корпусі утворює вищу кінематичну пару. Постійні коливальні та обертові рухи пальця під час експлуатації автомобіля викликають інтенсивні відносні переміщення робочих поверхонь пари палець-вкладиш, що спричиняє їх зношування. На рис. 1.3 наведено спрацьовані пальці.

Рис. 1.3. Фрагменти спрацьованих пальців сферичних шарнірів

Поява зазору у спряжені сприяє збільшенню динамічних навантажень та інтенсифікації подальшого процесу зношування робочих поверхонь деталей СШ (палець-вкладиш) [55]. У відповідності до ГОСТ Р 52433-2005 «Шарниры шаровые.

Технические требования и методы испытаний» момент хитання повинен лежати в межах 2–7 Н·м, а максимальна гранично-допустима величина зазору в спряжені палець-вкладиш не повинна перевищувати 0.7 мм, [56]. При відхилені від регламентованих параметрів СШ підлягає заміні або ремонту.

Для виявлення основних факторів, які впливають на працездатність СШ були проведені попередні дослідження шарнірів легкових автомобілів Daewoo Lanos, Nexia, які відбирались на станції технічного обслуговування з фіксованим пробігом 0; 1000; 20000; 40000 км. Вимірювання зазору у спряжені палець-вкладиш проводилось за наступною методикою.

Палець СШ базувався по конічній поверхні в спеціальній оправці, яка встановлювалась в патрон токарного верстата. Корпус місцями свого кріплення приєднувався до спеціальної державки, яка закріплювалась в різцетримачі верстата, а індикаторна стійка встановлювалась на станину. Для вимірювань використовувався індикатор годинникового типу. Вимірювальний наконечник індикатора торкався корпусу кульового шарніра на рівні центрів з натягом. Переміщуючи супорт токарного верстата (вправо, вліво) в напрямку повздовжньої подачі вимірювався осьовий зазор, а в напрямку поперечної радіальний. Схема вимірювань наведена на рис. 1.4.

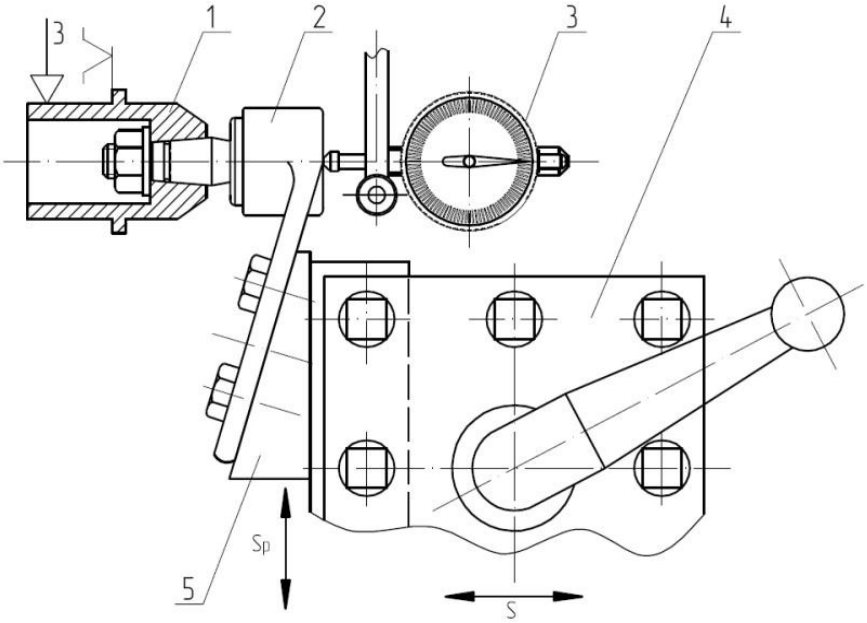


Рис. 1.4. Схема вимірювань зазору:

1 – оправка; 2 – сферичний шарнір; 3 – індикатор; 4 – різцетримач; 5 – державка

За результатами експериментальних досліджень побудовано графік залежності величини зазору у спряжені палець-вкладиш від напрацювання (рис.1.5).

Демонтовані шарніри після вимірювань радіального та осьового зазору розбирались для досліджень стану робочих поверхонь деталей шарніра (палець-полімерний вкладиш) та виявлення чинників, що впливають на процес зношування.

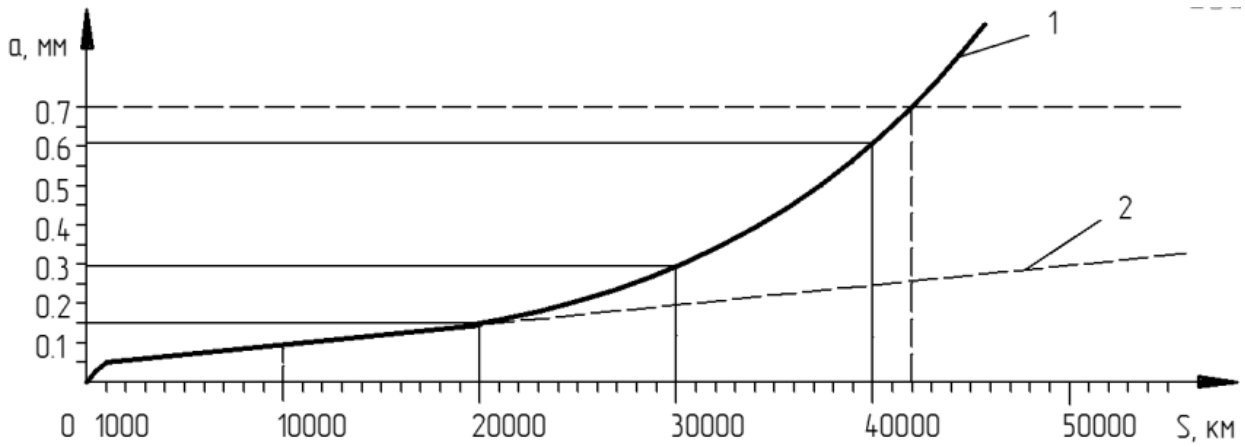


Рис.1.5. Графік залежності величини зазору від напрацювання:
1 – практична крива з врахуванням динамічних навантажень; 2 – теоретична крива нормального зношування

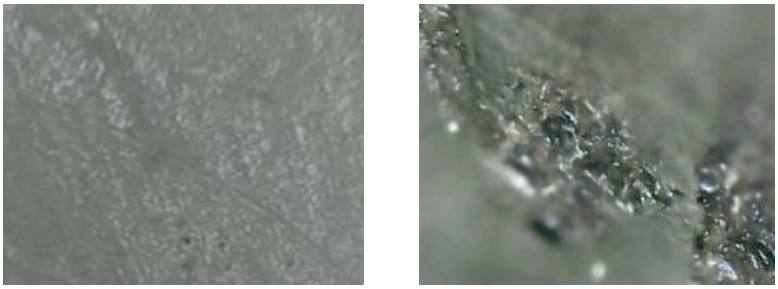
Шарнір з нульовим пробігом вважається еталонним. Пробіг до 1000 км відповідає періоду припрацювання (відбулося згладжування нерівностей робочих поверхонь, встановлюється рівноважна шорсткість) (рис. 1.6а, 1.7а).

а) б) в) г)

Рис. 1.6. Фрагменти зношених робочих поверхонь пальця, х25:
а – поверхня в період припрацювання (1000 км); б – період нормального зношування (20000 км); в – поверхня з періодом напрацювання (30000 км);
г – поверхня з напрацюванням більше (40000 км)

Пробіг 1000 – 20000 км відповідає періоду нормального зношування (швидкість зношування деталей стабілізувалась) (рис. 1.6б). Пробіг 20000 – 40000 км відповідає періоду зношування з врахуванням інтенсифікатора (в спряжені спостерігається збільшення зазору та сліди від корозійного і абразивного зношування сферичної поверхні пальця (рис. 1.6в, 1.6г).

На робочій поверхні полімерного вкладиша спостерігається укорінення абразивних частинок металу (рис. 1.7б).



а) б)

Рис. 1.7. Фрагменти робочих поверхонь полімерного вкладиша, х25:

а – поверхня в період припрацювання (1000 км);

б – поверхня з напрацюванням більше (40000 км)

Динамічні навантаження, які виникають з появою зазору у спряжені інтенсифікують процес зношування. Вплив динамічної складової на процес зношування відображає проміжок (після 20000 км) кривої 1 відображеної на рис.1.5. Після 40000 км починається період інтенсивного зношування в наслідок чого стрімко збільшується радіальний та осьовий зазор.

Для підвищення працездатності шарніра слід вдаватись до проведення конструкторсько-технологічних заходів спрямованих на зниження інтенсивності зношування, щоб максимально наблизити роботу шарніра до теоретичної кривої 2.

В ході проведених досліджень встановлено, що на працездатність та довговічність СШ впливають наступні фактори:

– *контактний тиск*, який впливає на інтенсивність зношування і визначається масою спорядженого автомобіля, геометрією контактуючих поверхонь спряження та умовами експлуатації;

– *швидкість відносного ковзання*, яка залежить від конструктивних розмірів деталей шарніра (палець-вкладиш), кінематики їх спряження та умов експлуатації;

– *значення температури* в зоні контакту кульового пальця і полімерного вкладиша, що суттєво впливає на вибір матеріалів контактуючих поверхонь і мастила;

– *змащування,* яке суттєво впливає на процес зношування. При проведені заходів спрямованих на поліпшення умов змащування (формування мастилоутримуючого профілю на робочих поверхнях) можна досягти значного ефекту. Завдяки постійному відновленню мастильної плівки усувається безпосередній контакт робочих поверхонь, зменшуються сили тертя і відповідно швидкість зношування;

– *якість робочих поверхонь* спряження кульовий палець-полімерний вкладиш, впливає на величину зношування під час періоду припрацювання;

– *відхилення від сферичності* робочої поверхні кульового пальця, негативно впливає на працездатність СШ і не повинно виходити за межі IT9.

Попередньо можна зробити наступний висновок – підвищення працездатності СШ можливо забезпечити за рахунок зміцнення сферичної поверхні пальця з формуванням на його поверхні геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю.

Аналіз відомих конструкцій СШ у різних конструктивних виконаннях [56–58] наведений в додатку А, вказує на необхідність проведення конструкторсько-технологічних заходів спрямованих на підвищення працездатності робочих поверхонь деталей спряження (палець-вкладиш) та доцільність удосконалення їх конструкцій.

1.1.1. Технічні вимоги до пальців сферичних шарнірів легкових автомобілів

При проектуванні технологічного процесу виготовлення пальців кульових шарнірів необхідно володіти базовою інформацією (конструкторська, нормативна документації та функціональне призначення кульового пальця у вузлі), яка визначає комплекс вимог до деталі.

Технічне креслення пальця типового СШ представлено на рис. 1.8.

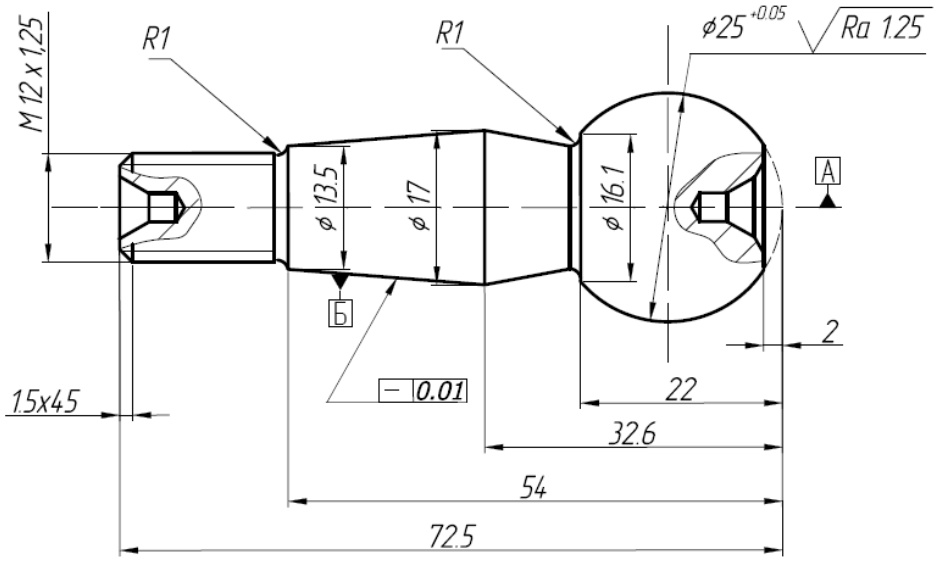


Рис. 1.8. Креслення пальця СШ легкового автомобіля

На основі аналізу базової інформації до пальців СШ, які використовуються в сучасних машинах сформовано комплекс вимог [56].

1. Вимоги до хімічного складу та фізико-механічних властивостей матеріалу і поверхні ($\sigma_в$=880….1030 Н/мм^2).

2. Вимоги до точності геометричних розмірів і взаємного розміщення поверхонь (7–9 квалітет точності).

3. Вимоги до якості поверхонь (параметр шорсткості R_a =0,32 – 3,2 мкм), а також до стану поверхні та поверхневого шару (окалина, неметалічні включення, тріщини, раковини, задири та інші дефекти не допустимі).

4. Спеціальні вимоги до системи контролю якості виробу (зазначення методу контролю параметра якості).

5. Спеціальні вимоги до способів обробки (методи, режими). Наприклад, зміцнення поверхневого шару сферичної поверхні пальця методами ППД з формуванням певного мікрорельєфу.

Конструкція пальця СШ включає в себе ряд елементів, властивості яких формуються як в процесі виготовлення заготовки так і під час механічної обробки і забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

1. Форма, розміри, шорсткість сферичної поверхні кульового пальця з мінімальними відхиленнями забезпечують необхідний експлуатаційний ресурс шарніра, значення моментів хитання та обертання пальця у вузлі.

2. Форма, розміри та шорсткість галтелі забезпечують необхідні кути хитання кульового пальця та несучу здатність вузла в цілому, а також запобігають пошкодженню захисного пильовика під час збирання.

3. Допуски взаємного розміщення сфери і монтажних елементів кульового пальця, забезпечують необхідну кінематичну точність роботи підвіски автомобіля.

4. Точність форми і розмірів монтажних поверхонь (конічних та циліндричних) забезпечують збирання вузлів підвіски та необхідні натяги і контактні напруження в монтажних з'єднаннях.

5. Точність профілю різьби (для кульових пальців з ділянками різьби) забезпечує автоматизоване збирання та необхідну міцність різьбового з’єднання.

1.1.2. Порівняльний аналіз вимог до матеріалів для виготовлення пальців сферичних шарнірів

Аналіз конструкторської документації показав, що поширеними матеріалами для виготовлення пальців СШ світовими виробниками є сталі марок: SAE5140, SAE5140H, 27MnSiVS6, 41CrS4, 38CrMn4KB, 37Cr4. Згідно з міжнародним транслятором сучасних сталей і даних нормативних документів [59–65] Вітчизняними аналогами вище перерахованих марок сталей є леговані конструкційні сталі марок: 30Х, 40Х, 30Г2. Порівняння аналогів сталей зведено в табл. 1.1.

В зарубіжній автомобілебудівній галузі сталь марки 27MnSiVS6 використовують для виготовлення пальців СШ рульових тяг, стабілізаторів передньої та задньої підвіски легкових автомобілів. Для більш навантажених СШ важелів передньої та задньої підвіски легкових автомобілів використовують сталі SAE5140, SAE5140H, які є аналогом до Вітчизняної сталі марки 40Х, хімічний склад яких наведено в табл. 1.2, а фізико-механічні властивості в табл. 1.3.

Таблиця 1.1

Вітчизняні та зарубіжні аналоги сталей для виготовлення пальців СШ

Зарубіжні марки сталі	США	Китай	Німеччина	Євросоюз	Італія	Англія	Франція
	SAE	GB	DIN	EN	UNI	BS	AFNOR
	5140 5140H	40Cr	27MnSiVS6	41CrS4	38CrMn4KB	37Cr4	28Cr4
Вітчизняні аналоги	40Х	40Х	30Г2	40Х	40Х	40Х	30Х

Таблиця 1.2

Хімічний склад сталі у, %

Вміст хім. елементів, %	Марка сталі			
	40Х	SAE5140	SAE5140H	27MnSiVS6
C	0,36–0,44	0,38–0,43	0,37–0,44	0,29–0,32
Si	0,17–0,37	0,15–0,35	0,15–0,35	0,55–0,65
Mn	0,5–0,8	0,7–0,9	1,4–1,5	0,6–1,0
Ni	до–0,3	-	до–0,25	до–0,015
S	до–0,035	до–0,04	до–0,03	0,03–0,045
P	до–0,035	до–0,035	до–0,04	до–0,025
Cr	0,8–1,1	0,7–0,9	0,6–1,0	0,15–0,2
Cu	до–0,3	-	до–0,35	до–0,025
Mo	-	-	до–0,06	до–0,05
Al	-	-	-	0,015–0,03
N	-	-	-	0,015–0,022
Ti	-	-	-	0,015–0,03
V	-	-	-	0,08–0,1

Таблиця 1.3

Фізико-механічні властивості матеріалів ГОСТ 4543–89

Марка сталі	термообробка	Межа текучості $\sigma_т$, Н/мм^2	Межа міцності $\sigma_в$, Н/мм^2	Відносне видовження δ_5, %	Відносне звуження ψ, %	Ударна в'язкість KCU Дж/см^2	Твердість НВ	Діаметр відбитка, мм
20Х	норм.	635	780	11	40	59	179	4,5
30Х	норм.	685	880	12	45	69	187	4,4
40Х	норм.	785	980	10	45	59	217	4,1
30Г2	норм.	345	590	15	45	–	207	4,2

Сталь марки 27MnSiVS6 легована ванадієм і титаном характеризується підвищеною пластичністю, міцністю та зменшеною величиною зерна. Дана сталь добре обробляється різанням, але як і інші згадані сталі чутлива до концентраторів напружень у вигляді рисок та ступінчастих переходів, що не містять галтелей.

За класифікацією виробників ріжучого інструмента (по класифікації «Sandvik Coromant») дані леговані сталі з тимчасовим опором на розрив $\sigma_в \leq 750$ МПа відносять до одного класу обробки різанням, наприклад P02.2 [59]. Але відмінності фізико-механічних властивостей (табл. 1.3) та структури матеріалу заготовки необхідно враховувати при проектуванні операцій технологічного процесу виготовлення деталі.

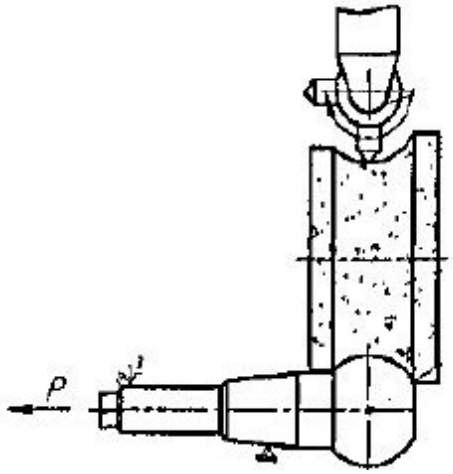
Проведений аналіз використання матеріалів світовими виробниками для виготовлення кульових пальців СШ показав, що кращим Вітчизняним аналогом є сталь 40Х за ГОСТ 4543–89.

1.1.3 Методи отримання заготовок та способи формоутворення неповних сферичних поверхонь

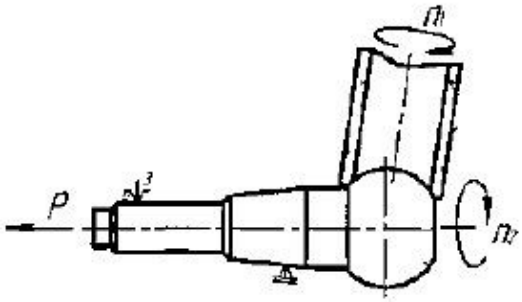
Отримання штучних заготовок з технологічним елементом у вигляді неповної сфери можливо різними методами: гарячим і напівгарячим об'ємним штампуванням, холодним об'ємним штампуванням, висаджуванням, комбінованим штампуванням, поперечно-клиновим прокатуванням [66]. Крім перерахованих способів в одиничному і дрібносерійному виробництві можливе отримання деталей з НСП різанням з прокату.

Деталі типу заготовок пальців кульових шарнірів підвіски автомобіля як правило отримують гарячим штампуванням на кривошипних гарячештампувальних прессах з легованих сталей марок 20Х, 40Х або холодним об’ємним висаджуванням, яке дозволяє отримати діаметральні розміри з точністю по 8–9 квалітету, а лінійні по 11–12 квалітету з параметром шорсткості R_a 2.5…0.63 мкм [67].

При застосуванні високотехнологічних методів отримання заготовок з НСП методами пластичного деформування, в якості формоутворюючої операції застосовують врізне шліфування профільними кругами (рис. 1.9а), що дозволяє отримати сферичну поверхню пальця кульової опори по 6–8 квалітету.



а)



б)

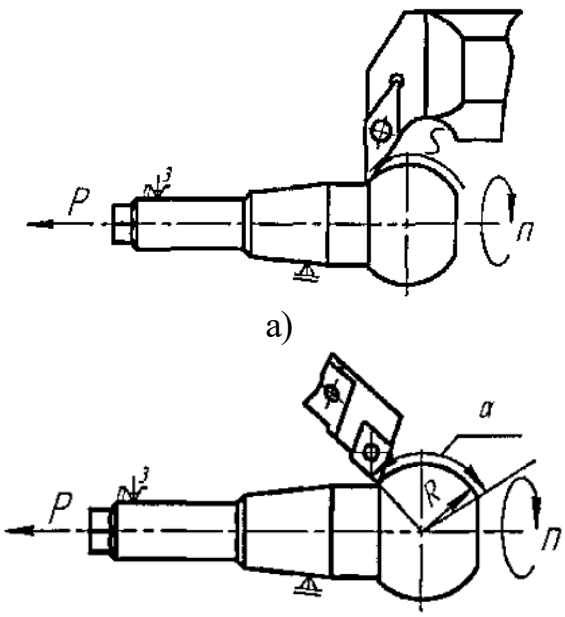
Рис. 1.9. Схема шліфування сферичної поверхні кульового пальця:
а – профільним кругом;
б – трубчатим кругом

Шліфування сферичної поверхні трубчастими кругами (рис. 1.9б) не зважаючи на високу точність обробки має обмежене застосування через малу стійкість інструменту і можливе лише після операцій чистової лезової обробки.

Основними недоліками абразивної обробки є: висока вартість інструмента та обладнання, необхідність введення попередніх операції для формоутворення сферичної поверхні, а також додаткової операції очищення виробів від абразиву.

Формоутворення сферичних поверхонь різанням як правило отримують на верстатах токарної групи за допомогою схеми плоско-паралельного точіння з використанням гідрокопіювальних супортів та верстатів з ЧПК (рис. 1.10а), фасонного точіння, точіння з використанням поворотних пристроїв (рис. 1.10б) [68] та точіння з використанням спеціальних супортів на верстатах автоматах [69].

При плоско-паралельній схемі точіння з використанням верстатів з ЧПК, ріжучий інструмент переміщується по двом координатам, при цьому кінцева точка формування твірної (профілю) сфери постійно зміщується по радіусу вершини різця, що впливає на відхилення форми сфери від номінальної, що складає 30–90 мкм біля торцевих поверхонь.



а)

б)

Рис. 1.10. Схеми обточування сферичної поверхні кульового вальця:
а – плоско-паралельне точіння;
б – точіння з використанням поворотного пристрою

При реалізації плоско-паралельної схеми обробки з використанням гідрокопіювальних верстатів отримати сферичну поверхню можливо лише з двох переходів, при точінні лівим та правим різцем. При цьому зміщення напівсфер може досягати 0,1 мм, що потребує введення додаткової шліфувальної операції.

При обточувані з використанням поворотних пристроїв можлива обробка зовнішніх НСП з R > 15 мм, стандартним інструментом, при чому забезпечується переміщення вершини різця по дузі радіусом R на деякий кут α, (рис. 1.10б).

Обточування з використанням спеціальних супортів на верстатах автоматах дозволяє отримати сферичні поверхні 9–11 квалітетів точності, що також в деяких випадках вимагає введення додаткової операції шліфування.

Для забезпечення фасонного точіння сферичної поверхні необхідно застосовувати дорогий спеціальний інструмент (вартість якого вища від вартості стандартного на 350–500%) та потужні верстати підвищеної жорсткості.

Також відомий спосіб фрезерування сферичних поверхонь (рис. 1.11), який отримав широке застосування [68].

При використанні даної схеми обробки виникає ряд дефектів: огранка, місцеві зарізи, задирки і вириви матеріалу в місцях виходу інструмента, відхилення форми сфери в місці відводу ріжучого інструмента. Для усунення даних дефектів необхідне додаткове призначення операцій чистового фрезерування і шліфування. Суттєвим недоліком даного методу є застосування спеціального інструмента.

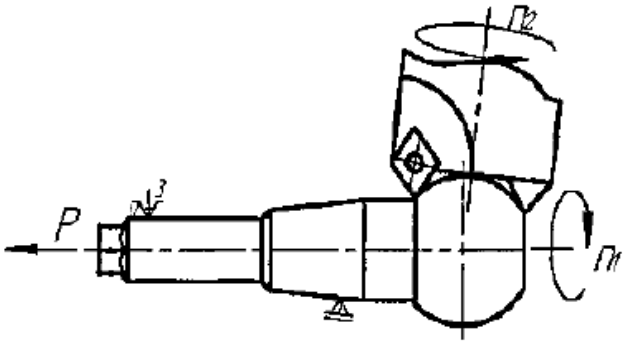


Рис. 1.11 – Схема фрезерування сферичної поверхні кульового пальця

Аналіз приведених способів формування НСП в умовах одиничного та серійного виробництва вказує на необхідність застосування лезової обробки та доцільність розробки верстатних пристроїв, які б дозволяли проводити чорнову і чистову токарну обробку НСП деталей машин.

1.2. Аналіз робіт та способів зміцнення методами поверхнево-пластичного деформування

В сучасному машинобудуванні для підвищення працездатності та комплексу експлуатаційних властивостей поверхневого шару деталей машин (на стадії виготовлення) значну увагу приділяють операціям поверхневого зміцнення.

Дослідженнями процесів зміцнення деталей машин з метою отримання зміцнених поверхневих шарів займались Аверченков В.І., Бабичев А.П., Кудінов В.В., Дрозд М.С., Грабченко А.І., Дальский А.М., Киричек А.В., Кудрявцев І.В., Похмурський В.І., Лур’є Г.Б., Пилипець М.І., Васильків В.В., Гурей В.І., Новіков Ф.В., Ящеріцин П.І., та ін..

Зміцнення ППД є одним з найменш енергоємних та трудомістких способів підвищення твердості, характеризується плавним градієнтом мікротвердості і стискаючими залишковими напруженнями, що важливо для підвищення працездатності деталей працюючих в умовах знакозмінних, циклічних навантажень [70–75]. Методи ППД дозволяють формувати поверхні з високим ступенем однорідності, з можливістю регулювання площі опорної поверхні, чим досягається зменшення періоду припрацювання [74].

Даний вид обробки як правило застосовують на фінішних операціях технологічного процесу замість або після ТО, а в деяких випадках замість абразивної обробки. Це зумовлено тим, що мікрогеометрія робочих поверхонь є основним фактором, що впливає на перебіг процесу тертя та абразивного зношування під час роботи деталей машин [76]. Для деталей вузлів ковзання важливо створити таку мікрогеометрію робочої поверхні, яка б забезпечувала мінімальне зношування і час періоду припрацювання.

Експериментально підтверджено, що період припрацювання деталей поверхні яких зміцненні ППД значно менший ніж у деталей поверхні яких оброблені різанням, це зумовлено тим, що радіус заокруглення вершин мікронерівностей, максимальний після обробки ППД [77].

В залежності від форми, розмірів, матеріалу деталі, а також вимог до геометричних параметрів і якості поверхні, можуть застосовуватись різні способи зміцнювальної обробки ППД, загальна класифікація яких наведена на рис. 1.10.

По виду навантаження способи ППД поділяються на статичні, динамічні та комбіновані [78].

Статичні способи ППД такі як: розкатка, обкатка, вигладжування, дорнування та інші – передбачають вплив на зону деформації потоком енергії постійної величини в часі за умови неперервного контакту між інструментом і деталлю, принципові схеми яких відображені на рис. 1.11.

Обкатка та розкатка (кульками, роликами) формує зміцнений поверхневий шар товщиною до 6 мм і дозволяє отримати степінь зміцнення до 50% з залишковими стискаючими напруженнями 200 – 450 МПа.

Алмазне вигладжування дозволяє отримати в середньому степінь зміцнення 60%, залишкові стискаючі напруження 500 – 1400МПа, при глибині залягання 0,15 – 0,5 мм [79, 80].

Дорнування застосовують для зниження шорсткості поверхні при не високій степені зміцнення.

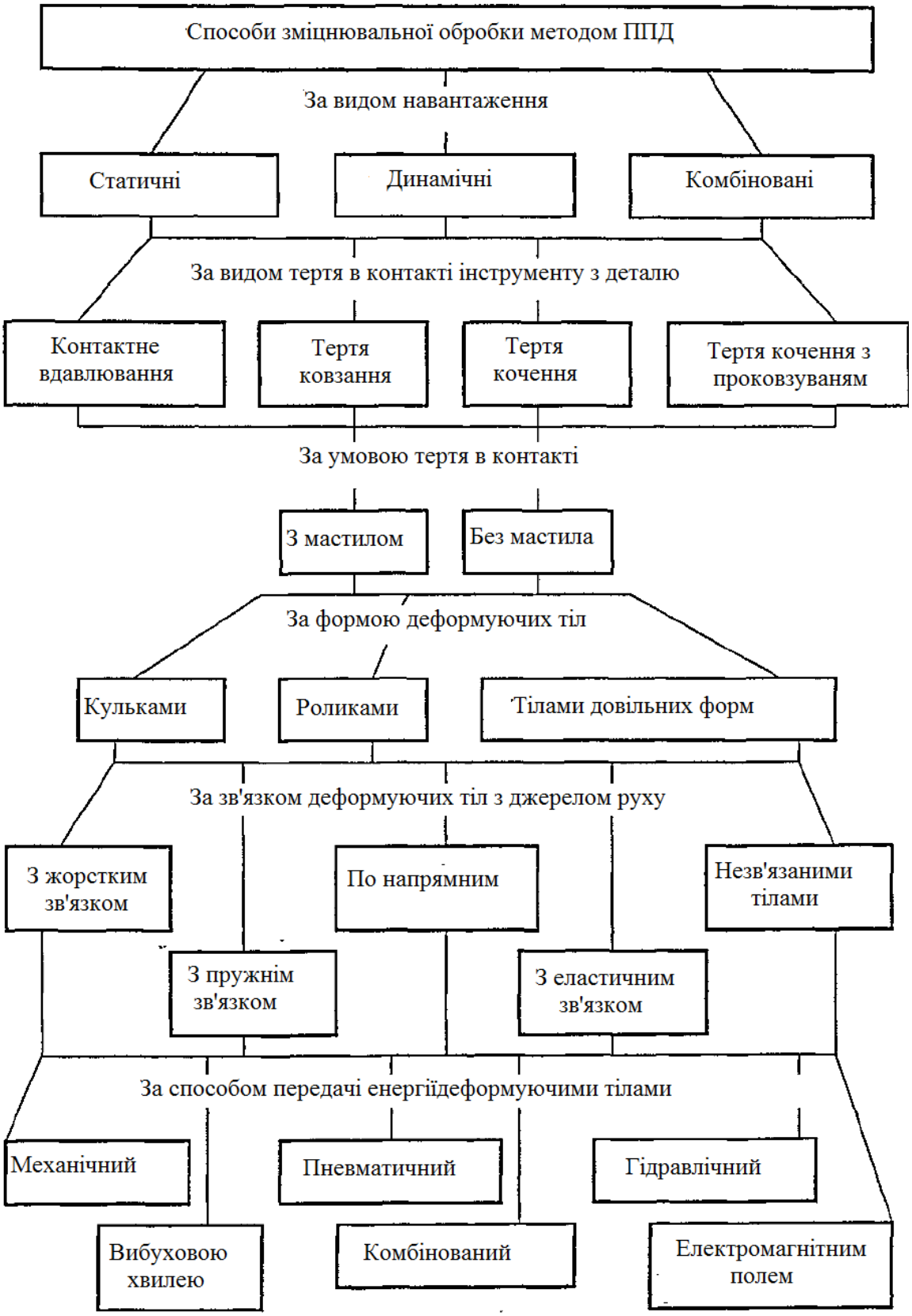
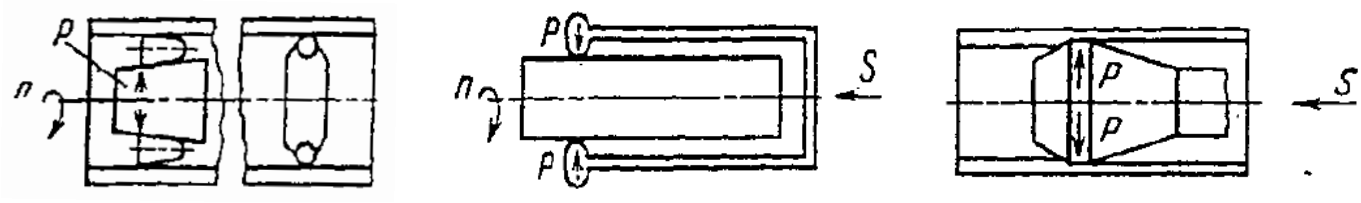


Рис. 1.10. Класифікація способів зміцнювальної обробки ППД

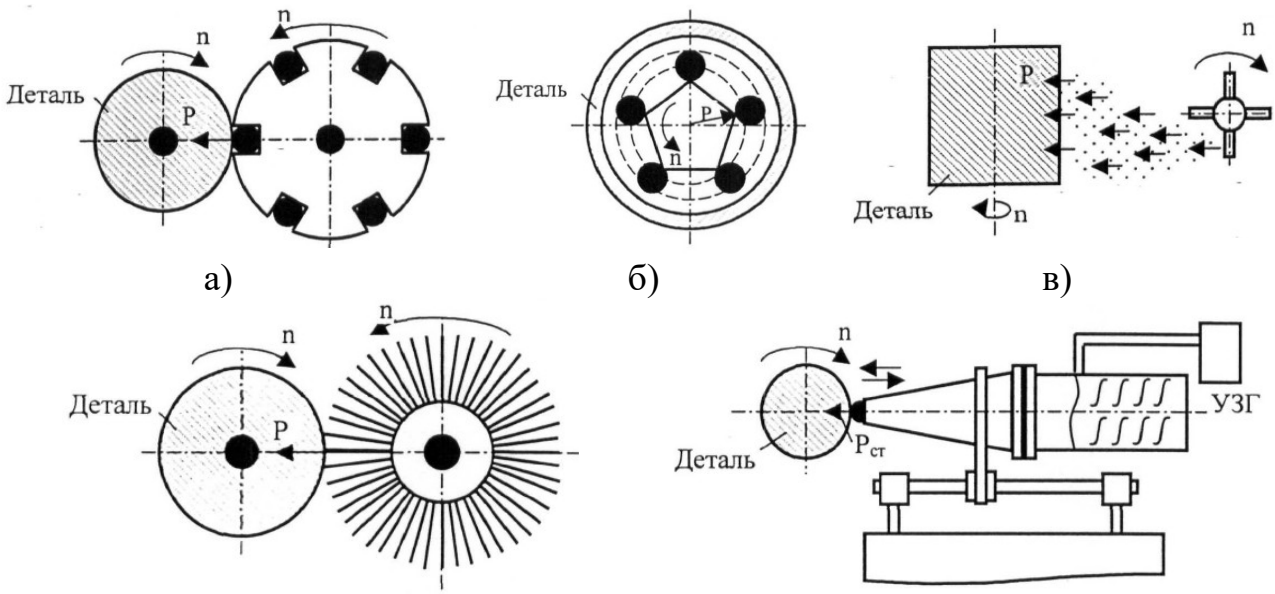
Спільною особливістю вищезгаданих способів є орієнтація на розмірну обробку, що значно обмежує їх застосування в умовах гнучкого виробництва.



а) б) в)

Рис. 1.11. Принципові схеми зміцнення поверхневого шару статичними методами: а – розкатування; б – обкатування; в – дорнування

При зміцнені динамічними методами ударне деформаційне навантаження на поверхню робочих тіл здійснюється за умови переривчастого контакту (ударне розкатування, відцентрова, дробиструменева, ультразвукова обробка, карбування, обробка обертовими металічними щітками та інші), принципові схеми обробки представлені на рис. 1.12.



а) б) в)

г) д)

Рис. 1.12. Принципові схеми зміцнювальної обробки динамічними методами: а – відцентрова обробка; б – ударне розкатування; в – дробиструменева обробка; г – обробка металевими щітками; д – ультразвукова обробка

Відцентрова обробка та ударне розкатування дозволяють зміцнити поверхневий шар з ступенем зміцнення до 50% та глибиною до 0,8 мм з залишковими стискаючими напруженнями 200 – 500 МПа.

При дробиструменевій обробці формується зміцнений поверхневий шар до 1,5 мм зі ступенем зміцнення 20 – 40% і стискаючими залишковими напруженнями 200 – 1000 МПа. Даний метод дозволяє зміцнювати тонкостінні деталі низької жорсткості з гострими кромками та різями з великим кроком.

Обробка металічними щітками дозволяє отримати зміцнений шар до 0,1 мм та підвищити мікротвердість до 30 % і сформувати стискаючі залишкові напруження до 1200 МПа [81].

При ультразвуковій обробці досягається ступінь зміцнення до 50 % з товщиною зміцненого шару 0,05 – 0,3 мм і залишковими стискаючими напруженнями до 1000 МПа.

Карбування дозволяє отримати ступінь зміцнення до 60 % з товщиною зміцненого поверхневого шару до 30 мм та залишковими стискаючими напруженнями до 1000 МПа [82].

Зміцнення комбінованими методами, наприклад статико-імпульсним зміцненням (СІЗ) дозволяє вести обробку в широкому енергетичному діапазоні. При високій енергії удару (більше 80 Дж) досягається наклепаний шар товщиною до 30 мм, ступінь зміцнення до 150 %, залишкові стискаючі напруження до 1200 МПа [83 – 85].

Освоєння технологічних комбінованих методів обробки призводить до підвищення енергоефективності, продуктивності та якості поверхневого шару деталей. Якість поверхневого шару визначається геометричними (макровідхилення, шорсткість) і фізико-механічними (мікротвердість, структура, залишкові напруження) параметрами, які формуються в залежності від технології виготовлення деталей.

Аналіз відомих технологій обробки поверхонь деталей машин методами ППД вказує на доцільність використання високоефективних комбінованих способів.

Графічне відображення основних технологічних параметрів способів зміцнювальної обробки ППД представлені на рис. 1.13.

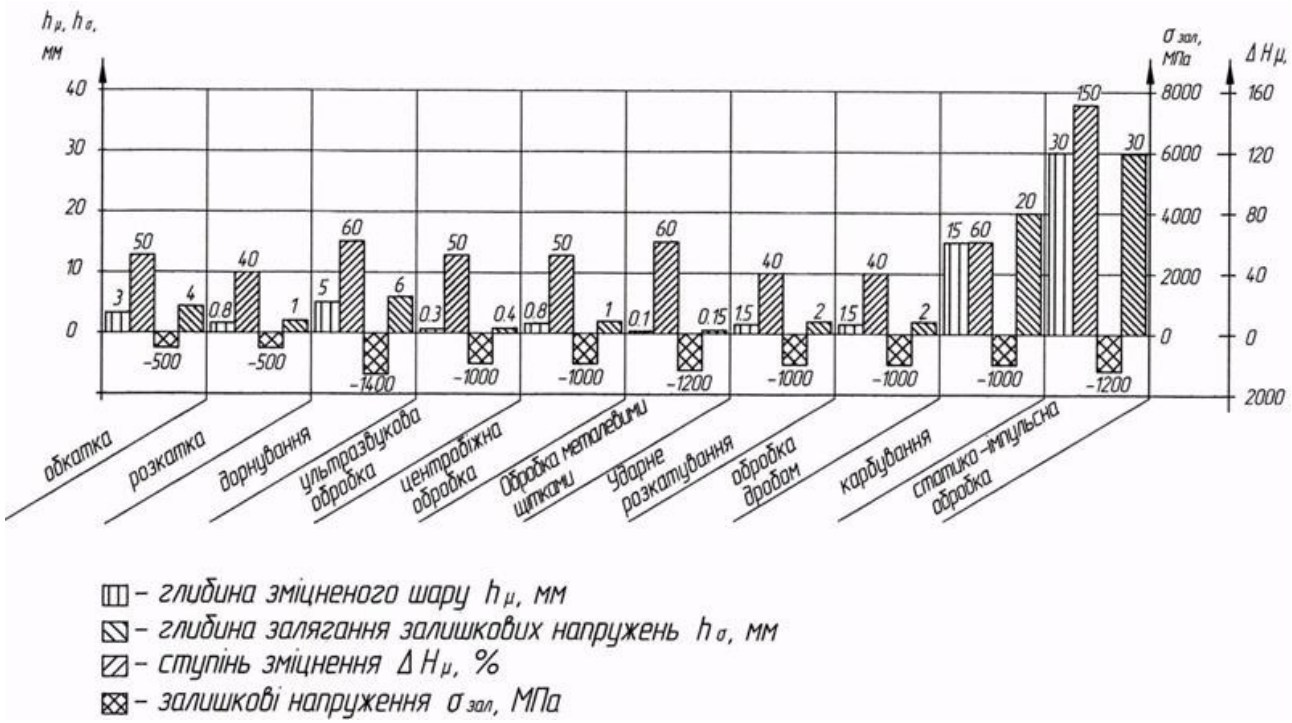


Рис. 1.13. Оцінка технологічних можливостей способів зміцнювальної обробки ППД

Проведений аналіз способів ППД показав, що якісно-зміцнений поверхневий шар можливо формувати використовуючи комбіновані методи ППД. Серед відомих способів зміцнення на особливу увагу заслуговує спосіб СІЗ, який характеризується високим коефіцієнтом корисної дії (ККД), дозволяє формувати зміцнений поверхневий шар із стискаючими залишковими напруженнями і необхідний мікрорельєф, а також керувати параметрами процесу зміцнення в широкому діапазоні.

1.3. Суть методу статико-імпульсного зміцнення

В наш час накопичений великий досвід в області підвищення міцності та працездатності робочих поверхонь деталей машин пластичним деформуванням. Методи ППД дозволяють обробляти поверхні деталей різних розмірів та конфігурацій, формувати мікрорельєфи поверхні (в тому числі регулярні), також процеси зміцнення легко піддаються механізації та автоматизації. Досвід вказує на ефективність використання комбінованих способів, які забезпечують широкий діапазон регулювання

фізико-механічних показників та якості поверхневого шару. До таких способів відноситься СІЗ [23, 83–85].

Суть способу СІЗ полягає в періодичному імпульсному навантаженні поверхні бойком через статично навантажений інструмент, що знаходиться у постійному контакті з оброблюваною поверхнею. Завдяки статичному навантаженню вектор дії якого збігається з напрямком дії ударного імпульсу досягається стабільність процесу зміцнення та зменшення втрат енергії удару (рис. 1.14) [23].

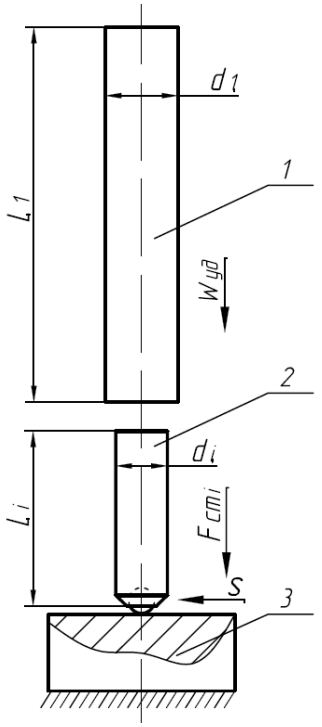


Рис. 1.14. Схема навантаження поверхні при СІЗ:
1 – бойок; 2 – інструмент з деформуючим елементом; 3 – зразок; $W_{уд}$ – енергія ударного навантаження; F_{cmi}– статичне навантаження інструмента; s – подача; L_1, L_i – довжини бойка та інструмента відповідно; d_1, d_i – діаметри бойка та інструмента відповідно

Під дією статичного навантаження інструмента створюються напруження зсуву які сприяють формуванню дрібнодисперсної структури поверхневого шару.

Даний спосіб дозволяє варіювати в широких межах міцністю та зносостійкістю поверхневого шару, створювати сприятливі стискаючі залишкові напруження, а також при певних режимах обробки формувати структуру подібну за властивостями до гетерогенної. Залишкові стискаючі напруження гальмують розвиток тріщин в поверхневому шарі, а використання радіусного деформуючого інструмента зменшує розмір існуючих мікротрішин. Розвитком СІЗ займались: Кірічек А.В., Соловйов Д.Л., Лазуткін А.Г, Барінов С.В. та ін..

Статичне навантаження інструмента з деформуючим елементом забезпечує постійний контакт з поверхнею зразка, як до так і після удару в результаті чого

забезпечується рекуперація відбитих хвиль деформації.

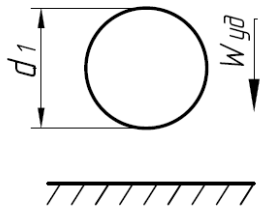
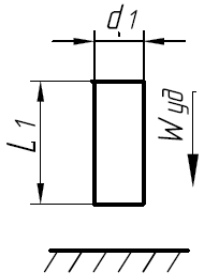
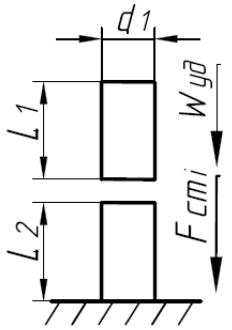
Дослідженнями ударних процесів займались Александров Е.В, Алімов О.Д., Соколінський В.Б., Манжосов В.К., Еремянц В.Е. та інші. Доведена можливість керування формою ударних імпульсів за рахунок акустичних та геометричних параметрів ударної системи [86–89].

Удар розглядається у вигляді поширення по тілам ударної системи плоских акустичних хвиль, які характеризуються законом зміни деформації або сил в часі, тобто амплітудою хвилі, часом дії сил (період хвилі), енергією хвилі. Ці характеристики залежать від геометрії елементів ударної системи, властивостей їх матеріалів та швидкості співударяння. Період хвилі прийнято називати ударним імпульсом. Параметри і форма ударного імпульсу, що надходить в зону деформації і будуть визначати ефективність динамічного навантаження в цілому.

Зміцнення керованими ударними імпульсами, вперше запропоновано в роботах А.В Кірічека та Д.Л. Соловйова, а також проведені дослідження для різних ударних систем [23, 90] табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Способи підведення енергії в зону деформації

Спосіб підведення енергії удару	Ударом інструмента		Ударом бойка по інструменту
Інструмент	кулька	бойок	торець інструмента
Схема способу			
Номер кривої	1	2	3

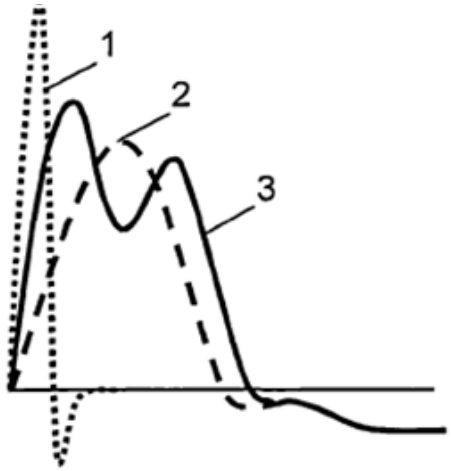


Рис. 1.15. Форми ударного імпульсу в кратері деформації при різних умовах навантаження: 1–удар кулькою; 2–удар циліндром; 3– удар бойка через статично навантажений інструмент

В зоні деформації були зафіксовані ударні імпульси різної форми, рис. 1.15.

Аналіз отриманих результатів показав, що пролонгований імпульс отриманий в результаті удару гладкого циліндричного бойка через статично навантажений хвилевід (інструмент) відрізняється найбільшою енергією завдяки використання відбитих хвиль деформації.

В машинобудуванні під час операцій зміцнення ППД переважно використовують деформуючі елементи (ДЕ) сферичної, циліндричної, дискової форм. Форму і розміри деформуючих елементів підбирають в залежності від параметрів мікрорельєфу, який необхідно створити на поверхні та самої конфігурації деталі.

Поверхнева твердість оброблюваного матеріалу і глибина пластичної деформації залежать від режимів зміцнення, фізико-механічних властивостей, структури та хімічного складу матеріалу. Найбільший вплив на поверхневу твердість чинить контактний тиск ДЕ в зоні контакту з оброблюваною деталлю і кратність прикладання навантаження. Значення контактного тиску визначається силою вдавлювання, геометрією ДЕ і деталі, а також фізико-механічними властивостями матеріалу заготовки. Кратність навантаження з урахуванням конструктивно-технологічних параметрів процесу зміцнення зручно описувати коефіцієнтом перекриття пластичних відбитків К.

При поверхнево-пластичному зміцнені сферичним ДЕ контактне зусилля з урахуванням твердості, межі текучості і діаметра пластичного відбитка для вуглецевих, і легованих сталей при пластичній деформації орієнтовно визначається за емпіричними формулами [91]:

$$F_k = \frac{HB\pi d_в^2}{4}, \tag{1.1}$$

$$F_k = 2b^2\sigma_T \tag{1.2}$$

де F_k – контактне зусилля; HB – твердість зміцненої зони; $d_в$ – діаметр пластичного відбитка; σ_T – межа текучості; b – глибина напружено-деформованого шару.

Глибина напружено-деформованого шару визначається за формулою:

$$b = \sqrt{\frac{HB\pi d_в^2}{8\sigma_T}} \tag{1.3}$$

Глибина зміцненого шару b переважно лежить в межах : $0.02R_3 \le b \le 0.1R_3$, де $R_з$ – радіус поперечного перерізу заготовки.

Зміцнення роликовими та багатосекційними ДЕ переважно застосовують для обробки значних площ масивних деталей при високій енергії удару (до 150 Дж).

Експериментальні зразки зміцнені з різними коефіцієнтами перекриття роликовим інструментом з енергією удару 70 Дж наведені на рис. 1.16 [92].

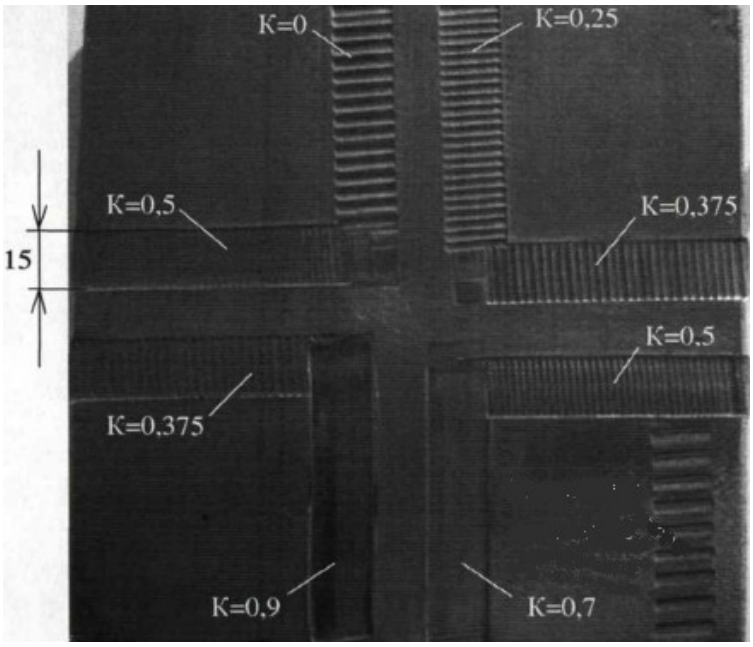


Рис. 1.16. Фото експериментального зразка

Для підвищення продуктивності обробки використовуються багатопозиційні стрижневі деформуючі інструменти (рис. 1.17) [93].

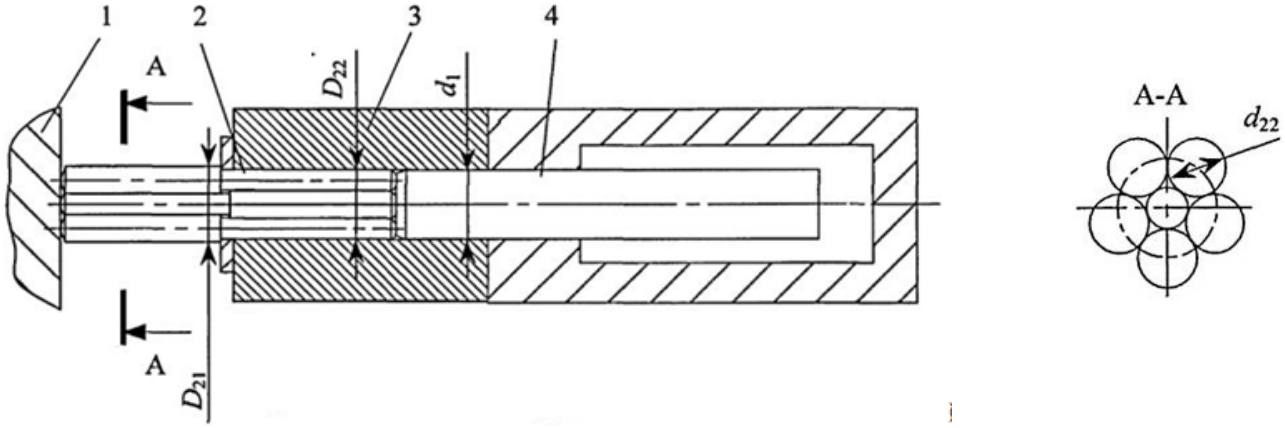


Рис. 1.17. Багатострижневий інструмент для СІЗ:

1 – зміцнювана поверхня; 2 – інструменти; 3 – корпус ударника; 4 – бойок

Використання такої схеми обробки дозволяє за один удар бойка сформувати одночасно декілька осередків деформації в наслідок чого створюється регулярний рельєф зміцненої поверхні. Такий інструмент використовується при зміцненні плоских поверхонь значної площі на технологічному обладнанні, яке дозволяє розвивати енергію удару більше 80 Дж.

1.3.1. Параметри статико-імпульсного зміцнення

Параметри СІЗ поділяються на технологічні, конструктивні та конструктивно-технологічні [94].

Основними технологічними параметрами СІЗ є енергія та частота удару, величина статичного навантаження деформуючого інструмента та величина подачі.

Енергія удару – один з основних параметрів, який найбільше впливає на величину пластичної деформації. При зміцнені ППД в ударній системі зароджуються плоскі механічні хвилі. В зону деформації енергію доставляє джерело хвилі (деформуюче тіло), при безпосередньому контакті з зміцнюваною поверхнею під час

удару. Таким чином поширена хвиля створює потік енергії в середовищі з певною інтенсивністю, який поширюється від джерела і утворює фронти пружної та пластичної деформації.

Величина сили статичного навантаження деформуючого тіла при СІЗ повинна забезпечувати максимальне використання енергії удару при деформації та гарантований постійний контакт інструмента з оброблюваною поверхнею протягом процесу зміцнення.

Подача, частота ударів та геометричні параметри відбитків впливають на рівномірність зміцнення, яка описується коефіцієнтом перекриття *К* і визначається за формулою:

$$K = 1 - \frac{v_S}{\delta f 60}, \tag{1.4}$$

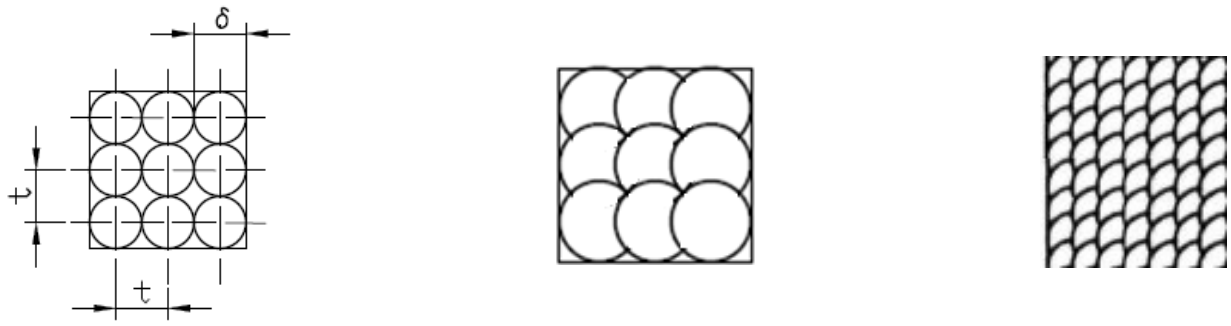
де *К*– коефіцієнт перекриття; v_S – швидкість подачі, мм/хв; f – частота ударів, Гц; δ – розмір пластичного відбитка, мм.

При зміцнені коефіцієнт перекриття знаходиться в межах $0 \leq K \leq 1$. Залежність між кроком пластичних відбитків t і діаметром відбитка δ з врахуванням коефіцієнта перекриття *К* виражається як:

$$t=(1-K)\ \delta. \tag{1.5}$$

Таким чином, якщо $K = 0$, то $t = \delta$ – край одного відбитка межує з краєм іншого; $K = 1$, $t = 0$ – інструмент багаторазово вдавлюється в одну і ту ж саму точку; $t < \delta$ – відбитки перекриваються. На рис. 1.18 представлено схеми кроку відбитків в залежності від коефіцієнта перекриття *К*.

В результаті досліджень [94 – 97] встановлено, що при зміцнені з коефіцієнтом перекриття який лежить в межах ($0 \leq K \leq 0.5$) формується структура зміцненого поверхневого шару подібна за своїми властивостями до гетерогенної. Конструктивно-технологічними параметрами СІЗ є форма і розміри деформуючого інструмента, а також елементів ударної системи. Обґрунтування параметрів ударної системи розглянуто в роботі [23].



а) б) в)

Рис. 1.18. Схеми кроку відбитків:

а – K = 0; б – K = 0,3; в – K = 0,5

t – крок пластичних відбитків; δ – діаметр пластичного відбитка

Виходячи з конструктивних міркувань та ефективності використання енергії удару, а також генерування імпульсних навантажень з відповідною формою (головної та хвостової частини) ударного імпульсу, при мінімальному коефіцієнті опору впровадження k=2,5·10^8 Н/м^2 рекомендуються співвідношення лінійних розмірів бойка та інструмента $n = L_1/L_2$ = 2 – 5 та площ поперечних перетинів $r = S_1/S_2$=1 – 4.

Деформуючий елемент при СІЗ вмонтовують в торець інструмента (проміжної ланки) або самому торцю надається необхідна форма. Таким чином форма і розміри інструмента впливають на величину коефіцієнта опору впровадження, на конфігурацію і розмір пластичних відбитків та визначають величину ударного імпульсу і його форму.

Регулювання показників якості можливе за рахунок зміни конструктивно-технологічних та технологічних параметрів. Зміна конструктивних параметрів, тобто конструкції генератора механічних імпульсів, технологічної оснастки, проводиться в край рідко (за умови зміни типорозміру оброблюваної деталі).

Тому під час розробки технологічного устаткування для СІЗ необхідно передбачити можливість гнучкого регулювання параметрів обробки.

1.4. Огляд та аналіз конструкцій пристроїв і обладнання для зміцнення неповних сферичних поверхонь деталей машин методами поверхнево-пластичного деформування

Відомо, що вся гама існуючих методів чистової обробки металів тиском по принципу взаємодії інструмента з оброблюваною поверхнею, поділяється на два класи [98]. До першого класу відноситься дорнування (взаємодія інструмент – деталь засновані на терті ковзанні). До другого класу – ротаційної обробки, відносяться процеси, при яких взаємодія між інструментом і деталлю здійснюється шляхом кочення деформуючого елемента по оброблюваній поверхні. Традиційно в якості деформуючих елементів використовують кульки або ролики циліндричної, конічної і рідше фасонної форми. Способи ротаційного обкочування набули широкого застосування в якості операції фінішно-зміцнювальної обробки НСП пальців кульових шарнірів сучасних автомобілів [99 – 105].

Відомий метод обкочування НСП профільними роликами з радіальною подачею.

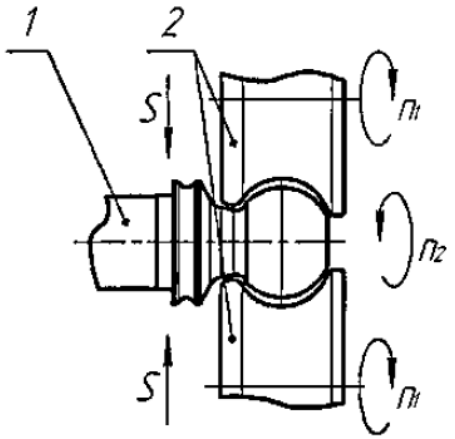


Рис. 1.19. Схема обробки НСП профільними роликами з радіальною подачею:
1 – заготовка; 2 – фасонні ролики

Схема обробки НСП профільними роликами з радіальною подачею наведена на рис. 1.19.

Даний метод характеризується високою продуктивністю і забезпечує стабільний параметр шорсткості $R_a \leq 0.4$ мкм, але висуває високі вимоги до розмірів НСП кульового пальця після формоутворюючих операцій різанням. Суттєвим недоліком даного методу є нерівномірний тиск інструмента на оброблювану сферичну поверхню, внаслідок чого формується не рівномірно зміцнений поверхневий шар з максимальним зміцненням в екваторіальній зоні.

В основі розглянутих нижче способів фінішно-зміцнювальної обкатки лежить принципова схема обробки (рис. 1.20), згідно до якої інструменту (обкатнику) надається обертальний рух в площині зміщеній відносно центра оброблюваної сферичної поверхні, та нахиленій під кутом α до поздовжньої осі симетрії пальця. Заготовці кульового пальця надають обертання навколо власної осі зі швидкістю значно меншою від швидкості обкатника в результаті чого зона зміцнення поширюється на всю НСП.

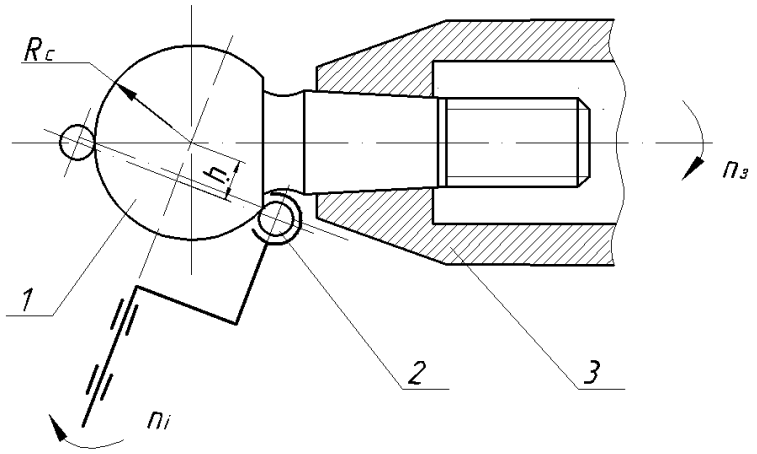


Рис. 1.20. Принципова схема процесу обкатки НСП:
1– деталь; 2– інструмент; 3– пристрій для закріплення деталі;
n_i– частота обертання інструмента; $n_з$ – частота обертання заготовки; R_c– радіус сфери

По виду деформуючих тіл кочення обкатники поділяються на кулькові та роликові. Ролики в свою чергу можуть бути як конічні так і циліндричні.

В роботі [105], розглянуто спосіб зміцнення НСП кульковим обкатником сепараторного типу.

Процес обробки кульками НСП здійснюється за допомогою спеціальної обкатної головки роторного типу з можливістю тонкого регулювання розміру, яка приведена на рис. 1.21.

Інструмент встановлюється в шпиндель вертикально-фрезерувального верстата і обертається з заданою швидкістю обробки. Подача здійснюється за рахунок обертання деталі, яка встановлюється в ділильну головку і приводиться в рух від приводу подач. Опорний ролик 5 підводиться до сферичної поверхні деталі 1 і фіксується. Обробка ведеться при інтенсивному охолодженні.

Головним недоліком такої конструкції є низька довговічність сепаратора та елементів регулювання, в результаті незначний знос приводить до зниження плавності

руху деформуючих тіл і сприяє появі вібрацій, які різко знижують довговічність обкатника та якість і продуктивність процесу обробки.

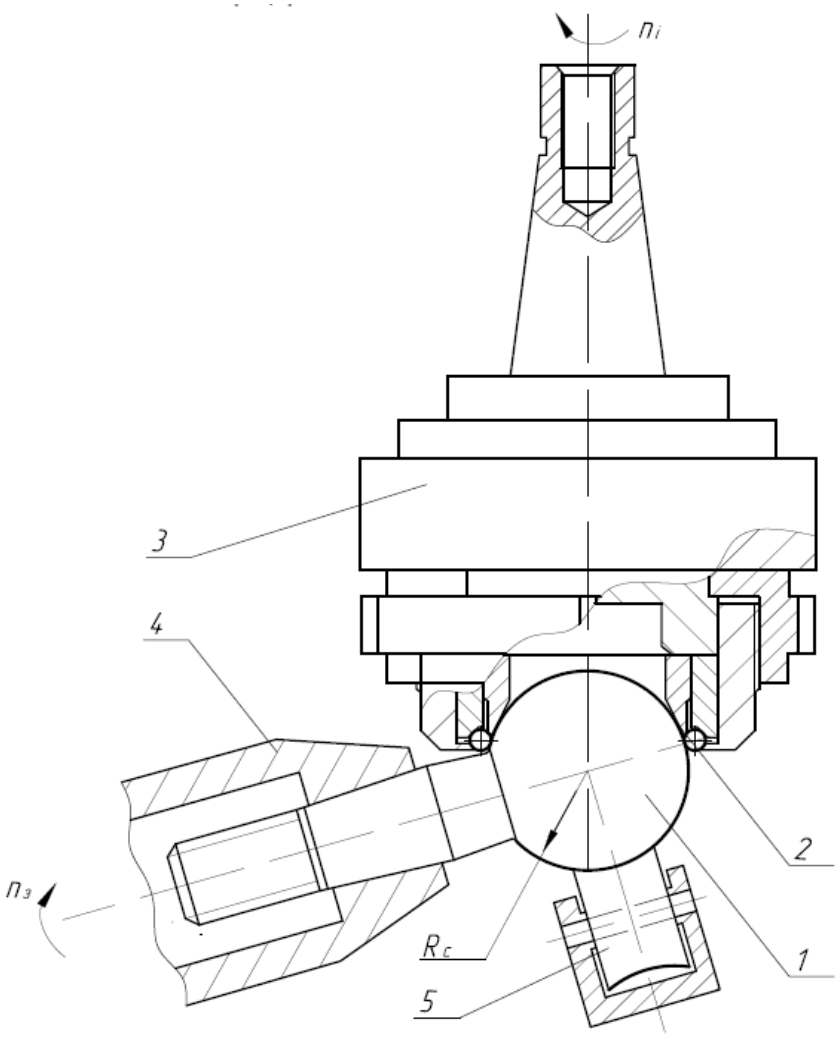


Рис. 1.21. Кулькова самоустановлювальна обкатна головка сепараторного типу:
1– деталь; 2– деформуючий елемент; 3– інструмент; 4– пристрій для закріплення деталі; 5– опорний ролик;
n_i– частота обертання інструмента; $n_з$– частота обертання заготовки; R_c– радіус сфери

Також варто відмітити, що необхідність використання додаткових опор при обкочуванні НСП, призводить до появи дефектів на обробленій поверхні. Крім того внаслідок різних швидкостей подач (максимальної на екваторі і мінімальної на полюсі), може відбуватись перенаклеп полюсної зони, що призводить до злущування зміцненого поверхневого шару.

Відомий спосіб ударно-імпульсного деформаційного зміцнення НСП [106], схема якого представлена на рис. 1.22.

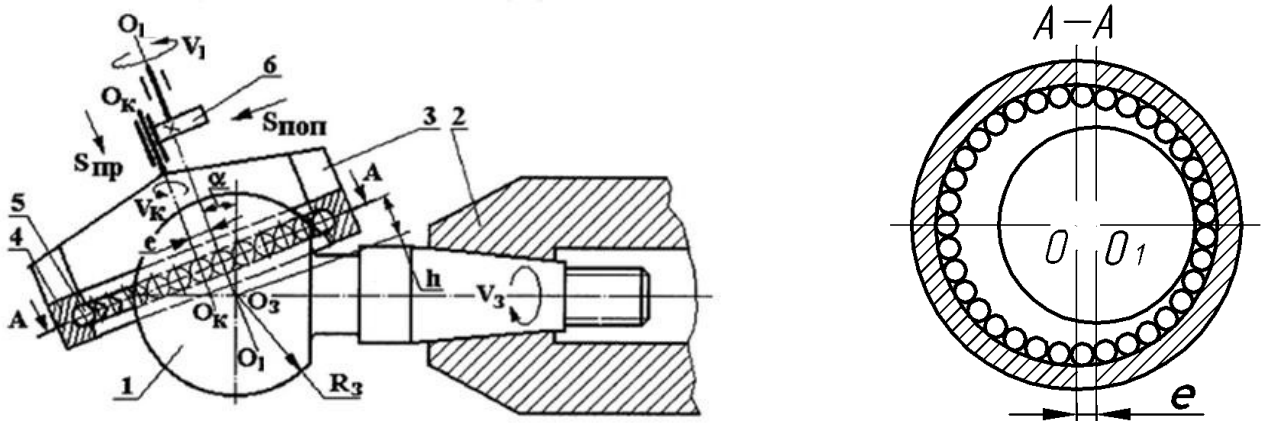


Рис. 1.22. Схема обробки НСП ударно-імпульсним деформаційним зміцненням

При такій схемі деформуючій головці 3 зміщеній відносно центра сфери на деяку відстань *e*, надають планетарний рух навколо власної осі, яка проходить через центр сферичної поверхні заготовки 1 закріпленої в патроні 2, яка обертається з власною швидкістю v_3.

Корпус деформуючої головки 3 містить кільце з біговою доріжкою 4 та розміщеними на ній деформуючими елементами 5. Під час обробки кільце 4 з деформуючими елементами 5 охоплює НСП заготовки 1 і здійснює планетарний рух, завдяки якому забезпечується переміщення контакту деформуючих тіл з поверхнею заготовки по колу. Як зазначається у [106], даний спосіб дозволяє підвищити твердість поверхневого шару на 30 – 80% з глибиною зміцнення до 2 мм із залишковими напруженнями стиску до 400 – 800 МПа.

Незважаючи на значні переваги, даний пристрій має такі недоліки як складність конструкції, наявність сепаратора (який визначає довговічність інструмента), складність налаштування, низький коефіцієнт використання енергії імпульсного навантаження.

Також відомі пристрої для статико-імпульсного зміцнення зовнішніх та внутрішніх поверхонь тіл обертання, що відрізняються оригінальністю та надійністю конструкції [107, 108].

Аналіз способів та конструкцій пристроїв для зміцнення НСП показав, що способи фінішно-зміцнювального обкочування не забезпечують рівномірність зміцненого шару НСП. Це зумовлено значною різницею величини подач інструмента в умовних січеннях сфери (екватор, полюс). Також відомі способи зміцнення НСП не дозволяють формувати зміцнений поверхневий шар з геометрично визначеним мастилоутримуючим профілем та керувати параметрами процесу зміцнення.

1.5. Рекомендації по кінематиці та вузлам машини для біполярного зміцнення

В сучасному машинобудуванні розвивається напрямок створення легко переналагоджуваних машин з числовим програмним керуванням та широкими функціональними можливостями.

Машини повинні відповідати таким критеріям як надійність, простота експлуатації та обслуговування.

При розробці нового обладнання необхідно значну увагу приділяти пошуку варіантів конструктивних виконань, які вирізняються від відомих простотою, високою продуктивністю та ККД, мінімальною кількістю елементів, низькою металоємкістю.

На основі проведеного аналізу науково-технічної інформації та патентних досліджень запропоновано спосіб біполярного СІЗ зовнішніх НСП. Для реалізації даного способу набула актуальності задача створення машини для біполярного СІЗ зовнішніх циліндричних та НСП.

Вихідними даними для проектування машини стали матеріали науково-дослідної роботи, винахідницька пропозиція [109] і створена на її основі експериментальна установка [110].

На стадії конструкторської розробки машини значну увагу приділяли питанням обґрунтування її параметрів з позиції забезпечення якості та працездатності виробу.

Під час створення машини для біполярного СІЗ були дотримані тенденції світового досвіду розвитку машин-агрегатів, який полягає у використані окремих вузлів або модулів і тим самим дозволяє використати досвід виробників та швидко реалізувати проект.

Ідея створення машини передбачає проектування генератора механічних імпульсів біполярної дії та ударної системи сконструйованої за принципом суміщення елементів, станини та інших елементів конструкції. Варіант конструктивного виконання генератора механічних імпульсів та ударної системи експериментальної установки наведено на рис. 1.23.

Для здійснення руху кутової подачі використовується поворотний стіл з індивідуальним приводом адаптований під систему ЧПК машини.

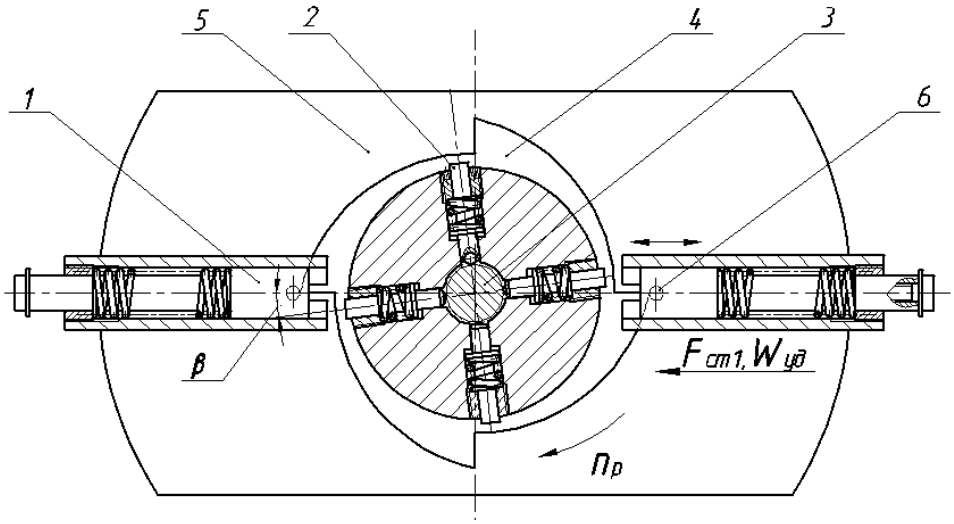


Рисунок 1.23. Схема конструктивного виконання ГМІ та ударної системи устаткування для СІЗ:

1–бойок; 2–інструмент; 3– деталь; 4– ротор з кулачком ; 5–корпус; 6–штовхач

$n_р$ – частота обертання ротора; $F_{ст1}$ – статичне навантаження бойка; $W_{уд}$ – енергія удару; β – кут випередження

Сервоприводи з датчиками кутових положень і блоком управління, механізми переміщень з приводами подач, числова система управління та засоби прийому-передачі інформації будуть використані з доступного асортименту відомих на ринку виробників.

Висновки до першого розділу та завдання досліджень

1. Результати проведеного аналізу сучасного стану питання підвищення працездатності СШ ковзання вказують на актуальність подальших досліджень спрямованих на удосконалення процесів в напрямку проектування, виготовлення та експлуатації шарніра.

2. З огляду літературних джерел встановлено, що найбільш ефективним методом підвищення працездатності рухомих з'єднань за критерієм зношування є вплив комбінованими методами зміцнення, які дозволяють формувати зміцнений поверхневий шар з можливістю формування на поверхні геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю.

3. Аналіз методів зміцнення показав, що метод СІЗ вважається перспективним, оскільки характеризується широкими технологічними можливостями і дозволяє керувати параметрами процесу зміцнення для забезпечення необхідної якості оброблюваної поверхні.

4. В ході аналізу методів та конструктивних особливостей існуючого оснащення для зміцнення НСП було виявлено, що технологічні можливості універсального верстатного обладнання використовуються не раціонально.

5. В результаті аналізу можливих варіантів та пошуку кращого рішення, обрано стратегію спрямовану на розробку і дослідження нового способу біполярного СІЗ з можливістю формування геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю та створення спеціального технологічного устаткування для його реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

– 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.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методика дослідження впливу енергії удару на поверхневу твердість зміцненого шару

Для проведення експериментальних досліджень та встановлення оптимального енергетичного діапазону при зміцнення зразків в умовах одиничного ударного навантаження використовувався копер (рис. 2.1).

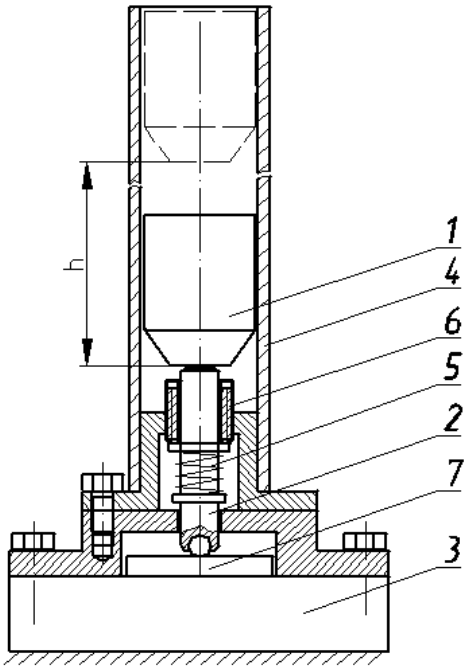


Рис. 2.1. Схема експериментального копра: 1 – бойок; 2 – інструмент; 3 – плита; 4 – напрямна; 5 – пружина; 6 – регулювальна гайка; 7 – зразок

Інструмент складається із стального циліндричного стрижня в торець якого вмонтовано деформуючий елемент (ДЕ) у вигляді кульки радіуса R_i=1 – 4 мм, виготовленої зі сталі ШХ 15 (термооброблено̂ї до твердості 61 HRC з шорсткістю R_a=0,1 мкм). Для досліджень використовувались зразки зі сталі 40Х нормалізованої.

Величина енергії одиничного удару змінювалась за рахунок зміни висоти падіння бойка маси m = 1 кг, загартованого до твердості 45 HRC та шліфованого з параметром шорсткості R_a = 0,32 мкм.

Значення енергії одиничного удару та передударної швидкості в залежності від висоти падіння бойка розраховувались за формулами (2.1) та (2.2) відповідно. Розрахункові значення наведені в табл. 2.1.

$$W = \frac{mv^2}{2}, \tag{2.1}$$

$$v = \sqrt{2gh}, \tag{2.2}$$

де m – маса бойка; v – передударна швидкість; h – висота падіння бойка; g – прискорення вільного падіння.

Таблиця 2.1

Значення енергії одиничного удару та передударної швидкості бойка

№	1	2	3	4	5	6
Маса бойка m, кг	1					
Радіус кульки R_i, мм	1					
Енергія W, Дж	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
Висота h, м	0,0255	0,051	0,0765	0,102	0,127	0,153
Передударна швидкість v, м/с	0,707	1	1,22	1,41	1,58	1,73

Зразки піддавались ударному навантаженню з різною енергією удару, в результаті чого на поверхні формувались відбитки.

По отриманим значенням мікротвердості за результатами трьох вимірювань будувалась залежність $HV^{100}=f(W)$, де W – енергія одиничного удару, Дж.

2.2. Методика дослідження оптимальної величини статичного навантаження при статико-імпульсному зміцненні

Для ефективного використання ударного імпульсного навантаження під час пружно-пластичного деформування необхідно забезпечити постійний безперервний контакт інструмента з оброблюваною поверхнею. На рис. 2.2 наведено принципову схему статичного навантаження інструмента при СІЗ.

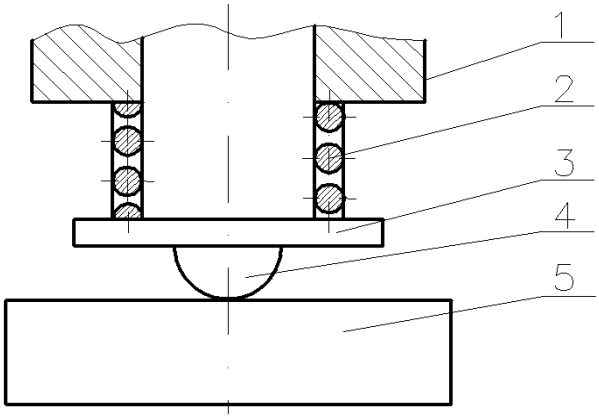


Рис. 2.2. Принципова схема статичного навантаження інструмента:
1 – корпус; 2 – пружина; 3 – інструмент; 4 – деформуючий елемент; 5 – деталь

Статичне навантаження інструмента забезпечується за рахунок пружини стиску, яка встановлена між уступом інструмента 3 і корпусом 1. Під дією пружних сил, інструмент в торець якого вмонтовано кульку підтискається до оброблюваної поверхні і забезпечує умови підведення імпульсного навантаження в зону деформації.

Для встановлення оптимальної величини статичного навантаження використовувався експериментальний копер (рис. 2.1). Дослідження проводились з енергією удару до 5 Дж на плоских зразках зі сталі 40Х нормалізованої та шліфовані до R_a = 1,25 мкм. Для деформування використовувався інструмент в торець якого було вмонтовано кульку R_i = 2,35 мм, виготовлену з сталі ШХ 15 (61 HRC, R_a = 0,1 мкм).

Під час проведення експерименту величина статичного навантаження інструмента змінювалась від 0 до 80 Н з кроком 20 Н. Для регулювання параметрів статичного навантаження використовувалась тарована пружина 5, яка стискалась мікрометричною гайкою 6. Удар по статично навантаженому інструменту здійснювався бойком з енергією $W_{уд}$. Дані для проведення експериментальних досліджень зведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Дані для проведення експериментальних досліджень

Маса бойка m, кг	1	
Радіус кульки R_i, мм	2,35	
Енергія W, Дж	1,5	2,5
Висота h, м	0,153	0,255
Передударна швидкість v, м/с	1,73	2,23
Статичне навантаження F_{cmi}, Н	0, 20, 40, 60, 80	

Для вимірювання діаметра відбитка використовувався інструментальний мікроскоп ИМ – 2 з ціною поділки 0,005 мм.

За отриманими значеннями діаметрів пластичних відбитків в залежності від величини статичного навантаження, при постійній величині енергії одиничного удару будувались залежності виду:

$$d_в = f(F_{cmi}) \tag{2.3}$$

де $d_в$ – середній діаметр пластичного відбитка; F_{cmi} – статичне навантаження інструмента.

2.3. Методика дослідження взаємозв'язку між величинами радіуса сфери деформуючого тіла та енергією одиничного удару

При зміцнені поверхневого шару деталей машин методами поверхнево-пластичного деформування можуть застосовуватись різні способи підведення енергії в кратер деформації. (табл. 1.4). Як показує досвід в процесах динамічного зміцнення в якості деформуючого інструмента застосовуються тіла переважно сферичної форми (наприклад дріб при дробоструменевій обробці, кульки при гідроструменевій, центробіжній, віброударній, карбувальній обробці) з радіусами R_i = 1…5 мм [111]. В залежності від фізико-механічних властивостей матеріалів інструмента та заготовки, а також від бажаної глибини, текстури і ступеня зміцнення, призначають режими обробки та радіус ДЕ, які визначають енергоємність процесу зміцнення.

Таким чином виникає задача з визначення необхідної енергії одиничного ударного навантаження, в залежності від радіуса сфери ДЕ, за умови забезпечення заданої мікротвердості.

Пропонується проводити дослідження за відомим методом експериментально-теоретичної рівноваги. В монографії [112] фізичний зміст явища удару описаний як процес, динамічної взаємодії двох і більше об'єктів, при чому сили, що виникають під

час удару досягають екстремальних значень за дуже короткий проміжок часу і породжують хвилі напружень, які виникають в області контакту. Якщо розглядати удар як процес поширення в ударній системі плоских механічних хвиль, що являє собою послідовну передачу руху від одної ділянки речовини до іншої, то можна стверджувати про передачу енергії.

В кратер деформації енергію доставляє джерело хвилі, тобто ДЕ, який приводить в рух безпосередньо контактуючі з ним шари металу, які здеформувавшись передають залишкову енергію наступному шару і т. д. Таким чином поширення деформаційної хвилі створює в тілі потік енергії, що поширюється від джерела.

Якщо зробити припущення, що розміри сферичного джерела хвилі достатньо малі і енергія від нього поширюється у всі сторони рівномірно, то його можна вважати точковим, а поширена ним деформаційна хвиля буде сферичною, тобто енергія рівномірно розподіляється по всій поверхні хвильової сфери. В такому випадку енергія, що перенесена хвилею через поверхню деякої площі за одиницю часу, тобто потужність перенесену через одиничне січення, називають інтенсивністю хвилі *I,* яка може бути виражена наступною залежністю:

$$I = \frac{P}{S} = \frac{W}{S\tau} = \frac{W}{4\pi R^2 \tau}, \tag{2.4}$$

де P – потужність, Вт; S – площа поверхні, м^2; R – радіус сфери ДЕ, м; τ – час передачі енергії, с.

Таким чином інтенсивність сферичної хвилі спадає обернено пропорційно квадрату відстані до центра джерела.

Будемо вважати, що з експерименту відомо твердість, глибину відбитка та енергію для випадку, коли радіус сфери ДЕ R_0 = 1 мм. У випадку застосування інструмента з радіусом сфери R_i, за умови $I_0 = I_i = const$, τ – const, можна записати наступне рівняння:

$$\frac{W_0}{4\pi R_0^2 \tau} = \frac{W_i}{4\pi R_i^2 \tau} \tag{2.5}$$

звідки:

$$W_i = \frac{W_0 4\pi R_i^2 \tau}{4\pi R_0 \tau} = \frac{W_0 R_i^2}{R_0}, \tag{2.6}$$

де W_0 – енергія удару для еталонного інструмента з R_0; W_i – енергія удару при використанні інструмента радіуса R_i.

Отримана залежність 2.6 дозволяє з достатньою точністю визначити необхідну енергію удару W_i в залежності від радіуса сфери R_i ДЕ.

Для перевірки отриманої залежності проводились експериментальні дослідження із використанням копра (рис. 2.1) та інструментів з сферичними ДЕ різних радіусів R_i = 1 – 4 мм, виготовлених зі сталі ШХ 15 (61 HRC та R_a = 0,1 мкм), які вмонтовувались в торець інструмента. Ударне навантаження здійснювалось за рахунок падіння бойка маси m = 1кг на інструмент з різної висоти, чим забезпечувався діапазон енергій одиничного удару. Зразки піддавались ударному навантаженню сферичними ДЕ з радіусами сфери R_i = 1 – 4 мм та відповідною енергією удару, яка розраховувалась за формулою 2.6, в результаті чого на поверхні формувались відбитки. Оцінка адекватності отриманої залежності (2.6) проводиться за результатами вимірювання мікротвердості в центрі пластичних відбитків.

2.4. Методика вимірювання мікротвердості

Вимірювання мікротвердості проводилось в центрі пластичного відбитка згідно з методикою [113, 114], на обладнані УИПМТ – 3, рис. 2.3. Навантаження на інструмент складало 100 г, час витримки 15 с. Схема вимірювань приведена на рис. 2.4.

Мікротвердість розраховується за формулою:

$$HV_{100} = 0.189\frac{F}{d^2}, \tag{2.7}$$

де F – навантаження на пірамідку (F=0.98=Н); d – середнє арифметичне довжин двох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мм.

Рис. 2.3. Мікротвердомір моделі ПМТ–3

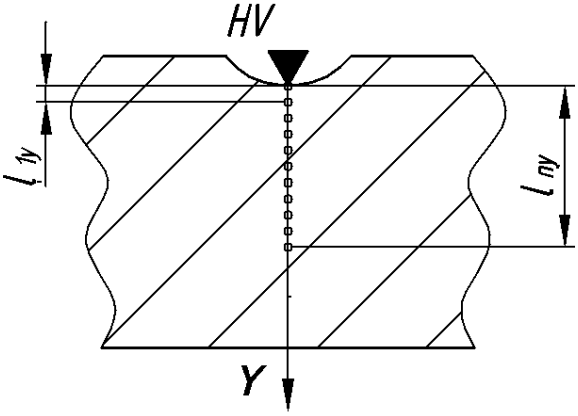


Рис. 2.4. Схема вимірювання мікротвердості

Для дослідження мікроструктури та розподілення твердості по глибині на сферичних поверхнях зразків готувались мікрошліфи з кроком по глибині 50 мкм. Схема розташування мікрошліфів на зміцненій сферичній поверхні наведена на рис. 2.5, а зафіксований палець у спеціальному фіксуючому пристрої на рис. 2.6.

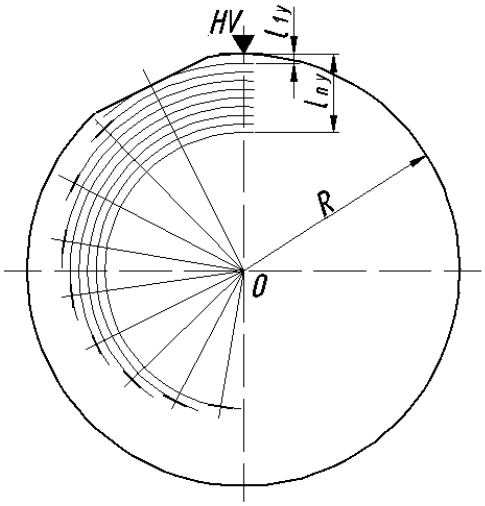


Рис. 2.5. Схема розташування мікрошліфів на сферичній поверхні

Рис. 2.6. Пристрій для фіксації пальця

Підготовка мікрошліфів здійснювалась в три етапи: чорнове шліфування, чистове шліфування (абразивний папір Р 180 – Р2500) та полірування (паста алмазна А80–А20). Промивання між переходами здійснювалось в керосині, а травлення мікрошліфів проводилось у 4% розчині нітратної кислоти (HNO_3).

2.5. Теоретичні основи перебігу хвильових процесів в ударній системі при статико-імпульсному зміцненні

Для динамічних способів ППД важливою характеристикою ефективності навантаження є частка енергії удару, яка витрачається на пружно-пластичну деформацію навантаженого матеріалу в осередку деформації. Удар розглядається у вигляді поширення по тілах ударної системи плоских акустичних хвиль, які характеризуються законом зміни деформацій або сил в часі, максимальним значенням сил – амплітудою хвилі, часом дії сил – тривалістю хвилі та енергією, що переноситься хвилею. Ці характеристики залежать від геометрії елементів ударної системи, фізико-механічних властивостей їх матеріалів і швидкості співударяння. Період такої хвилі називають ударним імпульсом. Імпульс певної форми, що надходить в осередок деформації – зону контакту ДЕ з навантаженим середовищем, і буде визначати ефективність динамічного навантаження в цілому.

В одновимірній постановці модель поздовжнього удару ідеально пружних стрижневих систем за умови, що співударяємі торці ідеально плоскі, була побудована ще в XIX столітті Сен-Венаном [86 – 89].

Актуальною також є постановка задачі розрахунку ударної системи із використанням хвильової теорії при СІЗ, де хвильова модель удару більш повно відображає реальні динамічні процеси в тілах ударної системи. СІЗ відбувається під впливом деформуючих імпульсів, які генеруються при ударі бойка по проміжній

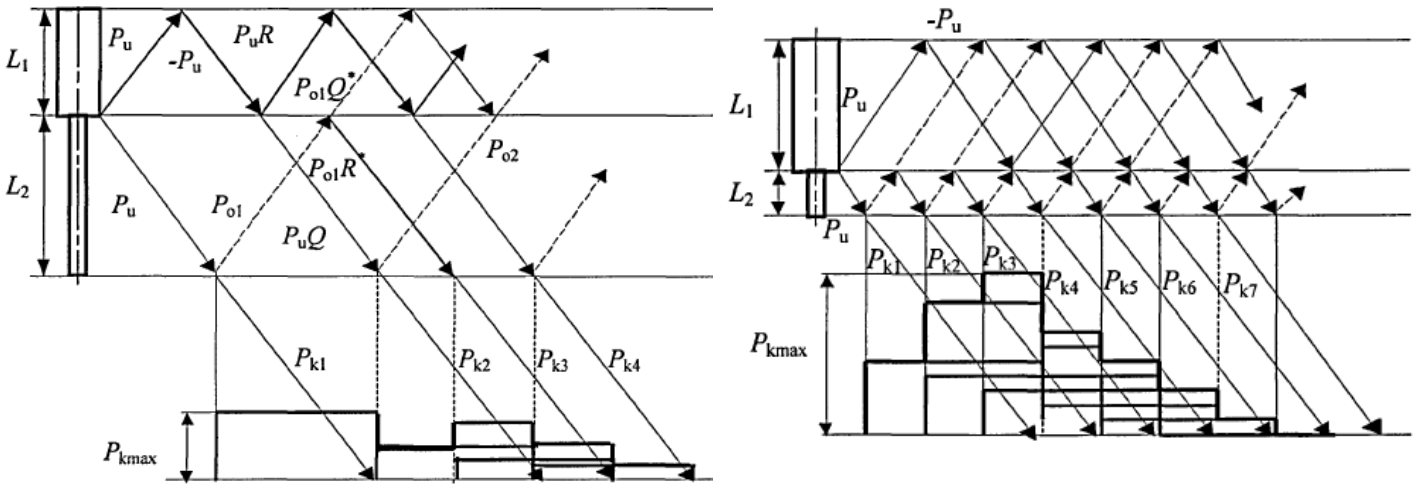
статично навантаженій ланці (інструмент) з відповідними геометричними та акустичними характеристиками.

Параметри ударного імпульсу, сформованого в осередку деформації залежать від параметрів деформаційної хвилі сформованої після удару в ударній системі бойок-хвилевід та від перебігу процесу її поширення по елементам ударної системи. Таким чином, необхідно дослідити параметри деформаційних хвиль в ударній системі бойок-хвилевід, які здійснюють деформаційне навантаження зони зміцнення зразка.

Розглянемо випадок формування ударного імпульсу при СІЗ коли геометричні параметри інструмента та бойка не співрозмірні. При ударі бойка по інструменту виникає хвиля деформації, яка породжує ударний імпульс з амплітудою p_u та тривалістю $T=2L_1/a_1$ (Рис.2.7). Поширюючись по інструменту і досягнувши навантаженої поверхні, хвиля деформації породжує прямий (пронизуючий) та відбитий ударні імпульси з амплітудами p_k та p_0 відповідно.

Прямий ударний імпульс відповідає головній частині імпульсу в зоні деформації. Відбитий імпульс (зворотна хвиля) поширюється по інструменту до границі з бойком. За рахунок контакту бойка та інструмента, частина імпульсу проходить в бойок, а інша відбивається від торця, змінює знак на протилежний та бере участь у повторній дії на зміцнювану поверхню.

Імпульс утворений в бойку внаслідок удару по інструменту (хвилеводу), відбивається без викривлень від вільного торця бойка, але з протилежним знаком (пряма хвиля деформації) пройшовши до контакту з інструментом, частково відбивається від торця і характеризується коефіцієнтом відбиття R^*, а інша частина проходить по інструменту та діє на оброблювану поверхню. Відбиті хвилі деформації від протилежних торців бойка (інструмента) протилежні за напрямком. При поширені ударних хвиль деформації діє принцип суперпозиції. Відбиті хвилі деформації утворюють хвостову частину імпульсу.



а) б)

Рис. 2.7. Схема поширення хвилі деформації в ударній системі бойок-хвилевід при співвідношенні площ поперечних перетинів r>1:

а – $L_1/L_2<1$; б – $L_1/L_2>1$

Сформований в кратері деформації ударний імпульс з головною та хвостовою частиною описується складною функцією і як правило має декілька максимумів по амплітуді. Згідно з принципом суперпозиції складну функцію ударного імпульсу можна замінити простою, ступінчатою із сукупності прямокутних імпульсів елементарної тривалості.

Під впливом перших сходинок імпульсу відбувається пружно-пластичне впровадження деформуючого елемента в об’єм зміцнюваного матеріалу. Через деякий проміжок часу відбувається спад амплітуди імпульсу. В момент коли величина контактного зусилля зменшується і врівноважується із пружно-пластичними силами опору матеріалу, впровадження інструмента припиняється.

При розвантажені інструмента, контактне січення інструмента та заготовки можна вважати нерухомим, оскільки величина пружної деформації для сталей складає 3…8% від пластичної. Якщо в подальшому амплітуда сил чергових сходинок імпульсу в зоні контакту буде більшою за сили опору зміцненого матеріалу при пластичній деформації, то інструмент і заготовка будуть зближатись. У протилежному випадку

одиничні прямокутні ударні імпульси будуть відбиватись від зони деформації як від жорсткої опори в ударну систему, не виконуючи корисну роботу.

В залежності від співвідношення довжин та площ поперечного перерізу бойка та інструмента хвильові стани в елементах ударної системи будуть різними. Відомі випадки практичного використання ударної системи з $L_1/L_2>1$ [115, 116]. Але, якщо бойок L_1 довший за інструмент L_2, то на хвилю деформації, що підходить до навантаженої поверхні, з деякого моменту часу починають накладатись відбиті хвилі від навантаженої поверхні і граничних торців бойка та інструмента. Періодичність дії таких ударних імпульсів в кратері деформації можна розрахувати за формулою (2.8), за умови, що $n = L_1/L_2$ – ціле число більше за одиницю і $a_1 = a_2$.

$$\tau = \frac{T}{n} = \frac{2L_2}{a_2}, \tag{2.8}$$

де τ – тривалість ударного імпульсу; T – період; L_1, L_2 – довжини бойка та інструмента; a_1, a_2 – швидкість поширення звуку в матеріалі.

При використанні ударної системи з бойками ступінчатої форми [117, 118], картина хвильового стану системи видозмінюється, а розрахунки параметрів імпульсу значно ускладнюються. У такому випадку при дослідженні характеристик ударного імпульсу перевагу надають експериментальним дослідженням.

2.6. Теоретичні дослідження ударної системи механічного генератора імпульсів

З класичної теорії удару максимальна передача енергії бойка інструменту можлива за умови, що після удару напрямки векторів швидкостей тіл співпадають, і тіла продовжують рух як одне ціле [87]. Для забезпечення даної умови в роботі запропоновано нову модель ударної системи з статичним навантаженням інструмента та комбінованим навантаженням бойка, конструктивна схема якої наведена на рис. 2.8.

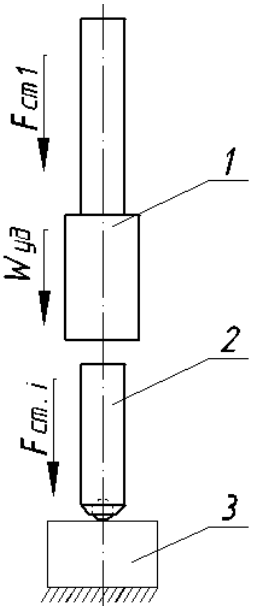


Рис. 2.8. Конструктивна схема ударної системи з статичним навантаженням інструмента та комбінованим бойка
1 – бойок; 2 – інструмент; 3 – деталь

Статичне та динамічне навантаження бойка забезпечується за рахунок енергії пружно деформованого тіла (стисненої пружини). Характеристика пружини розраховується таким чином, щоб частина її потенціальної енергії перетворювалась в кінетичну енергію бойка ($W_{уд}$), а інша її частина витрачалась на статичне навантаження бойка (F_{cm1}), і унеможливлювала його відрив (відскок) від інструмента. Якщо не враховувати статичне навантаження бойка, то коефіцієнт передачі енергії бойка інструменту можна розрахувати за формулою 2.9, [87]:

$$\eta = 1 - 4e^{-2(1+0.5e^{-2j})}, \tag{2.9}$$

де η – коефіцієнт передачі енергії; j – акустична жорсткість.

$$j = \frac{m_2}{m_1} \tag{2.10}$$

де m_2 – маса інструмента, m_1 – маса бойка.

Якщо врахувати, що максимальне значення η_{max} =1, то енергію відскоку можна знайти:

$$W_в = (1 - \eta)W_{уд}, \tag{2.11}$$

де $W_{уд}$ – енергія удару; $W_в$ – енергія відскоку бойка.

Таким чином для забезпечення максимальної передачі енергії ударною системою мінімально-необхідна потенційна енергія стисненої пружини W_n розраховується за умови:

$$W_n \geq W_{уд} + W_в \tag{2.12}$$

Враховуючи формулу (2.10) умова (2.11) матиме вигляд:

$$W_n \geq W_{уд} + (1 - \eta)W_{уд}, \tag{2.13}$$

або

$$W_n \geq (2 - \eta)W_{уд} \tag{2.14}$$

Згідно із законом збереження механічної енергії: сума кінетичної та потенційної енергії тіла зберігається при його механічному русі. Для випадку навантаження бойка згідно із запропонованою схемою, (рис. 2.9) закон збереження енергії можна записати наступним чином:

$$\frac{m_1 v_0^2(t_1)}{2} + \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} + m_1 g x_2 = \frac{m_1 v_1^2(t_2)}{2} + \frac{k x_1^2}{2}, \tag{2.15}$$

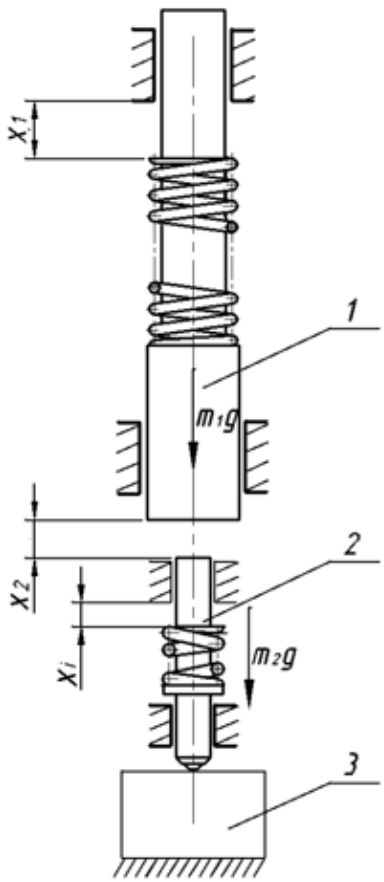


Рис. 2.9. Розрахунково-конструктивна схема ударної системи з комбінованим навантаженням бойка:

1 – бойок; 2 – інструмент; 3 – зразок

де x_1 – величина стиску пружини регулювальною втулкою; x_2 – величина стиску пружини за рахунок підйому кулачка генератора механічних імпульсів; k – жорсткість пружини бойка; t_1, t_2 – проміжки часу; m_1 – маса бойка; v_0 – швидкість бойка в початковий момент часу t_1; v_1 – швидкість бойка в момент часу t_2 (удар по інструменту).

Потенціальна енергія пружини, що витрачається на статичне навантаження бойка розраховується:

$$W_в = \frac{k x_1^2}{2}. \tag{2.16}$$

А сила статичного навантаження $F_{ст1}$:

$$F_{ст1} = k x_1. \tag{2.17}$$

Після елементарних математичних перетворень силу статичного навантаження

бойка F_{cm1} можна розрахувати за формулою:

$$F_{cm1} = \sqrt{2W_в k}. \tag{2.18}$$

Кінетична енергія бойка в момент удару розраховується за формулою:

$$W_{k1} = \frac{m_1 v_1^2(t_2)}{2} = \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} + m_1 g x_2 = \frac{k(x_2^2 + 2x_1x_2)}{2} + m_1 g x_2 . \tag{2.19}$$

Передударна швидкість бойка визначається з формули 2.19:

$$v_1 = \sqrt{\frac{k}{m_1}(x_2^2 + 2x_1x_2) + 2gx_2} . \tag{2.20}$$

В момент дотику торця бойка (який в цей момент має швидкість v_1) з торцем інструмента, тіла набувають спільної швидкості v, яку будемо вважати початковою швидкістю удару. Згідно із законом збереження імпульсу:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2)v, \tag{2.21}$$

де v_2 – швидкість інструмента до удару з бойком, $v_2 = 0$. Спільну швидкість v виражаємо за формулою (2.21):

$$v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{v_1}{1 + \frac{m_2}{m_1}}. \tag{2.22}$$

З врахуванням формули (2.20), формула (2.22) після математичних перетворень матиме вигляд:

$$v = \frac{m_1 \sqrt{k / m_1 (x_2^2 + 2x_1x_2) + 2gx_2}}{m_1 + m_2}. \tag{2.23}$$

Кінетична енергія системи в момент удару з врахуванням (2.23) після математичних перетворень матиме вигляд:

$$W_{k\,уд} = \frac{m_1^2((x_2^2 + 2x_1x_2)k / m_1 + 2gx_2)}{2(m_1 + m_2)}. \tag{2.24}$$

Потенційна енергія навантаженого інструмента розраховується за формулою:

$$W_{n2} = \frac{k_i x_i^2}{2}, \tag{2.25}$$

де k_i – жорсткість пружини інструмента; x_i – величина стиску пружини інструмента.

Повна енергія ударної системи в момент удару:

$$W_{пов} = W_{k\ \ уд} + W_{n1} + W_{n2}. \tag{2.26}$$

Або

$$W_{пов} = \frac{m_1^2((x_2^2 + 2x_1x_2)k / m_1 + 2gx_2)}{2(m_1 + m_2)} + \frac{kx_i^2}{2} + \frac{k_i x_i^2}{2}. \tag{2.27}$$

Потенціальна енергія ударної системи до удару:

$$W_n = \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} + mgx_2 + \frac{k_i x_i^2}{2}. \tag{2.28}$$

Виведені математичні залежності дозволяють визначити початкові енергетичні параметри ударної системи.

В роботах [87, 118], розглядаються окремі задачі удару циліндричних стрижнів з неплоскими торцями, але вплив сферичного деформуючого тіла на форму та параметри ударного імпульсу при СІЗ не досліджувались. В зв’язку зі складністю теоретичного описання ударної хвилі, яка формується при переході через інструмент в деталь, перевагу надають експериментальним дослідженням [119], які дозволяють встановити параметри ударного імпульсу та ефективність використання енергії удару при поверхнево-пластичному зміцненні в залежності від початкових умов.

2.7. Методика експериментальних досліджень параметрів ударного імпульсу в зоні деформації

Для досліджень параметрів ударного імпульсу в зоні деформації запропоновано методику та вимірювальний комплекс оригінальної конструкції (рис. 2.10), який складається з ударної, вимірювальної та реєструючої систем і дозволяє моделювати процес ударного навантаження з різними початковими умовами, та реєструвати параметри ударного імпульсу в зоні деформації.

Стенд складається з копра, реєструючого датчика-зразка (рис. 2.11) та системи з підсилення і передачі сигналу на персональний комп'ютер (ПК).

Рис. 2.10. Експериментально-вимірювальний комплекс

1 – ударна система; 2 – наковальня; 3 – датчик; 4 – блок підсилення та обробки сигналу; 5 – персональний комп'ютер

Оцінка точності отриманих результатів при визначені параметрів ударного імпульсу здійснювалась шляхом порівняння результатів отриманих в ході комп'ютерного моделювання процесу зміцнення.

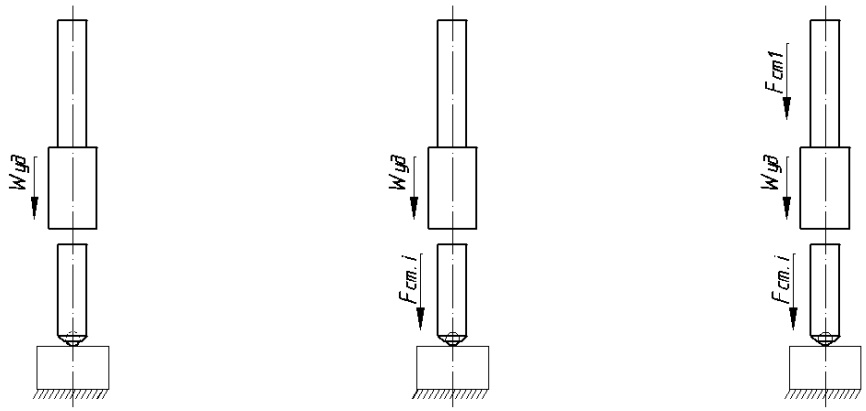
Під час експерименту використовувався інструмент в торець якого вмонтовано кульку R_i = 1,5 мм та R_i = 2,35 мм виготовлену зі сталі ШХ 15 (61 HRC, R_a = 0,1 мкм). Величина енергії одиничного удару та статичного навантаження бойка маси m (загартованого до твердості 45 HRC та шліфованого з параметром шорсткості R_a = 0,32 мкм) задавалась за рахунок зміни потенціальної енергії стисненої пружини. Для досліджень виготовлялись спеціальні зразки (зі сталі 40Х нормалізованої та шліфовані до R_a = 1,25 мкм) з можливістю встановлення датчика для реєстрації параметрів імпульсу, який виконує функцію перетворення механічної енергії в електричний сигнал.

Для вимірювання ударного навантаження в роботі використовується ємнісний електретний елемент моделі ACM9767P з вмонтованим підсилювачем сигналу з шириною смуги пропускання частот 20 – 20000 Гц. Такі датчики характеризуються високою чутливістю та мають не великі габаритні розміри, що дозволяє монтувати їх безпосередньо на об’єкт досліджень. Вивід сигналу здійснюється через екранований провідник та аудіо роз’єм 3,5 мм на звукову плату ПК. Загальний вигляд вимірювального датчика відображено на рис. 2.11.

Рис. 2.11. Загальний вигляд датчика для вимірювання ударного імпульсу

Для дослідження впливу параметрів удару на процес зміцнення, дослідження проводились в три етапи (без статичного навантаження, з статичним навантаженням інструмента F_{cmi}, з статичним навантаженням бойка та інструмента F_{cm1}, F_{cmi}) при постійній енергії удару $W_{уд}$.

Схеми навантажень бойка та інструмента при експериментальних дослідженнях відображені на рис. 2.12.



а) б) в)

Рис. 2.12. Схеми навантажень бойка та інструмента:

а – без статичного навантаження; б – з статичним навантаженням інструмента;

в – з статичним навантаженням бойка та інструмента

Для проведення експериментальних досліджень значення енергії одиничного удару та статичного навантаження бойка і інструмента розраховувались за вище вказаною методикою. Вихідні дані для проведення експерименту приведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Дані для проведення експериментальних досліджень

Маса бойка m_1, кг	0,35
Маса інструмента m_2, кг	0,1
Радіус кульки R_i, мм	1,5
Енергія $W_{уд}$, Дж	2,35
Передударна швидкість v, м/с	3,0
Статичне навантаження інструмента F_{cmi}, Н	40
Статичне навантаження бойка F_{cm1}, Н	150

Оцінка впливу статичних навантажень бойка та інструмента на процес зміцнення виявлялась по змінні мікротвердості зміцненого поверхневого шару зразків. Вимірювання мікротвердості проводилось на універсальному мікротвердомірі ПМТ – 3 в центрі пластичного відбитка. Значення мікротвердості відповідають середнім значенням за результатами трьох вимірювань.

На основі результатів експериментальних досліджень будувались діаграми мікротвердості від енергії удару: $HV=f(W_{уд}, F_{cm1}, F_{cmi})$, а також графіки ударного імпульсу.

2.7.1. Способи перетворення механічних коливань в електричний сигнал

В основу сучасних пристроїв для вимірювання вібрацій можуть бути покладені як контактні так і безконтактні способи. Але безпосередній запис вібрації практично не проводиться. До безконтактних відносять оптичні та лазерні віброметри. Такі пристрої дозволяють проводити вимірювання віддалено при досить високій точності.

Використовуються переважно такі пристрої для дослідження вібрацій з частотою 8…11000 Гц та амплітудою від 2 нм в лабораторних умовах. Значно ширшого застосування набули контактні методи вимірювання вібрацій, засновані на принципі сприйняття чутливим елементом – вібродатчиком механічних коливань та перетворення їх в електричний сигнал.

Вимірювальні датчики в свою чергу поділяються на два класи – генераторні та параметричні. До генераторних відносяться датчики з безпосереднім перетворенням механічних коливань в електричні, а до параметричних – датчики в яких механічні коливання моделюють електричні синусоїдальні коливання або постійну напругу, що створюється вимірювальною апаратурою незалежно від вібрацій [120, 122]. Для кожного із вказаних класів є ряд спільних властивостей за якими проводять оцінку при виборі типу датчика. Параметричні системи вигідні в енергетичному відношенні, вони не вимагають потужних підсилювачів. Крім того у випадку інтегрування або диференціювання коливань, вимоги до інтегральних та диференціальних контурів при модульованих коливаннях значно нижчі. Генераторні системи мають перевагу у тому, що вони можуть бути зроблені стабільними та виконані за більш простою схемою.

Спираючись на результати проведеного аналізу в першому розділі, для дослідження вібрацій (форми ударного імпульсу при ППД) використовуємо ємнісні датчики, які мають широкий частотний діапазон 20 – 20000 Гц, малі габаритні розміри та високу чутливість.

Складовою частиною вібровимірювальних ємнісних систем є конденсатор, який змінює свою електричну ємність під дією механічних сил. Внаслідок зміни ємності конденсатора (ввімкненого у спеціальну електричну схему) виникають або змінюються струми, які після підсилення і подальших перетворень реєструються апаратурою.

На рис. 2.13 наведена принципова схема ємнісного вібродатчика з плоским конденсатором.

Під дією вібрації змінюється зазор між обкладинками, що призводить до зміни ємності конденсатора, яка визначається за формулою:

$$C = 0{,}0885\frac{\varepsilon S}{\delta}, \tag{2.29}$$

де C – ємність конденсатора; S – робоча площа обкладинок конденсатора; ε – діалектричка стала середовища між обкладинками (для повітря $\varepsilon = 1$); δ – відстань між обкладинками.

На рис. 2.14 відображена принципова схема включення ємнісного вібродатчика в електричне коло.

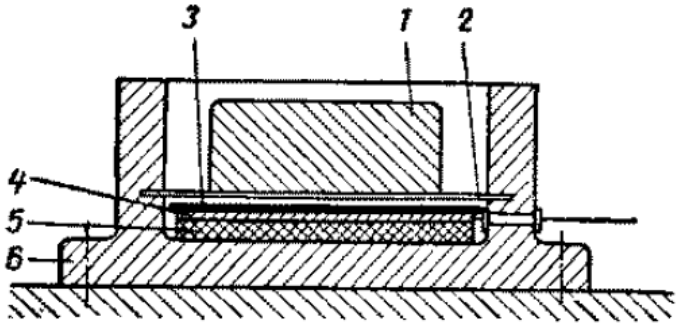


Рис. 2.13. Принципова схема ємнісного вібродатчика:
1 – інерційний елемент; 2 – плоска мембрана (обкладка); 3 – слюдяна пластинка; 4 – обкладка; 5 – ізоляційна прокладка; 6 корпус

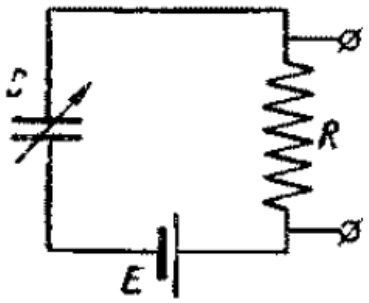


Рис. 2.14. Принципова схема включення ємнісного вібродатчика в електричне коло:
С – ємність датчика; Е – прикладена різниця потенціалів; R опір балансного резистора

На рис. 2.14 показана традиційна схема підключення ємнісного вібродатчика. Прикладена різниця потенціалів Е від акумуляторної батареї створює на ємнісному вібродатчику C деякий заряд. При зміні ємності заряд збільшується або зменшується, а протікаючий через резистор R струм зумовлює зміну потенціалів, яка подається на перший каскад підсилювача. Якщо зазор змінюється за законом $\delta_0 + d\,\delta$, а $d\,\delta \ll \delta_0$, то можна записати вираз для приросту C:

$$dC = -\,0.0885\frac{1}{\delta_0^2}d\delta, \tag{2.30}$$

де δ_0 – величина зазору при відсутності вібрації; $d\delta$ – вимушені коливання рухомої обкладинки.

Зміна заряду dq на обкладинках конденсатора пов'язана з зміною ємності співвідношенням:

$$dq = EdC, \tag{2.31}$$

де E – прикладена різниця потенціалів.

Струм в колі знаходимо:

$$I = dq/dt, \tag{2.32}$$

При підстановці q і dC напруга U, що знімається з резистора R, виражається залежністю:

$$U = IR = R\frac{dq}{dt^2} = -\frac{RE}{\delta_0^2}\frac{d\delta}{dt}, \tag{2.33}$$

Таким чином розглянута система реагує на швидкість зміни зазору між обкладинками.

Більш стабільно, але з меншою чутливістю працюють мостові схеми змінного струму із ємнісним датчиком увімкненим в одно з плечей, із зрівноважуючою ємністю в сусідньому плечі. При розбалансі, який виникає в результаті зміни ємності датчика, у вимірювальній діагоналі містка з'являється амплітудно-модульований змінний струм.

На рис. 2.15 наведено схему включення диференціального ємнісного датчика з трьома електродами. Середня рухома обкладка датчика створює розбаланс обох плечей одночасно. Пристрій такого типу реагує на зміну переміщення рухомої обкладки, тому при використанні акселерометричного підвісу в колі містка створюється струм пропорційний прискоренню, що діє на датчик.

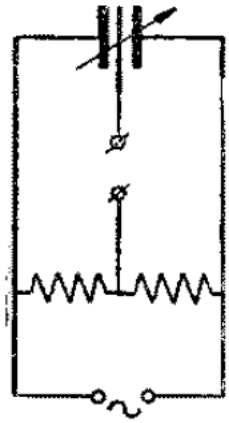


Рис. 2.15. Схема включення диференціального ємнісного датчика з трьома електродами

Також ємнісний датчик може бути включений в коливальний контур генератора високої частоти створюючи в ньому частотно-модульовані коливання, які підсилюються, детектуються і повторно підсилюються до необхідної величини для

забезпечення надійної реєстрації. Для зменшення шумів перший, підсилюючий каскад монтують в корпус датчика або на мінімальній відстані від нього.

Принципова електрична схема з каскадом підсилення відображена на рис.2.16.

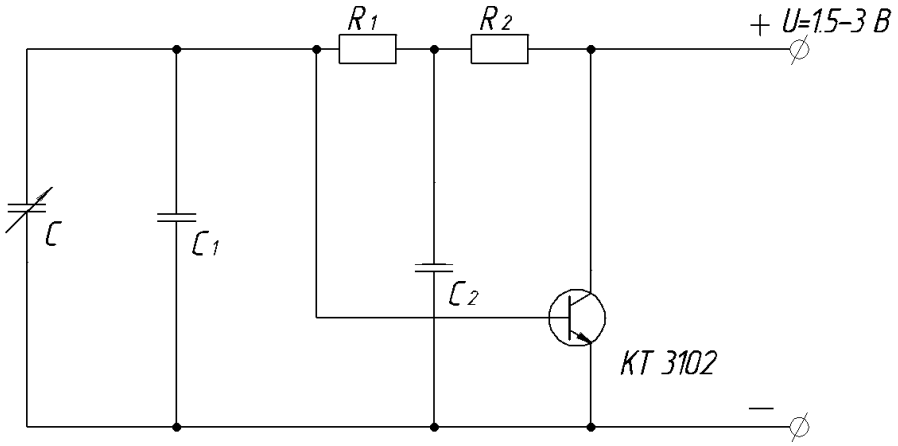


Рис. 2.16. Принципова електрична схема ємнісного датчика з підсилювачем:
C1 = 100 пф; C2 = 47 мкф; R1 = R2 = 1кОм

Технічні характеристики транзистора КТ3102.

Максимально допустимий струм на колекторі: I_{Kmax} = 0,1 А. Максимальний імпульсний струм на колекторі: $I_{K\,I\,max}$ = 0,2 А . Максимальна потужність колектора: $P_{K\,max}$ = 0,25 Вт. Діапазон робочих температур: T_p = 60 – 150 ^{0}С. Максимальна частота при підключені по схемі з спільним емітером: f = 150 МГц.

2.7.2. Моделювання умов навантаження зразка з використанням програмного комплексу Abaqus

В процесі ударного зміцнення зразка, навантажена поверхня під впливом ударного імпульсу буде пружно-пластично деформуватись змінюючи своє положення відносно рівноважного стану на величину a (рис. 2.17). Значення a в свою чергу не повинно перевищувати половини максимально-допустимого значення по амплітуді для вимірювального датчика, у нашому випадку $\Delta x \leq 0.15$ мм.

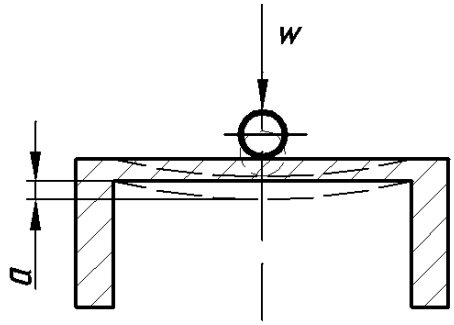


Рис. 2.17. Схема деформаційних переміщень навантаженої поверхні зразка під дією ударного навантаження

Режими ударного навантаження необхідно призначити такими щоб величина *a* не перевищувала вказане значення Δx. При моделюванні процесів ППД аналітичні залежності зв’язують між собою режими навантаження з епюрами розподілення твердості по глибині, епюрами залишкових напружень та деформацій. В зв’язку з цим встановлення відповідності між параметрами зміцнювальної обробки і значеннями амплітуди коливань навантаженої поверхні, які формуються на різних стадіях процесу зміцнювальної обробки є важливою задачею.

Для вирішення поставленої задачі використано програмний комплекс – Abaqus, який дозволяє моделювати процеси, що відбуваються в осередку деформації, без проведення численних та трудомістких експериментів. Комп'ютерні програми на основі методу скінчених елементів (МСЕ) дозволяють за порівняно невеликий проміжок часу провести повний аналіз і розрахунки енергосилових параметрів та створити якісну картину явищ. Сімейство продуктів Abaqus розробляється і підтримується компанією Abaqus, Inc. (USA) з 1978 року [123].

В основі методики моделювання лежить розрахунок напружено-деформованого стану матеріалу зразка (сталь 40Х, аналогом якої є сталь 5140Н за класифікацією SAE) при деформуванні чисельним методом кінцевих елементів.

Для описання степені деформації, в більшості випадків достатньо мати лише одне характерне значення деформації. Abaqus використовує значення відомі як степінь деформації або Фон-Мізес деформація:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \tag{2.34}$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – головні деформації.

Напруження в Abaqus визначено як сила, що діє на область модуля матеріалу. Напруження які діють на грань модуля бувають нормальні (перпендикулярні до грані) і зсувні (по грані). Напруження зсуву можна представити у вигляді двох компонентів по довільним ортогональним осям. Таким чином кінцевий стан напруження може бути виражений трьома нормальними складовими $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ і шістьма компонентами зсуву фрагмента об'єкта $\sigma_{xy}, \sigma_{yx}, \sigma_{yz}, \sigma_{zy}, \sigma_{zx}, \sigma_{xz}$.

З умови рівноваги можна стверджувати, що компоненти які діють в одній площині еквівалентні. Тобто $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy}, \sigma_{zx} = \sigma_{xz}$. Таким чином, кінцевий стан напруження може бути описаний трьома нормальними компонентами і трьома компонентами зсуву фрагмента.

Використовуючи математичний аналіз можна зорієнтувати три ортогональні осі так, що компоненти зсуву фрагмента об'єкта напруження по цим осям будуть рівні нулю. Результуючі нормальні напруження, які діють в напрямку цих осей і є основними напруженнями.

На базі програмного комплексу Abaqus розроблена методика моделювання і дослідження процесу зміцнення зразків із сталі 40Х методом ППД в умовах одиничного ударного навантаження.

Основними елементами методики моделювання і дослідження є:

– створення геометричної тривимірної моделі дослідного зразка та деформуючого інструмента (бойок маси m, що падає з висоти h в торець якого вмонтовано деформуючий елемент – кульку,) в системі SolidWorks та імпорт в програмний комплекс Abaqus;

– присвоєння кінематичних параметрів елементам ударної системи в умовах вільного падіння інструмента на дослідний зразок;

– створення сітки та призначення типу скінчених елементів;

– моделювання процесу удару і розрахунок фізичних параметрів стану поверхневого шару досліджуваного зразка;

– аналіз і обробка результатів експерименту, формування журналу фізичних параметрів стану поверхневого шару зразка та побудова графічних залежностей.

2.7.2.1. Побудова геометричної тривимірної моделі ударної системи

На рис. 2.18 зображена об’ємна тривимірна модель деформуючого бойка з інструментом і досліджуваного зразка зі сталі SAE5140H (аналог сталь 40Х), створена в SolidWorks та імпортована в Abaqus. Для скорочення часу на математичну обробку поставленої задачі було прийнято рішення задавати параметри інструмента, як абсолютно жорсткого тіла, а зразок прямокутної форми для можливості використання стандартного типу скінчених елементів з бібліотеки. При створені сітки в модулі (mesh) вибрано плоский скінчений елемент типу Plane Stress. Для дослідження процесу хвильового навантаження контактуючу поверхню виокремлено та задано сітку з меншою стороною ребра скінченого елемента. Задано функцію відображення хвильових процесів на поверхні у масштабі 400%. На стадії Step 1 присвоєно умови навантаження деформуючим тілом (кулька з R_i = 1,5 мм) та увімкнено функцію не відображення інструмента при швидкості v_i = 0 м/с. Усі наступні кроки експерименту Step 1… Step 10 відпрацьовуються автоматично. Значення половини амплітуди переміщень заданих точок формуються у табличному вигляді в журналі реєстрації (додаток Б).

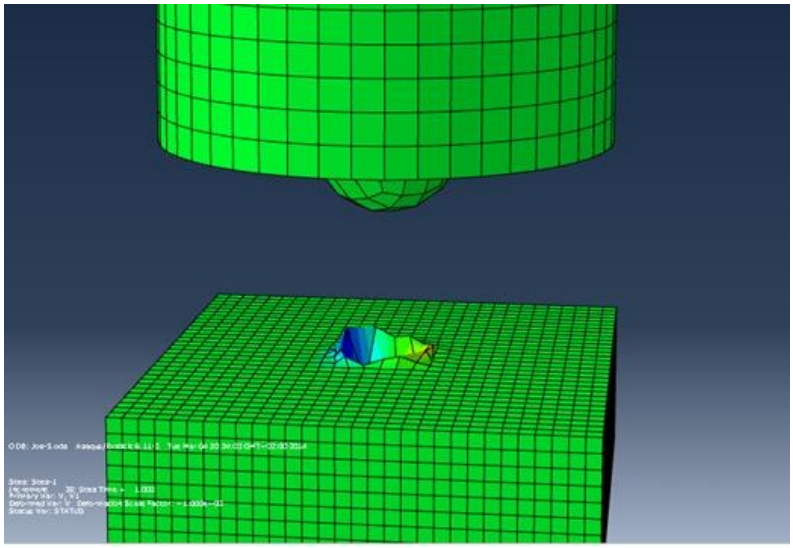


Рис. 2.18. Тривимірна модель ударної системи

На рис. 2.19 наведена спрощена імітаційна модель ударної системи. Падаючому тілу (деформуючий елемент) задано вихідні параметри бойка, що використовується в експерименті з використанням копра. А на рис. 2.20 наведена модель у розрізі по

головній площині інструмента і заготовки зі спрощеним абсолютно жорстким бойком та заданою площиною відгуку при ударному навантажені.

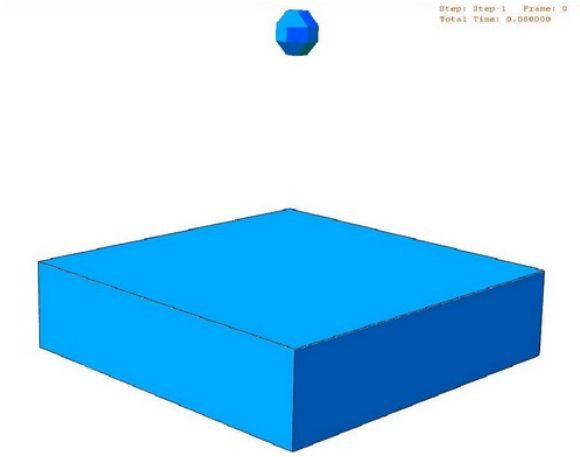


Рис. 2.19. Спрощена імітаційна модель ударної системи з абсолютно жорстким бойком

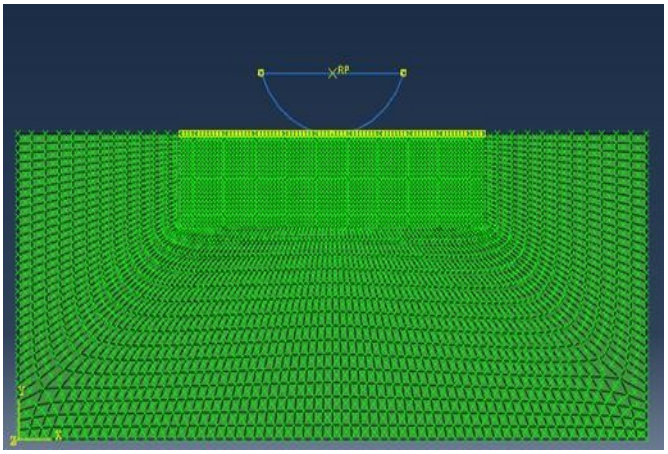


Рис. 2.20. Модель у розрізі по головній площині інструмента і заготовки з спрощеним абсолютно жорстким бойком

В результаті моделювання після розрахунку всіх кроків експерименту здійснюється вибір компонент для побудови графічних залежностей та формується журнал даних.

2.7.2.2. Визначення кінематичних параметрів для моделювання процесу зміцнення в умовах одиничного навантаження

До численних переваг програмного комплексу Abaqus відносять можливість моделювання кінематики як складних відносних рухів інструменту і заготовки при обробці, так і моделювання різних процесів. В даному випадку процес вільного падіння. Це дозволяє наглядно дослідити процес зміцнення поверхні досліджуваного зразка в часі і виконати поетапний аналіз формування характеристик процесу. Також з’являється можливість створення різних кроків розрахунку для варіювання вхідними даними.

Згідно з даними експериментальних досліджень приймаємо радіус деформуючого елемента (кулька) R_i = 1,5 мм, товщина досліджуваної поверхні зразка 3 мм, маса жорсткого тіла (інструмента) m = 0,45 кг.

Марку матеріалів задаємо з бібліотеки програмного комплексу Abaqus.

Матеріал зразка AISI 5140H, холодне деформування (аналог сталі 40Х ГОСТ 1050-88*). Тип об’єкту – пластичний.

Матеріал інструмента сталь AISI 10115 не деформований (аналог сталі ШХ 15 ГОСТ 1050-88*). Тип об’єкту – жорсткий.

При моделюванні експериментів висоту падіння задаємо з табл. 2.4.

Формуємо кінцево-елементну сітку для зразка і бойка з різних типів кінцевих елементів. Для чого розбиваємо зразок на 11800 елементів, в результаті чого формується 8650 вузлів і 5840 поверхневих багатогранників.

Задаємо прямолінійний рух бойка з визначеної висоти в напрямку власної осі. Тип руху – вільне падіння.

Деформуючий інструмент здійснює прямолінійний рух вільного падіння з заданої висоти в результаті чого досягає зміцнюваної поверхні з передударною швидкістю та енергією одиничного удару. Вихідні дані для моделювання умов падіння бойка зведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Вихідні дані для моделювання процесу експерименту

Енергія одиничного удару $W_{уд}$, Дж	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Відстань h, м	0,11	0,23	0,34	0,45	0,57	0,68	0,79	0,91
Перед ударна швидкість v, м/с	1,47	2,12	2,58	2,97	3,34	3,65	3,93	4,22

2.7.3. Тарування вимірювального комплексу

Одним із головних факторів, визначаючих характер процесу статико-імпульсного навантаження є форма ударного імпульсу. Тарування вимірювального датчика з метою визначення величини амплітуди ударного імпульсу проводилось наступним чином. На експериментальному стенді проводились дослідження за максимально наближеною схемою навантаження (рис. 2.21), яка реалізується при проведені комп'ютерного моделювання в Abaqus.

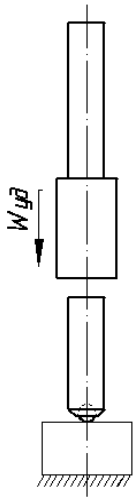


Рис. 2.21. Схема навантаження зразка при одиничному ударі

Експериментальні та комп'ютерні дослідження проводились за однакових початкових умов, при енергії удару $W_{уд}$ = 1Дж та $W_{уд}$ = 2,35Дж, а отримані графіки порівнювались. Для зручності експериментальні графіки імпортувались та оброблялись в графічному пакеті AvtoCad.

Суть запропонованого методу полягає в тому, що при комп'ютерних дослідженнях, при заданих значеннях енергії удару отримували форму імпульсу його тривалість, значення енергії в зоні деформації та діаметр пластичного відбитка. В ході комп'ютерного моделювання процесу зміцнення отримано контурний графік розподілу напружень за Мізісом (рис. 2.22) в момент зупинки інструмента після удару (v_i= 0 м/с), а на рис. 2.23 відгук хвильової (навантаженої) поверхні для одного із кроків експерименту.

На рис. 2.22 наочно показано як змінюється степінь деформації по товщині. Також варто відмітити, що даний графік відображає глибину залягання здеформованих шарів металу. По отриманим даним після розрахунку всіх кроків сформовано журнал даних (додаток Б) та побудовано графічні залежності максимального переміщення точок поверхні відгуку (рис. 2.23) від енергії одиничного удару, рис. 2.24.

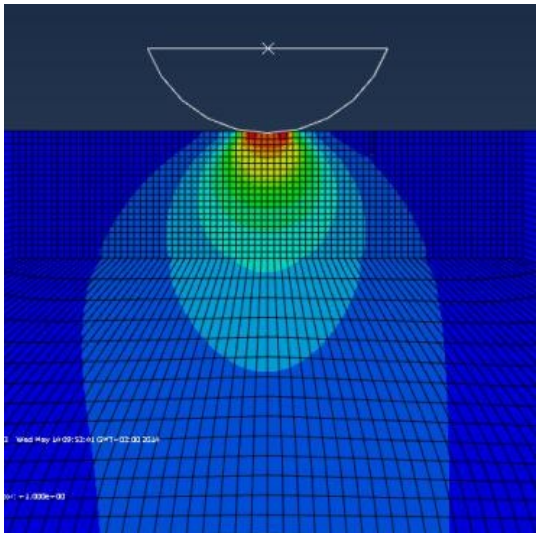


Рис. 2.22. Контурний графік розподілу напружень одиничного удару

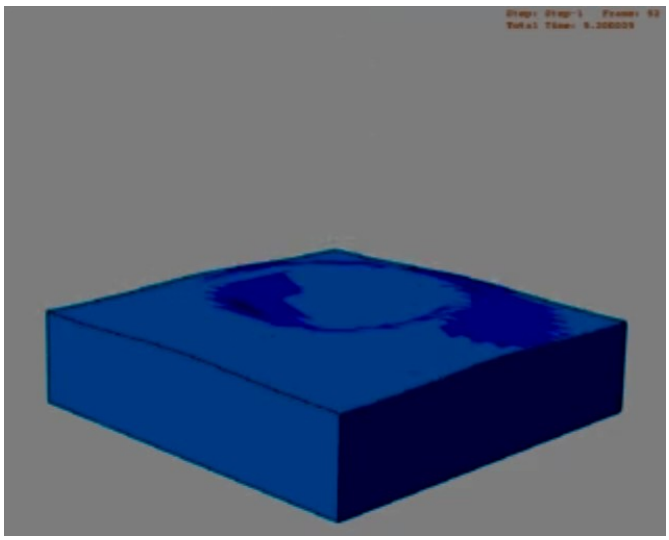


Рис. 2.23. Відгук хвильової (навантаженої) поверхні для одного із кроків експерименту

З графіка (рис. 2.24) видно, що величина переміщення точок поверхні відгуку не перевищує максимально-допустиме значення для вимірювального датчика $\Delta x \leq 0.15$ мм в умовах ударного навантаження з енергією удару до 4 Дж.

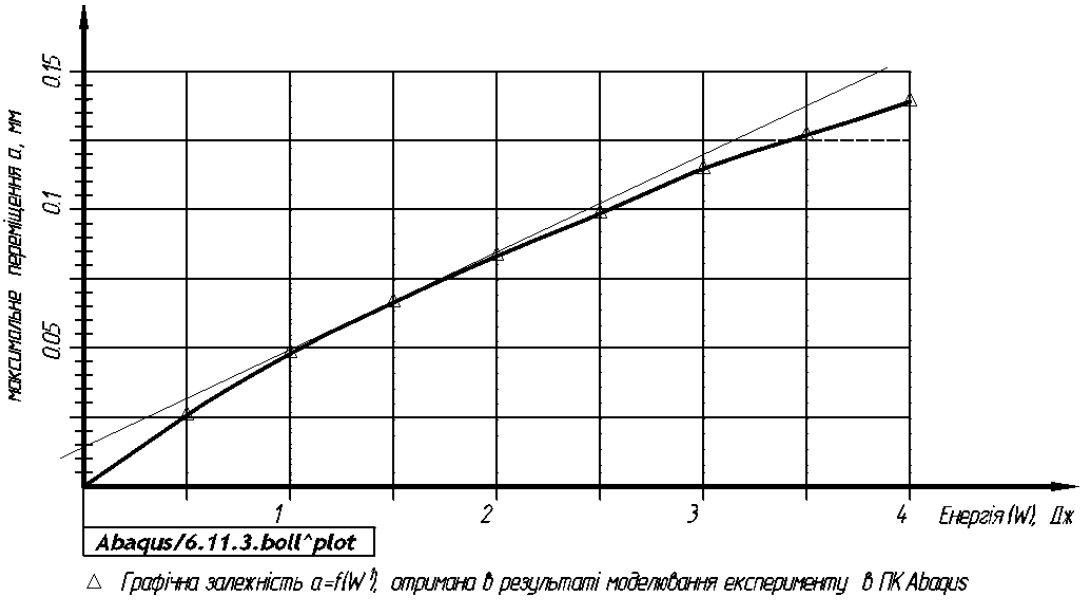


Рис. 2.24. Графічна залежність переміщення точок поверхні відгуку в залежності від енергії одиничного удару

Також побудовано графік енергії витраченої на деформацію для одного із кроків експерименту, рис. 2.25 (в даному випадку для умов з передударною енергією $W_{уд}$ = 1 Дж та радіусом ДЕ R_i = 1,5 мм). З графіка (рис. 2.25) видно, що при ударному навантаженні з енергією в 1 Дж ударна система забезпечує коефіцієнт використання енергії на рівні 75%. Ударний імпульс наростає миттєво і характеризується трикутною формою. Тривалість ударного імпульсу не перевищує 12 мкс.

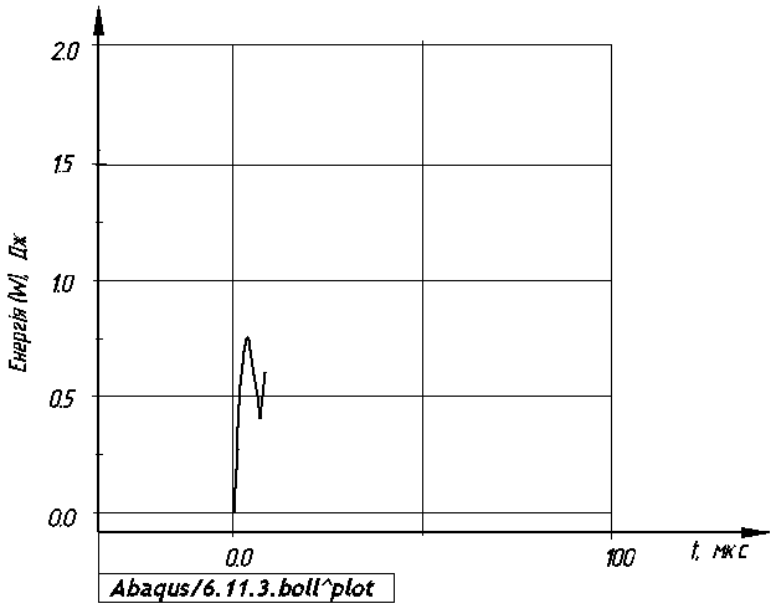


Рис. 2.25. Енергія ударної хвилі в зоні деформації

Експериментальні дослідження проводились за тих самих умов, отримували форму та тривалість імпульсу, діаметр пластичного відбитка, а амплітуді ударного імпульсу присвоювались значення одержані під час комп’ютерного моделювання. Так як відхилення значень діаметрів пластичних відбитків отриманих експериментально та в ході комп’ютерного моделювання не перевищували 8%.

Отримані графіки імпульсу в контакті інструмента з зразком оброблялись наступним чином. Весь імпульс рівномірно розбивався сіткою, після чого встановлювався часовий масштаб по осі абсцис n [с/мм] та по осі ординат k [Дж/мм]. Причому: $k=qW/H'$, де q – коефіцієнт масштабу зображення; H' – максимальне значення амплітуди, мм; $n= q\tau/L'$, де L' – умовний відрізок в мм для одиниці часу.

Для ударного імпульсу з передударною енергією $W_{уд}$ = 1 Дж (рис. 2.26, графік крива 1), енергія в зоні деформації складає 0,75 Дж, а коефіцієнт $k = qW/H'$ = = 1·0,75 Дж/22 мм = 0,034 Дж/мм, коефіцієнт $n = q\tau/L'$ = 1·100мкс/30мм=3,33мкс/мм. Знаючи масштабні коефіцієнти експериментального стенда можна дослідити параметри ударного імпульсу в зоні деформації при різних початкових умовах ударного навантаження.

Для графіка (рис. 2.26, крива 2), при початковій енергії удару 2,35 Дж – енергія в зоні деформації складає 1,7 Дж.

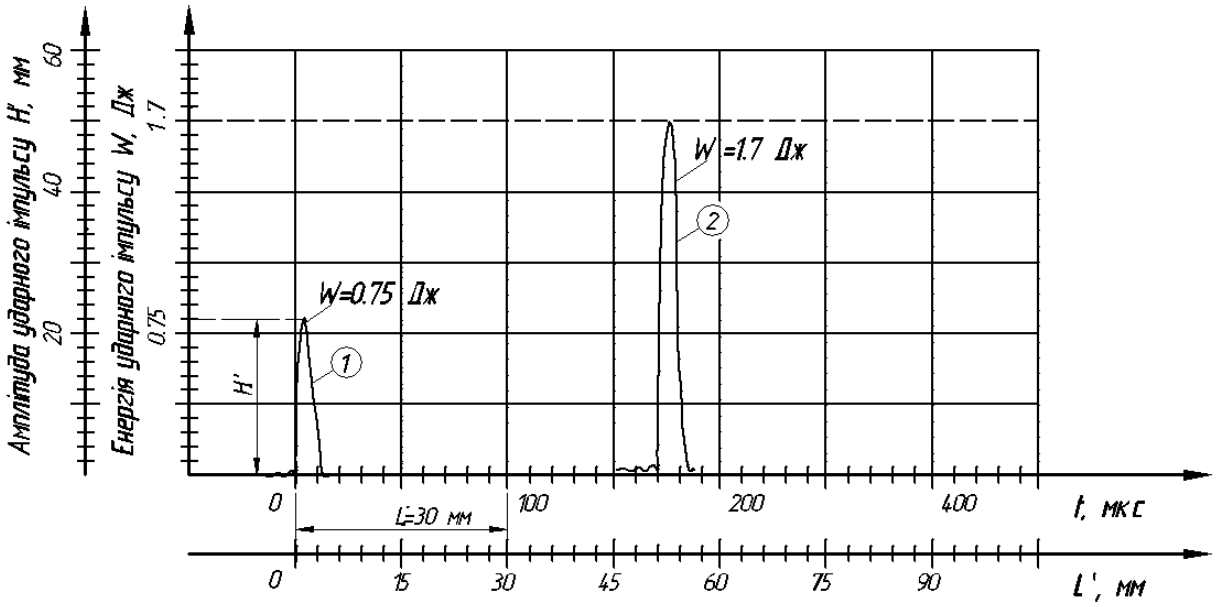


Рис. 2.26. Тарувальний графік ударного імпульсу

Отже знаючи перевідні масштабні коефіцієнти для експериментально-вимірювального комплексу можна оцінювати форму ударних імпульсів в зоні деформації, а також здатність до передачі енергії ударного імпульсу різноманітних типів ударних систем та інструментів (з деформуючими тілами різної форми).

2.8. Методологія моделювання параметрів процесу статико-імпульсного зміцнення методом планування факторного експерименту

Задача планування експерименту математично формулювалась наступним чином: необхідно отримати уяву про поверхню відгуку факторів, яку можна показати у вигляді функції або математичної моделі [124 – 127]:

$$M\{y\} = \eta = \varphi(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_k), \tag{2.35}$$

де y – залежний фактор (в нашому випадку HV – мікротвердість зміцненої поверхні); x_i – змінні фактори, від яких залежить відгук і які можливо змінювати під час експерименту (x_1 – значення енергії удару, x_2 – сила статичного навантаження бойка, x_3 – сила статичного навантаження інструмента). Відповідно задача зводиться до визначення залежності математичного очікування результату від параметрів процесу (факторів).

Математична модель необхідна для прогнозування напряму градієнта при русі по якому параметр збільшується швидше ніж в будь якому іншому напрямку. Діє припущення, що функція відгуку безперервна і має не більше одного екстремуму. При даних умовах з’являється можливість проводити пошук оптимуму, що ґрунтується на покроковому принципі. На основі випробувань будується математична модель, що використовується для оцінки градієнту, потім виконуються нові дослідження тільки в цьому напрямку.

В загальному випадку дослідження процесу виконувались при не повністю відомому механізмі явищ, що вивчались. Вид функції в цьому випадку невідомий, але для розв’язку екстремальних задач необхідно провести її апроксимацію. Точність, з якою степеневий ряд описує той або інший процес, залежить від порядку (степені) ряду. Представлення невідомої нам функції відгуку поліномом є найбільш зручним. Повний факторний експеримент реалізує всі можливі комбінації рівнів незалежних факторів, які повторюються, кожен з яких змінюється на двох рівнях. Число цих

комбінацій $N = 2^k$. Для трьох факторної задачі вибіркове рівняння регресії має вигляд [124, 125]:

$$\tilde{y} = M\{y\} = b_0 + \sum_{i=1} b_i x_i + \sum_{i,j} b_{i,j} x_i x_j + b_{123} x_1 x_2 x_3 \qquad (2.36)$$

Повний факторний експеримент дає можливість визначити роздільні оцінки коефіцієнтів *b*.

Знаходження моделі повного факторного експерименту (ПФЕ) складається з:

– планування експерименту;

– виконання експерименту;

– перевірки однорідності вибіркових дисперсій;

– отримання математичної моделі об’єкту з перевіркою статистичної значимості вибіркових коефіцієнтів регресії;

– перевірки адекватності математичного опису.

Використовуючи кодовані значення факторів (+1,−1), умови експерименту можна записати у вигляді таблиці або матриці планування експерименту, де ряди відповідають різним дослідам, а стовбці – значенням факторів. Матриця планування наведена в табл. 2.5. Стовбці x_1, x_2, x_3 створюють матрицю плану по яким безпосередньо визначаються умови дослідів.

Таблиця 2.5

Матриця планування експерименту $N = 2^3$

№	x_0	$x_1(2^0)$	$x_2(2^1)$	$x_3(2^2)$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1

Далі розміщують стовбці з можливими комбінаціями добутків факторів x_1x_2 , x_1x_3 , x_3x_2 , $x_1x_2x_3$, які дозволять оцінити ефекти від взаємодії факторів. Фіктивна змінна x_0 необхідна для оцінки вільного члена b_0. Значення x_0 у всіх стрічках однакове і дорівнює +1. Кількість незалежних факторів $r = 3$, а кількість точок плану $n = 8$.

Поставимо задачу визначення залежності мікротвердості зміцненої зони від таких параметрів СІЗ як: величина енергії удару, сила статичного навантаження інструмента та сила статичного навантаження бойка.

В якості математичної моделі приймаємо неповну кубічну функцію [126]:

$$M\{y\} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (2.37)$$

Для отримання оцінок коефіцієнтів даного рівняння використаємо повний факторний експеримент типу 2^3.

Результатом ПФЕ є отримання залежності зміни мікротвердості зміцненої зони від технологічних параметрів у вигляді рівняння (2.32).

Ортогональність матриці планування дозволяє спростити розрахунок коефіцієнтів регресії, що є одною з переваг такого планування експерименту.

Середнє значення в кожній точці плану розраховується за формулою:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j+1}^{m} \tilde{y}_{ij}}{m}, \quad (2.38)$$

де m – число паралельних дослідів; $\tilde{y}_i$ – експериментальне значення; y_i – середнє значення відгуку (мікротвердості *Hv).*

Кожен експеримент несе в собі певну похибку досліду, для її зменшення проводять паралельні дослідження при тих же умовах.

Оцінку похибки за дисперсією визначають:

$$\sigma^2\{\tilde{y}_i\} = \frac{\sum_{j+1}^{m} (\tilde{y}_{ij} - y_i)^2}{m - 1}, \quad (2.39)$$

де m – число повторюваних дослідів в точках плану; y – відгук параметра мікротвердості.

Перевірка однорідності дисперсій виконується за допомогою статистичних критеріїв Фішера, Кохрена, Бартлента. Використання критерію Фішера при числі більше двох не ефективне, тому що в оцінці приймають участь лише найбільша і найменша дисперсії. Критерій Кохрена ефективний у випадках, коли число повторюваних дослідів у всіх точках плану однакове.

Скористаємося статистичним критерієм Кохрена – це відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій:

$$G_p = \frac{\max\left(\sigma^2\left\{\tilde{y}_i\right\}\right)}{\sum\limits_{i=1}^{N} \sigma^2\left\{\tilde{y}_i\right\}}, \tag{2.40}$$

Якщо експериментальне значення критерію Кохрена не перевищує критичного, то приймається гіпотеза про однорідність дисперсій. Звичайний регресійний аналіз заснований на наступних положеннях:

– результати спостереження $y_1, y_2, ..., y_n$ параметра відгуку в n точках факторного простору представляють собою незалежні, нормально розподіленні випадкові величини;

– дисперсія величини y не залежить від абсолютної величини y і значень факторів, тобто дисперсії в різних точках плану однакові;

– незалежні змінні (фактори) x_1, x_2, x_k задаються з не значною похибкою по відношенню повторюваності для цих факторів.

Перевірка значимості кожного коефіцієнта виконується по t – критерію Стьюдента. При ПФЕ інтервали для всіх коефіцієнтів рівні один одному.

Значення дисперсії (відтворюваності) розраховується за формулою:

$$\sigma_в^2 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} \sigma^2\left\{\tilde{y}_i\right\}}{N}, \tag{2.41}$$

Перевірка гіпотези статистичної значимості коефіцієнтів проводиться наступним чином:

– розраховують середнє квадратичне відхилення коефіцієнтів:

$$\sigma\ \{b_k\} = \sqrt{\frac{\sigma_в^2}{Nm}}, \tag{2.42}$$

де N– число точок плану; m – число повторюваних дослідів в точках плану.

– розраховують критерій Стьюдента для кожного коефіцієнта:

$$t_k = \frac{|b_k|}{\sigma\ \{b_k\}}, \tag{2.43}$$

де t_k – розрахункове значення критерію Стьюдента, а t_t – табличне.

Якщо $t_k \lhd t_t$ то гіпотеза статистичної значимості коефіцієнтів відхиляється, а коефіцієнт виключають з математичної моделі.

Після врахування значень критерію Стьюдента математична модель об’єкта визначається у вигляді рівняння зв’язку вихідного параметра у при змінних x_i, яка складається тільки із значимими коефіцієнтами.

Статистична не значимість коефіцієнта b_i може бути обумовлена наступними причинами:

– рівень базового режиму наближений до екстремуму по змінній x_i;

– крок варіювання обраний занадто малим;

– дана змінна (добуток змінних) не має функціонального зв’язку з параметром y;

– велика похибка експерименту внаслідок наявності некерованих змінних.

Якщо має місце перша або третя причина, значення фактору фіксується на визначеному рівні, в другому випадку, необхідно збільшити інтервал варіювання. При наявності четвертої причини, необхідно вжити заходи, що до зменшення похибки експериментів.

Не значимість коефіцієнтів, що оцінюють взаємодію, обумовлюється відсутністю цих ефектів. Чим більше абсолютне значення коефіцієнта регресії b_i, тим більший його

вплив на критерій оптимізації в заданому інтервалі варіювання факторів. Якщо коефіцієнт при змішаному добутку факторів, наприклад b_{ij} виявляється значимим, то це свідчить про те, що дія одного з цих факторів, наприклад x_i, залежить від рівня на якому знаходиться інший фактор x_j.

Для того щоб перевірити гіпотезу про адекватність результатів експерименту, достатньо оцінити відхилення, обумовлене рівнянням регресії вихідної величини у від результатів експерименту в різних точках факторного простору.

Розсіювання результатів експерименту відносно рівняння зв'язку, що апроксимує шукану функціональну залежність, можна характеризувати за допомогою дисперсії адекватності $\sigma^2_{ад}$, оцінка якої визначається за формулою:

$$\sigma^2_{ад} = \frac{m}{N\text{-}L} \sum \left(y_i - \hat{y}_i \right)^2, \tag{2.44}$$

де L – число значимих коефіцієнтів математичної моделі $N - L$ число степені волі плану.

Перевірка адекватності складається з визначення співвідношення між дисперсією адекватності $\sigma^2_{ад}$ і дисперсії відтворюваності σ^2 {y}. Перевірка гіпотези про адекватність моделі проводилась з використанням F – критерію Фішера.

Критерій Фішера дозволяє перевірити нуль – гіпотезу про рівність двох генеральних дисперсій $\sigma^2_{ад}$ і σ^2 {y} в тому випадку, якщо критерій F формується як відношення:

$$F_p = \frac{\sigma^2_{ад}}{\sigma^2_{в}}, \tag{2.45}$$

Якщо $F_p \lhd F_T$ то гіпотеза про адекватність математичної моделі приймається. В іншому випадку гіпотеза відхиляється.

Перевірка адекватності можлива лише при $f_{ад} > 0$. Якщо число точок в плані рівне числу оцінюваних коефіцієнтів регресії рівняння зв'язку ($n = m$), то відповідно,

не залишається ступенів волі $f_{ад} = 0$ для перевірки нуля гіпотези. В цьому випадку, можна скористатись тим, що вільний член це спільна оцінка, тобто:

$$b_0 \rightarrow b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i. \tag{2.46}$$

Якщо наявні повторювані досліди в центрі планування, тобто в точці з координатами (0,0,0,...,0), то середній відгук дає незміщену оцінку $\bar{y}_0 \rightarrow b_0$. Тому, якщо різниця $(b_0 - \bar{y}_0)$ виявиться статично значимою, то це буде вказувати на неадекватність лінійної моделі. Якщо деякі коефіцієнти регресії виявились не значимими або ними можна знехтувати (занадто малі величини) тоді необхідно довести правомірність лінійної апроксимації в заданому інтервалі варіювання. В такому випадку число членів рівняння, що перевіряється буде менше ніж число точок в плані і один або декілька ступенів свободи залишаться для перевірки гіпотези адекватності.

2.9. Методика та устаткування для проведення експериментальних досліджень біполярного статико-імпульсного зміцнення неповних сферичних поверхонь

Для перевірки адекватності висунутих положень по біполярному СІЗ НСП, було виготовлено експериментальне устаткування [110], (рис. 2.27) яке встановлювалась на напрямні токарно-гвинторізного верстата мод. ІТ1-М.

Устаткування для зміцнення НСП містить корпус (закріплений нерухомо на станині) генератор механічних імпульсів з ударною системою та поворотний пристрій для закріплення заготовки кульового пальця з індивідуальним приводом. Даний пристрій забезпечує статико-імпульсне навантаження на сферичну поверхню заготовки кульового пальця, яка обертається відносно власної осі з частотою $n_з$ та отримує додаткове переміщення на кут φ відносно центра НСП. Кутове переміщення

поворотного столу забезпечується за допомогою рейкового механізму який кінематично зв’язаний з супортом верстата.

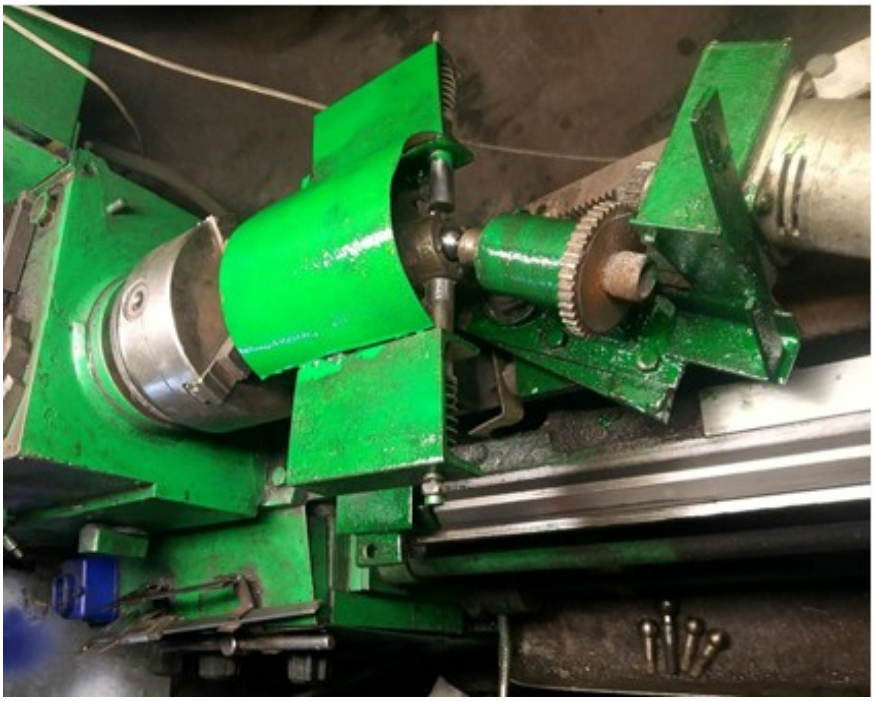


Рис. 2.27. Загальний вигляд експериментального устаткування

Крутний момент на вал ротора ГМІ передається від шпинделя верстата в результаті чого забезпечується біполярне статико-імпульсне навантаження на НСП. Енергія ударної хвилі через інструмент передається в зону деформації в результаті на поверхні утворюються пластичні відбитки, а заготовка провертається з певним кроком (в двох взаємно перпендикулярних площинах). В процесі обробки бойки генератора імпульсів взводиться, розганяється і завдають одночасно чергові удари з діаметрально протилежних сторін по інструментам, формуючи на поверхні деталі пластичні відбитки сукупність яких формує зміцнений поверхневий шар з коефіцієнтом перекриття *К*.

Технологічними параметрами СІЗ для розробленої установки є енергія і частота ударів ГМІ, частота обертання інструмента та заготовки, кутова подача, статичне навантаження та коефіцієнт перекриття. Технічні характеристики установки для СІЗ наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Технічні характеристики експериментальної установки

Технічні характеристики установки для біполярного СІЗ	
Частота обертання інструмента n_i, хв.$^{-1}$	12,5 – 630
Енергія одиничного удару $W_{уд}$, Дж	до 4
Сила статичного навантаження бойка $F_{ст1}$, Н	до 200
Сила статичного навантаження інструмента $F_{стi}$, Н	до 80
Радіус деформуючого елемента R_i, мм	до 3
Діаметр оброблюваних сферичних поверхонь, мм	22 – 27
Частота обертання заготовки $n_з$, хв.$^{-1}$	до 63
Кут хитання поворотного столу α	42°
Потужність двигуна верстата, кВт	3,5
Габаритні розміри установки, мм	670х980х 1980
Маса загальна, кг	1700

Для досліджень використовували пальці СШ виготовлені зі сталі 40Х з діаметром сфери 25 мм. Зразки зміцнювали з коефіцієнтами перекриття: $K = 0$; $K = 0{,}3$, $K = 0{,}5$; $K = 0{,}7$; $K = 0{,}9$.

У відповідності до заданого коефіцієнта перекриття технологічні параметри обробки розраховувались за побудованими математичними залежностями.

2.10. Методика дослідження механічних властивостей зразків зі сталі 40Х на розтяг

Дослідження механічних властивостей матеріалу проводилось на спеціальній машині моделі УМ-5, яка створює монотонно-зростаюче навантаження на досліджуваний зразок та здійснює реєстрацію величини діючої сили і його деформації. Для дослідження використовувались спеціальні зразки з робочою

довжиною l_0 =100 мм квадратного перетину (рис. 2.28) зміцнені з різними значеннями коефіцієнта перекриття K при наступних технологічних параметрах: (енергія $W_{уд}$ = 2,25 Дж; інструмент кулька, $R_і$ = 1,5 мм; статичне навантаження інструмента F_{cmi} = 60 Н; статичне навантаження бойка F_{cm1} = 120 Н.

Основні властивості матеріалу визначають з діаграми розтягу, яка будується в координатах F – $\Delta\ell$ за допомогою самописного пристрою на випробувальній машині. Типовий вид діаграми розтягу маловуглецевої сталі Ст3 наведено на рис. 2.29.

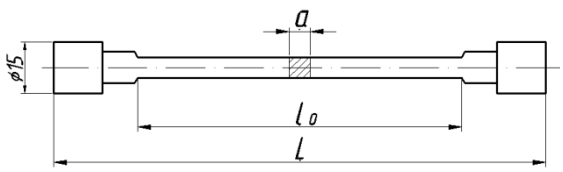


Рис. 2.28. Ескіз експериментального зразка

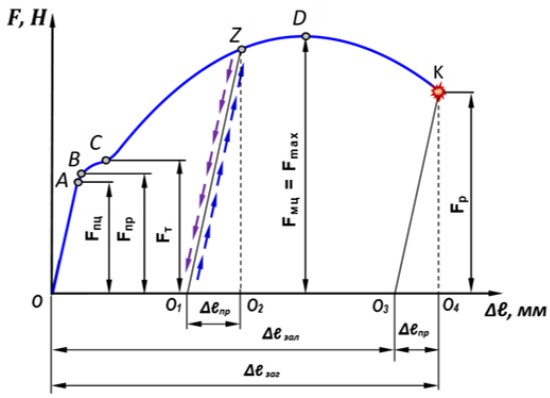


Рис. 2.29. Діаграма розтягу маловуглецевої сталі Ст3

Діаграма складається з ряду характерних ділянок і точок які характеризують різні стадії деформування зразка. Точка А характеризує найбільше допустиме навантаження $F_{пц}$ до якого виконується лінійна залежність між навантаженням та видовженням зразка. Точка В відповідає найбільшому навантаженню $F_{пр}$ при якому зразок зберігає пружні властивості. Точка С відповідає навантаженню $F_т$ зразок деформується без зростання навантаження. Точка D відповідає максимальному навантаженню F_{max} після якої починається місцеве звуження зразка у вигляді шийки. Точка К відповідає навантаженню F_K при якому зразок руйнується.

Використовуючи значення навантажень в характерних точках діаграми і знаючи площу поперечного перетину зразка A_0 визначаємо основні характеристики міцності матеріалу:

– межа пропорційності

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}, \tag{2.47}$$

– межа пружності

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{уп}}}{A_0}, \tag{2.48}$$

– межа текучості

$$\sigma_{\tau} = \frac{F_{\tau}}{A_0}, \tag{2.49}$$

– межа міцності

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{F_{\tau}}{A_0}, \tag{2.50}$$

– напруження в момент розриву

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{F_{K}}{A_0}. \tag{2.51}$$

Для матеріалів, діаграма розтягу яких не має чітко вираженої ділянки текучості, межу текучості умовно визначають як напруження при якому величина залишкової деформації складає 0,2 % від розрахункової довжини зразка, а умовну межу текучості позначають як $\sigma_{0.2}$.

При випробувані зразків на розтяг також визначають характеристики пластичності:

– відносне видовження після руйнування

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} 100\%, \tag{2.52}$$

– відносне звуження після руйнування

$$\psi = \frac{\Delta A_0}{A_0} 100\%, \tag{2.53}$$

де ΔA_0 – зменшення площі поперечного перерізу в місці розриву

$$\Delta A_0 = A_0 - A_{\min} \tag{2.54}$$

Оскільки діаграма розтягу характеризує не лише властивості матеріалу, а й розміри зразка, то її прийнято перебудовувати в системі відносних координат σ - ε яку називають діаграмою напружень.

2.11. Методика дослідження працездатності пальців сферичних шарнірів

Для оцінки працездатності зміцненого пальця проводились порівняльні дослідження за критерієм зносостійкості, за відомою методикою «сфера-фаска» [128]. Випробування проводились на експериментальній установці в режимі зворотно-обертового руху, який моделює відносні переміщення деталей шарніра під час експлуатації.

Схема експериментальних випробовувань наведена на рис. 2.30.

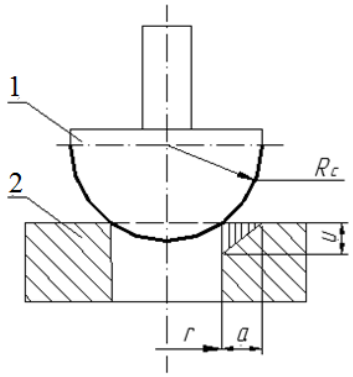


Рис. 2.30. Схема експериментальних випробовувань зразків на зношування: 1 – деталь з НСП; 2 – полімерна втулка

Для досліджень застосовувались кульові пальці зі сталі 40Х з діаметром сфери 25 мм, зміцнені з коефіцієнтом перекриття K = 0,9 та зміцнений обкочуванням. Вимірювання фаски здійснювалось за допомогою інструментального мікроскопа в трьох рівномірно діаметрально віддалених точках.

Полімерний зразок виготовлено у вигляді втулки з діаметром отвору $d_{отв}$ = 17 мм, висотою h = 20 мм та зовнішнім діаметром D = 35 мм. Матеріал полімерного зразка – капролон Б. Осьове навантаження F = 350 Н, частота обертання пальця $n_з$ = 50 об/хв. Для змащування використовувалось мастило ШРБ-4.

Шлях тертя визначається за формулою:

$$S = \pi d_{отв} n_з t, \tag{2.55}$$

де S – шлях тертя; $d_{отв}$ – внутрішній діаметр втулки; $n_з$ – частота обертання заготовки; t – час тертя.

Висновки до другого розділу

1. Описана загальна методологія роботи, що здійснюється на базі застосування системного підходу до вирішення поставленої наукової задачі, яка передбачає теоретичні та експериментальні дослідження, комп'ютерне моделювання, аналіз і формування множини стратегій вибору оптимальних параметрів процесу зміцнення, які використовуються при проектуванні технологічного устаткування.

2. Наведено методику початкових досліджень оптимального енергетичного діапазону, величини зусилля статичного навантаження інструменту на процес зміцнення та взаємозв'язок між величинами радіуса сфери деформуючого елемента і енергією одиничного удару.

3. Розглянуто теоретичні передумови перебігу хвильових процесів в ударній системі.

4. Розроблено методики зміцнення пальців на експериментальній установці та оцінки працездатності.

РОЗДІЛ 3
ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ

3.1. Дослідження впливу енергії одиничного удару на поверхневу твердість зміцненого шару

При зміцнені поверхневого шару пластичним деформуванням головним параметром є енергія одиничного удару $W_{уд}$, величина якої визначає глибину залягання деформації та градієнт мікротвердості. Основними показниками, що характеризують деформаційне зміцнення є степінь та глибина наклепу. Із збільшенням енергії одиничного удару зростають до певного рівня степінь деформування та твердість зміцненого поверхневого шару, що в свою чергу визначає його фізико-механічні властивості.

Величина енергії одиничного удару повинна знаходитись в певних межах, так як при малій енергії забезпечується початок пластичного деформування мікрооб'ємів поверхневого шару з малим ступенем зміцнення, а при збільшені енергії до критичної процес зміцнення супроводжується перенаклепом (злущування тонких шарів металу). Оскільки регламентована величина максимально-допустимого зносу для СШ складає a = 0,7 мм (на діаметр), то глибина зміцненого поверхневого шару з заданими фізико-механічними властивостями може знаходитись в межах максимально-допустимого зносу. В зв'язку з цим проводяться дослідження впливу енергії одиничного удару на поверхневу твердість та глибину зміцненого шару.

Дослідним шляхом встановлено зміну мікротвердості в залежності від енергії одиничного удару. Одержані експериментальні значення мікротвердості в центрі пластичного відбитка H_y, при відповідних значеннях енергії одиничного удару та радіуса ДЕ R_i = 1 мм зведені в табл.3.1.

Таблиця 3.1

Експериментальні значення мікротвердості H_y, в залежності від енергії одиничного удару, при R_i = 1 мм (Сталь 40Х)

Ступінь зміцнення	HV_0^{100}	$W_{уд}$, Дж					
		0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
		HV^{100}	HV^{100}	HV^{100}	HV^{100}	HV^{100}	HV^{100}
	312	321	337	380	429	442	450
ΔHV^{100},%	-	2,85	8,01	21,8	37,5	41,67	44,22

По одержаним значенням мікротвердості побудовано графічну залежність виду: $HV^{100}=f(W_{уд})$, (рис. 3.1).

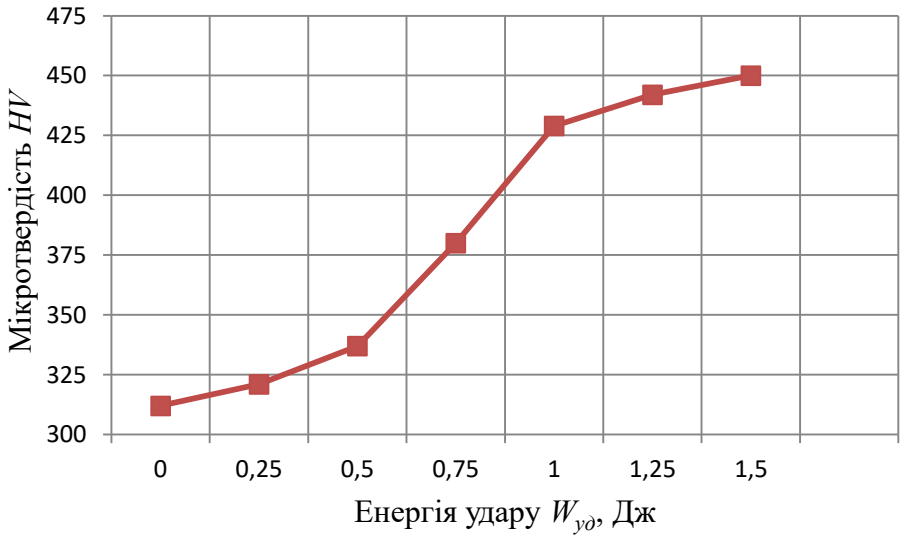


Рис. 3.1. Графік залежності зміни мікротвердості від енергії одиничного удару

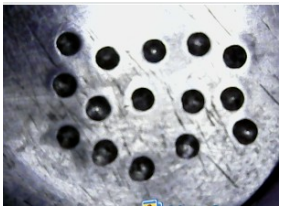
З графіка видно, що в енергетичному діапазоні $0,5 \leq W_{уд} \leq 1,5$ Дж спостерігається стрімке зростання мікротвердості. Подальше збільшення енергії удару призводить до надмірних напливів навколо пластичного відбитка і в меншій мірі впливає на зростання мікротвердості.

3.2. Дослідження впливу величини статичного навантаження інструмента на поверхневу твердість та діаметр пластичного відбитка

Під час ударного навантаження поверхневий шар зразка пластично деформується, в результаті змінюється мікротвердість та формується пластичний відбиток діаметром $d_в$ і глибиною $h_в$, рис. 3.2.

$W_{уд}$=1,5 Дж

F_{cmi} = 0 – 80 Н



$W_{уд}$ = 2,5 Дж

F_{cmi}= 0 – 80 Н

Рис. 3.2. Фотознімки експериментальних зразків

Дослідним шляхом встановлено характер зміни величини діаметра пластичного відбитка в залежності від величини статичного навантаження.

Результати експериментальних досліджень зведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Результати експериментальних досліджень

R_i, мм	2,35									
$W_{уд}$, Дж	1,5					2,5				
F_{cmi}, Н	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80
$d_в$, мм	1,73	1,87	1,95	1,965	1,97	2,115	2,23	2,27	2,275	2,28

По отриманим експериментальним даним побудовані графіки залежності зміни діаметра пластичного відбитка від величини статичного навантаження, при $W_{уд1}$, $W_{уд\,2}$ – const, які наведені на рис. 3.3.

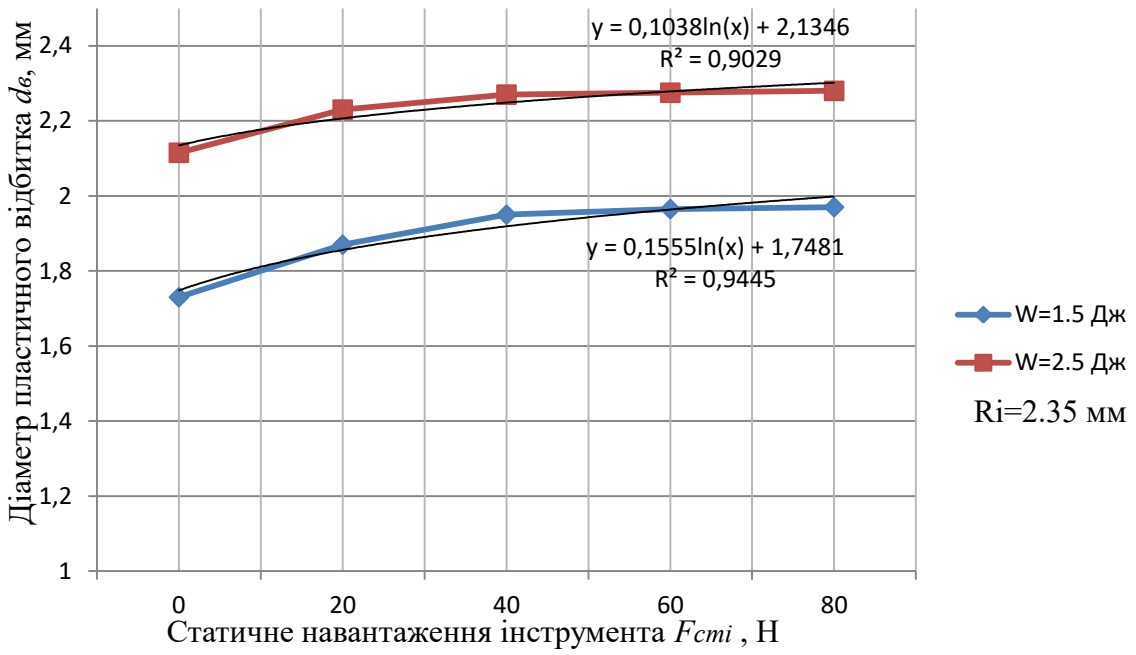


Рис. 3.3. Залежності діаметра пластичного відбитка від величини статичного навантаження інструмента

Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що при енергії удару ($W_{уд}$ = 1,5, $W_{уд}$ = 2,35 Дж) та статичному навантаженні інструмента в межах F_{cmi} = 20 – 60 Н спостерігається зростання діаметра пластичного відбитка. Подальше збільшення величини статичного навантаження (наприклад F_{cmi} = 80 Н) в меншій мірі впливає на процес передачі енергії.

Також під час проведення експериментів було помічено, що в момент удару бойок ударним торцем досягав вільного торця інструмента і після зіткнення змінював напрямок вектора швидкості руху на протилежний, відскакуючи на певну висоту і володіючи деякою частиною енергії, яка після роз’єднання ударних торців не приймає участі в процесі хвильового деформування і вільно затухає в ньому.

Факт перерозподілу і перетворення кінетичної та потенціальної енергії при ударі в ударній системі також був зафіксований в роботах [87, 88] під час досліджень, які були спрямовані на пошуки шляхів з підвищення ефективності використання енергії удару при зменшені маси тіл ударної системи.

3.3. Дослідження взаємозв'язку між величинами радіуса сфери деформуючого елемента та енергією одиничного удару

Як показує досвід в процесах динамічного зміцнення поверхневого шару деталей машин, в якості деформуючого інструмента застосовуються тіла переважно сферичної форми (наприклад дріб при дробоструменевій обробці, кульки при гідроструменевій, відцентровій, віброударній, карбувальній обробці) з радіусами R_i = 1 – 5 мм. В залежності від фізико-механічних властивостей матеріалів інструмента та заготовки, а також від бажаної глибини, текстури і ступеня зміцнення, призначають режими обробки та радіус ДЕ, які визначають енергоємність процесу зміцнення. Для визначення необхідної енергії одиничного ударного навантаження при використанні ДЕ певного радіуса, за умови забезпечення заданої мікротвердості можна скористатись припущенням про незмінність інтенсивності деформаційної хвилі (залежність 2.6).

Під час досліджень зразки піддавались ударному навантаженню сферичними деформуючими тілами з радіусами сфери R_i = 1 – 4 мм та відповідною енергією удару, в результаті чого на поверхні формувались відбитки. Вимірювання мікротвердості проводилось в центрі пластичного відбитка. Результати досліджень зведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Результати експериментальних досліджень

Радіус ДЕ R_i, мм	1	1,5	2,35	3,97
Енергія удару $W_{уд}$, дж	1	2,25	5,5	16
Мікротвердість HV^{100}	429	429	416	416
	429	416	429	416
	429	429	416	416
Середнє значення $HV_{сер}$	429	424,7	420,3	416
Відносне відхилення ΔHV^{100},%	-	1	2.1	3

Аналіз результатів експериментальних досліджень підтвердив адекватність отриманої залежності (2.6) так як значення відносної похибки ΔHV лежать в межах 3–5 %.

3.4. Дослідження параметрів ударного імпульсу в зоні деформації при поверхнево-пластичному зміцненні

При зміцнені поверхневого шару пластичним деформуванням головним параметром є енергія одиничного удару $W_{уд}$, величина якої визначає глибину залягання деформації та градієнт мікротвердості. Із збільшенням енергії одиничного удару зростають до певного рівня степінь деформування, твердість та глибина зміцненого поверхневого шару, що в свою чергу визначає його фізико-механічні властивості.

Величина енергії одиничного удару повинна знаходитись в певних межах, так як при малій енергії забезпечується початок пластичного деформування мікрооб'ємів поверхневого шару з малим ступенем зміцнення, а при збільшені енергії до критичної, відбувається процес перенаклепу (злущування тонких шарів металу).

Фізико-механічні властивості зміцненого поверхневого шару формуються під впливом багатьох факторів. Окрім енергії удару вагомими чинниками виступають схема навантаження поверхні та умови підведення енергії в зону деформації, кратність ударного навантаження, геометричні параметри ДЕ, параметри (форма) ударного імпульсу та його тривалість.

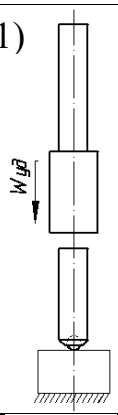
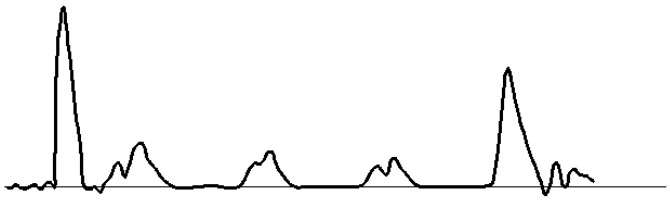
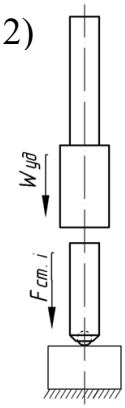
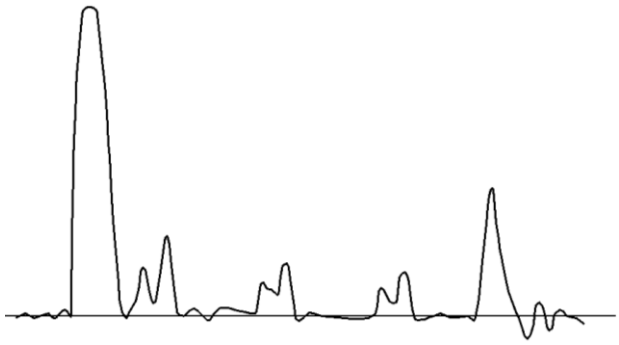
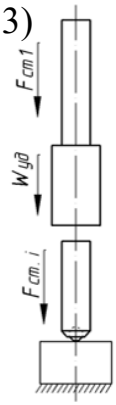
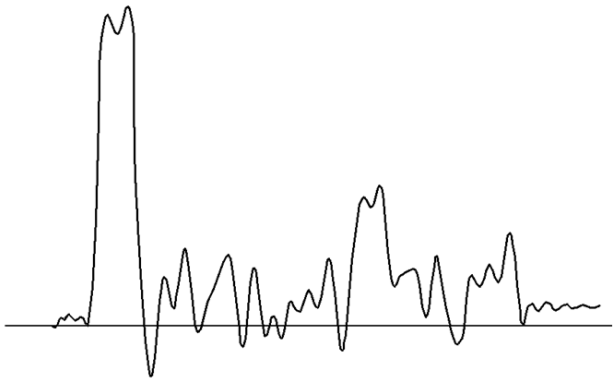
Теоретичні обґрунтування використання комбінованого статичного і динамічного навантаження при ППД вказують на підвищення коефіцієнта використання енергії (КВЕ) удару, продуктивності процесу обробки, а також розширення технологічних можливостей метода ППД.

Дослідження проводились в три етапи (без статичного навантаження, з статичним навантаженням інструмента F_{cmi} = 40 Н, з статичним навантаженням бойка та інструмента F_{cm1} =150 Н, F_{cmi} = 40 Н), при постійній енергії удару $W_{уд}$=2,35Дж. Матеріал зразка сталь 40Х, нормалізована до твердості HV^{100} = 313.

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Результати експериментальних досліджень

Початкові умови		Результати експериментальних досліджень		
Схема навантаження	Умови навантаження	Діаметр відбитка, мм	Мікротвердість, HV^{100}	Форма імпульсу
1) 	$W_{уд}$= 2,35 Дж; R_i=1,5 мм.	2,115	345	
2) 	$W_{уд}$= 2,35 Дж; F_{cmi} = 40 Н; R_i = 1,5 мм.	2,23	412	
3) 	$W_{уд}$= 2,35 Дж; F_{cmi} = 40 Н; F_{cm1} = 150 Н; R_i = 1,5 мм.	2,28	430	

Експериментальні графіки ударного імпульсу переносились в координати тарувального графіка після чого проводилась оцінка параметрів ударного імпульсу.

На рис. 3.4 наведено графік для схеми 2 (табл.3.4).

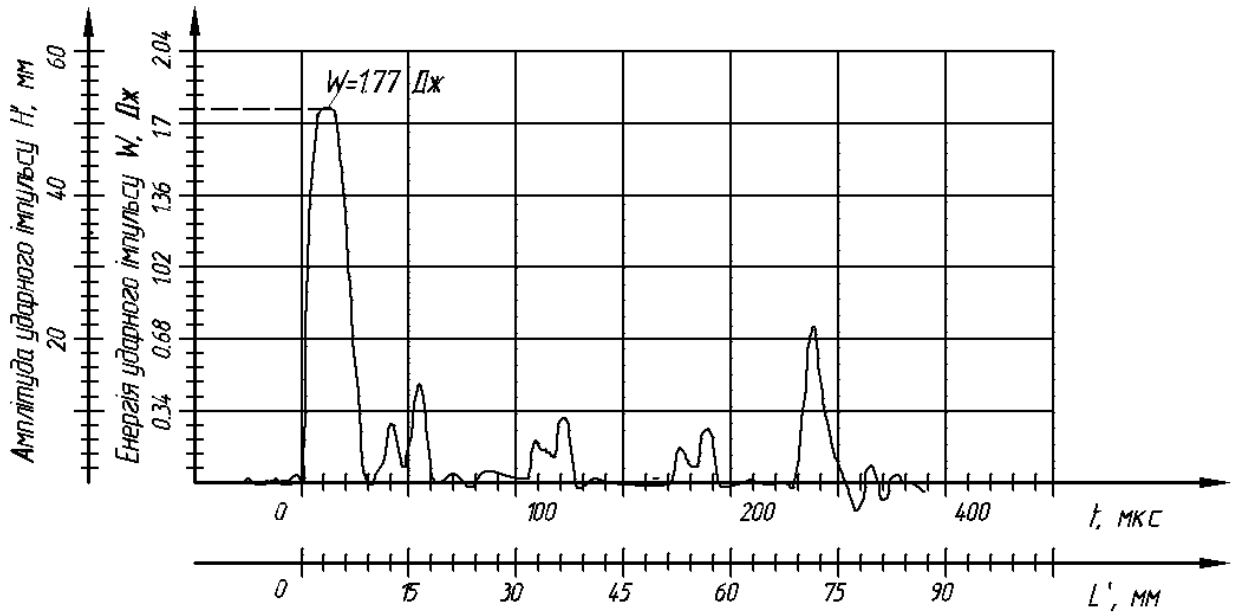


Рис. 3.4. Графік ударного імпульсу для умов:

$W_{уд}$ = 2,35 Дж; $F_{ст1}$ = 40 Н; R_i = 1,5 мм

При статичному навантаженні інструмента амплітуда ударного імпульсу зросла, а енергія в зоні деформації досягла значення W = 1,77 Дж. Також збільшилась тривалість ударного імпульсу. Спостерігається підвищення мікротвердості та діаметра пластичного відбитка.

Аналіз результатів експериментальних досліджень геометричних параметрів пластичного відбитка показав, що сприятливі умови передачі енергії удару ($W_{уд}$ = 1 – 5 Дж) через інструмент в заготовку створюються при статичному навантаженні інструмента $F_{стi}$ = 20 – 60 Н. Подальше збільшення величини статичного навантаження в меншій мірі впливає на процес передачі енергії.

Під час проведення експериментів було помічено, що в момент удару бойок ударним торцем досягав вільного торця інструмента і після зіткнення змінював напрямок вектора швидкості руху на протилежний відскакуючи на деяку висоту. Даний факт свідчить про неповне використання енергії удару так як в момент відскоку бойок володіє деякою частиною енергії, яка після роз'єднання ударних торців не приймає участі в процесі хвильового деформування і вільно затухає в ньому. Це підтверджується експериментальними графіками форми імпульсу. З графіків видно, що сили головного ударного імпульсу миттєво наростають та мають малу тривалість, а форма ударного імпульсу шпилеподібна (схема 1, 2 Табл.3.4). Після удару бойок під впливом відбитої хвилі підноситься на деяку висоту та здійснює наступний удар з меншою енергією, після чого спостерігається повне затухання ударної хвилі.

В зв'язку з цим виникає актуальне питання підвищення КВЕ та розширення технологічних можливостей ППД.

Для вирішення даної задачі в роботі запропоновано нове рішення яке дозволяє збільшити активний час удару та запобігає роз'єднанню ударних торців бойка, та інструмента і сприяє більш повному використанню енергії удару за рахунок статичного навантаження бойка (схема 3, табл.3.4), [129].

Оптимальні значення статичного навантаження для бойка ступінчатої форми, масою m = 0.35 кг визначались теоретично в залежності від величини енергії удару ($W_{уд}$ = 1 – 5 Дж) , перевірялись експериментально і лежать в межах $F_{ст1}$ = 80 – 300 Н.

В результаті дослідження ударної системи з ступінчатим бойком (при статико-імпульсному навантаженні) побудовано графік ударного імпульсу, рис. 3.5.

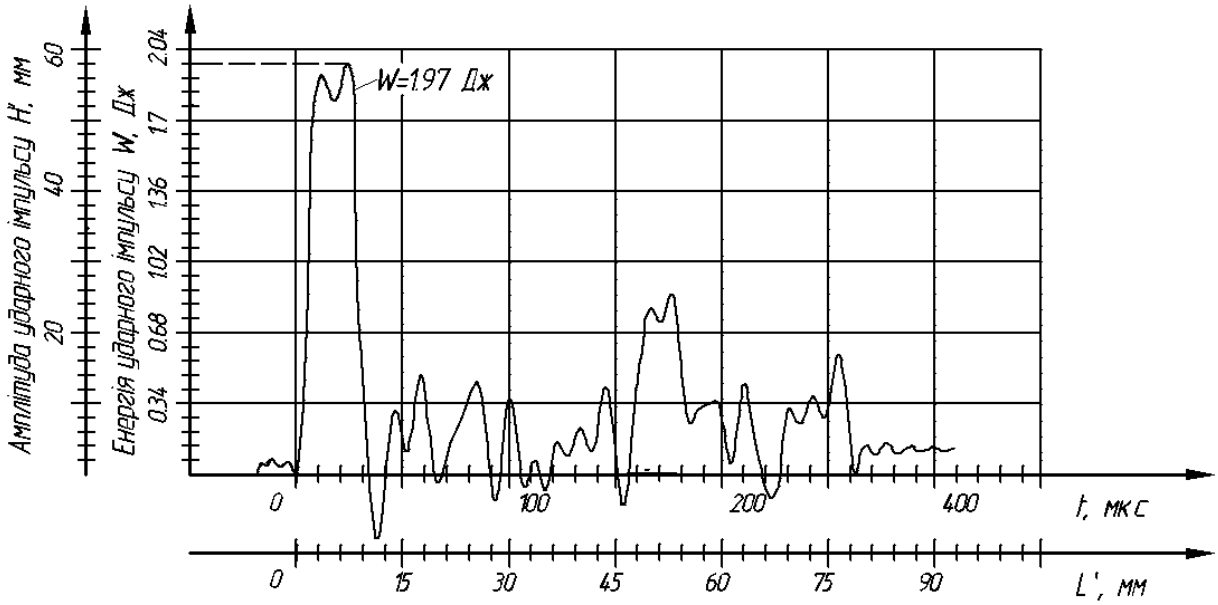


Рис. 3.5. Графік ударного імпульсу для схеми 3 (табл.3.4)

За такої схеми навантаження тривалість ударного імпульсу та амплітуда зростають. В ударній системі формується пролонгований ударний імпульс, який складається з основної та додаткової (хвостової) частини. Така форма імпульсу формується за рахунок рекуперації відбитих хвиль, геометричних співвідношень елементів ударної системи (зокрема ступінчастої форми бойка при співвідношенні довжин інструмента і бойка, як 1/3), а також оптимального статичного навантаження бойка та інструмента.

Дослідним шляхом встановлено вплив параметрів статичного навантаження на зміну мікротвердості. Результати експериментальних досліджень зведені в табл. 3.4 і відповідають середнім значенням за результатами трьох вимірювань.

По отриманим експериментальним даним побудовані діаграми які відображають вплив статичного навантаження бойка та інструмента на мікротвердість зміцненого шару зразка, рис. 3.6.

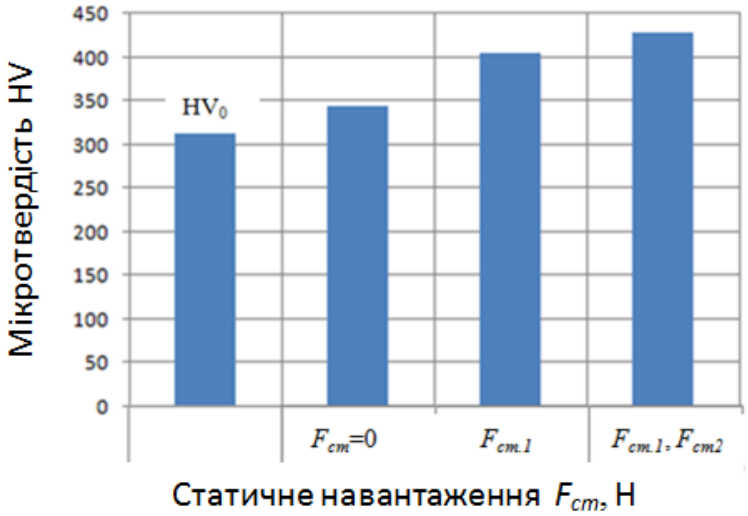


Рис. 3.6. Графічне відображення впливу статичного навантаження бойка та інструмента на зміну мікротвердості поверхневого шару

Аналіз отриманих результатів показав, що схема з використанням статичного навантаження бойка та інструмента при однаковій енергії удару забезпечує підвищення мікротвердості до 20% у порівняні з традиційною схемою обробки (без статичного навантаження), що вказує на зростання коефіцієнта використання енергії удару.

Проведено дослідження коефіцієнта корисної дії (ККД) ударної системи в залежності від геометричних та акустичних властивостей ударної системи та умов навантаження. Встановлено, що кращий результат (η = 83%) зафіксовано для схеми 3. Найменше значення ККД відповідає схемі 1 (η = 74%).

3.5. Дослідження енергетичних параметрів процесу статико-імпульсного зміцнення математичним плануванням експерименту

За критерій зміцнення при відпрацюванні технологічних параметрів процесу СІЗ приймалось збільшення мікротвердості, яке контролювалось на зміцнених ділянках. При досліджені найбільш впливових технологічних параметрів процесу СІЗ були прийняті: значення енергії удару, сили статичного навантаження бойка та сили статичного навантаження інструмента, табл. 3.5.

Для встановлення оптимальних значень вказаних параметрів за критерієм максимальної мікротвердості зміцненого шару був використаний метод математичного планування експерименту, методика якого наведена в другому розділі (пункт 2.8).

При реалізації методу планування експерименту для отримання коефіцієнтів рівняння регресії використаємо повний факторний експеримент типу $N = 2^3$. Основні рівні факторів прийнято близькими до тих, що використовуються на практиці, а інтервали варіювання прийнято виходячи з реальних границь коливань значень факторів (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні			Інтервал Δx_i	Розмірність
	+1	0 (головний)	-1		
x_1 – енергія удару, W	1,85	2,35	2,85	0,5	Дж
x_2 – статичне навантаження бойк F_{cm1}	100	150	200	50	Н
x_3 – статичне навантаження інструмента, F_{cmi}	20	40	60	20	Н

Мікротвердість зміцненої поверхні прийнято як функцію відгуку.

Згідно з матрицею планування, визначались значення мікротвердості зміцненої зони на поверхні зразків із сталі 40Х в залежності від технологічних параметрів СІЗ. В кожній точці факторного простору дослід повторювався тричі.

В результаті математичного моделювання отримано коефіцієнти регресії та побудовано регресійну модель виду:

$$y = 418{,}25 + 25{,}75x_1 + 5{,}75x_2 + 2{,}5x_3 - 2{,}5x_1x_2 \quad (3.1)$$

Розрахунки коефіцієнтів регресії та перевірка адекватності математичної моделі розглянуті в додатку В.

Аналіз даних експерименту та пошук оптимальних значень факторів при яких забезпечується максимальна мікротвердість проведено в програмному продукті Statistica 6.0, результати наведено на рис. 3.7– 3.9.

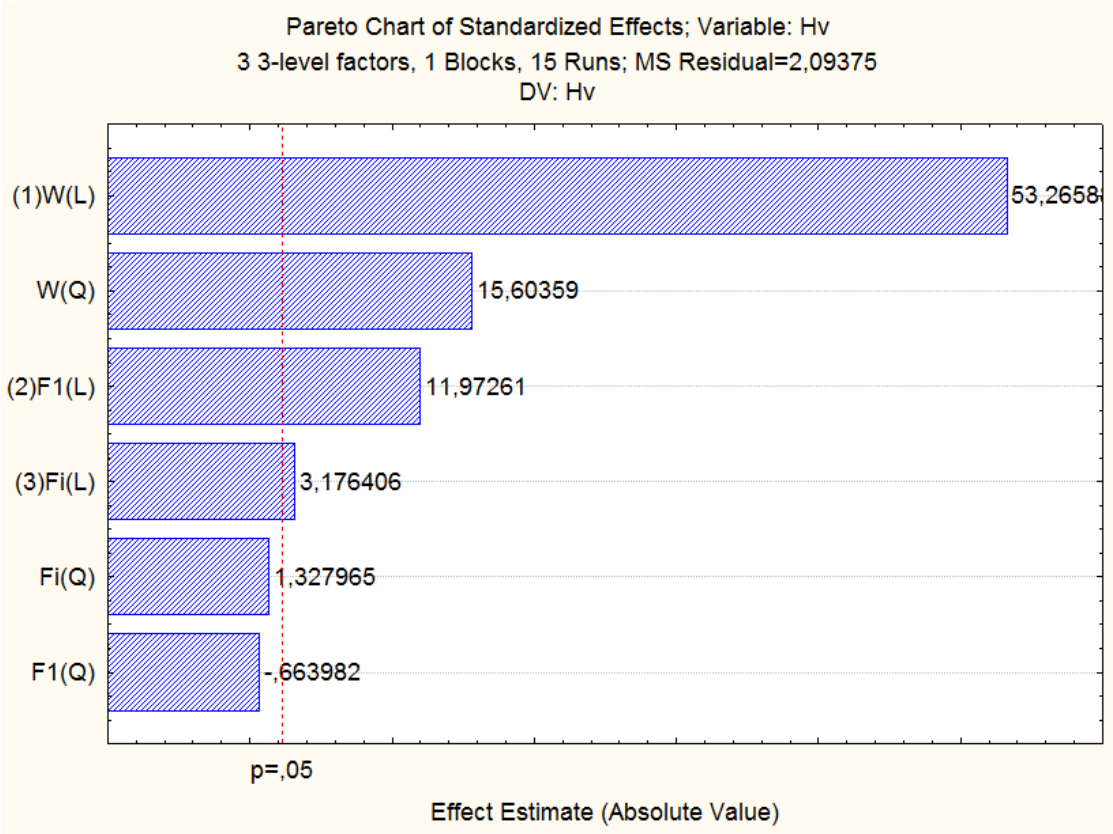


Рис. 3.7. Діаграма значимості коефіцієнтів регресії

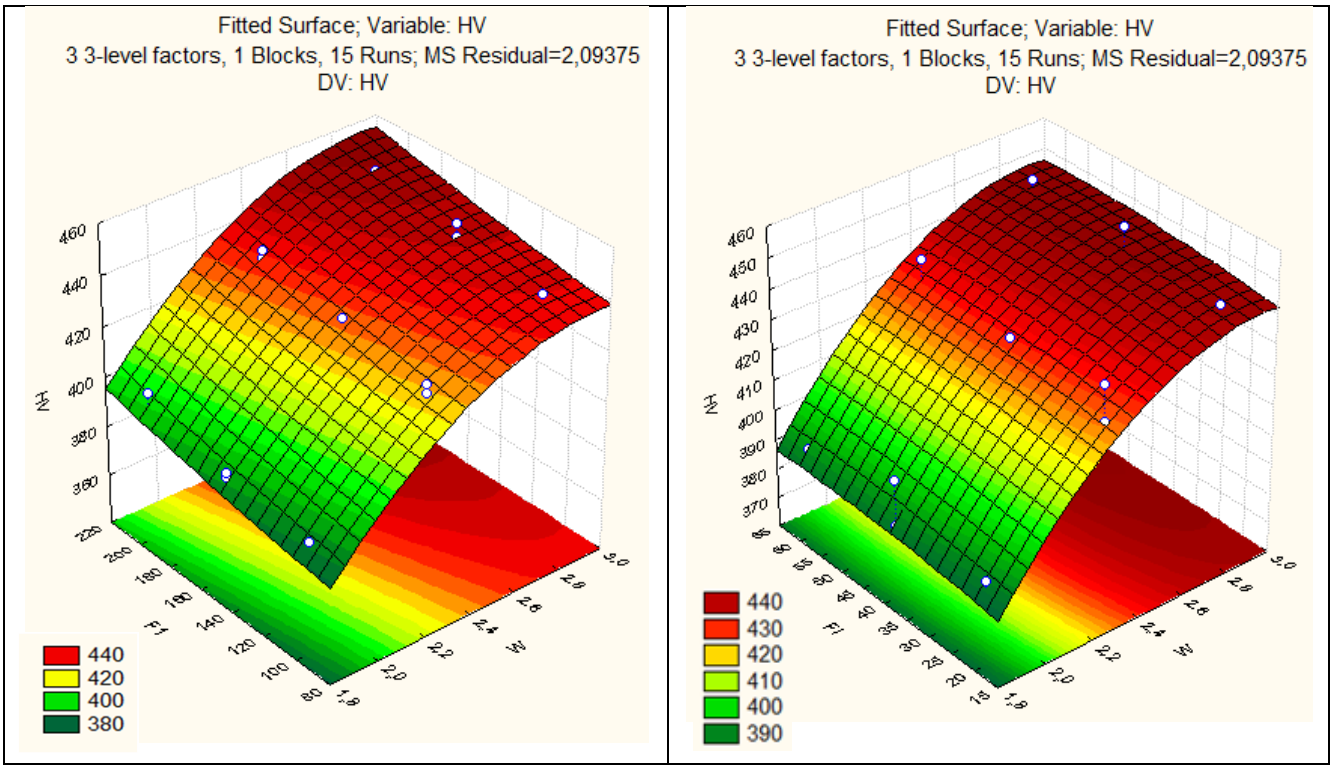


Рис. 3.8. Графічне відображення поверхні відгуку

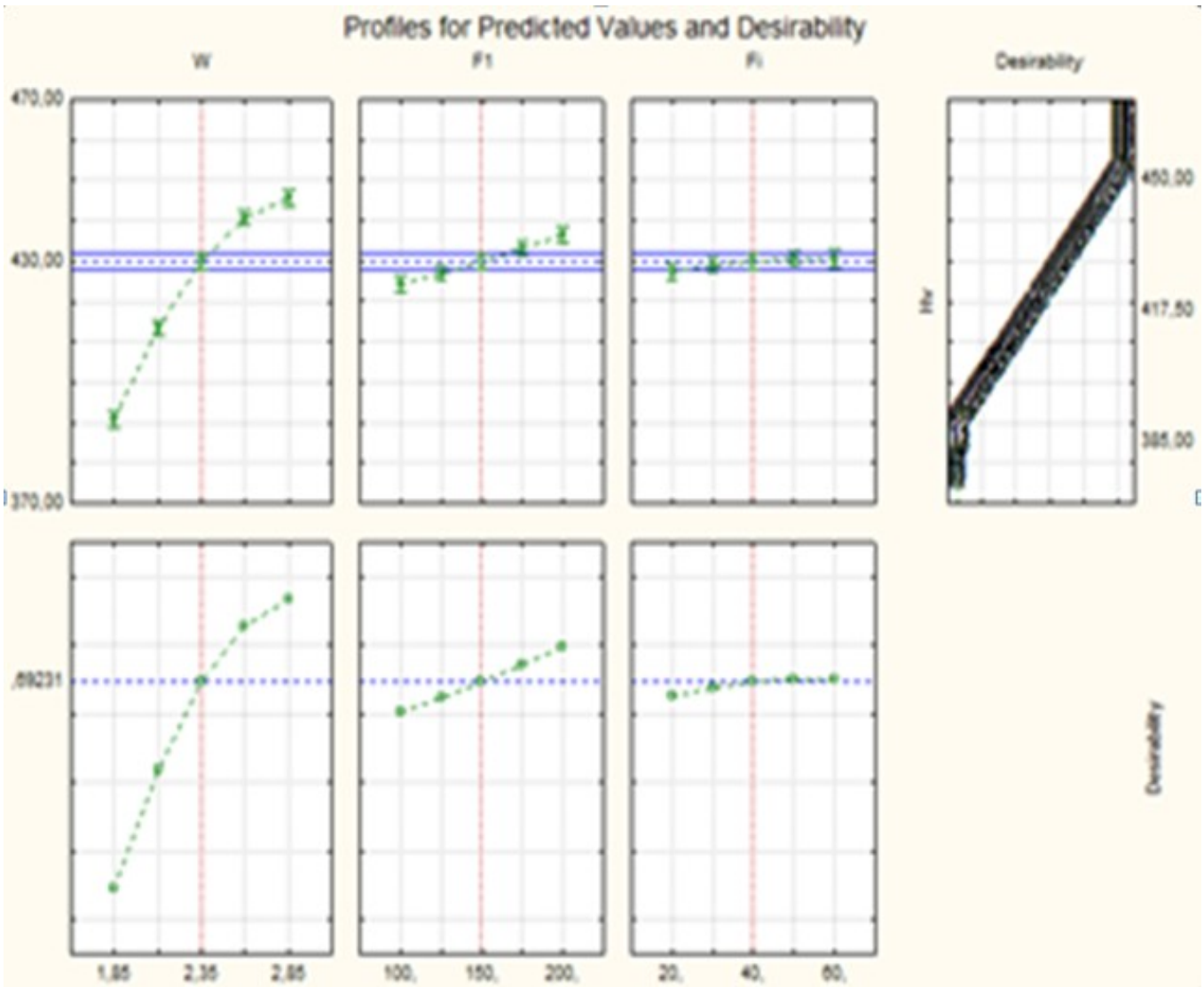


Рис. 3.9. Графічне відображення впливу параметрів зміцнення на мікротвердість поверхні

Дослідження показали, що на величину мікротвердості найбільше впливає енергія $W_{уд}$, сила статичного навантаження бойка F_{cm1} *та* сила статичного навантаження інструмента $F_{cm\,i}$.

З графіків рис. 3.9 видно, що сила статичного навантаження інструмента F_{cmi}. більше 40 Н практично не впливає на зміну мікротвердості. Сила статичного навантаження бойка F_{cm1} позитивно впливає на проміжку $F_{cm1}=150 - 200\ H$ і має лінійну залежність. Параметр енергії одиничного удару $W_{уд}$ ефективно впливає на проміжку $W_{уд}$ = 2,35 – 2,85 Дж.

3.6 Розроблення пристрою для обточування неповних сферичних поверхонь

Відомо, що стан НСП після лезової обробки, в значній мірі впливає на якість поверхневого шару сформованого при наступній операції статико-імпульсного зміцнення.

При СІЗ НСП одночасно деформуються та зминаються виступи мікронерівностей утворені в результаті попередньої механічної обробки, при цьому твірна лінія кола описана інструментами, переміщується по напрямній сферичній поверхні пальця, практично без зміни її геометричної форми (сферичності). Тому для забезпечення мінімальних відхилень від сферичності під час фінішної зміцнювальної обробки, необхідно забезпечити геометричну точність НСП при попередній лезовій обробці з мінімальним відхиленням від сферичності та заданим значенням шорсткості.

Для реалізації даних вимог в роботі запропоновано поворотний пристрій для обточування НСП [130] в основі якого лежить схема рис. 3.10, що дозволяє вести чорнове і чистове обточування НСП з R_{min} = 5 мм стандартним інструментом.

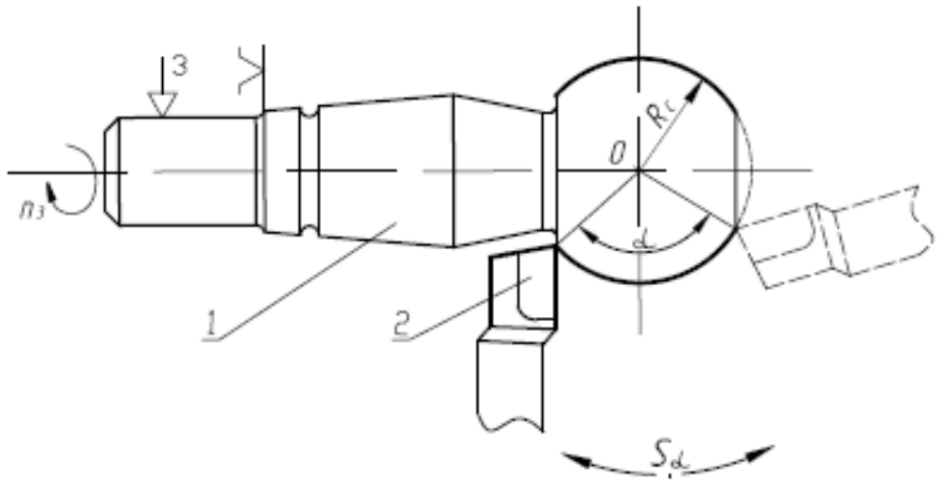


Рис. 3.10 – Схема обробки сферичної поверхні кульового пальця з використанням поворотного пристрою:

1–заготовка; 2– різець;

$n_з$ – частота обертання заготовки; R_c – радіус сфери; $S\alpha$ – кутова подача

Запропонована кінематична схема відрізняється тим, що вершина різця зміщена відносно осі обертання пристрою на деяку відстань е, що дозволяє зменшити технологічну відстань від центра сфери до закріплення в патроні.

Таким чином з’являється можливість обточування коротких деталей з НСП без спеціальних оправок.

Згідно кінематичної схеми обробки заготовці надається обертовий рух відносно власної осі Dr з частотою n_3 об/хв, при цьому ріжучий інструмент здійснює головний рух подачі Ds огинаючи сферичну поверхню заготовки відносно центра сфери з кутовою подачею S_α на деякий кут α у площині різання.

Кутова подача різця на один оберт заготовки розраховується за формулою:

$$S_\alpha = \frac{360S}{\pi d_c} n_з, \tag{3.2}$$

де S, мм/об – подача вершини інструмента, що відповідає одному оберту заготовки; d_c – діаметр оброблюваної сфери; $n_з$ – частота обертання заготовки.

Технологічними елементами режимів обробки НСП є: частота обертання заготовки, кутова подача, глибина різання, фізико-механічні властивості матеріалу заготовки та геометричні характеристики інструмента.

Запропонований пристрій (рис. 3.11) встановлюється на призматичних напрямних станини токарного верстата, виконаний з можливістю поздовжнього переміщення і фіксації в потрібному положенні і містить поворотний стіл із закріпленим на ньому різцетримачем з установленим в ньому різцем, оснащений механізмом налагодження різцетримача і різця, регульованим підшипниковим вузлом, причому обертання столу здійснюється механізмом, який має кінематичний зв'язок із супортом верстата.

Робота пристрою для обточування НСП ґрунтується на властивості сферичної поверхні, яка полягає у тому, що будь-який її перетин площиною, включаючи площини, зміщені щодо центру сфери дає окружність. Це дозволяє представити процес

формоутворення неповної сфери як узгоджені рухи по напрямній лінії – окружності, отриманої за рахунок обертання заготовки і твірної лінії окружності, описаної вершиною різця по радіусу оброблюваної сфери. Таким чином, точність формоутворення сфери визначається не профілем ріжучого інструмента, а точністю траєкторії цих рухів, тобто кінематикою процесу, що дозволяє отримати сферичні поверхні високої точності.

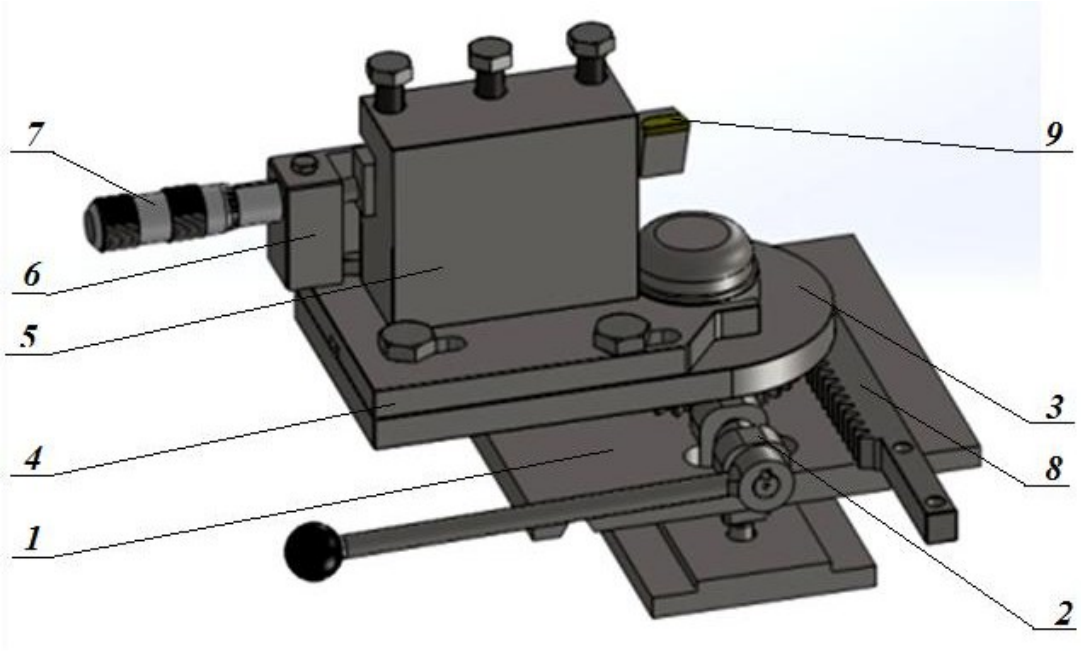


Рис. 3.11 – Поворотний пристрій для обточування НСП:
1 – платформа; 2 – механізм фіксації; 3 – поворотний стіл; 4 – платформа поперечних переміщень різцетримача;5 – різцетримач; 6 – кронштейн;
7 – мікрометричний гвинт; 8 – зубчаста рейка; 9 – різець;

В процесі обробки подача супорта верстата S_y перетворюється за рахунок рейкового механізму в кругову подач S_α , залежність між якими визначається формулою:

$$S_y = \frac{\pi d_0 S_\alpha}{360}, \tag{3.3}$$

де d_0 – ділильний діаметр зубчатого колеса поворотного столу.

Підставивши (3.2) у (3.3) отримаємо формулу (3.4) для визначення поздовжньої подачі супорта верстата в залежності від S, n_3, d_c:

$$S_y = \frac{S\ d_0 n_з}{d_c}, \tag{3.4}$$

Фрагмент процесу обробки сферичної поверхні пальця кульової опори автомобіля з використанням запропонованого пристрою представлено на рис.3.12.

Рис. 3.12 – Фрагмент процесу токарної обробки сфери кульового пальця з використанням поворотного пристроюб

1 – спеціальна оправка; 2 – заготовка; 3 – різець; 4 – поворотний стіл; 5 – різцетримач

До переваг запропонованого пристрою відноситься значне підвищення точності обробки і розширення технологічних можливостей. При використанні пристрою досягається висока продуктивність оброблення навіть в умовах дрібносерійного та ремонтного виробництва, оскільки на встановлення пристрою витрачається не більше 10 хв.

3.7. Формування мікрорельєфу поверхні при статико-імпульсному зміцненні

Формоутворення мікрорельєфу поверхні при СІЗ відбувається в результаті періодичних ударів бойків по статично навантажених інструментах (з сферичними ДЕ), які знаходяться в постійному контакті з оброблюваною поверхнею деталі, що обертається навколо власної осі та здійснює рух подачі у площині інструментів. Внаслідок біполярного ударного навантаження та жорсткої кінематичної характеристики процесу обробки на НСП формується зміцнений поверхневий шар з геометрично визначеним мікрорельєфом, характеристики якого визначаються параметрами обробки. Енергія удару $W_{уд}$ та діаметр деформуючого елемента d_i впливають на розміри і форму відбитка, а частота ударів f, частоти обертання інструмента n_i та заготовки $n_з$ і кутова подача $S_\propto$ розраховані в залежності від коефіцієнта перекриття K визначають відносне розміщення відбитків на сферичній поверхні. Такий підхід дозволяє формувати фізико механічні властивості зміцненого поверхневого шару та мікрорельєф певної текстури ще на стадії проектування технологічного процесу обробки.

Мікрорельєф поверхні зразка до зміцнення (після лезової обробки) являє собою систему паралельно розміщених мікронерівностей з рівноймовірнісним розподілом виступів та западин.

Проведено моделювання кінематики процесу різання в середовищі solidworks simulation. На рис. 3.13 наведено результат дослідження траєкторій руху вершини інструмента, які утворюються завдяки обертанню заготовки відносно власної осі та кутової подачі різця відносно центра сфери заготовки на деякий кут $\propto$.

В результаті проведених досліджень отримано траєкторію руху точки вершини інструмента, яка формує криву у вигляді сферичного гелікоїда на НСП під час обробки.

При наступній операції статико-імпульсному зміцнені інструментом з сферичним ДЕ висота мікронерівностей зменшується на величину ΔR, рис. 3.14.

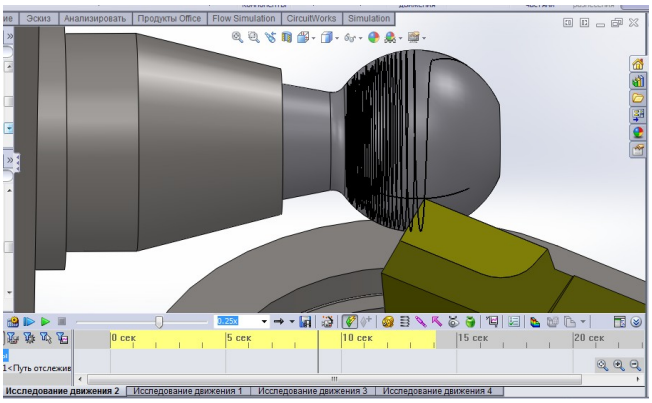


Рис. 3.13. Моделювання траєкторій руху вершини інструмента

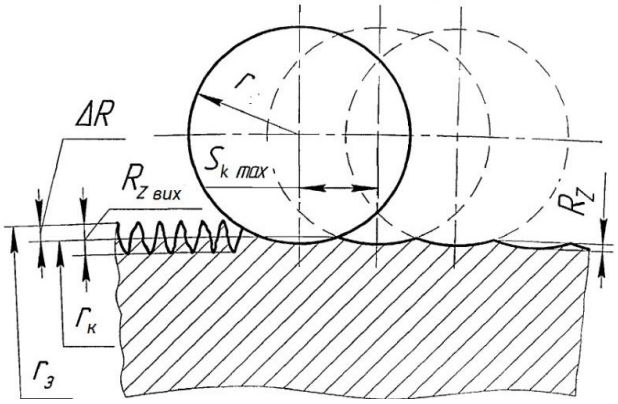


Рис. 3.14. Схема формування шорсткості при СІЗ

В процесі ударного навантаження на поверхні зразка формуються відбитоки. Виступи вихідної поверхні зминаються і перетікають в западини, а інший здеформований об’єм металу видавлюється в результаті чого на крайці відбитка формується наплив. На рис. 3.15 наведено схему пластичного відбитка, а на рис. 3.16 фото зразка з відбитком.

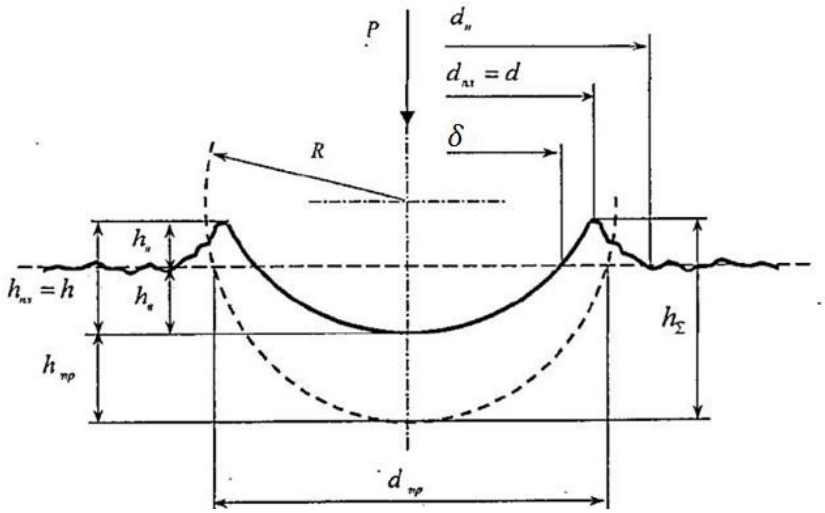


Рис. 3.15. Схема утворення пластичного відбитка

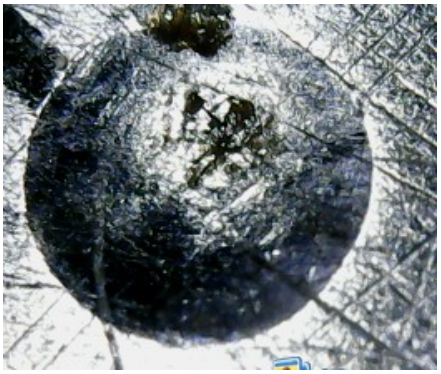


Рис. 3.16. Фото відбитка

Напливи і лунки, які формуються під час ударного зміцнення є важливими елементами мікрорельєфу, які напряму залежать від діаметра сфери ДЕ, величини статичного навантаження, енергії одиничного удару, коефіцієнта перекриття та фізико-механічних властивостей матеріалів деформуючого елемента та заготовки.

Таким чином для формування заданого мікрорельєфу при зміцнені поверхневого шару деталей машин необхідно мати уяву про сукупність геометричних параметрів відбитка в залежності від параметрів обробки.

Рівномірність зміцнення визначається перекриттям пластичних відбитків, залежить від режимів обробки та описується коефіцієнтом перекриття K, який знаходиться в межах $0 \leq K \leq 1$.

В залежності від коефіцієнта перекриття можливе утворення трьох основних видів мікрорельєфу поверхні: структура з локальними відбитками $K \ll 0$ ($t > \delta$); структура з відбитками, що дотикаються $K = 0$ ($t = \delta$); структура з взаємним перекриттям відбитків $0 < K < 1$, ($t < \delta$), рис. 3.17.

Експериментально встановлено, що під час зміцнення в залежності від величини коефіцієнта перекриття в поверхневому шарі формуються зони вторинної, третинної, і.т.д деформації, що призводить до зростання мікротвердості та зміни параметру шорсткості зміцненої поверхні.

При чистовому зміцненні параметри обробки визначаються з умови забезпечення бажаної твердості та шорсткості зміцненої поверхні і як правило в таких випадках коефіцієнт перекриття лежить в межах $0{,}5 < K < 1$, а крок $t < \delta$.

При обробці з $K > 0{,}5$ формується повністю новий мікрорельєф без ділянок вихідної поверхні. В такому випадку шорсткість визначається глибиною утворених відбитків. Для визначення висоти мікронерівностей та оцінки впливу коефіцієнта перекриття розроблено геометричну модель (рис. 3.18), де формування мікропрофілю розглядається як слід утворений робочим ходом інструмента.

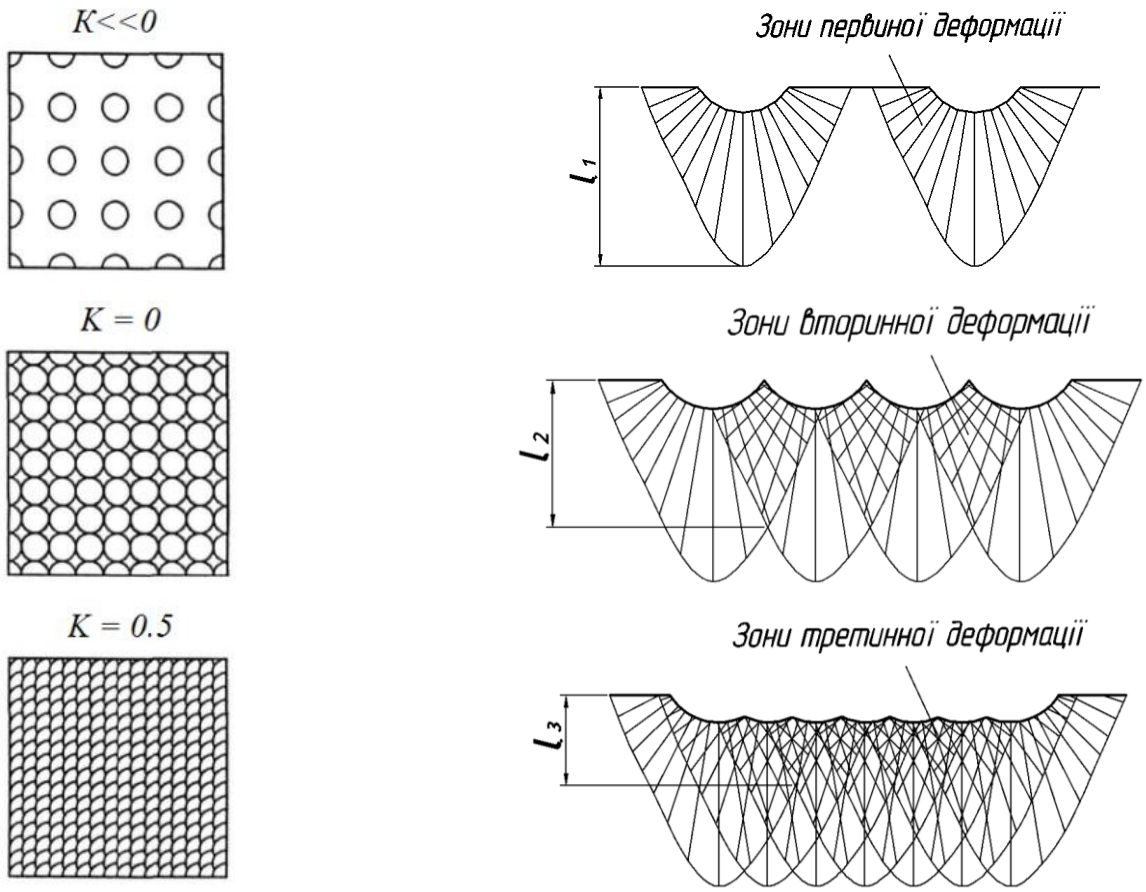


Рис. 3.17. Схеми формування зони залягання деформації в поверхневому шарі деталі в залежності від коефіцієнта перекриття *К:*

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

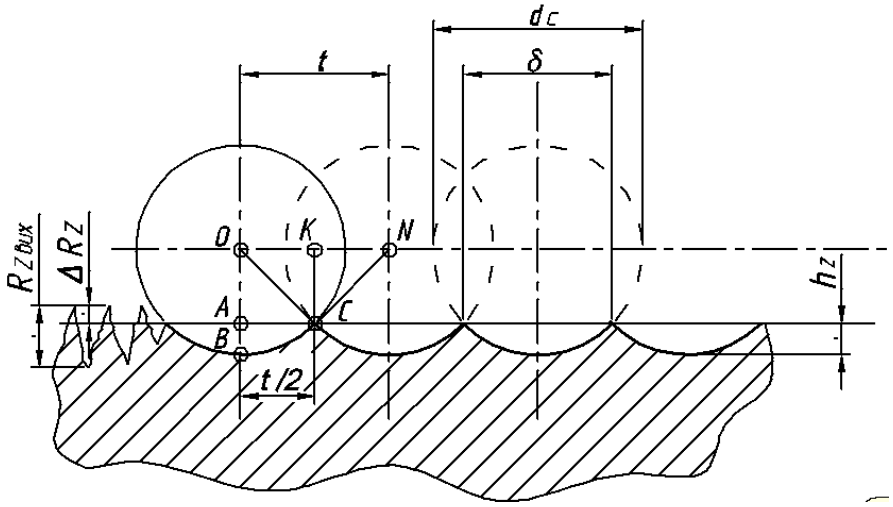


Рис. 3.18. Схема формування мікропрофілю

Згідно до розрахункової схеми (рис. 3.18) з геометричних побудов висота мікровиступів може бути визначена за формулою:

$$h_Z = OB - OA = OB - \sqrt{OC^2 - AC^2} = OB - \sqrt{OC^2 - (t/2)^2}. \quad (3.5)$$

З врахуванням коефіцієнта перекриття K крок t між відбитками δ визначається за формулою:

$$t = (1 - K)\delta. \quad (3.6)$$

Для визначення висоти мікровиступів в залежності від коефіцієнта перекриття формула (3.5) з врахуванням (3.6) матиме вигляд:

$$h_Z = \frac{d_i}{2} - \sqrt{(d_i/2)^2 - ((1 - K)\delta/2)^2} = \frac{d_i - \sqrt{d_i^2 - ((1 - K)\delta)^2}}{2}, \quad (3.7)$$

де d_i – діаметр інструмента.

Для визначення коефіцієнта перекриття з врахуванням бажаної висоти мікровиступів з формули (3.7) виведена залежність яка після математичних перетворень матиме вигляд:

$$K = 1 - \frac{2\sqrt{h_Z(d_i - h_Z)}}{\delta}. \quad (3.8)$$

Виведені математичні залежності дозволяють встановити взаємозв’язок між параметром шорсткості зміцненої поверхні та технологічними параметрами статико-імпульсної обробки.

Для формування мастилоутримуючого профілю передбачається двостадійна обробка. Після зміцнення формується геометрично визначений на поверхні мастилоутримуючий профіль у вигляді дискретних лунок з геометричними параметрами які обумовленні умовами зворотного руху мастила в лунці. Для забезпечення необхідної площі опорної поверхні обробку ведуть з кроком $t > \delta$ і коефіцієнтом перекриття $K \ll 0$.

Висновки до третього розділу

1. За результатами досліджень були виявлені основні параметри статико-імпульсного зміцнення та встановлено їх вплив на величину мікротвердості зміцненої поверхні.

2. Проведено дослідження параметрів ударного імпульсу в зоні деформації при різних схемах навантаження. Кращий результат (η = 83%) забезпечує схема з статичним навантаженням інструмента та комбінованим навантаженням бойка при наступних режимах обробки: $W_{уд}$ = 2,35 Дж; R_i = 1,5 мм; статичне навантаження бойка F_{cm1} = 150 Н; статичне навантаження інструмента F_{cmi} = 40 Н.

3. Запропоновано технологічне спорядження та методику розрахунку параметрів токарної обробки зовнішніх НСП.

4. Побудовано геометричну модель формування мікропрофілю на НСП та отримано математичні залежності, які дозволяють встановити взаємозв’язок між параметром шорсткості зміцненої поверхні та технологічними параметрами СІЗ.

РОЗДІЛ 4
КОНСТРУЮВАННЯ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ БІПОЛЯРНОГО СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО РОБОТИ

4.1. Кінематичний аналіз процесу зміцнювальної обробки зовнішніх неповних сферичних поверхонь

При розробці машин ударної дії однією з головних задач є підвищення ефективності використання енергії, що надходить від генератора механічних імпульсів (ГМІ) в зону деформації. Для вирішення даної задачі в роботі запропоновано модель ударної системи ГМІ біполярної дії з додатковим статичним навантаженням ступінчатого бойка. Схема біполярного зміцнення наведена на рис. 4.1. За такої схеми обробки деталь одночасно сприймає дві зустрічні деформаційні хвилі, енергія яких максимально використовується під час деформації поверхневого шару заготовки і не поглинається масивною наковальнею, відсутність якої знижує металоємкість конструкції пристрою.

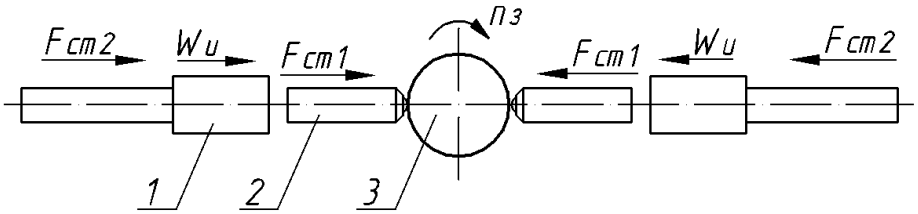
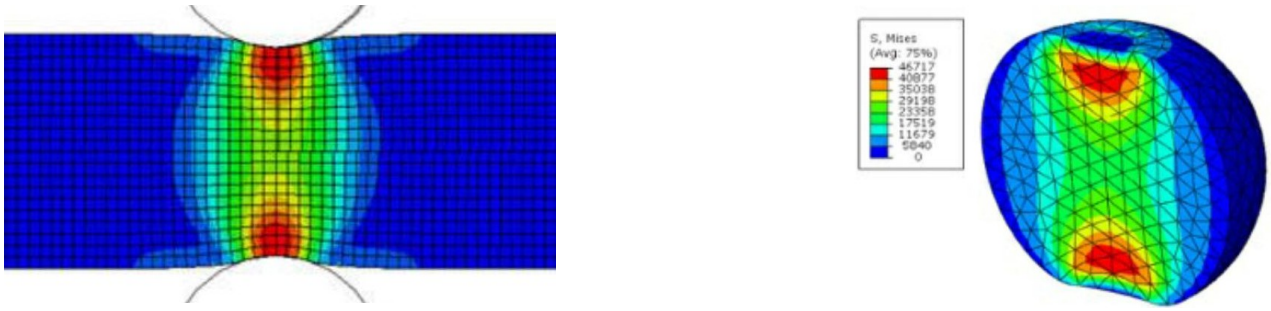


Рис. 4.1. Схема біполярного статико-імпульсного зміцнення:
1 – бойок; 2 – інструмент; 3 – заготовка

Для перевірки ефективності запропонованої схеми проведені дослідження процесу біполярного СІЗ у програмному комплексі Abaqus, який дозволяє відстежувати процес зміцнення в заданий проміжок часу. На рис. 4.2 приведено

контурні графіки розподілу напружень при зміцнені зразків прямокутного та круглого січення для одного із кроків експерименту.



а) б)

Рис. 4.2 Розподіл еквівалентних напружень за об’ємом під дією біполярного ударного навантаження:

а – зразок прямокутного січення; б – зразок сферичної форми

Результати моделювання процесу біполярного зміцнення підтвердили припущення, що за такої схеми обробки зустрічні потоки енергії деформаційної хвилі здійснюють корисну роботу, без застосування опорної наковальні, що дозволяє знизити металоємність конструкції пристрою, підвищити продуктивність процесу обробки та зменшити втрати енергії удару. За такої схеми обробки формуються симетричні стискаючі залишкові напруження, а діаметрально протилежні згинальні моменти компенсуються. Такий підхід дозволяє проводити рівномірне зміцнення та мінімізує викривлення заготовки .

Запропоновано спосіб [109] та схему процесу біполярного СІЗ зовнішніх НСП, рис. 4.3.

Згідно до запропонованої схеми обробки 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 α у площині деформуючих елементів (кутова подача).

Сферична поверхня пальця знаходиться у постійному контакті з статично навантаженими інструментами силою F_{cm1}.

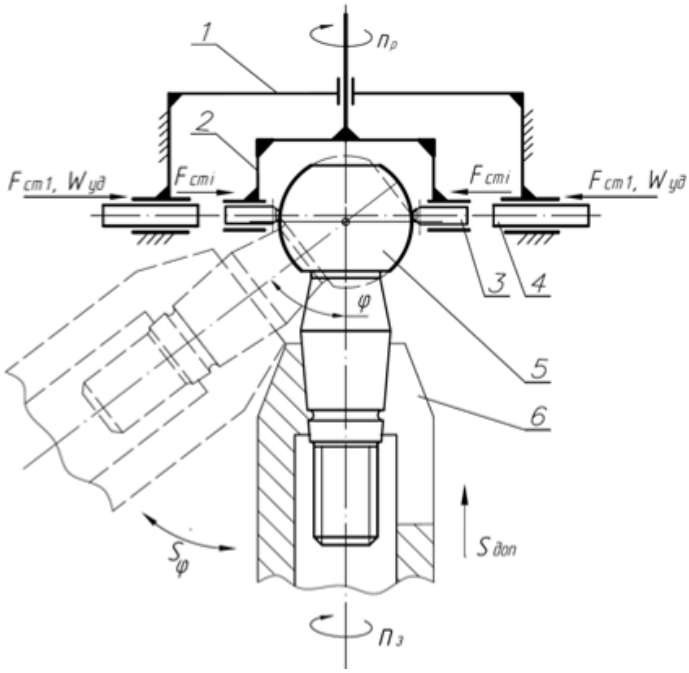


Рис. 4.3. Схема біполярного СІЗ НСП:

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – деформуючий елемент; 4 – бойок; 5 – заготовка;

6 – пристосування для закріплення заготовки

Періодичне імпульсне навантаження $W_{уд}$, генерується ударною системою, тобто ударами бойків по інструментам з періодичністю заданою механічним генератором імпульсів.

Технологічними параметрами зміцнювальної обробки НСП є: частота обертання інструменту (ротора пристрою) n_i, частота обертання заготовки $n_з$, кутова подача s_α, статичне навантаження інструмента F_{cmi}, статичне навантаження бойка F_{cm1}, радіус деформуючого тіла R_i та енергія удару $W_{уд}$. Степінь деформування поверхневого шару залежить від енергії удару та коефіцієнта перекриття.

Частота ударів по інструменту f_i залежить від частоти обертання ротора генератора n_i та кількості кулачків механічного генератора z і визначається за формулою:

$$f_i = n_i z, \tag{4.1}$$

де f_i – частота ударів бойка по інструменту; n_i – частота обертання ротора;

z – кількість кулачків механічного генератора.

Інструмент виконаний у вигляді циліндричного стрижня в торець якого вмонтовано деформуючий елемент (кульку), який знаходиться в постійному контакті з оброблюваною поверхнею під дією статичного навантаження F_{cmi}. Ударне імпульсне навантаження забезпечується за рахунок удару бойка з енергією $W_{уд}$ по вільному торцю інструмента, в результаті чого на поверхні заготовки формується пластичний відбиток діаметром δ.

Величина подачі S_α залежить від розмірів пластичного відбитка та бажаного коефіцієнта перекриття K, який знаходиться в межах $0 \leq K \leq 1$.

При $K = 0$, $t = \delta$ – край одного відбитка межує з краєм іншого; при $K = 1$, $t = 0$ – інструмент багаторазово влучає в одну точку; $t < \delta$ – відбитки перекриваються.

Залежність між кроком пластичних відбитків t, тобто $S_{iк}$ (подача на один деформуючий елемент) і діаметром відбитка δ з врахуванням коефіцієнта перекриття K можна представити у вигляді:

$$t = (1 - K)\delta, \tag{4.2}$$

де t – крок пластичних відбитків; K – коефіцієнт перекриття; δ – діаметр пластичного відбитка.

Частота обертання заготовки $n_з$ з врахуванням коефіцієнта перекриття K розраховується за формулою:

$$n_з = (1 - K)\frac{\delta n_i zk}{2\pi d_c}, \tag{4.3}$$

де z – кількість кулачків механічного генератора імпульсів; k – кількість бойків; d_c – діаметр оброблюваної сфери.

Кутова подача S_α, на один оберт заготовки забезпечується за рахунок повороту заготовки у площині інструментів на деякий кут α і розраховується за формулою:

$$S_\alpha = \frac{360° t}{\pi d_c}, \tag{4.4}$$

Підставивши формулу (4.2) у (4.4), отримаємо:

$$S_{\alpha} = \frac{360°(1 - K)\delta}{\pi d_c}, \tag{4.5}$$

При розрахунку параметрів обробки слід приймати значення К < 1, так як зміцнення з коефіцієнтом перекриття, який наближається до одиниці призводить до перенаклепу.

4.1.1. Зв'язок колової подачі і технологічних параметрів при біполярному статико-імпульсному зміцненні зовнішніх неповних сферичних поверхонь

Під дією сили статичного навантаження F_{cmi} інструменти знаходяться у постійному контакті з оброблюваною поверхнею і під час обробки здійснюють процес обкочування, що сприяє вигладжуванню країв лунок отриманих в результаті дії періодичного імпульсного навантаження. Схема утворення мікрорельєфу на НСП представлена на рис. 4.4.

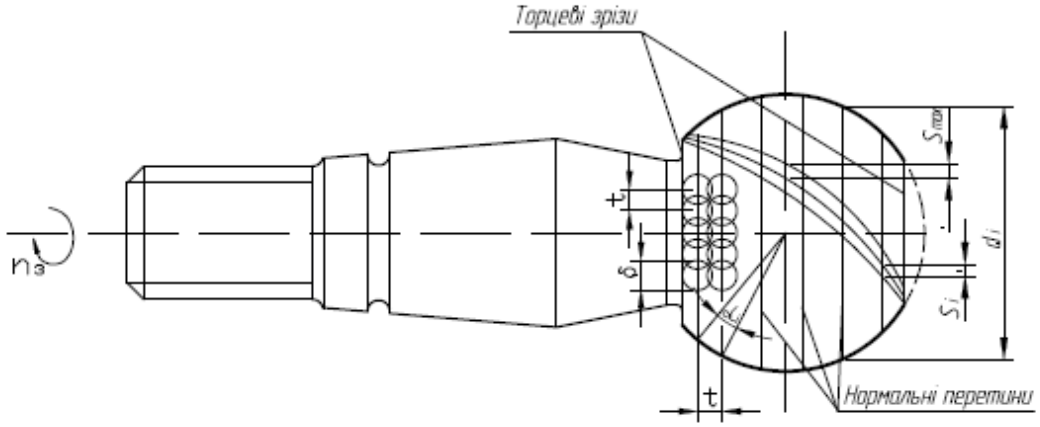


Рис. 4.4. Схема утворення мікрорельєфу на сферичній поверхні

Колова подача деталі на один оберт інструмента в n-му січені, перпендикулярному осі неповної сфери S_i (мм/об), визначається за формулою:

$$S_i = \frac{\pi d_n n_з}{n_i}, \tag{4.6}$$

$S_{iк}$ – колова подача деталі на один ДЕ (кульку) за один оберт інструмента в і-му січені, перпендикулярному осі неповної сфери (мм/об на одну кульку) може бути визначена за формулою:

$$S_{ik} = \frac{\pi d_n n_з}{n_i z_i}, \tag{4.7}$$

де $S_{iк}$ – подача на один інструмент, d_n – діаметр n-го січення, z_i – число деформуючих кульок (інструментів).

З урахуванням коефіцієнта перекриття формула 4.7 матиме вигляд:

$$S_{ik} = \frac{\pi d_n n_з}{n_i z_i} = \frac{\pi d_n (1 - K)\delta n_i zk}{2\pi d_c n_i z_i} = \frac{d_n \delta zk(1 - K)}{2 d_c z_i} \tag{4.8}$$

Величини подач S_i та $S_{iк}$ залежать від того, в якому січені НСП, перпендикулярно до осі кульового пальця вони вимірюються. Максимальна подача визначається в січені перпендикулярному до осі пальця і проходить через центр сфери для якого $d_n = d_c$.

Звідки:

$$S_{i\max} = \frac{\pi d_c n_з}{n_i}, \tag{4.9}$$

де d_c – діаметр сфери.

$$S_{ik\max} = \frac{\pi d_c n_з}{n_i z_i} = \frac{\pi d_c (1 - K)\delta n_i zk}{2\pi d_c n_i z_i} = \frac{(1 - K)\delta zk}{2 z_i} \tag{4.10}$$

Формула 4.8 дозволяє розрахувати величину зміни колової подачі $S_{iк}$, при сталому значенні діаметра пластичного відбитка та технологічних параметрів обробки кульового пальця в і-тому січені НСП.

Діаметр в n-му січені d_n визначається за формулою:

$$d_n = 2\sqrt{h_i (d_c - h_n)}, \tag{4.11}$$

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

Для дослідження зміни величини колової подачі $S_{ік}$ використовуємо палець СШ з діаметром НСП d_c= 25мм та задаємось діаметром пластичних відбитків $\delta = 2{,}4$ мм, кількістю кулачків $z = 4$ та кількістю бойків (ударників) $k = 2$.

Коефіцієнт перекриття K розраховувався для максимального діаметра НСП d_c = 25мм.

На графіку (рис. 4.5) відображені результати проведених досліджень зміни величини подачі в залежності від діаметрів в і-тих нормальних січеннях сферичної поверхні пальця СШ.

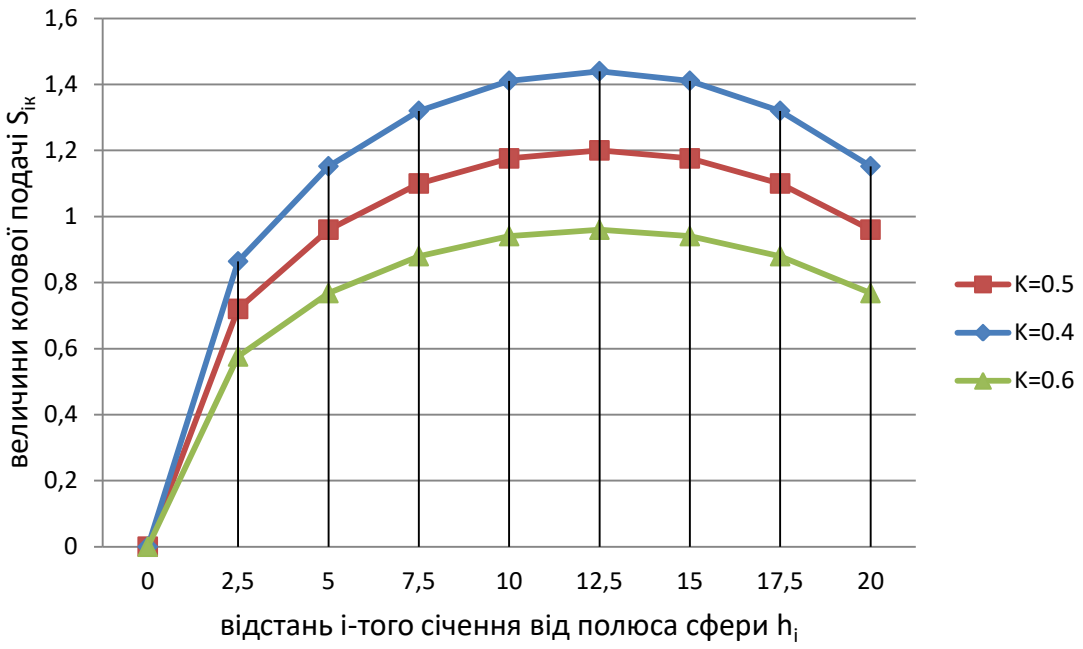


Рис. 4.5. Графік залежності величини подач від технологічних параметрів

Проаналізувавши графік, можна зробити висновок, що із збільшенням діаметра в і-му січені від полюса сфери подача зростає і досягає максимуму при $d_i = d_c$. В інтервалі відстаней h_i = 0 – 2,5 мм подача стрімко спадає до мінімальних значень, що може призвести до перенаклепу під час обробки. Щоб уникнути небажаного явища перенаклепу в полюсній зоні, слід виконувати торцевий зріз на НСП.

4.2. Конструктивно-технологічні параметри статико-імпульсної обробки

До конструктивно-технологічних параметрів, які забезпечують реалізацію процесу СІЗ відносяться конструктивні особливості ударних пристроїв, технологічна оснастка та параметри обробки. Ударні пристрої можуть використовуватись як оригінальної так і стандартної конструкції, і повинні забезпечувати:

– максимальну передачу енергії удару в зону деформації за допомогою ударної системи (інструмент-бойок), геометричні параметри якої дозволяють генерувати хвилі деформації;

– нерозривний контакт ударної системи після удару (деталь-інструмент-бойок) для максимального використання енергії удару;

– енергію удару для забезпечення пластичної деформації навантаженої поверхні зразка;

– необхідну частоту імпульсів (ударів);

– низьку металоємність, що дозволить встановлювати ударний пристрій на металооброблювальні верстати (токарні, фрезерні і т. д.);

– високий ККД, що сприяє зниженню енергоємності процесу обробки.

Пристрої для деформаційного зміцнення деталей машин бувають з вбудованим генератором механічних імпульсів (ГМІ) у виконавчу ланку та винесеним.

Для деформаційного зміцнення поверхонь деталей машин порівняно не великих розмірів з погляду мінімізації габаритів устаткування перевагу надають використанню пристроїв з вбудованими ГМІ.

Величина енергії удару при деформуванні є основним параметром при виборі та конструюванні устаткування і його силових (виконавчих) ланок.

Аналіз конструкцій ударних пристроїв показав, що перераховані вимоги будуть залежати від застосування того чи іншого привода ГМІ (магнітострикційні, електромагнітні, механічні, пневматичні, гідравлічні).

Серед відомої гами на особливу увагу заслуговують механічні генератори, які відрізняються простотою конструкції. Для зменшення габаритів конструкції пристрою та зниження металоємкості доцільно вжити заходи з суміщення елементів ударної системи та елементів ГМІ.

4.2.1. Визначення оптимальних параметрів ударної системи

Спосіб СІЗ дозволяє використовувати відбиті хвилі деформації для повторного пружно-пластичного навантаження зони деформації, за умови оптимального підбору параметрів ударної системи. Зміна геометричних та акустичних співвідношень елементів ударної системи (бойок-інструмент) дозволяє керувати хвильовими процесами. В зв'язку з цим енергія удару може по різному використовуватись та розподілятись між елементами ударної системи формуючи пролонгуючі ударні імпульси з головною і хвостовою частинами. Використання хвостової частини ударного імпульсу дозволяє підвищити коефіцієнт використання енергії. Дослідження з формування пролонгованого ударного імпульсу показали, що найбільший ефект досягається за рахунок удару бойка через проміжну статично-навантажену ланку – інструмент.

Для забезпечення рекуперації відбитої енергії від навантаженого середовища та створення ефекту пролонгованого ударного впливу, проф. Лазуткіним А.Г. запропоновані раціональні співвідношення параметрів ударної системи (бойок-інструмент): $L_1/L_2 > 1$, $d_1/d_2 > 1$, $m_1/m_2 = 3.5 \dots 4.5$, $d_{1min} \geq 20$ *мм,* $L_2 \geq 50$ *мм.*

Узагальнюючи накопичений досвід [87, 132, 133] та враховуючи конструктивні особливості пристрою, розраховуємо елементи ударної системи (додаток Г).

Дослідним шляхом встановлені межі ефективної енергії удару $W_{уд} = 1 – 4$ Дж, для діаметрів деформуючого інструмента $d_i = 2 – 5$ мм.

Головними характеристиками ГМІ виступають частота та енергія удару на виході, яка генерується за рахунок розгону бойка маси m до передударної швидкості під дією сил пружності стисненої циліндричної пружини. Отже величина енергії удару на виході ГМІ залежить від параметрів пружин, конструктивних особливостей ударної системи, робочого ходу бойка та величини початкового стиснення.

Розрахунок параметрів пружини бойка починаємо з визначення необхідної повної потенційної енергії, накопичуваної пружиною, яка повинна відповідати наступній умові:

$$W_{\text{п.п}} \geq W_{\text{уд}}. \tag{4.12}$$

Акумулятивна потенційна енергія стиснутої пружини розраховується за формулою:

$$W_{\text{п.п}} = \frac{\sum \text{F} \sum \text{x}}{2}. \tag{4.13}$$

Або

$$W_{\text{уд}} = \frac{\sum \text{F} \sum \text{x}}{2}, \tag{4.14}$$

де $\sum F$ – сумарна стискаюча сила; $\sum x$ – сумарне переміщення.

Згідно конструкції ГМІ пружина сприймає двосторонні стискаючі зусилля: F_1 – з боку регулювальної втулки деформуючись при цьому на величину x_1 та зі сторони кулачка – F_2, деформуючись на величину x_2. Схема навантаження пружини представлена на рис. 4.6.

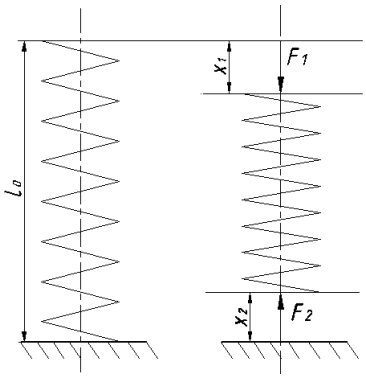


Рис. 4.6. Схема навантаження пружини

Розрахунок параметрів пружинних елементів ГМІ приведений в додатку Г.

4.3. Проектування генератора імпульсів устаткування для біполярного статико-імпульсного зміцнення з механічним приводом

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано конструкцію генератора механічних імпульсів устаткування для біполярного СІЗ НСП з статичним навантаженням інструмента F_{cmi} та бойка F_{cm1}. Розробка конструкції устаткування проводилась з урахуванням геометричних параметрів ударної системи та кінематики процесу обробки.

В основі запропонованого генератора (рис. 4.7) використовується кулачковий ударний механізм здатний здійснювати серію ударів за один оберт кулачка та нова модель ударної системи [134].

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). Розрахунок енергосилових та конструктивних параметрів ударної системи проведено згідно з методикою розглянутою у [134].

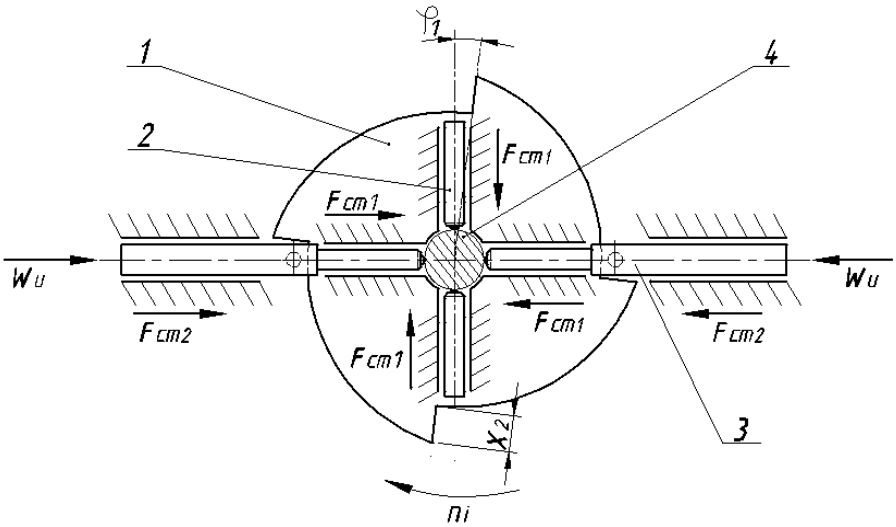


Рис. 4.7. Схема генератора механічних імпульсів біполярної дії:

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

Взведення 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. Генератор такої конструкції дозволяє забезпечити підвищення використання енергії удару та продуктивності процесу обробки.

Головною перевагою кулачкових механізмів є можливість задавання руху вихідної ланки (бойка) по заданому закону при відносній простоті конструкції механізму та високій точності його роботи. Такі механізми надійні в роботі, займають мало місця в конструкціях машин та найчастіше знаходять застосування там де потрібно забезпечити автоматизм та жорстку кінематику руху ланок механізму.

4.3.1. Побудова математичної моделі роботи генератора механічних імпульсів

Відповідно до запропонованої конструкції ведучою ланкою є кулачок, а виконавчим органом (вихідною ланкою) бойок (штовхач) з центральним розташуванням (роликовим наконечником). 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 φ. В період віддалення бойок в напрямних рухається прямолінійно під дією кулачка, а під час наближення розганяється до передударної швидкості за рахунок потенціальної енергії стисненої пружини. В період ближнього стояння відбувається удар бойка по інструменту з наступним вистоєм. На рис. 4.8 наведено схему фазових кутів кулачка.

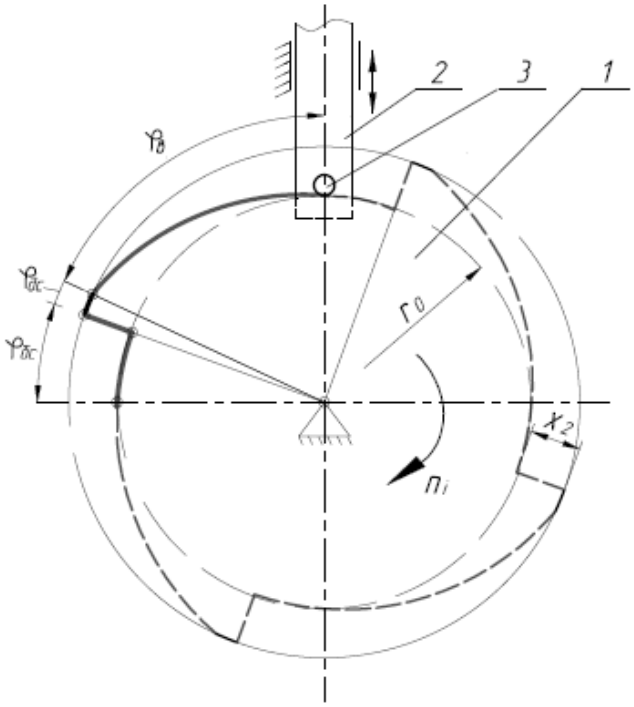


Рис. 4.8. Схема фазових кутів кулачка: 1 – кулачок; 2 – бойок; 3 – ролик; $\varphi_в$ – кут віддалення; $\varphi_{дс}$ – кут дальнього стояння; $\varphi_{бс}$ – кут ближнього стояння

Робочий цикл руху бойка $T_ц$ можна розділити на декілька етапів, (рис.4.9).

1. Холостий хід $l_{х.х} = x_2$ – відповідає куту віддалення кулачка (бойок рухається у крайнє положення (зведення бойка) за час $t_{зв}$.

2. Вистій бойка у зведеному стані – відповідає куту дальнього стояння кулачка та регламентується $t_{д.с}$.

3. Робочий хід $l_{рх}$ – відповідає моменту, коли бойок з прискоренням розганяється до передударної швидкості (розгін бойка) $t_р$.

4. Удар бойка по інструменту та їх спільний рух, з подальшим пружно-пластичним деформуванням матеріалу зразка інструментом $t_у$.

5. Вистій бойка в контакті з інструментом під дією статичного навантаження – відповідає куту ближнього стояння кулачка (удар – вистій) $t_{б.с.}$

Таким чином робочий цикл бойка можна записати:

$$T_ц = t_{зв} + t_{д.с} + t_р + t_у + t_{б.с} \tag{4.15}$$

Повний цикл руху бойка (взведення, вистій, розгін, удар, вистій) відбудеться за час: $T_ц = 1/f$, де f – частота ударів, яка розраховується за формулою: $f = n\,z$, де n – частота обертання ротора; z – кількість кулачків.

Робочий процес кулачкового ударного механізму ілюструється діаграмою переміщень бойка в залежності від кута повороту кулачка наведеною в [134].

При побудові математичної моделі та досліджені робочого циклу були прийняті наступні припущення, які ідеалізують реальні умови роботи ударного механізму: втрати на механічне тертя не чинять суттєвого впливу на енергетичні характеристики пристрою; маси рухомих елементів вважаються зосередженими; тривалість співударяння бойка з торцем інструмента була дуже малою порівняно з періодом циклу і в розрахунках не враховувалась; механізм у роботі розглядається в період усталеного руху (робота рушійних сил не враховувалась).

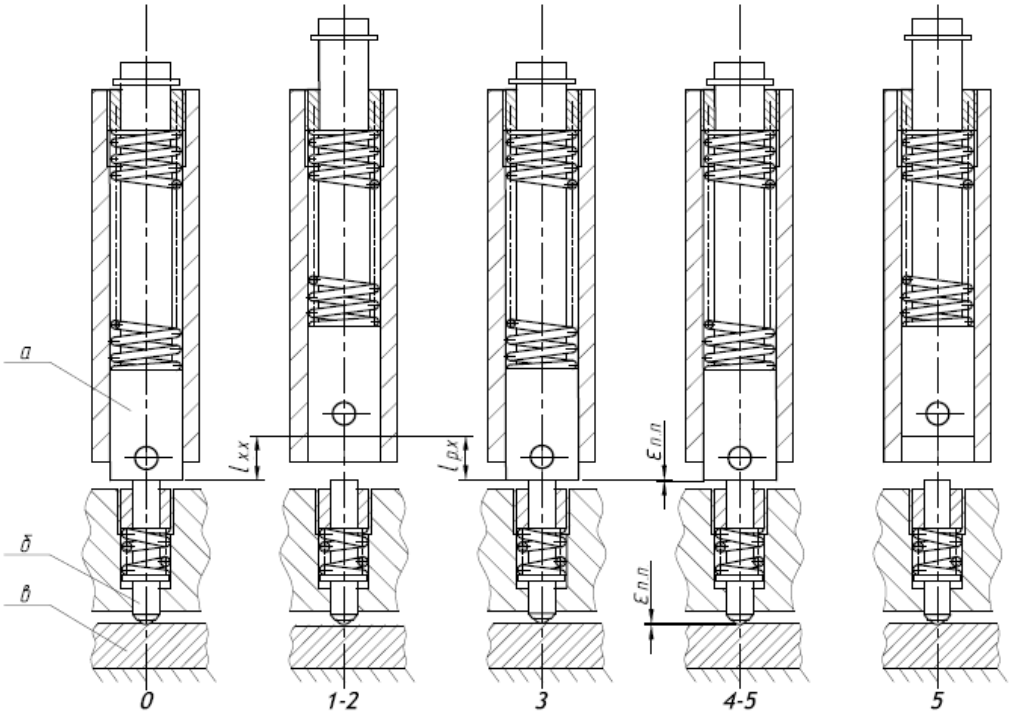


Рис. 4.9. Схема циклу роботи бойка:

а – бойок; б – інструмент; ~~в~~ – зразок

Головним показником який визначає ККД у запропонованому ГМІ є енергія удару, оскільки частота ударів залежить від конструкції кулачка та частоти його обертання. Для забезпечення максимальної передачі енергії необхідно враховувати рекомендації, щодо проектування елементів ударної системи [112, 135].

Головними конструктивними параметрами, що визначають розміри ГМІ є геометричні характеристики елементів ударної системи та робочий хід бойка l_{px} Робочий хід розраховується в залежності від енергії удару та величини передударної

швидкості і задається параметрами кулачка. Необхідні значення енергії та передударної швидкості бойка забезпечуються за рахунок дії пружних сил стисненої пружини. При роботі регулювання енергії ударів здійснюється завдяки переміщенню пружини регулювальною втулкою на величину x_1.

Розглядаючи механізм на першому етапі роботи як змінну систему, взведення бойка (штовхача) можна виразити через роботу, яка витрачається на переміщення бойка в опорах і стиснення пружини [136]:

$$\sum A = A_f + A_{k.o}, \tag{4.16}$$

де A_f – робота сил тертя; $A_{k.o}$ – корисна робота виконана машиною для взведення бойка. З іншого боку взведення бойка здійснюється за рахунок провертання кулачка на деякий кут $\varphi_в$. Враховуючи, що роботу зведених рушійних сил і сил опору можна виразити через зведений момент: $M_{зв} = M_p + M_{к.о}$, рівняння рівноваги буде мати вигляд:

$$dA = M_{зв}\, d\varphi, \tag{4.17}$$

де φ – узагальнена координата кута повороту ланки взведення.

Корисна робота виконана машиною для взведення бойка (стиснення пружини) визначається як різниця потенціальної енергії, рис. 4.10.

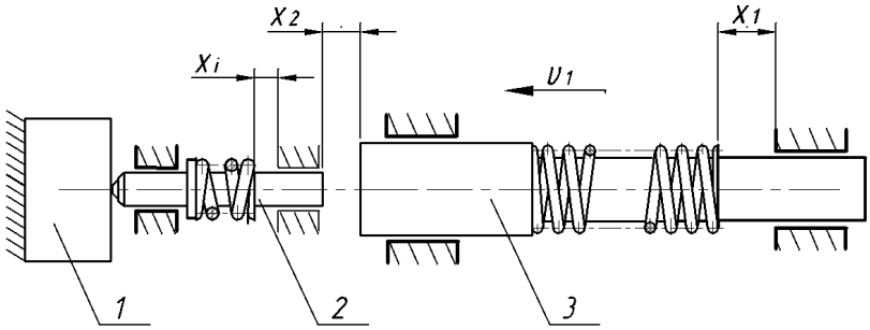


Рис. 4.10. Розрахунково-конструктивна схема ударної системи з комбінованим навантаженням бойка:

1 – зразок; 2 – інструмент; 3 – бойок

$$A_{k.o} = W_{n1} - W_{n2} = \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} = \frac{k}{2}((x_1 + x_2)^2 - x_1^2), \tag{4.18}$$

де W_{n1}, W_{n2} – потенціальна енергія пружини в початковій та кінцевій точках; k – жорсткість пружини; x_1 – величина стиску пружини регулювальною втулкою; x_2 – величина стиску пружини внаслідок повороту кулачка (підйом).

Модуль роботи сил тертя в напрямних бойка в залежності від кута підйому кулачка θ (рис. 3.12) визначається як:

$$A_f = |F| x_2 \sin\theta\mu, \tag{4.19}$$

де F – необхідна сила для стиснення пружини на величину x_2, θ – кут підйому кулачка, μ – коефіцієнт тертя. В нашому випадку сила F в залежності від величини x_2 визначається як:

$$F = k(x_1 + x_2). \tag{4.20}$$

Враховуючи формули (4.18-4.20), формула (4.17) матиме наступний вигляд:

$$dA = d\left(\frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} + k(x_1 + x_2)x_2 \sin\theta\mu\right) = M_{зв} \mathrm{d}\varphi. \tag{4.21}$$

Або:

$$M_{зв} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\varphi}\left(\frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} + k(x_1 + x_2)x_2 \sin\theta\mu\right). \tag{4.22}$$

Математична модель роботи ГМІ на першому етапі робочого циклу дозволяє визначити необхідний зведений крутний момент на валу ротора для найбільш навантаженого періоду (взведення бойка).

Якщо зробити припущення, що система консервативна (дисипативні чинники не враховуємо), то період розгону бойка (третій етап) можна описати згідно з законом збереження енергії наступним рівнянням:

$$\frac{m_1 v_0^2(t_1)}{2} + \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2(t_2)}{2} + \frac{kx_1^2}{2}, \tag{4.23}$$

де t_1, t_2 – проміжки часу; m_1 – маса бойка; v_0 – швидкість бойка в початковий момент часу t_1; v_1 – швидкість бойка в момент часу t_2 (удар по інструменту). Враховуючи, що початкова швидкість бойка $v_0 = 0$, а передударна $v_1 = dx_2 / dt$, рівняння руху бойка після математичних перетворень матиме вигляд:

$$\frac{dx_2}{dt} = \left((x_2^2 + 2x_1x_2)k/m\right)^{1/2}. \tag{4.24}$$

З рівнянь видно, що динаміка бойка під час розгону в більшості залежить від конструктивних параметрів ГМІ. Швидкість бойка буде зростати по мірі випрямлення пружини і досягне максимальних значень в момент удару по інструменту.

Максимальне переміщення бойка визначається як: $x_2 = R_{\max} - r_0$, де $R_{\max}, r_0$ – максимальний та мінімальний радіуси кулачка.

Для визначення часу розгону бойка $t_{роз}$ запишемо наступне рівняння:

$$dt = \frac{dx_2}{\left((x_2^2 + 2x_1x_2)k/m\right)^{1/2}}. \tag{4.25}$$

Для забезпечення збіжності торців в момент удару необхідно узгодити прямолінійний рух бойка та обертовий рух кулачка, тобто від початку розгону бойка до удару за час $t_{роз}$, кулачок повинен провернутись на кут φ_i за час $t_{пов}$ (рис. 4.8): $\varphi_i \leq 90 - (\varphi_в + \varphi_{д.с} + \varphi_н)$.

Кутову швидкість повороту кулачка визначаємо за формулою:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}. \tag{4.26}$$

Враховуючи, що $t_{роз} = t_{пов}$, формула (4.26) з врахуванням (4.25) матиме вигляд:

$$\omega_{\max} = \frac{d\varphi_i\left((x_2^2 + 2x_1x_2)k/m\right)^{1/2}}{dx}. \tag{4.27}$$

Побудовані математичні моделі для періодів взведення та розгону бойка дозволяють визначити основні параметри ГМІ.

Для визначення параметрів ГМІ проводились розрахунки відповідно до запропонованої методики в середовищі Excel. Встановлено, що підвищення частоти обертання ротора до $n_{кр}$, коли час повороту кулачка $t_{пов}$ на кут $\varphi_{б.с}$ стає меншим за час відведений на розгін і удар бойка $t_{роз}$, призводить до перехоплювання бойка кулачком і унеможливлює процес передачі енергії бойка інструменту.

Для перевірки працездатності запропонованої моделі ГМІ та дослідження оптимального частотного ряду обертів привода ротора, а також фазового кута

випередження φ_1 розроблено комп'ютерну імітаційну модель ГМІ (рис. 4.11) та проведено моделювання у середовищі SolidWorks з використанням системи для проведення кінематичного та динамічного аналізу технічних систем SolidWorks Motion.

За результатами проведених досліджень побудовано графічні залежності частоти обертання ротора $n_{кр}$ від фазового кута випередження φ_1, які представлені на рис. 4.12 та підтверджено адекватність математичної моделі, так як відхилення результатів не перевищують 6%.

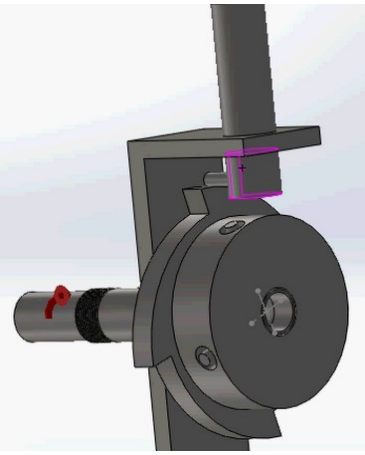


Рис. 4.11. Імітаційна модель ГМІ

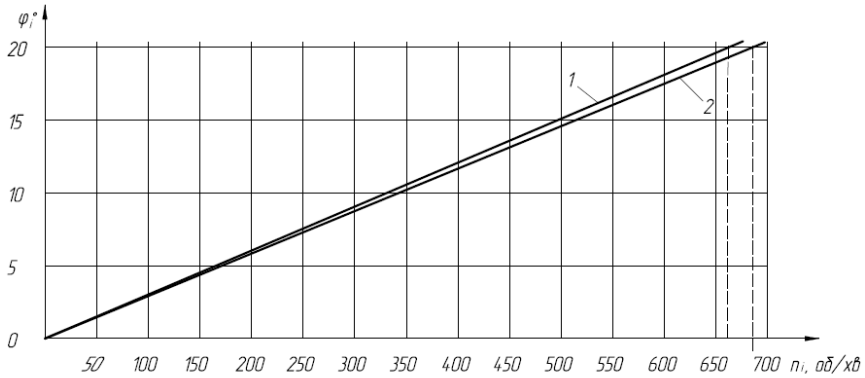


Рисунок 4.12. Графік залежності частоти обертання ротора від кута випередження φ_1:
1 – теоретична крива; 2 – крива отримана за результатами комп'ютерного моделювання

Аналіз результатів показав, що частотний ряд обертання ротора знаходиться в межах 10 – 650 об/хв, так як після $n_{кр}$ = 660 об /хв відбувається перехоплювання бойка.

Під час призначення режимів обробки слід наближатись до діапазону максимально-допустимих значень частоти обертання ротора так як від неї залежить продуктивність обробки. Відповідно до запропонованої методики проведено розрахунки параметрів ГМІ технологічного устаткування, основні технічні характеристики якого зведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Технічні характеристики ГМІ

Радіус деформуючого тіла R_i, мм	1.5 – 2.5
Енергія удару W, Дж	0.5 – 4
Статичне навантаження інструмента $F_{ст1}$, Н	40 – 80
Статичне навантаження бойка $F_{ст2}$, Н	60 – 200
Частота ударів f, Гц	1.3 – 84
Частота обертання ротора n, хв.$^{-1}$	10 – 630
Стиснення пружини регулювальною втулкою x_1, мм	0 – 27
Стиснення пружини кулачком x_2, мм	15
Маса бойка m_1, кг	0,3
Жорсткість пружини k, Н/м	50000

4.4. Експериментальне устаткування для біполярного статико-імпульсного зміцнення зовнішніх неповних сферичних поверхонь

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та запатентовано експериментальне устаткування для реалізації біполярного СІЗ [110]. Схема устаткування для біполярного СІЗ НСП наведена на рис. 4.13, а 3D модель устаткування на рис. 4.14. Для зменшення металоємкості конструкції проведено суміщення елементів генератора імпульсів та ударної системи. Генератор імпульсів виконаний з можливістю регулювання кута випередження кулачка β в залежності від частоти обертання ротора.

Пристрій містить корпус 1, закріплений нерухомо на станині верстата (не показано), в якому встановлено ротор 2 і пристрій 5 для закріплення заготовки кульового пальця з індивідуальним приводом.

На роторі 2 встановлені деформуючі елементи 6 у формі циліндрів з випуклими торцями з робочою сферичною частиною, які статично навантажені пружними елементами 7, стиснення яких забезпечується регулювальними втулками 8 і виконані з

можливістю переміщення у напрямку перпендикулярному осі обертання ротора 2. Ударні механізми 9, які містять напрямну 10, бойок 11, пружину 12 зафіксовану регулювальною втулкою 13, закріплені на корпусі 1.

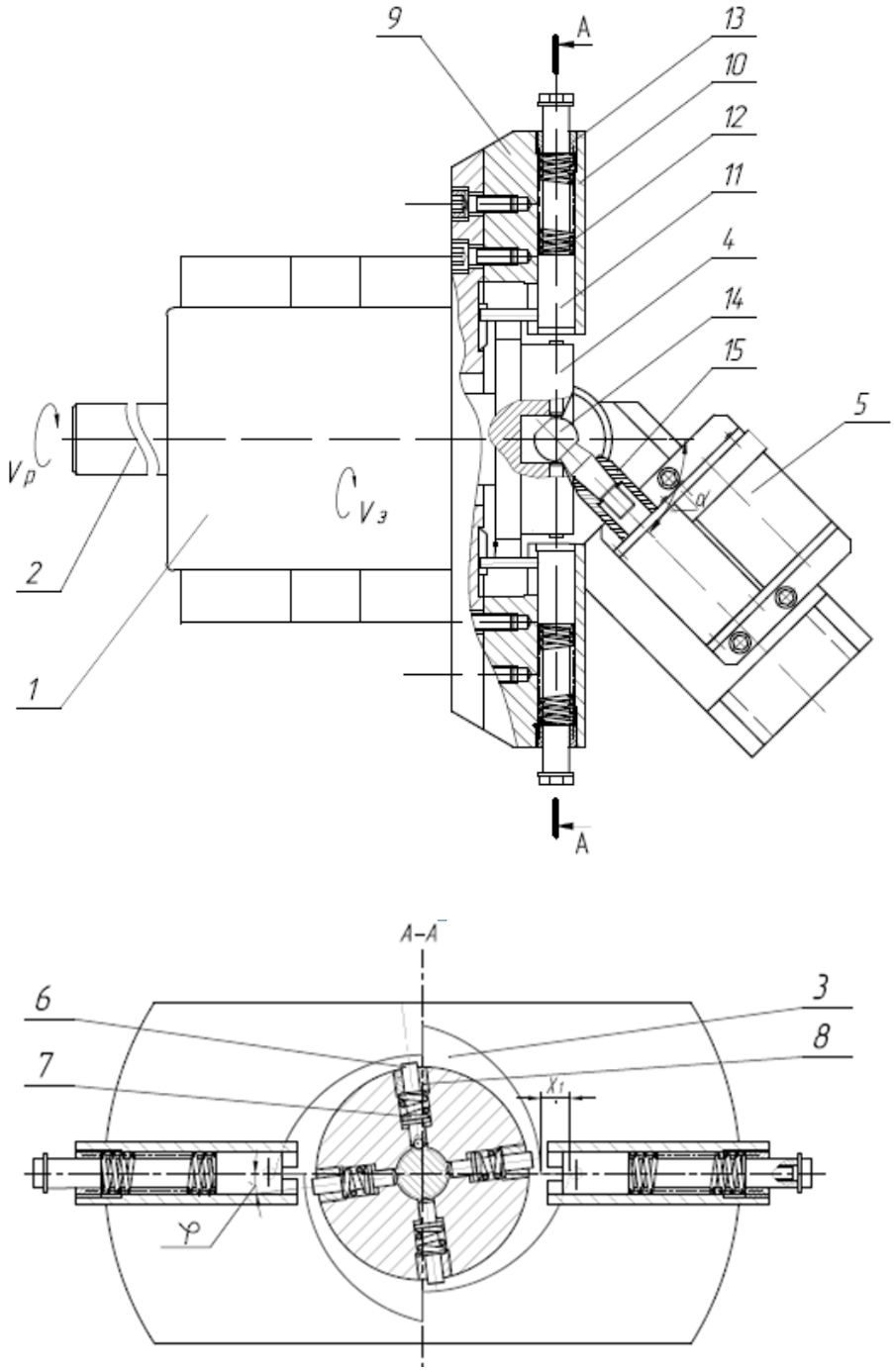


Рис. 4.13. Схема устаткування для біполярного СІЗ НСП

Ударні механізми 9, які містять напрямну 10, бойок 11, пружину 12 зафіксовану регулювальною втулкою 13, закріплені на корпусі 1. На роторі 2 розміщений кулачок 3, який має кінематичний зв'язок із бойками 11 та можливість регулювання фазового динамічного кута випередження β. Це забезпечує статико-імпульсне навантаження на сферичну поверхню заготовки кульового пальця 14, що закріплюється у патроні 15 пристрою 5 і обертається відносно власної осі з частотою $n_з$ та отримує додаткове коливання на кут φ відносно центра НСП, причому осі симетрії заготовки кульового пальця, ротора і бойків інструментальної головки лежать в одній площині.

Робота пристрою для зміцнення сферичних поверхонь ґрунтується на властивості сферичної поверхні, яка полягає у тому, що будь-який її перетин площиною, включаючи площини, зміщені щодо центра сфери, дає коло і здійснюється наступним чином. Заготовку кульового пальця закріплюють у патроні 15, якому надають обертовий рух з частотою $n_з$ і осьове переміщення S_n для підведення сферичної поверхні заготовки 14 до контакту з деформуючими елементами 6, які формують статичне навантаження F_{cmi} на сферичну поверхню заготовки.

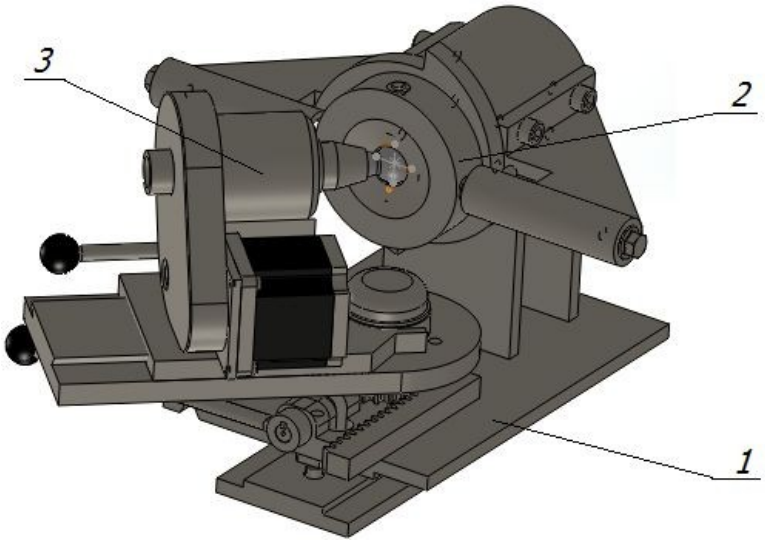


Рис. 4.14. 3D модель устаткування для біполярного СІЗ НСП:
1 – платформа; 2 – інструментальна головка для статико-імпульсного деформування;
3 – поворотний пристрій для закріплення заготовки з приводом

При наданні ротору 2 обертового руху з частотою n_p під дією кулачка 3 генератора імпульсів (попередньо налаштованого з урахуванням динамічного фазового кута випередження β), який має кінематичний зв'язок з бойками 11, пружина 12 періодично стискається і забезпечує циклічне, статико-імпульсне навантаження F_{cm1} і F_{cmi} на сферичну поверхню заготовки кульового пальця 14. За такої схеми обробки заготовка пальця 14 одночасно сприймає дві зустрічні деформаційні хвилі, енергія яких максимально використовується під час деформації поверхневого шару сферичної поверхні.

Запропонований пристрій розширює технологічні можливості СІО завдяки використання біполярного статико-імпульсного впливу, що підвищує продуктивність і точність обробки, а також дозволяє формувати зміцнений поверхневий шар з різним коефіцієнтом перекриття пластичних відбитків.

Висновки до четвертого розділу

1. В перше запропоновано спосіб біполярного статико-імпульсного зміцнення та модель ударної системи біполярної дії з комбінованим навантаженням ступінчатого бойка, завдяки чому досягається підвищення коефіцієнта використання енергії, продуктивності процесу обробки та зниження металоємкості конструкції пристрою.

2. Розроблено схему обробки для біполярного СІЗ НСП кульового пальця та проведено дослідження формування мікрорельєфу.

3. Розглянуто вплив технологічних параметрів на величину подачі деформуючого інструмента та виведено математичні залежності для визначення режимів обробки з врахуванням коефіцієнта перекриття.

4. Запропоновано конструкцію ГМІ та проведено розрахунок конструкторсько-технологічних параметрів устаткування.

5. Розглянуто цикл роботи ГМІ та розроблено розрахунково-конструктивну схему ударної системи, побудовано математичну модель роботи на першому етапі робочого циклу (який відповідає періоду взведення), а також рівняння руху бойка для третього етапу роботи (тобто етапу розгону бойка) та рівняння для визначення часу відведеного на розгін бойка і максимально допустимої кутової швидкості кулачка. Отримані математичні моделі для періодів взведення та розгону бойка дозволяють визначити основні параметри ГМІ машини.

6. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та запатентовано експериментальне устаткування для реалізації біполярного СІЗ НСП.

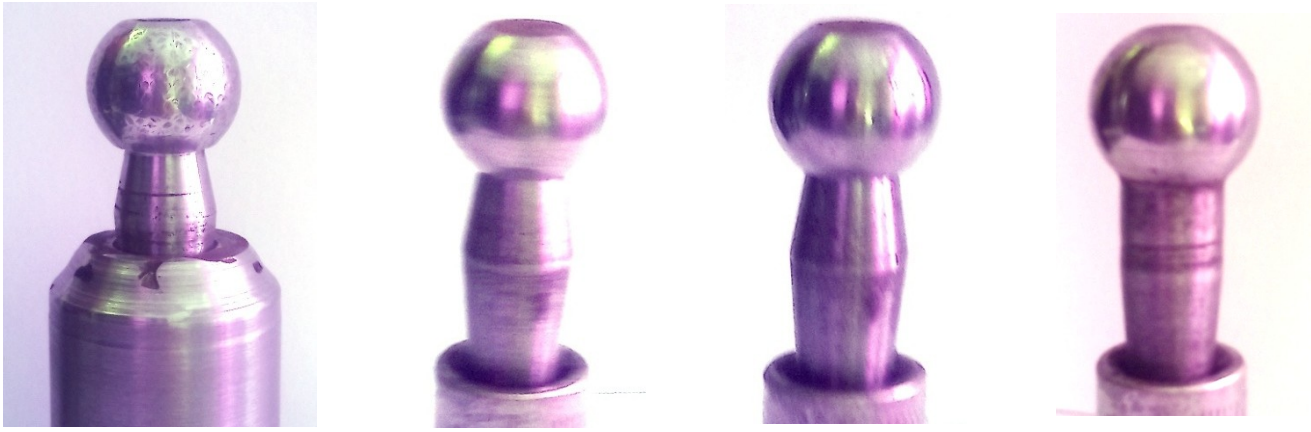
РОЗДІЛ 5
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЇ ДОСЯГНУТИХ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

5.1. Апробація способу біполярного статико-імпульсного зміцнення та експериментального устаткування

Для перевірки працездатності експериментальної установки було зміцнено серію пальців кульових шарнірів з різною варіацією параметрів обробки, які визначались за побудованими математичними моделями.

Для досліджень були виготовлені зразки (пальці) зі сталі 40Х. Обточування НСП пальців здійснювалось за допомогою спеціального пристрою.

Зразки (рис. 5.1) зміцнювались з коефіцієнтами перекриття: K = 0; K = 0,3, K = 0,5; K = 0,7; K = 0,9, після чого проводились дослідження мікрорельєфу (рис. 5.2) та розподілення твердості по глибині.



$K < 0$ $K = 0,5$ $K = 0,7$ $K = 0,9$

Рис. 5.1. Фото експериментальних зразків

$K = 0$ $K = 0,5$ $K = 0,7$ $K = 0,9$

Рис. 5.2. фото типів мікрорельєфу

Проведено експериментальні дослідження зміни поверхневої мікротвердості від значення коефіцієнта перекриття пластичних відбитків.

Експериментально встановлено, що під час зміцнення в залежності від величини коефіцієнта перекриття, в поверхневому шарі формуються зони вторинної, третинної, і.т.д. деформації, що призводить до зростання мікротвердості та зміни параметру шорсткості зміцненої поверхні.

Результати експериментальних досліджень поверхневої мікротвердості при різних коефіцієнтах перекриття зведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Результати експериментальних досліджень

Радіус кульки R_i, мм	1,5				
Енергія $W_{уд}$, Дж	2,25				
Статичне навантаження інструмента F_{cmi}, Н	60				
Коефіцієнт перекриття K	0	0,3	0,5	0,7	0,9
Мікротвердість HV^{100}	312/429	455	493	536	558
Степінь деформації ε, %	37,5	45,7	58,0	71,8	78,7

За результатами експериментальних досліджень побудовано графік залежності величини зміни поверхневої мікротвердості від значення коефіцієнта перекриття K, рис. 5.3.

При зміцненні з K, що наближається до одиниці спостерігається явище перенаклепу (злущування тонких шарів металу).

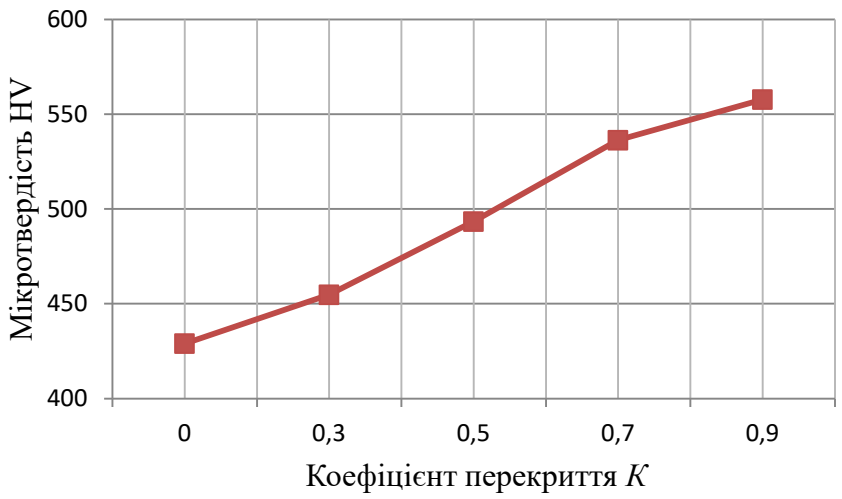


Рис. 5.3. Графік залежності зміни поверхневої мікротвердості від значень *К*

Дослідження мікротвердості по глибині проводилось з кроком вимірювання 50 мкм. Середні значення результатів за трьома вимірюваннями зведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Дослідження мікротвердості по глибині

Умови експерименту	Палець (сталь 40Х) d_c = 25 мм		
	Енергія $W_{уд}$ = 2,25 Дж		
	Інструмент кулька, R_i = 1,5 мм		
	Статичне навантаження інструмента F_{cmi} = 60 Н		
	Статичне навантаження бойка F_{cm1} = 120 Н		
Глибина l_y, мкм	Коефіцієнт перекриття *К*		
	К = 0,5	*К* = 0,7	*К* = 0,9
	Мікротвердість HV^{100}		
0	493	536	560
50	487	534	558
100	475	520	544
150	450	488	523
200	416	448	486
250	381	406	436
300	347	372	394
350	322	340	363
400	312	322	340
450	312	314	328
500	312	312	320

За результатами експериментальних досліджень побудовано графіки залежності зміни мікротвердості за глибиною від величини коефіцієнта перекриття *К*, рис. 5.4.

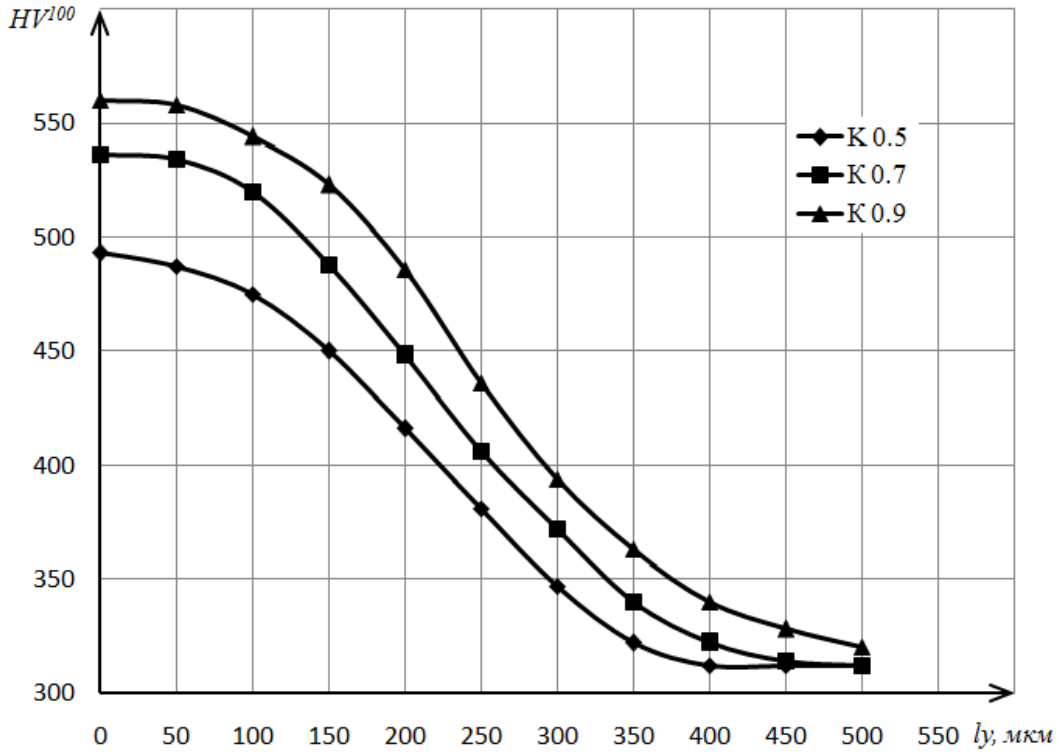


Рис. 5.4. Графік залежності зміни мікротвердості за глибиною від величини коефіцієнта перекриття *К*

На основі аналізу результатів експериментальних досліджень встановлено, що при зміцнені з коефіцієнтом перекриття K = 0 – 0.9 і енергії удару $W_{уд}$ = 2,25 Дж – степінь зміцнення лежить в межах 37,5 – 79,5 %. При зміцнені 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 зміцнені з коефіцієнтом перекриття K = 0,7 – 0,9 формується рівномірно-зміцнений поверхневий шар, причому з зростанням величини *К* параметр шорсткості зменшується, а твердість збільшується.

Також перевірено можливість формування мастило утримуючого мікрорельєфу на зміцненій НСП. На НСП пальця зміцненого з коефіцієнтом K = 0,9 до твердості

HV^{100} = 550 одиниць формувався мастилоутримуючий профіль з коефіцієнтом перекриття $K < 0$ (рис. 5.5).

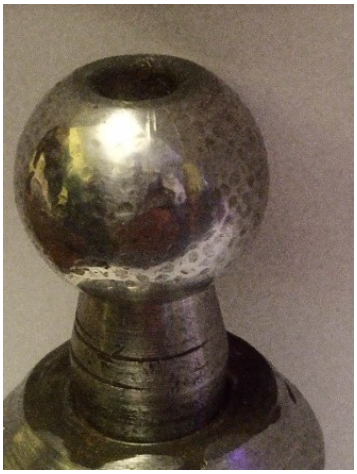


Рис. 5.5. Фото пальця з мастилоутримуючим профілем

Результати досліджень експериментального устаткування для біполярного СІЗ [110] використані при проектуванні машини модульної конструкції для біполярного СІЗ зовнішніх неповних сферичних та циліндричних поверхонь з можливістю формування геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю [137].

5.2. Дослідження впливу параметрів біполярного зміцнення на механічні властивості зразків із сталі 40Х

Для дослідження впливу параметрів біполярного статико-імпульсного зміцнення на механічні властивості матеріалу, використовувались зразки із сталі 40Х квадратного перерізу з стороною a=6,5 мм та довжиною робочої частини l_0 = 100 мм, рис. 5.6.

Зразки виготовлялись з сталі 40Х нормалізованої до твердості HV^{100} = 312 одиниць.

Випробувались зразки на розтяг зміцнені з різними значеннями коефіцієнта перекриття K при наступних технологічних параметрах: (енергія $W_{уд}$ = 2,25 Дж; інструмент кулька, R_i = 1,5 мм; статичне навантаження інструмента F_{cmi} = 60 Н; статичне навантаження бойка F_{cm1} = 120 Н), рис. 5.6. Зразок №1– без зміцнення, зразок №2 – зміцнений з коефіцієнтом перекриття K = 0,9 з нанесенням мастилоутримуючого профілю, зразок №3 – зміцнений з коефіцієнтом перекриття

K = 0,5, зразок №4 – із зміцненою зоною з коефіцієнтом перекриття K = 0,9 довжиною 20 мм.

1) 2) 3) 4)

Рис. 5.6. Загальний вигляд зразків після випробувань на розтяг

Результати випробувань експериментальних зразків на одноосьовий статичний розтяг зведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Результати випробувань експериментальних зразків

Зразок №	K	HV^{100}	$F_{мц}$, Н	Δl_0, мм	ΔA_0, мм	$\sigma_{мц}$, Н/мм^2	ε,%	Ψ,%
1	-	316	3420	19,2	24,6	809	19,2	58,2
2	0,9	563	3780	10	12	894,6	10	28,4
3	0,5	490	3610	14	19,25	855	14	45,5
4	0,9	-	3410	13	22	–	–	52,0

Для вивчення основних механічних характеристик міцності побудовано діаграму напружень (рис. 5.7), яка відображає характеристики для кожного окремого зразка (криві 1-3).

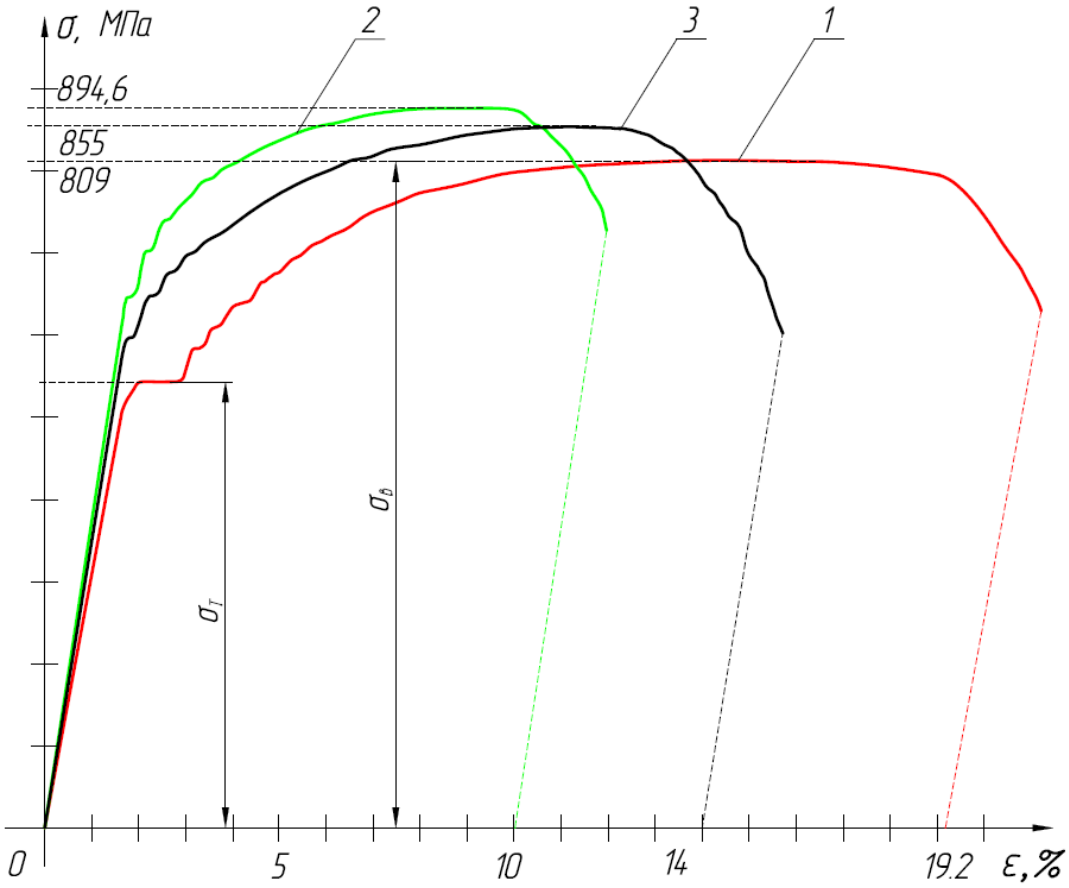


Рис. 5.7. Діаграма механічних напружень:

1 – характеристика не зміцненого зразка; 2–зразок зміцнений при $K = 0,9$;

3– зразок зміцнений при $K = 0,5$

Криві 1, 2, 3 відповідно характеризують механічні властивості сталі 40Х нормалізованої та зміцненої при різних режимах.

Аналіз значень експериментальних даних 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 пружнім та міцнішим, але втрачає пластичність.

5.3. Дослідження працездатності зміцненого пальця сферичного шарніра

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. Для досліджень використовувались пальці зміцнені обкочуванням та статико імпульсною обробкою з коефіцієнтом перекриття $K = 0,9$. Результати експериментальних випробувань зведені в табл. 5.4 та відображені графічно (рис. 5.8).

Таблиця 5.4

Результати експериментальних досліджень

№	s 10^6, мм	Палець обкатний		Палець зміцнений K=0.9	
		a, мм	a_0=0,5, a- a_0, мм	a, мм	a_0=0,5, a- a_0, мм
1	0,05	0,92	0,42	0,85	0,35
2	0,1	1,20	0,7	1,0	0,5
3	0,2	1,41	0,91	1,13	0,63
4	0,3	1,58	1,08	1,25	0,75
5	0,4	1,71	1,21	1,35	0,85
6	0,5	1,82	1,32	1,46	0,96

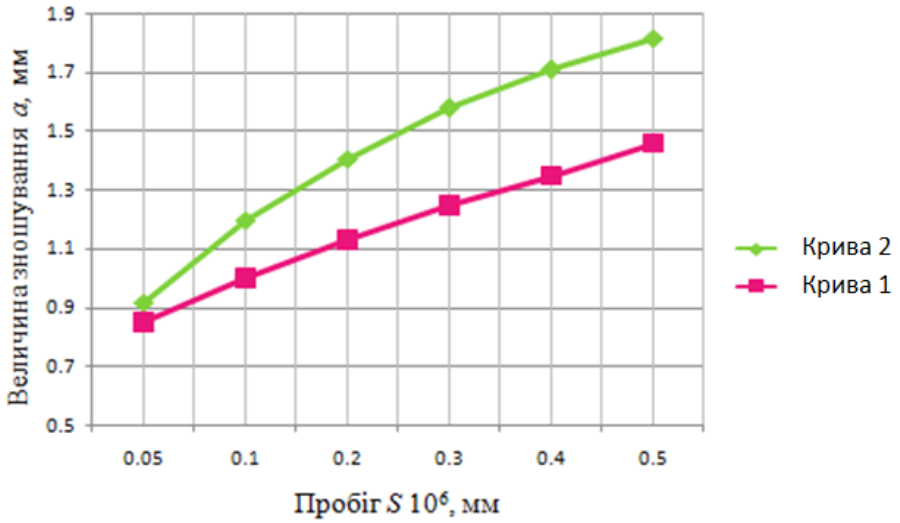
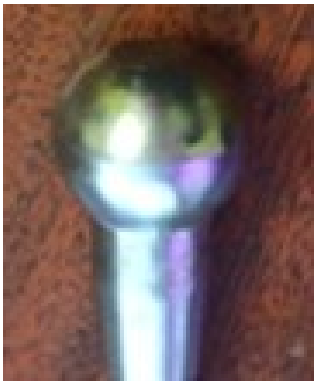


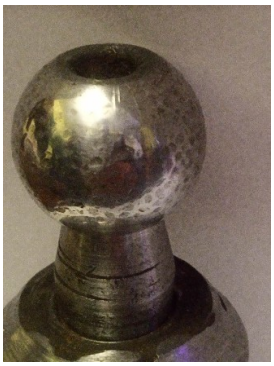
Рис. 5.8. Графік величини зношування від напрацювання:
1 – палець зміцнений з $K = 0,9$ та мастилоутримуючим профілем; 2– палець зміцнений обкочуванням

Фото експериментальних зразків наведено на рис. 5.9.

а)



б)



в)

Рис. 5.9. Фото експериментальних зразків:
а – полімерний зразок; б – палець зміцнений обкочуванням; в – палець зміцнений з К = 0,9 та мастилоутримуючим профілем

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 порівняні з зміцненим обкочуванням.

Для перевірки працездатності зміцненого кульового пальця в реальних умовах експлуатації, ним було оснащено автомобільний кульовий шарнір оригінальної конструкції [138]. Дослідження модернізованих елементів конструкції шарніра наведені в додатку Д.

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

5.4. Машина для біполярного статико-імпульсного зміцнення

Результатом виконання роботи є створення машини для біполярного СІЗ зовнішніх циліндричних та неповних сферичних поверхонь деталей машин з можливістю формування геометрично визначеного мастилоутримуючого профілю [137], загальний вигляд якої наведено на рис. 5.10.

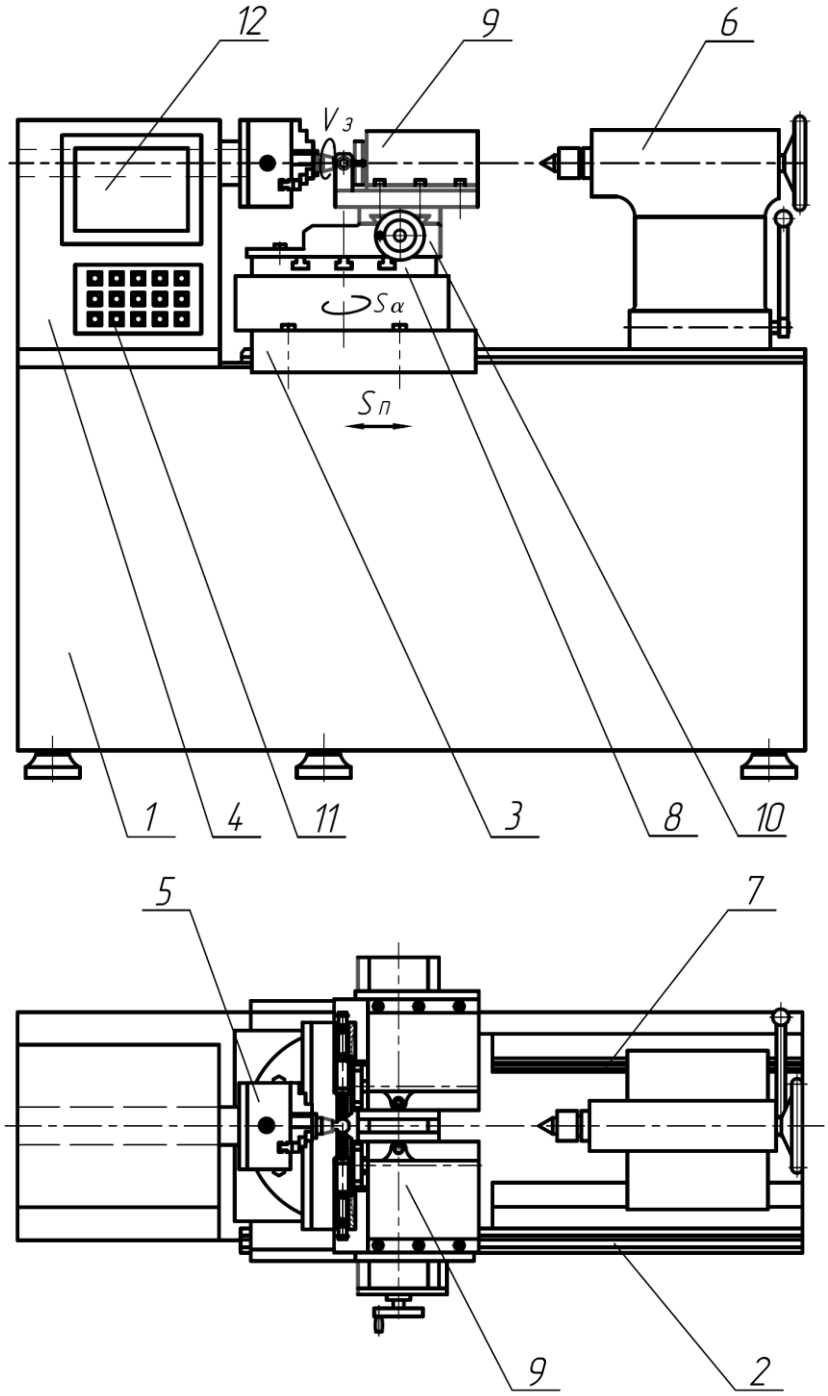


Рис. 5.10. Схема машини для біполярного СІЗ НСП

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 пристосування для закріплення і обертання заготовки 5, задню

бабку 6, яка встановлена на напрямні 7. Заготовка закріплюється у пристосуванні 5, обертання якого забезпечується приводом (не показано), розміщеним в передній бабкі 4.

На супорт поздовжніх переміщень 3 встановлено поворотний стіл 8 з індивідуальним приводом (не показано). Дві інструментальні головки 9, закріплені у пристосуванні 10, встановленому на поворотному столі 8 таким чином, що осі інструментів з деформуючими елементами головок 9 і вісь обертання стола 8 находяться в одній площині, перпендикулярній площині, в якій знаходиться вісь обертання пристосування для закріплення заготовки 5.

Пристосування 10 оснащено механізмом регулювання інструментальних головок (не показано) відносно осі обертання заготовки, закріпленої у пристосуванні 5. Інструментальні головки 9, оснащені механічними кулачковими, генераторами імпульсів з синхронізованими безступінчастими приводами (не показано) і цифровою системою керування. Поздовжнє переміщення супорта 3 забезпечується механізмом подачі (не показано), оснащеного безступінчастим приводом з цифровою системою керування.

Керування машиною здійснюється за допомогою системи з числовим програмним керуванням. Машина містить вбудований пульт керування 11 та панель індикації 12.

Робота машини здійснюється наступним чином. Інструментальні головки 9, які закріплені на поворотному столі 8 налагоджуються на заданий розмір за допомогою пристосування 10, оснащеного механізмом регулювання (не показано) інструментальних головок 9 відносно осі обертання пристосування 5 для закріплення заготовки.

При обробці зовнішніх циліндричних поверхонь заготовку закріплюють у пристосуванні 5 і задній бабкі 6, яка служить для додаткової підтримки оброблюваної заготовки. Надають обертовий рух заготовці $V_з$ і поздовжню подачу $S_п$. Система

керування машини у відповідності до алгоритму забезпечує біполярне статико-імпульсне зміцнення та формування геометрично визначеного мікрорельєфу поверхневого шару.

При обробці неповних сферичних поверхонь, заготовку, наприклад, палець СШ, закріплюють у пристосуванні 5, надають обертовий рух *Vз* і поздовжню подачу S_n для підведення сферичної поверхні заготовки до контакту з деформуючими елементами інструментів головок 9.

Кутова подача S_α забезпечується завдяки повороту стола 8 на кут α. Під дією ударної системи інструментальних головок 9 формується біполярне статико-імпульсне навантаження на сферичну поверхню заготовки. Система керування машини у відповідності до алгоритму, забезпечує оброблення всієї сферичної поверхні, нанесення геометрично визначеного мікрорельєфу з заданим коефіцієнтом перекриття пластичних відбитків.

Робота машини при зміцненні сферичних поверхонь ґрунтується на властивості сферичної поверхні, яка полягає у тому, що будь-який її перетин площиною дає окружність. Таким чином, точність оброблення сферичної поверхні визначається кінематикою процесу, що дозволяє отримати неповні сферичні поверхні високої точності.

Запропонована машина розширює технологічні можливості поверхневого пластичного зміцнення завдяки використанню біполярного СІЗ, що підвищує продуктивність і точність обробки та дозволяє керувати глибиною зміцненого шару, ступенем зміцнення і мікрорельєфом зовнішніх поверхонь обертання деталей машин в автоматичному режимі у відповідності до заданого алгоритму.

Блок схема алгоритму розрахунку параметрів процесу обробки відображено на рис. 5.11.

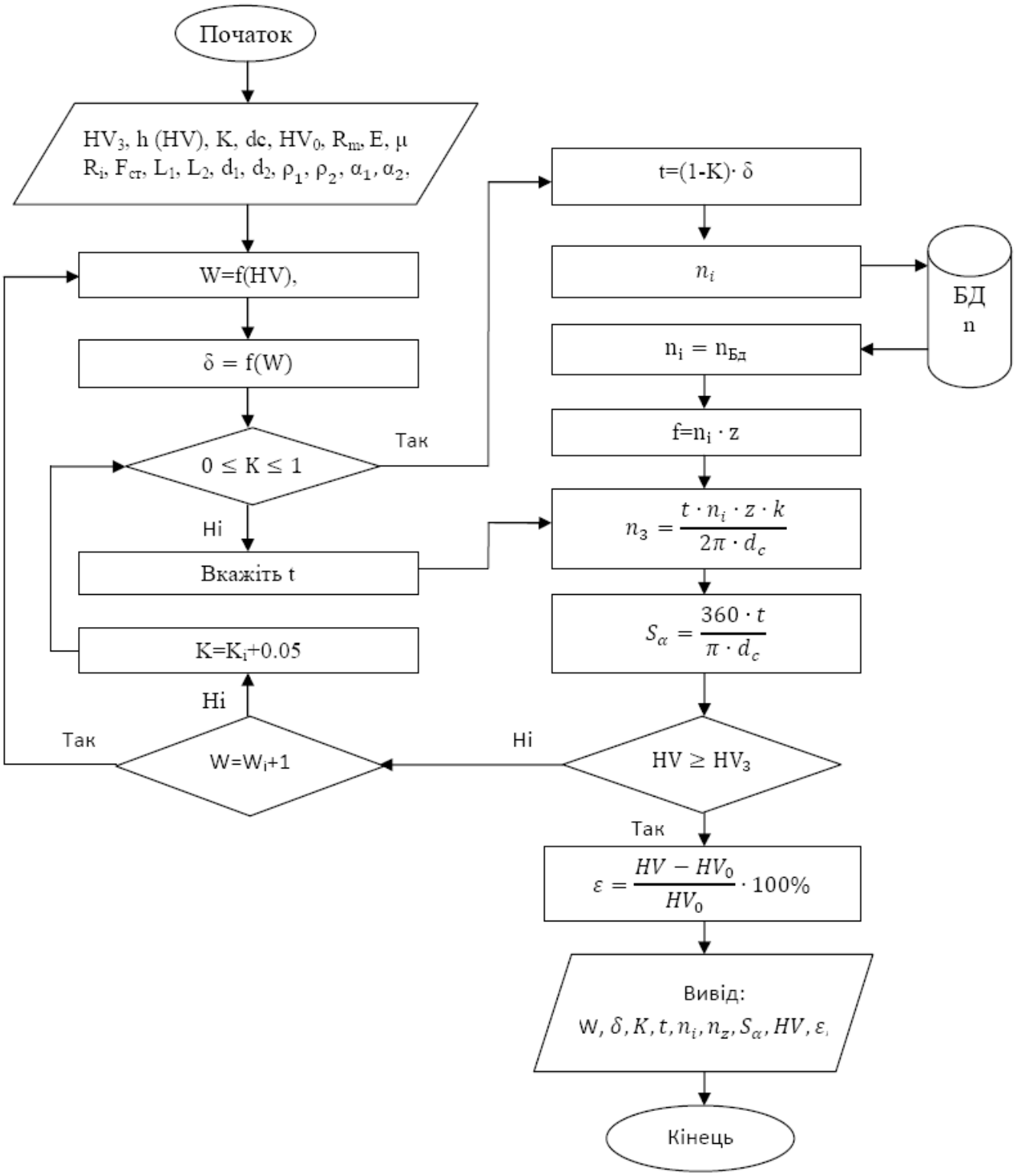


Рис. 5.11. Схема алгоритму розрахунку параметрів машини

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, μ);
- конструктивно-технологічні параметри ударної системи (R_i, $F_{ст}$, L_1, L_2, d_1, d_2, ρ_1, ρ_2, α_1, α_2, z, k).

1.1 Визначення за експериментальними залежностями значень енергії одиничного удару W і діаметр пластичного відбитка δ;

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 Вибір частоти обертання кулачка n_i;

2.2 Визначення частоти ударів по інструменту f_i;

2.3 Визначення частоти обертання заготовки n_3;

2.4 Визначення кутової подачі S_α, на один оберт заготовки.

3 Перевірка отриманих параметрів поверхневого шару:

3.1 Порівняння базових значень мікротвердості із заданими $HV \geq HV_з$ та визначення ступеня зміцнення ε. 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 СІЗ та ГМІ.

Основні технічні характеристики машини наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Технічні характеристики машини для біполярного СІЗ

Технічні характеристики машини	Параметри
Діаметр оброблюваної заготовки $d_з$, мм	20 – 150
Міжцентрова відстань L_{max}, мм	750
Радіус деформуючого тіла R_i, мм	1.5 – 2.5
Енергія удару $W_{уд}$, Дж	0.5 – 4
Статичне навантаження інструмента $F_{ст1}$, Н	40 – 80
Статичне навантаження бойка $F_{ст2}$, Н	60 – 200
Частота ударів f, Гц	до 25
Частота обертання ротора кулачка n, хв.$^{-1}$	10 – 630
Стиснення пружини регулювальною втулкою X_1, мм	0 – 27
Стиснення пружини кулачком X_2, мм	15
Маса бойка m_1, кг	0,3
Жорсткість пружини k, Н·м	50000
Потужність ,кВт	3,5
Габарити, мм	1800x800x1050
Маса, кг	470

Завдяки модульній конструкції і використання індивідуальних приводів та системи числового керування, з’явилась можливість швидкого переналагоджування на різні типорозміри деталей.

Машина містить індивідуальний блок управління, вбудований 12-ти дюймовий екран та панель індикації і керування органами верстата, що значно полегшує роботу оператора.

5.5 Удосконалення конструкції та технології виготовлення пальця сферичного шарніра

5.5.1 Удосконалення конструкції пальця кульової опори

На основі проведених досліджень встановлено, що сферична поверхня пальця СШ зношується не рівномірно, так як під час експлуатації відносні швидкості ковзання різні і максимального значення набувають в полюсних зонах. В результаті аналізу типової конструкції пальця СШ було виявлено ряд технологічних елементів, які підлягають удосконаленню,а саме:

– для зменшення напружень в небезпечному перерізі запропоновано збільшити радіус галтелі А (рис. 5.12);

– для підвищення технологічності конструкції пальця СШ запропоновано виконати в полюсній зоні торцевий зріз Г та центрувальні отвір Б і В (рис. 5.12).

Так як контактуюча сферична поверхня працює в умовах граничного змащування, то НСП доцільно зміцнити та сформувати мастилоутримуючий профіль П у вигляді геометрично визначених на поверхні дискретних лунок.

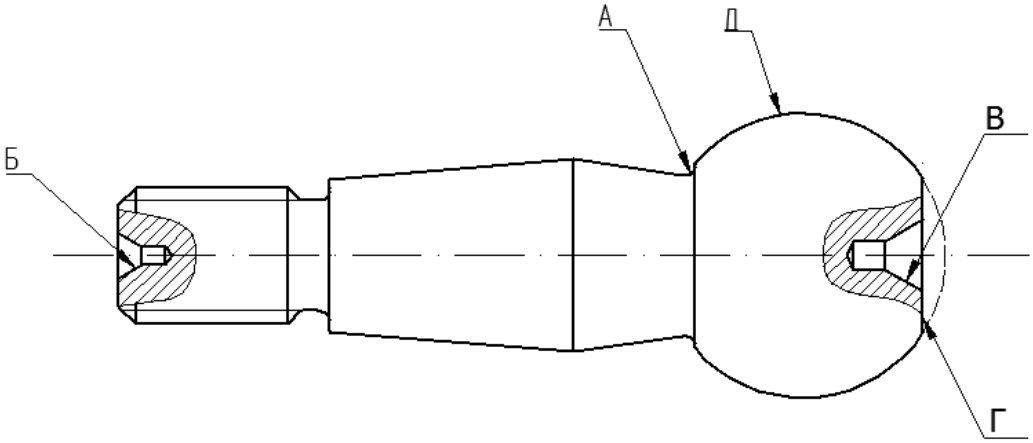


Рис. 5.12 – Схема технологічних елементів

Впровадження таких заходів дозволить отримати технологічну деталь удосконаленої конструкції з покращеними функціональними властивостями.

5.5.2 Технологічний маршрут процесу виготовлення деталі палець

Запропонована удосконалена технологія виготовлення пальця СШ та розроблено технологічний маршрут обробки, виходячи з вимог до робочого креслення і властивостей матеріалу заготовки.

Послідовність методів обробки поверхні на першому переході вибирають в залежності від способу отримання заготовки та її точності. Встановлюють методи кінцевої обробки поверхні в залежності від технічних вимог, які ставляться до цієї поверхні.

Методи обробки поверхні на проміжних переходах призначають на основі вже вибраного першого і останнього методів обробки.

Таким чином, кожному методу кінцевої обробки, передує декілька попередніх методів. На чорнових операціях точність поверхні підвищується на 2 – 3 квалітети, на чистових на 1 – 2. Враховуючи дані рекомендації розроблено узагальнений технологічний маршрут виготовлення деталі палець.

Для побудови плану маршруту технологічного процесу механічної обробки пальця схематично зобразимо деталь на рис. 5.13 з позначенням її поверхонь, після чого складемо план.

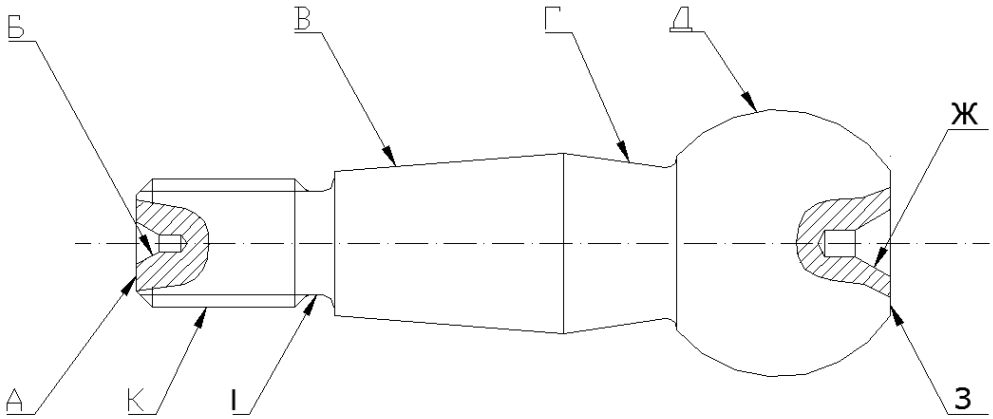


Рис. 5.13. Позначення оброблюваних поверхонь пальця

Операція 005 заготівельна. Технологічний процес одержання заготовки – гаряче об’ємне штампування.

Операція 010 термічна. Покращення, відпуск.

Операція 015 фрезерно-центрувальна. Верстат фрезерно-центрувальний моделі МР-75. Виконати центрувальні отвори Ж, Б**.** Пристрій – Фасоні призми. Ріжучий інструмент Насадна фреза, свердло центрувальне.

Операція 020 токарна з ЧПК. Контурна обробка усіх поверхонь до заданих розмірів. Верстат токарно-гвинторізний з ЧПК моделі 16К20-Ф3. Пристрій – жорсткий центр. Ріжучий інструмент контурний прохідний різець оснащений твердосплавною пластинкою Т15К6.

Операція 025 різьбонакатна. Накатати різьбу К. Верстат різьбонакатний мод. АА 0418 Б.

Операція 030 Токарна. Обточити сферичну поверхню Д начисто. Верстат токарно-гвинторізний моделі ІТ 1-М. Пристрій – технологічне спорядження для обточування НСП, оправка. Ріжучий інструмент – різець лівий, прохідний упорний оснащений твердосплавною пластинкою Т15К6.

Операція 035 зміцнювальна. Технологічне устаткування для біполярного статико-імпульсного зміцнення поверхні Д.

Операція 040 контрольна. Контролювати розміри та якість відповідно до технічних вимог вказаних на креслені деталі.

При обробці пальця використовується як спеціальний, так і універсальний ріжучий інструмент (центрувальні свердла, різці прохідні, підрізні, контурні і канавкові та комплект технологічного спорядження для обточування неповної сферичної поверхні.

Зведений маршрут технологічного процесу виготовлення деталі палець наведено в табл.5.6.

Таблиця 5.6

Зведений маршрут обробки пальця СШ

№ опер	Назва операції	Модель верстата	Короткий зміст	Базові повер-хні
1	2	3	4	5
005	Заготівельна		Гаряче об’ємне штампування	
010	Термічна		Покращення, відпуск	
015	Фрезерно-центрувальна	МР-71	Фрезерувати торці А, З одночасно. Центрувати два отв. Б і Ж одночасно	
020	Токарна з ЧПК	16К20Ф3	Точити пов. К витримуючи розмір ø $11{,}97_{-0{,}05}$ під різьбу М12- 7h, канавку І. Точити попередньо і остаточно пов. В, Г. Точити пов. Д витримуючи розмір ø $26_{-0{,}1}$	Б,Ж
025	Різьбонакатна	АА 0418 Б	Накатати різьбу К	
030	Токарна	ІТ 1-М	Точити начисто пов. Д, витримуючи розмір ø $25^{+0.25}$	В
035	Зміцнювальна	Технолог. устаткування	Обробити пов. Д	В
040	Контрольна		Контролювати розміри та якість відповідно до технічних вимог вказаних на креслені деталі	

5.5.3 Технологічний маршрут процесу виготовлення деталі палець (експериментальне виробництво «БелМаг»)

Операція 005 заготівельна. Технологічний процес одержання заготовки – гаряче об’ємне штампування.

Операція 010 термічна. Покращення, відпуск.

Операція 015 фрезерно-центрувальна. Верстат фрезерно-центрувальний моделі МР-75. Виконати центрувальні отвори Ж, Б**.** Пристрій – Фасоні призми. Ріжучий інструмент Насадна фреза, свердло центрувальне.

Операція 020 токарна з ЧПК. Контурна обробка усіх поверхонь до заданих розмірів. Верстат токарно-гвинторізний з ЧПК моделі 16К20-Ф3. Пристрій – жорсткий центр. Ріжучий інструмент контурний прохідний різець оснащений твердосплавною пластинкою Т15К6.

Операція 025 шліфувальна. Шліфувати конусну поверхню В. Верстат кругло-шліфувальний моделі 3М150 з повідковим патроном. Ріжучий інструмент круг абразивний ПП 24А40НСМ25К8.

Операція 030 різьбонакатна. Накатати різьбу К. Верстат різьбонакатний мод. АА 0418 Б.

Операція 035 фрезерна. фрезерувати сферичну поверхню Д начисто. Верстат горизонтально-фрезерний моделі 6Р82. Пристрій – приводна головка, оправка. Ріжучий інструмент – спеціальна двозуба фреза, оснащена твердосплавними пластинками Т15К6.

Операція 040 зміцнювальна. Зміцнити сферичну поверхню Д. Верстат горизонтально-фрезерний моделі 6Р82. Пристрій – приводна головка, оправка. Інструмент – спеціальна обкатна головка.

Операція 045 контрольна. Контролювати розміри та якість відповідно до технічних вимог вказаних на креслені деталі.

При обробці пальця використовується як спеціальний, так і універсальний ріжучий й абразивний інструменти, до яких відносяться центрувальні свердла, різці прохідні, підрізні, контурні і канавкові, шліфувальні круги та комплект технологічного спорядження для фрезерування й зміцнення неповної сферичної поверхні.

Зведений маршрут технологічного процесу виготовлення деталі палець наведено в табл.5.7.

Таблиця 5.7

Зведений маршрут обробки пальця СШ

№ опер	Назва операції	Модель верстата	Короткий зміст	Базові поверхні
1	2	3	4	5
005	Заготівельна		Гаряче об’ємне штампування	
010	Термічна		Покращення, відпуск	
015	Фрезерно-центрувальна	МР-71	Фрезерувати торці А, З одночасно. Центрувати два отв. Б і Ж одночасно	
020	Токарна з ЧПК	16К20Ф3	Точити пов. К витримуючи розмір ø $11{,}97_{-0{,}05}$ під різьбу М12- 7h, канавку І. Точити попередньо пов. В Точити попередньо і остаточно пов. Г. Точити пов. Д витримуючи розмір ø $26_{-0{,}1}$	Б,Ж
025	Кругло - шліфувальна	3М150	Шліфувати пов. В	Б,Ж
030	Різьбонакатна	АА 0418 Б	Накатати різьбу К	
035	Фрезерна	6Р82	Фрезерувати начисто пов. Д, витримуючи розмір ø $25^{+0.25}$	В
040	Зміцнювальна	6Р82	Обробити пов. Д	В
045	Контрольна		Контролювати розміри та якість відповідно до технічних вимог вказаних на креслені деталі	

Для порівняння варіантів відомої та удосконаленої технологій виготовлення деталі «палець сферичного шарніра» побудовано граф операцій технологічного маршруту, рис. 5.14.

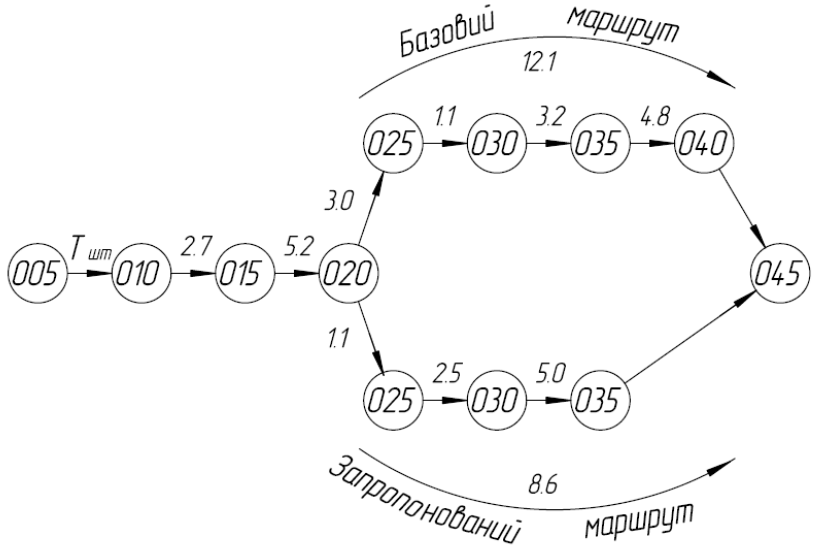


Рис. 5.14. Граф технологічного маршруту

Запропонований технологічний маршрут відрізняється від базового усуненням шліфувальної операції та економією часу. Ще однією перевагою є те, що для запропонованого технологічного маршруту використовується обладнання меншої потужності приблизно в два рази.

Рішення про вибір того чи іншого варіанту технологічного процесу, приймають після їх техніко-економічного обґрунтування по відмінних операціях.

5.6 Економічна ефективність від удосконалення технологічного маршруту

Критерієм підвищення ефективності впровадження нової технології та обладнання є підвищення норми дохідності запропонованого проекту по відношенню до базового. В наш час оцінка ефективності інвестицій може здійснюватись як

простими методами так і методами дисконтування, заснованих на принципі приведення майбутніх доходів до даного моменту часу.

Сучасний стан розвитку економіки в країні поки, що не дозволяє проводити достовірні прогнози розвитку економічних та фінансових процесів пов’язаних з машинобудівною галуззю. Саме тому в роботі використовуються прості методи оцінки ефективності від впровадженої технології, які оперують дискретними значеннями вихідних показників. В такому випадку не враховуються життєвий цикл нової технології та обладнання, а також не рівномірність грошових надходжень в різні періоди року.

Узагальнюючим показником, що визначає рівень технології є економічний ефект в якому знаходять відображення всі показники, що характеризують нову ідею. Очікуваний економічний ефект від впровадження удосконаленої технології можливо досягнути за рахунок зниження базових витрат на технологічні операції (формоутворення конічної та сферичної поверхні та при зміцнені сферичної поверхні) в умовах виробництва по наступних статтях:

– відсутність браку пов’язаного з перенаклепом полюсної частини сфери при обкочуванні;

– відсутність спеціального інструмента (різцева головка, обкатник) орієнтованого на один типорозмір;

– зниження часу на обробку за рахунок біполярного зміцнення;

– зниження енергоємності операцій через заміну не енергоефективного обладнання менш потужним;

– зниження часу налагоджування на розмір та відпрацювання операцій за рахунок використання технологічного устаткування для зміцнення з системою ЧПК.

Економічного ефект досягається зниженням основного часу на обробку та застосування технологічного обладнання меншої потужності.

Загальний економічний ефект від впровадження технології можна розрахувати за формулою:

$$K = (C_1 - C_2)\Pi(1 - N/100), \quad (5.1)$$

де К – загальний економічний ефект; C_1 – собівартість операцій механічної обробки базової технології, грн/деталь; C_2 – собівартість операцій механічної обробки удосконаленої технології, грн/деталь; Π – річна програма випуску деталей, шт;
N – ставка податку на прибуток, 30%

По розрахунковим даним норм часу, затрати на механічну обробку за базовим маршрутом складають 20хв (з них 14 хв машинний та 6 хв допоміжний час, а для запропонованого 16.5 хв (з них 11,5 хв машиний та 5,1 хв допоміжний час).

Статті витрат та технологічної собівартості виготовлення деталі палець для базового і удосконаленого варіантів зведені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8.

Технологічна собівартість виготовлення деталі «палець»

Статті витрат	Вартість грн./год.	Сума, грн./деталь	
		базовий	удосконалений
1. Витрати на оплату праці робітників	79	18,45	15,28
2. Витрати на оплату праці доп. робітників	68	6,8	5,6
3. Експлуатаційні витрати технологічного устаткування	240	56,1	46,43
4.Транспортні витрати (2%х п.3)		1,12	0,93
5. Витрати на амортизацію приміщень (7%х п.3)		3,92	3,25
6. Разом		86,39	71,5

При річній програмі випуску Π = 20000 шт., економічний ефект на період цін 2020 року складає:

$$K = (86{,}39 - 71.5)20000(1 - 30/100) = 208460 \text{ грн}$$

Техніко-економічні розрахунки підтверджують ефективність впровадження технологічного устаткування та маршруту обробки виготовлення деталі «палець сферичного шарніра».

Висновки до п’ятого розділу

1. Проведені дослідження мікротвердості та механічних властивостей (межі міцності, плинності, пластичності) не зміцнених та зміцнених зразків при різних режимах обробки. Встановлено, що при зміцнені з коефіцієнтом перекриття К= 0.3–.0.9 – степінь зміцнення лежить в межах 37.5 – 78.7%, а межа міцності зростає до $\sigma_в$ = 895 МПа.

2. Розрахунково-експериментальна порівняльна оцінка працездатності зміцнених пальців показала підвищення зносостійкості до 20% у порівняні зі зміцненими обкочуванням.

3. Підтверджено працездатність запропонованого експериментального обладнання для біполярного СІЗ НСП.

4. За результатами виконання дисертаційної роботи запропоновано конструкцію машини з системою ЧПК для біполярного СІЗ зовнішніх циліндричних та неповних сферичних поверхонь.

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

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 ($W_{уд}$ = 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 ($W_{уд}$ = 2,35 Дж; $F_{ст\ i}$ = 60 Н; $F_{ст1}$ = 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 зміцнені 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 хв$^{-1}$; енергія удару $W_{уд}$ = 2,35 Дж; статичне навантаження інструмента F_{cmi} = 60 Н; статичне навантаження бойка F_{cm1} = 120 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки. Красноярск, 2013. 192с.

2. Дроздов Ю.Н., Наумова Н.М. Контактные напряжения в шарнирных соединениях с подшипниками скольшения. Проблемы машиностроения и надежости машин. 1997. №3. С. 52–57.

3. Скуратовський А. К. Підшипники ковзання. Навчальний наочний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 38с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31982/1/Pidshypnyky_kovzannia.pdf.

4. Бригер И.А., Пановко Я.Г. Прочность. Устойчивость. Колебания: справочник в 3 т. Москва: Машиностроение, 1968. Т.2. 464 с.

5.Артёмов И.И., Савицкий В.Я., Сорокин С.А. Повышение ресурса гидродинамического подшипника скольжения с самоустанавливающимися графитовыми элементами. Новые промышленые технологии. Минатом. 2002. № 5–6. С.11–14.

6.Артёмов И.И., Савицкий В.Я., Сорокин С.А. Прогнозирование износостойкости тяжелонагруженных гидродинамических подшипника скольжения с самоустанавливающимися элементами. Новые промышленые технологии. Изд. Минатом. 2002. № 5–6. С.15–21.

7. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. Москва: Изд. Машгиз, 1963. 243 с.

8. Лукин П.П., Гаспарянц Г.Л., Радионов В.Ф. Учебник для студентов втузов, обучающихся по специальности «Автомобили и тракторы». Москва: Машиностроение, 1984. 376 с.

9. Баженов. Ю.В. Основы теории надежности машин: учеб. пособие: Владимир: Изд-во Владим. Гос.ун-та, 2006. 160 с.

10. Раймпель Й. Шасси автомобиля: Элементы подвески:/ под. Ред. Г.Г. Гридасова. Москва: Машиностроение, 1987. 312 с.

11. Гладкий Д. Предприятия, выпускающие строительную технику в Республике Беларусь. СТТ1 2003. № 23. С 104.

12. Цыферблат В.Л., Смирнова О.В. Горные машины с гидропневмоударниками за рубежом. Москва: ЦНИЭИ уголь, 1979. №6. С48.

13. Rudolf Hausherr, Sohne Gmbh, Co.KG. Schlaqkohf-Nachreibmashine. Germany: HNM-4.1980.6c.

14. Хаарман К. Проходчиские машины с ударным рабочим органом. *Глюкауф.*1974. №15. С13–18.

15. Струтинський С.В. Сучасні технології виготовлення деталей сферичних шарнірів просторових систем приводів. *Актуальні задачі сучасних технологій:* зб. тез доп. IV міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 25–26 листопада 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 236–240. URL: https://m.tntu.edu.ua/storage/news/00002426/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA2015_1_1.pdf (Дата звернення 10.18.2016).

16. Струтинський В., Кириченко А. Оцінка деформативності ланок змінної довжини обладнання з паралельною кінематикою. *Збірник наукових праць «Наукові нотатки».* 2009. № 25. С 357–362.

17. Шелепко О., Кириченко А., Гречка А. Експериментальне визначення жорсткості багатокоординатного верстата паралельної структури «пентапод». *Збірник наукових праць Кропивницького національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* Кропивницький, 2018. № 31. С 104–110.

18. Хаймзон, М.Е., Крылов К.А., Кораблёв А.И. Надёжность авиационых разьёмных соединений: науч.пособ. Москва: Транспорт, 1970. 326с.

19. Халдеев В.Н. Совершенствование технологи изготовления многослойных презиционных полусферических оболочек. *Производственно-технический журнал «Новые промышленные технологи».* Москва, 1993. №3. С. 257.

20. Белик Ш.М., Протасова Р.Н. Износостойкость пластмасс при реверсивном трении и малих скоростях скольжения в отсутствии смазки. Трение, изнашивание и качество поверхности: науч. пособ. Москва: Наука, 1973. С.140–146.

21. Djassemi M., Seifoddini. H. Analysis of critical machine reliability in manufacturing cells. Journal of Industrial Engineering and Management, 2019. Vol. 12(1), P. 70–82. https://www.researchgate.net/publication/331031408_Analysis_of_critical_machine_reliability_in_manufacturing_cells.

22. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на долговечность и надежность деталей машин. Москва: Машиностроение, 1970. 315 с.

23. Киричек А. В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Москва: Машиностроение, 2004. 288с.

24. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей повехностным пластическим деформированием: Справочник. Москва: Машиностроение, 1987. 328 с.

25. Shiratori, M., Ito, M. and Hashimoto, M. (1995) Elastic-Plastic Analysis of Rolling Contact for Surface Hardened Steel. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. A., 61, 1064-1069. URL: http://dx.doi.org/10.1299/kikaia.61.1064.

26. Смелянский В.М., Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. Москва: Машиностроение, 2002. 360 с.

27. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. Москва: Машиностроение, 2000. 320 с.

28. Сулима А.М., Шулов А.В., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. Москва: Машиностроение, 1988. 240с.

29. Чепа П.А., Андрияшин В.А., под ред. Берестнева О.В. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей: науч. пос./ Минск. Ин-т пробл. надежности и долговечности машин. Минск: Наука и техника, 1988. 272 с.

30. Фролов К. В. Современная трибология: Итоги и перспективы. Москва: Издательство ЛКИ, 2008. 480 с.

31. Браун Э.Д., Буше Н.А. под ред. Чичинадзе А.В. Учебник для технических вузов: науч. пособ. 2-е изд. Переработ. и доп. Москва: Машиностроение, 2001. 664 с.

32. Сендецки Дж. Композиционные материалы. Механика композиционных материалов: науч. пособ. Т2. Москва: Мир, 1978. 569 с.

33. Тагер А.А. Физикохимия полимеров. Москва: Химия, 2008. 544 с.

34. Пилиповский Ю.Л., Грудина Т.В., Сапожникова А.В. Композиционные материалы в машиностроении. Киев: Техника, 1993. 141 с.

35. Абрамов С.К., Абрамов Л.М., Рассохин Г.И. Полимерные материалы в сельскохозяйственном машиностроении. Москва: Агропромиздат, 1986. 255с.

36. Кудрявцева Г.И. Армирующие химические волокна для композиционных материалов. Москва: Химия, 1998. 236 с.

37. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Физика и механика полимеров. Москва: Высш. шк., 1983. 391 с.

38. Baurova N., Zorin V. Application of polymer composite materials in mechanical engineering. INFRA-M Academic Publishing LLC, 2018. 301 p.

39. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на надежность и долговечность машин. Москва: Машиностроение, 1970. 315 с.

40. Коднир Д.С., Жильников Е.П., Эластогидродинамический расчет деталей машин. Москва: Машиностроение, 1988. 160 с.

41. Брейтуэйт Е.Р. Твёрдые смазочные материалы и антифрикционные покрытия: [пер. с англ.]. Москва: Химия, 1987. 320 с.

42. Кламанн Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты / пер. с англ. под ред. Ю.С. Заславского. Москва: Химия, 1988. 488 с.

43. Васильева Е.С., Толочко О.В., Сергеев Н.Н. Жидкие смазочные композиционные материалы, содержащие высокодисперсные наполнители, для подшипниковых узлов управляемых систем: монография. Тула: ТулГУ, 2014. 144с.

44. Бреки А.Д. Триботехнические характеристики жидких смазочных и полиамидных композиционных материалов, содержащих антифрикционные наночастицы дихалькогенидов вольфрама: монография. Тула: ТулГУ, 2015. 276с.

45. Радчик С. Смазка машин. Київ: Техніка, 1973. 84 с.

46. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Москва: Мир, 1989. 509 с.

47. Дыха А. В., Бабак О.П. Повышение несущей способности подшипника скольжения с маслоудерживающими канавками: *Проблеми трибології.* 1997. № 1. С. 25–27.

48. Диха О.В. Регулярний профіль поверхні і папілярні лінії: *Вісник Технологічного університету Поділля.* 2000. № 3. С. 66–68.

49. Дыха А.В., Бабак О.П., Ильчишина А. В. Создание и экспериментальное исследование смазочной способности маслоудерживающих канавок переменной глубины: *Проблеми трибології.* 1999. № 2. С. 26–29.

50. Бабак О.П., Кузьменко А.Г., Пасечник А.А. Повышение износостойкости трибосопряжений путем формирования маслоудерживающего профиля: *Вісник Технологічного університету Поділля*. 2002. №4 Ч.1 (42). С. 7–12.

51 Стельмах О.У. Експериментальне дослідження динаміки течій примежових шарів мастила в трибоконтакті ковзання. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2011. №1. С. 9–15.

52. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Москва: Машиностроение, 1982. 248 с.

53. Monaghan. Diamond Burnishing Tool / Elliott Tool Technologies, Ltd., manufactures the products shown in this catalog № RB-2005. 20p. URL:https://www.fts-forever.com.tw/pdf/ELLIOTT02.pdf.

54. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. Москва: Машиностроение, 1981. 160с.

55. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення довговічності сферичних шарнірних з'єднань: *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2017. № 2/ Ч1, Т1. С. 71–73.

56. Шкуратяний Ю.В., Стучинський М.О. Кульові шарніри, технічні вимоги: *Науково-виробничий журнал.* 2014. № 2 (238). 54 с.

57. Шаровая опора: Пат. 31156 Российская Федерация. МПК F16C 11/06. RU №31155; заявл. 13.05.2002; опубл. 20.07.2003, Бюл. №20. 6 с.

58. Шаровая опора: Пат. 123870 Российская Федерация. МПК F16C 11/06 № 185066 заявл. 13.08.2012; опубл. 10.01.2013 Бюл. № 1. 8 с.

59. Кершенбаум В.С. Международный транслятор современных сталей и сплавов. Тверь: Международная инженерная академія, 2002. 1104 с.

60. SPH ANN Steel for Studs. British: MS 242. 2016. 198 p.

61. Steel for Ball Studs. TMS-S-10, (SAE 5140–H). 2016. 475 p.

62. Steel for Fordings. TMS-S-10, (SAE 5140–H). 2016. 79 p.

63. Chemical compositions of SAE alloy steels. (SAE J404 APR94). 2017. 60 p.

64. ГОСТ Р 10702–2016. Прокат из качественной конструкционной углеродистой и легированной стали для холодного выдавливания и высадки. [На замену ГОСТ Р 10702–78; Дейст. от 01.10.17]. Изд. офиц. Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина. 2017. 48с.

65. ГОСТ Р 4543–2016 Прокат из легированной конструкционной стали. [На замену ГОСТ Р 4543–71; Дейст. от 01.10.17]. Изд. офиц. Центральный научно-исследовательский институт черной металлурги им. И.П. Бардина. 2017. 53 с.

66. Гун И.Г. Совершенствование технологической системы изготовления шаровых шарниров. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 360 с.

67. Навроцкий Г.А. Холодная объемная штамповка: справочник. Москва: Машиностроение, 1973. 495 с.

68. Справочник технолога-машиностроителя /за ред А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. В 2-х т. Т.1. 4-е изд., перераб. и доп.: Москва: Машиностроение, 1985. 656 с.

69. Обработка фасонных поверхностей на токарных станках. Пат. 2056976 Российская Федерация, МПК B23B5/36. №93003815/08–93; заявл. 25.01.1993; опубл. 27.03.1993, Бюл. № 2. 8 с.

70. Каледин Б.А., Чепа П.А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием. Минск: Наука и техника, 1974. 232 с.

71. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев: Техника, 1971. 142 с.

72. Олейник Н.В., Кычин В.П., Луговской А.Л. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. Киев: Техника, 1984. 151 с.

73. Чепа П.А., Андрияшин В.А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей. Минск: Наука и техника, 1988. 192 с.

74. Чепа П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием. Минск: Наука и техника, 1981. 128с.

75. Васильків В.В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.08 / Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів, 2015. 312 с.

76. Dossett J., George E. Introduction to Surface Hardening of Steels. *ASM Handbook, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes.* Vol. 4A, 2013, P. 389–398.

URL:https://www.asminternational.org/documents/10192/22533690/5344G_Sample_BuyNow.pdf/96e9ae44-b6a1-420c-abf5-ee32a98280d5.

77. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Ленинград: Машиностроение, 1982. 248 с.

78. Поляк М.С. Технология упрочнения. В 2 т.: Москва: Машиностроение, 1995. Т.2. 688 с.

79. Juha H., Sampsa V.A. Surface improvement of shafts by the diamond burnishing and ultrasonic burnishing techniques. Int. J. Machining and Machinability of Materials. 2017. Vol. 19, No. 3. P 246–259. DOI:10.1504/IJMMM.2017.10004737.

80. Технологические основы обеспечения качества машин: / Под ред. К.С. Колесникова. Москва: Машиностроение, 1990. 256 с.

81. Гавриленко И.Г. Переменно-силовое иглофрезерование. *Вестник машиностроения.* 1993. №1. С. 45–47.

82. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. Москва: Машиностроение, 1985. 152 с.

83. Щебров О.М., Киричек А.В., Лазуткин А.Г., Соловьев Д.Л. Упрочнение ответственных поверхностей статико-импульсной обработкой. *Наука производству.* 1998. № 11. С. 20–23.

84. Бойцов А.Г., Машков В.Н., Смоленцев В.А. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. Москва: Машиностроение, 1991. 144 с.

85. Кокорева О.Г., Исследование параметров качества поверхностного слоя тяжелонагруженных деталей машин, упрочненных методами поверхностно-пластического деформирования. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2017. Том 13. № 11. С. 487–490.

86. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. Москва: Наука, 1969. 201 с.

87. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформации в ударных системах. Москва: Наука, 1985. 357 с.

88. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Расчет динамического внедрения инструмента в обрабатываемую среду (препринт). Фрунзе: Илим, 1980. 44 с.

89. Еремьянц В.Э. Влияние формы ударного импульса на процесс взаимодействия инструмента с обрабатываемой средой. Фрунзе: Илим, 1981. 59 с.

90. Киричек А.В., Лазуткин А.Г., Соловьев Д.Л. Классификация способов поверхностного динамического упрочнения. *Информационные и социально-экономические аспекты создания современных технологий*: *Меж-вуз. сб. научн. тр. Набережные Челны:* КНИ, 1997. С. 22–27.

91. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов. Одесса–Николаев: Издательство НГГУ им. Петра Могилы, 2005. 352с.

92. Баринов С.В. Повышение сопротивления контактному выкашиванию гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой: дис…канд. тех. наук: 05.02.08., 05.03.01/ Орловский государственный технический университет. Орёл, 2009. 200 с

93. Многостержневое устройство для упрочнения поверхностным пластическим деформированием: пат № 2219042 РФ. заявл. 21.12.2003; опубл. 27.03.2004, Бюл. № 1. 8 с.

94. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Параметры упрочняющей статико-импульсной обработки. Москва: СТИН. 2005, С. 30–33.

95. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Равномерность наклепа после статико-импульсной обработки: *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2005. №2. С. 3–5.

96. Kokoreva O.G., Fadeev F.O. Results of research of hardness of samples under strengthening by methods of surface-plastic deformation. Journal of advanced research in technical science. 2019. №. 13. P 60–62. DOI:10.26160/2474-5901-2019-13-60-62.

97. Kirichek A. V., Barinov S.V. Study of methods relating to increase of contact pitting resistance in 45, 40h, 35hgsa steel due to development of heterogeneous structure involving mechanical hardening technique. Applied Mechanics and Materials. 2015 Vol. 756. P 65–69. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.756.65.

98. Methods of obtaining surface finishes. Technical Report TR-29. 2001. P.11. URL:https://www.balseal.com/wpcontent/uploads/2019/06/Methods_Of_Obtaining_Surface_FinishesTR _29.pdf.

99. Способ обработки неполных сферических поверхностей деталей поверхностным деформированием: Пат. 2031770 Российская Федерация, МПК6 В 24 В 39/04.; заявл. 14.04.1992; опубл.27.03.1995, Бюл. №9. 11 с.

100. Способ увеличения ресурса сферического шарнира и устройство для его осуществления: Пат. 2103571 Российская Федерация, МПКб F16C11/06.; заявл. 12.04.1997; опубл.27.01.1998, Бюл. №3. 12 с.

101. Способ обработки поверхностным деформированием сферических поверхностей; Пат. 2128574 Российская Федерация, МПКб В24В39/04.; заявл. 12.04.1998; опубл.27.03.1999, Бюл. №10. 9 с.

102. Способ обработки неполной сферической головки шарового пальца поверхностным деформированием; Пат. 2162785 Российская Федерация, МПК6 В24В39/00.; заявл. 10.02.2000; опубл.10.02.2001, Бюл. №4. 9 с.

103. Способ обработки неполной сферической головки шарового пальца; Пат. 2188115 Российская Федерация, МПК6 В24В39/00; заявл. 10.02.2000; опубл.19.01.2001, Бюл. №24. 11 с.

104. Способ обработки неполной сферической головки шарового пальца; Пат. 2201325 Российская Федерация, МПК6 В24В39/00; заявл. 21.03.2001; опубл.27.03.2003, Бюл. №9. 4 с.

105. Способ обкатки неполных сферических поверхностей; Пат. 2276005 Российская Федерация, МПК6 В24В39/04; № 2004129399/02; заявл. 05.10.2004; опубл. 10.05.2006, Бюл. №13 12 с.

106. Способ импульсно-ударного деформирования сферической поверхности Пат. 2278018 Российская Федерация, МПК6 В24В39/04. № 2004136435/02; заявл. 2004.12.14; опубл. 2006.06.20, Бюл. №17. 9 с.

107. Інструмент для імпульсного зміцнення зовнішньої крайки шнека: пат. 55298 Україна: МПК B24B 39/00. № u201006687; заявл. 31.05.2010; опубл. 10.12.2010, бюл. № 23/2010. 6с.

108. Інструмент для статико-імпульсного зміцнення конічних отворів: пат. 64815 Україна: МПК B21D 11/06. №u201103209; заявл. 18.03.11; опубл. 25.11.2011, Бюл. №22. 4с.

109. Спосіб збільшення ресурсу сферичного шарніра: пат 132728 Україна, МПК F16C 11/06; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5

110. Пристрій для зміцнення неповних сферичних поверхонь статико-імпульсною обробкою: пат 132726 Україна: МПК B24B 5/00; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5.

111. Аксенов В.А. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов обработки: монография. Новосибирск: НГТУ, 1995. 264 с.

112. Goldsmith W. *Impact. The theory and physical behavior of colliding solids*. London, 1996.379 p.

113. Журавлев В.Н., Николаева О.И Машиностроительные стали: справочник. Москва: Машиностроение, 1992. 480 с.

114. ИСО 6507-2-2010. Металлы и сплавы. Измерение микротвердости по Викерсу. – Часть 2. Поверка и калибровка твердомеров.[дейст. от 01.01.2010] Москва: Стандартинформ, 2010. 24 с.

115. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Управление параметрами поверхностного слоя упрочнением статико-импульсной обработкой. *Справочник. Инженерный журнал.* 2004, № 10. С. 16-19.

116. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення ефективності використання енергії удару при статико-імпульсному зміцненні поверхневим пластичним деформуванням. *Вісник Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький,, 2018. № 4. С.48-56.

117. Костюк С.А., Косіюк М.М. Механічний генератор імпульсів машини ударної дії для статико-імпульсного зміцнення. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький,. 2018. № 5. С.302-308.

118. S. Braun. Encyclopedia of Vibration. ISBN 978-0-12-227085-7 Copyright © 2001 Elsevier Ltd. All rights reserved.

119. Алимов О.Д., Дворников Л.Т. Бурильные машины. Москва: Машиностроение, 1976. 295 с.

120. Кунщиков Б.К., Кунщикова М.К. Общий курс геофизических методов разведки. Москва: Недра, 1996, 430с.

121. Янчич В.В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: Учеб. Пособие. Ростов-на-Дону, 2008. 206 с.

122. M.A. Trindade. Applications of piezoelectric sensors and actuators for active and passive vibration control. *In 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications*, Brazilia, 2008. P. 12–32. URL:https://www.researchgate.net/publication/256273842_Applications_of_piezoelectric_sensors_and_actuators_for_active_and_passive_vibration_control

123. Рижов С.В. Методичні вказівки Abaqus 2010. Москва: Тесис 2010. 97с.

124. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. Москва: Наука, 1971. 283 с.

125. Лецкий Э. К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Москва: Мир, 1977. 552 с.

126. Калошка В.К., Лобко С.И., Чиркова Т.С., Математическая обработка результатов экспериментов. Минск: Высшая школа, 1982. 103с.

127. Васильків В.В., Радик Д.Л. Експериментальні дослідження в технології машинобудування. Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012. 256 с.

128. Кузьменко А.Г. Износ и надежность шаровых опор подвески переднего колеса автомобиля (расчеты и испытанния). *Проблемы трибологии.* 2009. №3. С. 29-52

129. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення ефективності використання енергії удару при статико-імпульсному зміцненні поверхневим пластичним деформуванням. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2018. № 4. С. 48–56.

130. Пристрій для точіння зовнішніх сферичних поверхонь: пат 116147 Україна: МПК B23B5/00; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

131. Косіюк М.М., Костюк С.А., Формоутворення неповних сферичних поверхонь на універсальних верстатах токарної групи. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2017. № 3. С. 47–52.

132. Лазуткин А.Г. Научные основы создания горных машин с гидропевмоударными исполнительными органами. Дис. ... докт. техн. наук. -М.:МГИ, 1978. 434с.

133. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э., Мартыненко Л.М. Расчет ударных систем с неторцевым соударением элементов. Фрунзе: Илим, 1979. 109 с.,

134. Костюк С.А., Косіюк М.М. Механічний генератор імпульсів машини ударної дії для статико-імпульсного зміцнення. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* Хмельницький, 2018. № 5. С. 302–308.

135. Томсен Є., ЯНГ Ч., Кобаяши Ш. Механіка пластичної деформації при обробці металів. Москва: Машинобудування, 1969. 504с.

136. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. Київ: Наукова думка, 2002. 660 с.

137. Машина для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання статико-імпульсною обробкою: пат 147855 Україна: МПК B23B5/00. №u202100056; заявл. 11.01.2021; опубл. 16.06.2021, Бюл. № 24.

138. Кульовий шарнір Пат. 116145 Україна, МПК F16C 11/06. № 45934; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. 4 с.

139. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов: монография. Москва: Машиностроение, 1980. 326с.

140. ГОСТ Р 52433–2005 Шарниры шаровые. Технические требования и методы испытаний.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

АНАЛІЗ ВІДОМИХ КОНСТРУКЦІЙ СФЕРИЧНИХ ШАРНІРІВ

Більшість СШ підвіски автомобілів відрізняються лише типорозмірами та конструктивним виконанням в залежності від призначення та маси автомобіля.

Відомі СШ з різноманітним конструктивним виконанням корпуса ((рис.А1): а) – зварні із заливним вкладишем; б) – закатні зверху; в) – закатні знизу; г)– цільноковані з пружинним кільцем; д) – цільноковані з обтисканням знизу; є) – з різьбовою кришкою).

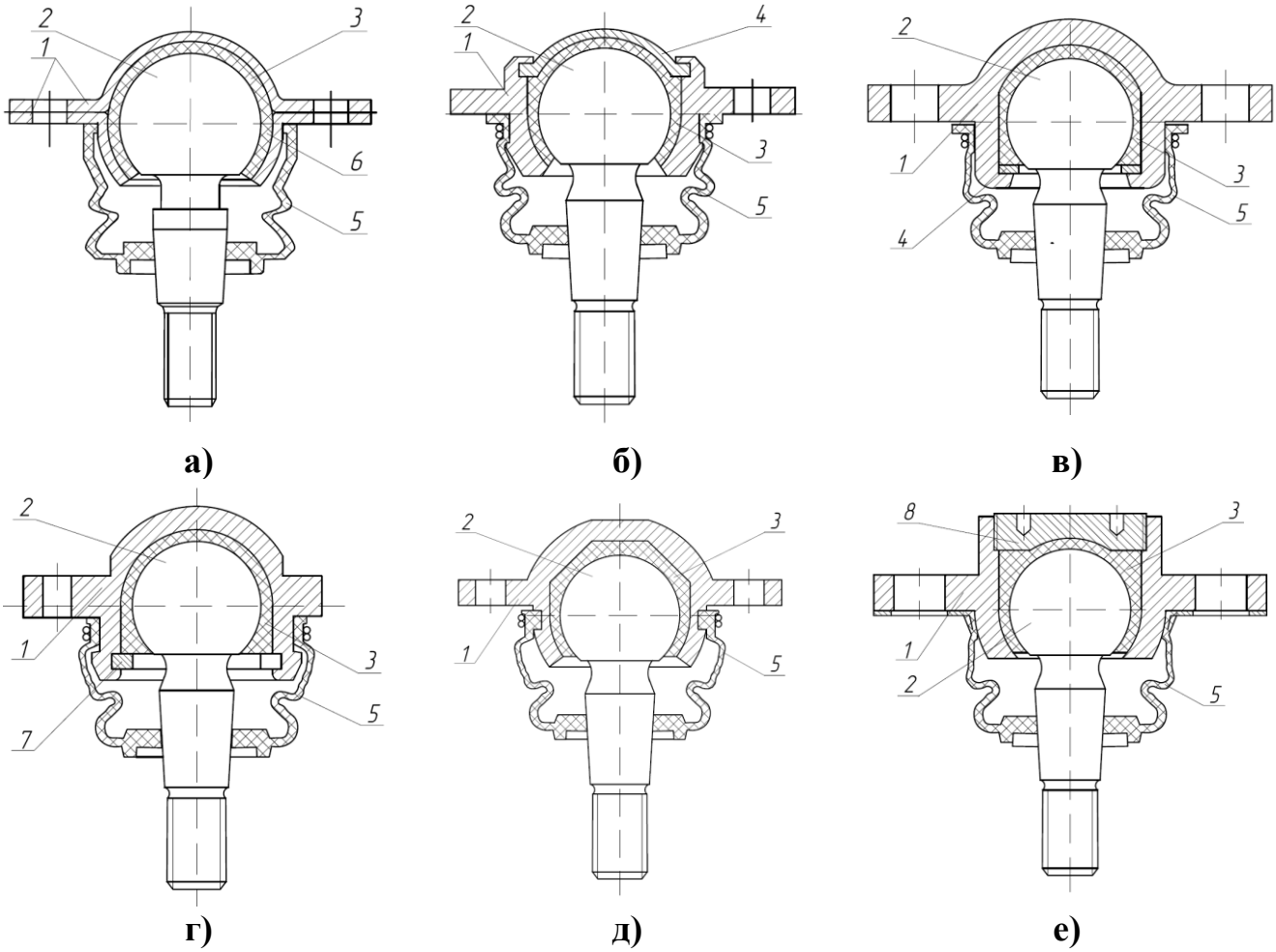


Рис. А1. Схеми СШ з різним конструктивним виконанням корпуса:

1 – корпус; 2 – палець; 3 – вкладиш; 4 – кришка; 5 – захисний пильовик;

6 – заливний матеріал; 7 – пружинне кільце; 8 – гайка

В заливних шарнірах в якості наповнювача використовуються полімерний заливний матеріал *сирфен* або різноманітні реактопласти, а у всіх інших конструкціях – композиційні матеріали на основі поліамідів [57]. До суттєвого недоліку наведених заливних конструкцій слід віднести – відсутність мастилоутримуючих канавок вкладиша, внаслідок чого створюються умови граничного змащування.

Відома конструкція СШ [57], що містить палець із сферичною поверхнею, охоплений вкладишем, який встановлений у корпусі, підтиснутий пружним елементом (у вигляді гумового кільця) і закритий заглушкою. Вкладиш складається із двох частин. Частина вкладиша, що контактує із пружним елементом, має поздовжній розріз. Між частинами вкладиша при складанні створено компенсаційний зазор для вибирання зносу під час експлуатації шарніра.

Недоліком даної конструкції є недостатня надійність, зниження експлуатаційних властивостей кульового шарніра внаслідок зменшення стабільності моментів хитання й обертання.

Також відома конструкція кульового шарніра [58], що містить корпус, палець із кульовою головкою, розміщений у корпусі полімерний вкладиш, що складається із двох частин, підтиснутий пружним елементом і закритий заглушкою, між пружним елементом і верхньою частиною вкладиша розташована шайба з металу.

Конструкція такого шарніра не дозволяє забезпечити достатнє змащування робочих поверхонь (палець-вкладиш).

Аналіз конструкцій СШ у різних конструктивних виконаннях, вказує на необхідність проведення конструкторсько-технологічних заходів спрямованих на підвищення працездатності деталей спряження (палець-вкладиш) та доцільність удосконалення їх конструкцій.

ДОДАТОК Б

ЖУРНАЛ ДАНИХ З ПК ABAQUS

ODB: C:/Abaqus_temp/ferma.odb
Step: ferma
Frame: Increment 1: Step Time = 1.000

Element Label	Node Label	E.Max. Prin @Loc 1	S.Mises @Loc 1
13	3	18.7872E-06	3.75745E+06
13	20	10.4019E-06	2.08038E+06
14	20	10.4019E-06	2.08038E+06
14	21	1.00829E-06	1.67707E+06
15	21	1.00829E-06	1.67707E+06
15	5	0.	2.95081E+06
28	6	104.18E-06	20.8361E+06
28	30	104.18E-06	20.8361E+06
29	30	104.18E-06	20.8361E+06
29	31	104.18E-06	20.8361E+06
30	31	104.18E-06	20.8361E+06
30	3	104.18E-06	20.8361E+06
46	8	22.3779E-06	4.47557E+06
46	42	11.7137E-06	2.34275E+06
47	42	11.7137E-06	2.34275E+06
47	43	524.817E-09	2.13282E+06
48	43	524.817E-09	2.13282E+06
48	7	0.	4.05572E+06
49	9	0.	2.95081E+06
49	44	1.00829E-06	1.67707E+06
50	44	1.00829E-06	1.67707E+06
50	45	10.4019E-06	2.08038E+06
51	45	10.4019E-06	2.08038E+06
51	6	18.7872E-06	3.75745E+06
64	10	101.377E-06	20.2754E+06
64	54	101.377E-06	20.2754E+06
65	54	101.377E-06	20.2754E+06
65	55	101.377E-06	20.2754E+06
66	55	101.377E-06	20.2754E+06
66	8	101.377E-06	20.2754E+06
70	11	0.	4.05572E+06
70	58	524.817E-09	2.13282E+06

Значення переміщень точок поверхні відгуку при ударному навантаженні.

Ref. point	Energy	Displacement
1	0	0
2	0.5	1.25E-05
3	1	4.60E-05
4	1.5	6.80E-05
5	2	8.74E-05
6	2.5	9.75E-05
7	3	12.41E-05
8	3.5	13.12E-05
9	4	14.21E-05

ДОДАТОК В

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА МЕХАНІЧНИХ ІМПУЛЬСІВ МАШИНИ МАТЕМАТИЧНИМ ПЛАНУВАННЯМ ЕКСПЕРИМЕНТУ

В якості математичної моделі приймаємо неповну кубічну функцію [19]:

$$M\{y\} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (B.1)$$

Матрицю планування повного факторного експерименту (ПФЕ) наведено в табл. В.1.

Таблиця В.1

Матриця планування експерименту N =2^3

№	x_0	$x_1(2^0)$	$x_2(2^1)$	$x_3(2^2)$	x_1 x_2	x_1 x_3	x_2 x_3	x_1 x_2 x_3
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1

Для перетворення математичних залежностей використано наступні властивості матриці:

1. Симетричність : $\sum x_i = 0$
2. Ортогональність: $\sum\limits_{i=j} x_i x_j = 0$
3. Нормування $\sum x_i^2 = N$

Сумарна неув'язка для вибраної функції відображається як:

$$\delta = \sum_{i=1}^{N} \left(\overline{y} - b_0 - b_1 x_1 - b_2 x_2 - b_3 x_3 - b_{12} x_1 x_2 - b_{13} x_1 x_3 - b_{23} x_2 x_3 - b_{123} x_1 x_2 x_3 \right) \to \min \quad (B.2)$$

Для знаходження коефіцієнтів математичної моделі запишемо систему з восьми рівнянь:

1. $b_0 N + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2 + b_3 \sum x_3 + b_{12} \sum x_1 x_2 + b_{13} \sum x_1 x_3 - b_{23} \sum x_2 x_3 - b_{123} \sum x_1 x_2 x_3 =$
$= \sum \bar{y}$
2. $b_0 \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + b_3 \sum x_1 x_3 + b_{12} \sum x_1^2 x_2 + b_{13} \sum x_1^2 x_3 + b_{23} \sum x_1 x_2 x_3 +$
$+ b_{123} \sum x_1^2 x_2 x_3 = \sum \bar{y} x_1$
3. $b_0 \sum x_2 + b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2 x_3 + b_{12} \sum x_1 x_2^2 + b_{13} \sum x_1 x_3 x_2 + b_{23} \sum x_2^2 x_3 +$
$+ b_{123} \sum x_1 x_2^2 x_3 = \sum \bar{y} x_2$
4. $b_0 \sum x_3 + b_1 \sum x_1 x_3 + b_2 \sum x_2 x_3 + b_3 \sum x_3^2 + b_{12} \sum x_1 x_2 x_3 + b_{13} \sum x_1 x_3^2 + b_{23} \sum x_2 x_3^2 +$
$+ b_{123} \sum x_1 x_2 x_3^2 = \sum \bar{y} x_3$
5. $b_0 \sum x_1 x_2 + b_1 \sum x_1^2 x_2 + b_2 \sum x_1 x_2^2 + b_3 \sum x_1 x_2 x_3 + b_{12} \sum x_1^2 x_2^2 + b_{13} \sum x_1^2 x_2 x_3 + b_{23} \sum x_1 x_2^2 x_3 +$
$+ b_{123} \sum x_1^2 x_2^2 x_3 = \sum \bar{y} x_1 x_2$
6. $b_0 \sum x_1 x_3 + b_1 \sum x_1^2 x_3 + b_2 \sum x_1^2 x_2 x_3 + b_3 \sum x_1 x_3^2 + b_{12} \sum x_1^2 x_2 x_3^2 + b_{13} \sum x_1^2 x_3^2 + b_{23} \sum x_1 x_2 x_3^2 +$
$+ b_{123} \sum x_1^2 x_2 x_3^2 = \sum \bar{y} x_1 x_3$
7. $b_0 \sum x_2 x_3 + b_1 \sum x_1 x_2 x_3 + b_2 \sum x_2^2 x_3 + b_3 \sum x_2 x_3^2 + b_{12} \sum x_1 x_2^2 x_3 + b_{13} \sum x_1 x_2 x_3^2 + b_{23} \sum x_2^2 x_3^2 +$
$+ b_{123} \sum x_1 x_2^2 x_3^2 = \sum \bar{y} x_2 x_3$
8. $b_0 \sum x_1 x_2 x_3 + b_1 \sum x_1^2 x_2 x_3 + b_2 \sum x_1 x_2^2 x_3 + b_3 \sum x_1 x_2 x_3^2 + b_{12} \sum x_1^2 x_2^2 x_3 + b_{13} \sum x_1^2 x_2 x_3^2 +$
$+ b_{23} \sum x_1 x_2^2 x_3^2 + b_{123} \sum x_1^2 x_2^2 x_3^2 = \sum \bar{y} x_1 x_2 x_3$

Враховуючи властивості матриці ПФЕ після спрощення система рівнянь матиме вид:

1. $b_0 N = \sum \bar{y}$
2. $b_1 \sum N + b_{12} \sum x_1^2 x_2 + b_{13} \sum x_1^2 x_3 + b_{123} \sum x_1^2 x_2 x_3 = \sum \bar{y} x_1$
3. $b_2 \sum N + b_{12} \sum x_1 x_2^2 + b_{23} \sum x_2^2 x_3 + b_{123} \sum x_1 x_2^2 x_3 = \sum \bar{y} x_2$
4. $b_3 \sum N + b_{13} \sum x_1 x_3^2 + b_{23} \sum x_2 x_3^2 + b_{123} \sum x_1 x_2 x_3^2 = \sum \bar{y} x_3$

5. $b_1 \sum x_1^2 x_2 + b_2 \sum x_1 x_2^2 + b_{12} \sum x_1^2 x_2^2 + b_{13} \sum x_1^2 x_2 x_3 + b_{23} \sum x_1 x_2^2 x_3 + b_{123} \sum x_1^2 x_2^2 x_3 =$
$= \sum \overline{y} x_1 x_2$

6. $b_1 \sum x_1^2 x_3 + b_2 \sum x_1^2 x_2 x_3 + b_3 \sum x_1 x_3^2 + b_{12} \sum x_1^2 x_2 x_3^2 + b_{13} \sum x_1^2 x_3^2 + b_{23} \sum x_1 x_2 x_3^2 +$
$+ b_{123} \sum x_1^2 x_2 x_3^2 = \sum \overline{y} x_1 x_3$

7. $b_2 \sum x_2^2 x_3 + b_3 \sum x_2 x_3^2 + b_{12} \sum x_1 x_2^2 x_3 + b_{13} \sum x_1 x_2 x_3^2 + b_{23} \sum x_2^2 x_3^2 + b_{123} \sum x_1 x_2^2 x_3^2 =$
$= \sum \overline{y} x_2 x_3$

8. $b_1 \sum x_1^2 x_2 x_3 + b_2 \sum x_1 x_2^2 x_3 + b_3 \sum x_1 x_2 x_3^2 + b_{12} \sum x_1^2 x_2^2 x_3 + b_{13} \sum x_1^2 x_2 x_3^2 +$
$+ b_{23} \sum x_1 x_2^2 x_3^2 + b_{123} \sum x_1^2 x_2^2 x_3^2 = \sum \overline{y} x_1 x_2 x_3$

Спрощення:

$\sum x_1^2 x_2 = \sum 1 x_2 = 0$ – зведено до властивості симетричності;

$\sum x_2^2 x_3^2 = \sum 1 = N$ – зведено до властивості нормування.

1. $b_0 N = \sum \overline{y}$

2. $b_1 N = \sum \overline{y} x_1$

3. $b_2 N = \sum \overline{y} x_2$

4. $b_3 N = \sum \overline{y} x_3$

5. $b_{12} N = \sum \overline{y} x_1 x_2$

6. $b_{13} N = \sum \overline{y} x_1 x_3$

7. $b_{23} N = \sum \overline{y} x_2 x_3$

8. $b_{123} N = \sum \overline{y} x_1 x_2 x_3$

Розрахункові формули для коефіцієнта b:

1. $b_0 = \dfrac{\sum \overline{y}}{N}$

2. $b_1 = \frac{\sum \bar{y} x_1}{N}$

3. $b_2 = \frac{\sum \bar{y} x_2}{N}$

4. $b_3 = \frac{\sum \bar{y} x_3}{N}$

5. $b_{12} = \frac{\sum \bar{y} x_1 x_2}{N}$

6. $b_{13} = \frac{\sum \bar{y} x_1 x_3}{N}$

7. $b_{23} = \frac{\sum \bar{y} x_2 x_3}{N}$

8. $b_{123} = \frac{\sum \bar{y} x_1 x_2 x_3}{N}$

Порядок обробки ПФЕ:

1. Знаходимо середнє значення в кожній точці плану:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j+1}^{m} \tilde{y}_{ij}}{m}, \tag{В.3}$$

де m – число паралельних дослідів; $\tilde{y}_i$ – експериментальне значення; $\bar{y}_i$ – середнє значення.

2. Проводимо оцінку похибки за дисперсією:

$$\sigma^2\{\tilde{y}_i\} = \frac{\sum_{j+1}^{m} (\tilde{y}_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m - 1}. \tag{В.4}$$

3. Проводимо перевірку гіпотези про однорідність дисперсії за критерієм Кохрена:

$$G_p = \frac{\max\left(\sigma^2\{\tilde{y}_i\}\right)}{\sum_{i=1}^{N}\sigma^2\{\tilde{y}_i\}}. \qquad (B.5)$$

Оскільки $G_p = 0.16 \lhd G_T = 0.6798$, то гіпотеза про однорідність приймається.

4. Розраховуємо значення дисперсії (відтворюваності):

$$\sigma_в^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sigma^2\{\tilde{y}_i\}}{N}, \quad \sigma_в^2 = 1.5625 \qquad (B.6)$$

Результати розрахунків зведені в табл. В.2.

Таблиця В.2

Результати експериментальних досліджень

№	$x_1(2^0)$	$x_2(2^1)$	$x_3(2^2)$	$\tilde{y}_i$	$\tilde{y}_m$	y	$\sigma^2\{\tilde{y}_i\}$
1	-1	-1	-1	383	381	382	2
2	1	-1	-1	437	439	438	2
3	-1	1	-1	397.5	398.5	398	0.5
4	1	1	-1	446	444	445	2
5	-1	-1	1	388	386	387	2
6	1	-1	1	444	442	443	2
7	-1	1	1	402	404	403	2
8	1	1	1	450	450	450	0

5. Визначення коефіцієнтів регресії математичної моделі:

1. $b_0 = \frac{\sum \bar{y}}{N}$ 2. $b_1 = \frac{\sum \bar{y} x_1}{N}$ 3. $b_2 = \frac{\sum \bar{y} x_2}{N}$ 4. $b_3 = \frac{\sum \bar{y} x_3}{N}$

5. $b_{12} = \frac{\sum \bar{y} x_1 x_2}{N}$ 6. $b_{13} = \frac{\sum \bar{y} x_1 x_3}{N}$ 7. $b_{23} = \frac{\sum \bar{y} x_2 x_3}{N}$ 8. $b_{123} = \frac{\sum \bar{y} x_1 x_2 x_3}{N}$

Значення коефіцієнтів регресії математичної моделі зведені в табл. В.3.

Таблиця В.3

Значення коефіцієнтів регресії

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
418.25	25,75	5,75	2,5	-2,25	0	0	0

6. Перевірка гіпотези статистичної значимості коефіцієнтів:

– середнє квадратичне відхилення коефіцієнтів:

$$\sigma\ \{b_k\} = \sqrt{\frac{\sigma_в^2}{Nm}} \qquad \sigma\ \{b_k\} = 1.5625 \tag{В.7}$$

– розрахунок критерію Стьюдента:

$$t_k = \frac{|b_k|}{\sigma\ \{b_k\}}, \tag{В.8}$$

де t_k – розрахункове значення критерію Стьюдента, а t_t – табличне.

Значення критеріїв Стьюдента зведені в табл. В.4.

Таблиця В.4

Значення критеріїв Стьюдента

t_0	t_1	t_2	t_3	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{123}	t_t
1338,4	82,4	18,4	8,0	7,2	0	0	0	2,30601

Якщо $t_k \lhd t_t$ то гіпотеза статистичної значимості коефіцієнтів відкидається, а коефіцієнт виключають з математичної моделі.

Рівняння регресії матиме вигляд:

$$y = 418{,}25 + 25{,}75x_1 + 5{,}75x_2 + 2{,}5x_3 - 2{,}5x_1x_2 \tag{В.9}$$

7. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Знаходимо прогнозовані значення відгуку $\hat{y}$ по побудованій математичній моделі:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (B.10)$$

Для оцінки математичної моделі використовують число степенів свободи плану f – різниця числа експериментів та числа коефіцієнтів математичної моделі:

– якщо $f \rhd 0$ то можна визначити усі коефіцієнти математичної моделі;

– якщо $f = 0$ то можна визначити усі коефіцієнти математичної моделі за умови, що $\hat{y} = \bar{y}$;

– якщо $f \lhd 0$ то визначити усі коефіцієнти математичної моделі неможливо. Необхідно збільшити число експериментів або модернізувати математичну модель.

У нашому випадку, для моделі (В.11) $\hat{y} = \bar{y}$. Розрахункові значення наведені в табл. В.5.

$$y = 418{,}25 + 25{,}75 x_1 + 5{,}75 x_2 + 2{,}5 x_3 - 2{,}5 x_1 x_2 \quad (B.11)$$

Таблиця В.5

Порівняння прогнозованих значень відгуку

№	1	2	3	4	5	6	7	8
y_1	382	438	398	445	387	443	403	450
$\hat{y}_1$	382	438	398	445	387	443	403	450

8. Знаходимо дисперсію адекватності:

$$\sigma_{ад}^2 = \frac{m}{N - L} \sum \left(\bar{y}_i - \hat{y}_i \right)^2, \quad (B.12)$$

де L – число значимих коефіцієнтів математичної моделі $N - L$ число степені волі плану

9. Знаходимо розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_p = \frac{\sigma_{ад}^2}{\sigma_в^2}. \quad (B.13)$$

Якщо $F_p \lhd F_T$ то гіпотеза про адекватність математичної моделі приймається.

Оскільки $F_p \lhd F_T$; $0 \lhd 4.07$, то гіпотеза про адекватність мат. моделі підтверджується.

ДОДАТОК Г

РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ГМІ

1. Розрахунок елементів ударної системи

Метод СІЗ дозволяє використовувати відбиті хвилі деформації для повторного пружно-пластичного навантаження зони деформації, за умови правильного підбору параметрів ударної системи. Зміна геометричних та акустичних співвідношень елементів ударної системи (бойок-інструмент) дає можливість керувати хвильовими процесами. В зв'язку з цим енергія удару може по різному використовуватись та розподілятись між елементами ударної системи формуючи пролонгуючи ударні імпульси з головною і хвостовою частинами. Використання хвостової частини ударного імпульсу дозоляє підвищити ККД процесу обробки. Дослідження по формуванню пролонгованого ударного імпульсу показали, що найбільший ефект досягається за рахунок удару бойка через проміжну статично-навантажену ланку – інструмент.

Для забезпечення рекуперації відбитої енергії від навантаженого середовища та створення ефекту пролонгованого ударного впливу запропоновані раціональні співвідношення параметрів ударної системи (бойок-інструмент): $L_1/L_2 > 1$, $d_1/d_2 > 1$, $\frac{m_1}{m_2} = 3{,}5 - 4.5$, $d_{1min} \geq 20$ *мм,* $L_2 \geq 50$ *мм.*

Принципова схема такої ударної системи з поширенням деформаційних хвиль представлена на рис. Г.1.

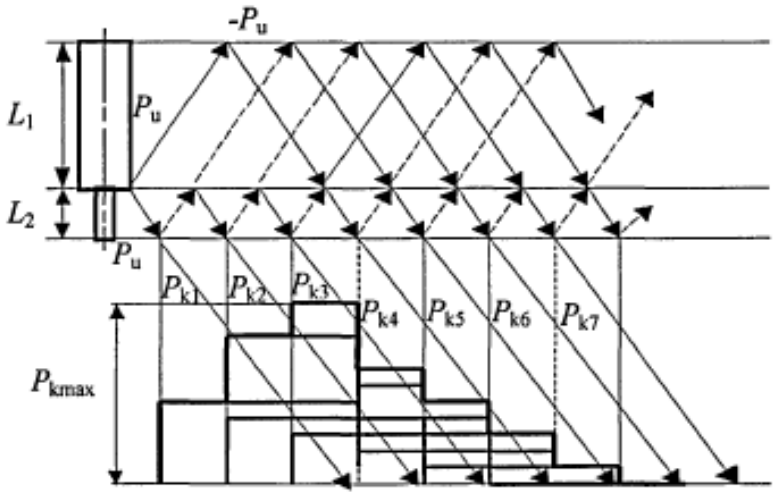


Рис. Г.1. Схема поширення хвиль деформації в ударній системі (бойок-інструмент), при співвідношенні: $L_1/L_2 > 1$, $d_1/d_2 > 1$

При досліджені різних співвідношень параметрів такої ударної системи було встановлено, що частка енергії хвостової частини може складати 0 – 72% від всієї енергії удару.

Узагальнюючи накопичений досвід та враховуючи конструктивні особливості пристрою, розраховуємо елементи ударної системи.

Згідно умови, мінімальний діаметр бойка $d_{1min} \geq 20$ мм, приймаємо $d_1 = 22$ мм. Довжину бойка L_1визначаємо з умови: $L_1 \approx 3L_2$, приймаємо $L_2 = 50$ мм, $L_1 = 150$ мм.

Для ударних систем з енергією удару до 16 Дж, $d_{2min} \geq 7$ мм, приймаємо $d_2 = 8$ мм.

Для того щоб виконати умову суміщення елементів ГМІ та ударної системи, запропоновано виконати бойок та інструмент у вигляді ступінчастих циліндрів (для встановлення циліндричних пружин стиску), вигляд яких представлено на рис. Г.2.

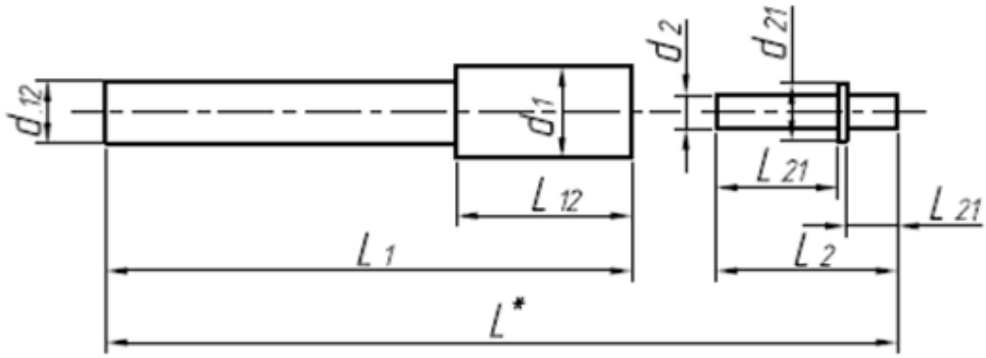


Рис. Г.2. Конструктивне виконання елементів ударної системи (бойок-інструмент)

Після проектування елементів ударної системи необхідно провести перевірку на співвідношення їх мас.

Згідно умови:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{0.35}{0.08} = 4.37, \qquad (Г.1)$$

де m_1 – маса бойка, m_2 – маса інструмента.

Перевірочний розрахунок підтвердив, що показник співвідношення мас лежить в допустимих межах (4,37 <4,5).

2. Розрахунок енергосилових параметрів ГМІ та пружних елементів

При розрахунку параметрів ГМІ були зроблені наступні припущення: сили тертя між бойком і напрямними не враховано ; елементи ударної системи вважаються абсолютно жорсткими, а удар бойка по інструменту не пружним;

Дослідним шляхом встановлені межі ефективної енергії удару $W_{уд}$ = 1 – 4Дж, для діаметрів ДЕ інструмента d_i = 2 – 5 мм.

Головними характеристиками ГМІ виступають частота та енергія удару на виході, яка генерується за рахунок розгону бойка маси m до перед ударної швидкості

під дією сил пружності стисненої циліндричної пружини. Отже величина енергії удару на виході ГМІ залежить від параметрів пружин, ударної системи, робочого ходу бойка та величини початкового стиснення.

Розрахунок параметрів пружини бойка починаємо з визначення необхідної повної потенційної енергії, накопичуваної пружиною, яка повинна відповідати наступній умові: $W_{п.п} \geq W_{уд.}$.

Акумулятивна потенційна енергія стиснутої пружини розраховується за формулою:

$$W_{\text{п.п}} = \frac{\sum F \sum x}{2}, \qquad (Г.2)$$

Або

$$W_{\text{уд}} \leq \frac{\sum F \sum x}{2}, \qquad (Г.3)$$

де $W_{\text{п.п}}$ ($W_{\text{уд}}$) – потенціальна енергія пружини, $\sum F$ – сумарна стискаюча сила, $\sum x$ – сумарне переміщення.

Згідно конструкції ГМІ пружина сприймає двосторонні стискаючі зусилля: F_1 – з сторони регулювальної втулки деформуючись при цьому на величину x_1 та зі сторони кулачка – F_2, деформуючись на величину x_2. Схема навантаження пружини представлена на рис. Г.3.

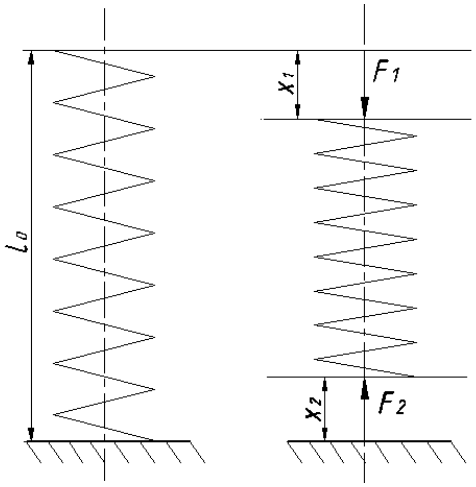


Рис. Г.3. Схема навантаження пружини

Задавшись максимальною потенційною енергією пружини бойка ГМІ $W_{уд}$ = 4 Дж та максимально-можливим переміщенням (з конструктивних міркувань) $\sum x$ = 42 мм, розраховуємо $\sum F$, тобто силу яку сприйматиме пружина.

З формули 3:

$$\sum F \geq \frac{2W_{уд}}{\sum x}, \qquad (Г.4)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$\sum F \geq \frac{2W_{уд}}{\sum x} = \frac{2\ 4}{\sum 0.042} = 190.45\text{Н} \qquad (Г.5)$$

Максимально-допустима сила з урахуванням запасу міцності та умови не дотикання витків пружини розраховується як:

$$F_{\max} = 1.05 \sum F = 1.05 \cdot 190.45 = 199.97 \text{ Н} \qquad (Г.6)$$

За ГОСТ 13764-88 для пружини з максимальною силою деформації $F_{\max}$=200Н існує 5 типорозмірів.

З конструктивних міркувань зовнішній діаметр пружини, D_1 повинен бути меншим за діаметр напрямної бойка, тобто $D_1 < d_1$, а внутрішній діаметр $D_В$ повинен бути більшим за d_{12}, тобто $D_В > d_{12}$.

$$D_В = D_1 - 2d_0, \qquad (Г.7)$$

де $D_В$ – внутрішній діаметр пружини; D_1 – зовнішній діаметр пружини d_0 – діаметр дроту.

Задавшись розмірами d_1=22 мм, d_{12} = 15 мм (рис. Г.2. вибираємо пружину з наступними даними: D_1=21мм; d_0=2,8 мм; k_1 =50 Н/мм; s_3=4 мм, де k_1 – жорсткість одного витка пружини; s_3 – відстань між двома сусідніми витками.

Загальний вид пружини з основними параметрами наведено рис. Г.4.

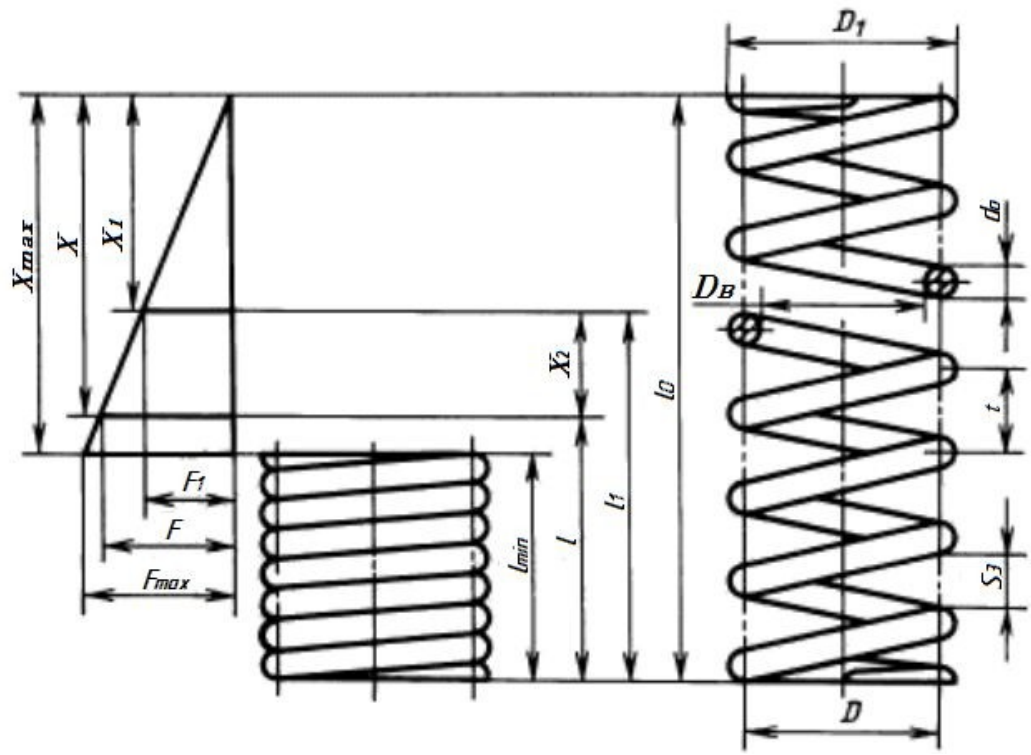


Рис. Г.4 – Параметри пружини

Внутрішній діаметр:

$$D_B = D_1 - 2d_0 = 21 - 2 \cdot 2{,}8 = 21 - 5{,}6 = 15{,}4 \text{ мм},$$

умова $D_B > d_{12}$ виконується.

Крок пружини у вільному стані розраховується:

$$t = s_3 + d_0 = 4 + 2.8 = 6.8 \text{ мм} \qquad (Г.8)$$

Жорсткість пружини:

$$k = \frac{\sum F}{\sum x} = \frac{190.45}{42} = 4.534 \text{Н/м} \qquad (Г.9)$$

Кількість робочих витків:

$$\text{n} = \frac{k_1}{k} = \frac{50}{4.534} = 11, \qquad (Г.10)$$

де k – розрахункова жорсткість пружини; k_1 – жорсткість одного витка; n – число робочих витків пружини.

Кількість повних витків:

$$n_1 = n + n_2, \tag{Г.11}$$

де n_2 – число опорних витків пружини, $n_2 = 1{,}5$

Довжина пружини при максимальній деформації:

$$l_{\min} = (n_1 + 1 - n_2)d_0 \tag{Г.12}$$

З врахуванням (10)

$$l_{\min} = (n + 1)d_0 = (11 + 1)2.8 = 33{,}6 \text{ мм} \tag{Г.13}$$

Максимальна деформація пружини:

$$x_{\max} = \frac{F_{\max}}{k} = \frac{200}{4.534} = 44{,}1 \ \textit{мм} \tag{Г.14}$$

Загальна довжина пружини у вільному стані:

$$l_0 = l_{\min} + x_{\max} = 33{,}6 + 44{,}1 = 77{,}7 \text{ мм} \tag{Г.15}$$

2.1. Розрахунок параметрів пружини інструмента

За вихідні дані, при розрахунку пружини приймемо максимальне робоче статичне навантаження інструмента $F_{\text{ст і}}$ при переміщенні на $x_{\text{і}}$. Відповідно до запропонованої конструкції регулювання величини стиснення пружини $x_{\text{і}}$ забезпечується регулювальною втулкою.

Дослідним шляхом встановлені межі ефективної величини статичного навантаження $F_{\text{ст і}}$= 0 – 80 Н, для діаметрів деформуючого інструмента d_i = 2 – 5 мм.

Величину робочого переміщення приймаємо конструктивно $x_{\text{і}}$ =4 мм. Розрахункову виносливість пружини приймаємо $N_{\text{f}} \geq 1 \cdot 10^7$.

Відповідно до ГОСТ 13764-88 пружину при заданій довговічності слід віднести до І класу.

Для вибору пружини розраховуємо максимально-допустиму сила з урахуванням запасу міцності та умови не дотикання витків пружини за наступною формулою:

$$F_{\max} = \frac{F}{1-\delta} = \frac{200}{4{,}534}, \qquad (Г.16)$$

де δ – відносний інерційний зазор між витками.

Користуючись інтервалом значень δ = 0,05 – 0,25 за формулою (Г.16) знаходимо межі граничного зусилля $F_{\max}$

$$F_{\max} = \frac{F}{1-0{,}05}.....\frac{F}{1-0{,}25} = \frac{80}{1-0{,}05}.....\frac{80}{1-0{,}25} = 84....106.7\text{Н} \qquad (Г.17)$$

В інтервалі від 84 до 107 Н за ГОСТ 13766 для пружин I класу, розряду 1 існує ряд пружин з наступними силовими характеристиками $F_{\max}$: 85; 90; 95; 100; 106 Н.

Виходячи із заданого зусилля та бажаного внутрішнього діаметру D_{Bi}, який згідно із результатами розрахунків ударної системи повинен лежати в інтервалі: $8<D_{\text{Bi}}<10$ мм Приймаємо пружину за ГОСТ 13767-86 з наступними характеристиками:

$F_{\max} = 95$ Н; D_1=12 мм; d_0=1,8 мм; k_1 =97,05 Н/мм; s_3=0,928 мм.

Загальний вид пружини з необхідними позначеннями наведено на Рис. Г.4

Внутрішній діаметр:

$D_{\text{B}}=D_1-2d_0=12-2\cdot 1.8 = 12 - 3{,}6 = 8{,}4$ мм, отже умова (Г.7) виконується.

Крок пружини у вільному стані розраховується:

$$t = s_3+d_0 = 0.928+ 1.8 = 2.728 \text{ мм} \qquad (Г.18)$$

Жорсткість пружини:

$$k = \frac{F_2 - F_1}{x_i} = \frac{80-0}{4} = 20\text{Н/м} \qquad (Г.19)$$

Кількість робочих витків:

$$n = \frac{k_1}{k} = \frac{97.05}{20} = 4{,}85, \qquad (Г.20)$$

Кількість повних витків:

$$n_1 = n + n_2, \qquad (Г.21)$$

де n_2 – число опорних витків пружини, $n_2 = 1{,}5$

Довжина пружини при максимальній деформації:

$$l_{\min} = (n_1 + 1 - n_2)d_0 \quad (Г.22)$$

Або з урахуванням (Г.22)

$$l_{\min} = (n + 1)d_0 = (4.85 + 1)1.8 = 10{,}5 \text{ мм} \quad (Г.23)$$

Максимальна деформація пружини:

$$x_{\max} = \frac{F_{\max}}{k} = \frac{95}{20} = 4{,}75 \ \textit{мм} \quad (Г.24)$$

Загальна довжина пружини у вільному стані:

$$l_0 = l_{\min} + x_{\max} = 10{,}53 + 4{,}75 = 15{,}25 \text{ мм} \quad (Г.25)$$

ДОДАТОК Д

МОДЕРНІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ КУЛЬОВОГО ШАРНІРА

Для перевірки працездатності зміцненого кульового пальця в реальних умовах експлуатації, ним було оснащено автомобільний кульовий шарнір оригінальної конструкції [138], рис. Д1, Д.2. Також захищено патентом спосіб підвищення ресурсу кульового шарніра [109]. Особливістю запропонованого способу є те, що НСП кульового пальця піддають біполярному СІЗ. В результаті чого на сферичній поверхні формується зміцнений поверхневий шар з геометрично-визначеним мікрорельєфом та мастилоутримуючим профілем.

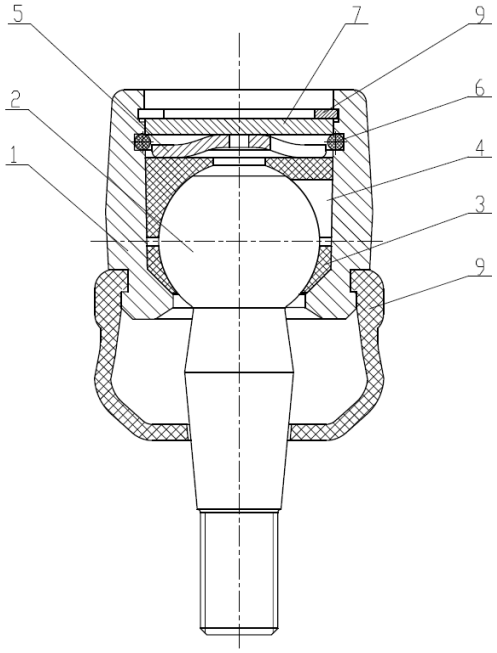


Рис. Д1. Схема саморегульованого СШ: 1) – корпус; 2) – палець; 3,4) – вкладиші; 5) – пружній елемент; 6) – ущільнююче кільце; 7) – кришка; 8) – стопорне кільце;

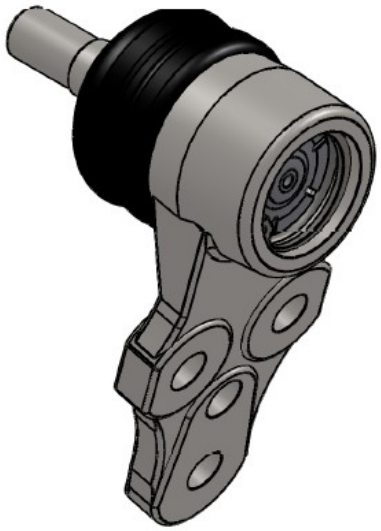


Рис. Д.2. 3D модель саморегульованого СШ

9) – пильовик

Для реалізації запропонованих рішень проведено модернізацію кульової опори. На основі досліджень проведених в розділах 1 – 4 розроблені конструкторсько-технологічні рішення, які спрямовані на підвищення працездатності пальця СШ.

Проведено біполярне СІЗ НСП пальця з наступним формуванням мастилоутримуючого профілю, що значно поліпшує умови змащування. Завдяки постійному відновленню мастильної плівки усувається безпосередній контакт робочих поверхонь внаслідок чого суттєво зменшуються сили тертя і складаються умови для значного зниження швидкості зношування.

Для забезпечення автоматичного вибирання зазору в парі тертя палець-вкладиш застосовано пружинний елемент оригінальної конструкції, завдяки чому забезпечуються постійні умови контакту робочих поверхонь, зменшується інтенсивність зношування та підвищується ресурс шарніра.

З метою підвищення ремонтопридатності шарніра проведено модернізацію конструкції корпуса.

Запропонований кульовий шарнір (рис. Д.1) містить корпус 1, у конусному гнізді якого встановлено полімерні вкладиші 3 і 4, виконані з можливістю осьового переміщення в гнізді корпусу 1 (наприклад, через наявність розрізів, канавок) і виготовлений із композиційного матеріалу із антифрикційними наповнювачами (наприклад, виготовлення вкладиша з полімеру армованого вуглецевим волокном), що охоплює палець 2 з кульовою головкою поверхня якої зміцнена та містить мастилоутримуючий профіль.

Вкладиш складається із двох частин – нижньої частини 3 та верхньої 4. Верхня частина вкладиша 4 та нижня 3 базуються в конічній частині корпусу 1. Між верхньою та нижньою частинами вкладиша створено технологічний зазор. У корпусі 1, над вкладишем 4 розміщений пружній елемент 5, ущільнююче кільце 6, кришка 7 яка фіксується стопорним кільцем 8.

Кульовий шарнір збирається в такий спосіб. У конічний отвір корпусу 1 запресовується нижня частина вкладиша 3, потім встановлюється кульовий палець 2 так, щоб нижня частина вкладиша 3 охоплювала кульову поверхню. На сферичну поверхню пальця 2 попередньо наносять мастило. Після чого в конічну частину корпусу 1 послідовно встановлюють вкладиш 4, пружинний елемент 5, ущільнююче кільце 6, кришку 7 та фіксують стопорним кільцем 8.

Під час роботи конструктивні елементи кульового шарніра – корпус 1, полімерні вкладиші 3, 4 і кульовий палець 2, зазнають значних знакозмінних навантажень. При фіксуванні кришки 7 в корпусі 1 відбувається первина деформація пружного елемента 5, який під час експлуатації забезпечує осьове переміщення вкладиша 4 (завдяки зазору) за рахунок чого стабілізуються моменти хитання й обертання в кульовому шарнірі. Розроблена конструкція є саморегульованою.

Максимально-допустима сила затиску пальця 2 вкладишами 3 і 4 (рис.Д.1), що забезпечується за рахунок пружного елемента типу тарілчастої пружини визначається з умови регламентованого моменту хитання пальця, величина якого за ГОСТ Р 52433–2005 «Шарниры шаровые. Технические требования и методы испытаний» лежить в межах $M_f = 2 – 7$ Н·м.

Сила затиску F розраховується за формулою:

$$F = \frac{M_f}{2R_c f}, \qquad (Д.1)$$

де M_f – момент хитання пальця, Н·м; R_c – радіус сфери, мм; f – коефіцієнт тертя.

Прийнявши R_c= 12,5 мм; f = 0,035 (для сталь-полімер), за формулою (Д.1) знаходимо необхідну силу затиску :

$$F_{\min} = M_{f\min}/2Rf = 2/2\cdot 0{,}0125\cdot 0{,}035 = 2285 \text{ Н} \qquad (Д.2)$$

$$F_{\max} = M_{f\max}/2Rf = 7/2\cdot 0{,}0125\cdot 0{,}035 = 8000 \text{Н} \qquad (Д.3)$$

Для подальших розрахунків пружного елемента приймаємо: $F_{\min}$ =2300 Н, $F_{\max}$=4000 Н.

Основними параметрами пружного елемента типу тарілчастої пружини (рис. Д.3), що визначають силу пружності є: зовнішній діаметр *D*, діаметр внутрішнього отвору *d*, товщина пружини *s*, висота h_o та максимально-допустима деформація *f'*.

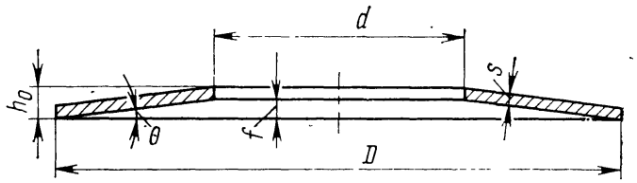


Рис. Д.3. Ескіз тарілчастої пружини

Враховуючи конструктивні особливості кульового шарніра запропоновано пружній елемент типу тарілчастої пружини оригінальної конструкції (з збільшеною опорною поверхнею та прорізами) (рис. Д.4, Д.5), виготовлений холодним штампуванням із попередньо, термічно обробленої, листової сталі марки 60С2А по ГОСТ 14959–88 товщиною 1,5 мм.

Рис. Д.4. Переріз пружного елемента

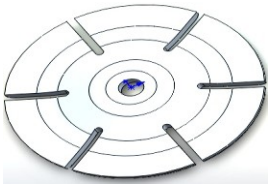


Рис. Д.5. 3D модель пружного елемента

Розрахунок навантаження необхідного для визначення величини осадки проводиться за формулою (Д.4) [139]:

$$F = \frac{2\pi E s \lambda_1}{3(D-d)^2} \ln \frac{D}{d} \left[(f'-\lambda_1)\left(f'-\lambda_1/2\right) + s^2 \right], \qquad (Д.4)$$

де *E* – модуль пружності МПа; *s* – товщина пружини мм ; λ_1– осадка, мм; *f'* – максимально-допустима деформація.

Дані розрахунків жорсткісної характеристики пружини представлені на графіку, рис. Д.6.

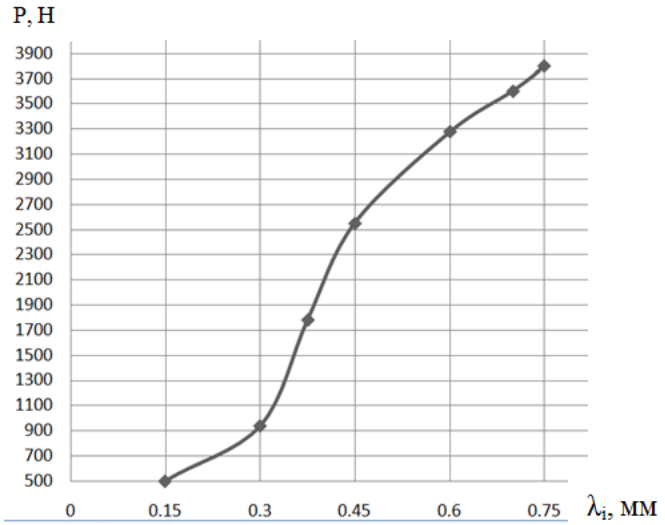


Рис. Д.6. Графік жорсткістної характеристики пружного елемента

З метою оптимізації конструкції та відстеження виникаючих напружень і лінійних переміщень проведено комп'ютерне моделювання процесу роботи пружного елемента.

На рис. Д.7 та Д.8 наведено імітаційну модель навантаження пружного елемента та контурну діаграму напружено-деформованого стану відповідно.

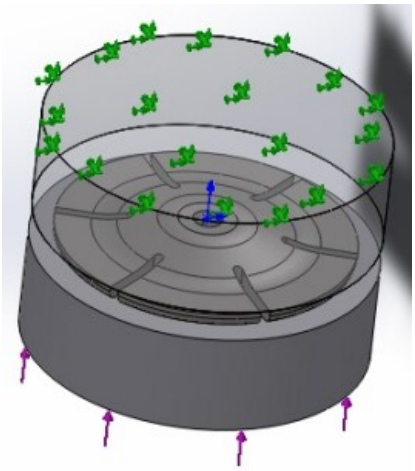


Рис. Д7. Імітаційна модель навантаження пружного елемента

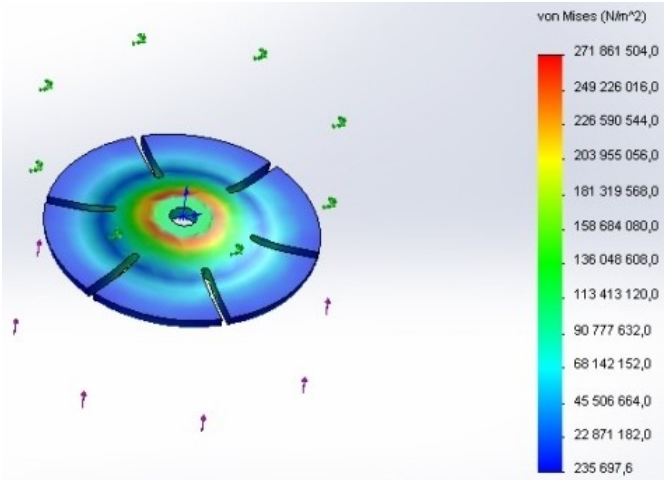


Рис. Д8. Контурна діаграма розподілу напружень

Проведені дослідження показують, що пружній елемент працює без перенавантажень в зонах концентрації напружень.

Для перевірки конструкції пружного елемента на втомну міцність проведено розрахунки з визначення строку служби (кількості циклів), результати яких представлені на рис. Д.9.

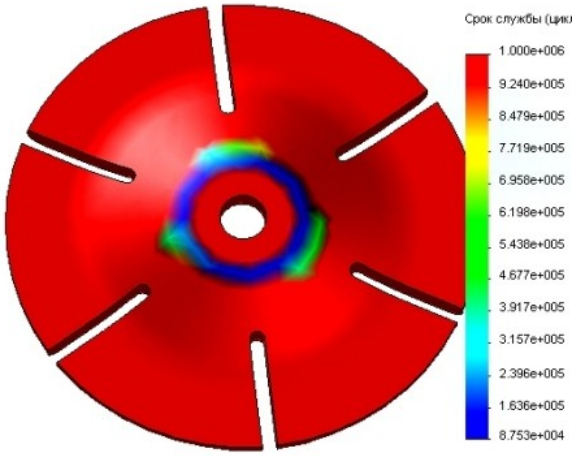


Рис. Д.9. Контурний графік розподілу втомних навантажень

Проведені дослідження дають можливість пересвідчитись у тому, що пружній елемент працює без перенавантажень і не зруйнується раніше експлуатаційного терміну.

Дослідження напружено-деформованого стану кульового шарніра за допомогою комп’ютерного моделювання дозволили виявити найбільш навантажені ділянки його деталей. На рис. Д.10 наведено окремі результати досліджень напружено-деформованого стану деталей: корпус, палець, вкладиш.

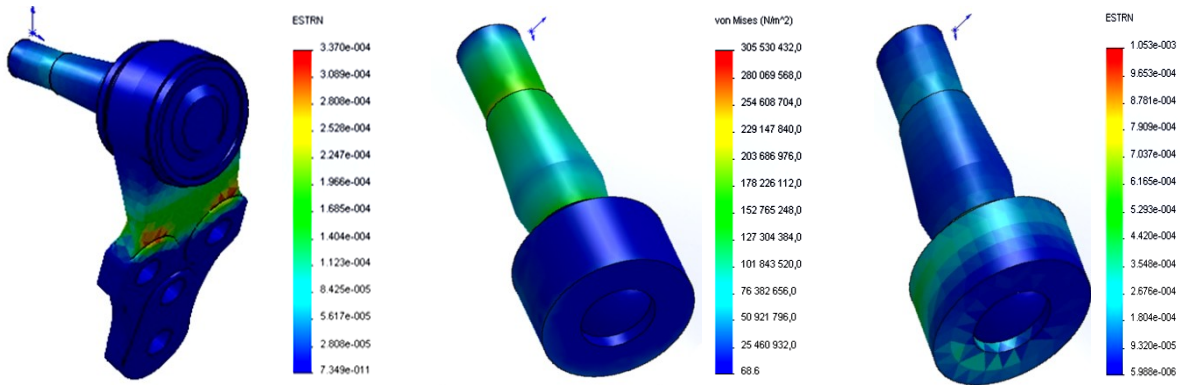
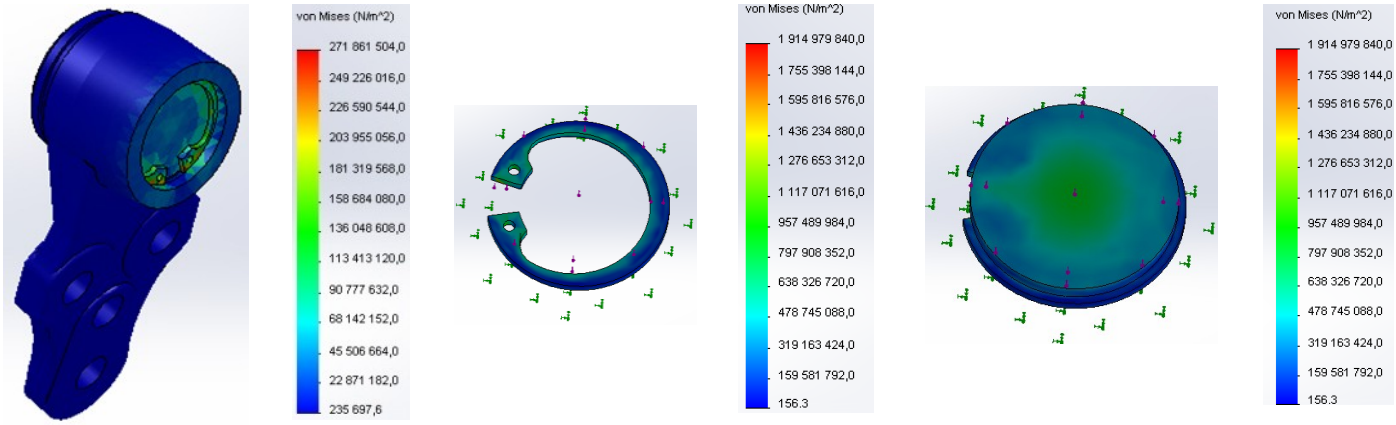


Рис. Д.10. Фрагменти дослідження напружено-деформованого стану деталей СШ

Аналізуючи результати досліджень встановлено, що під час експлуатації максимальні навантаження сприймає верхня частина вкладиша і НСП пальця, а навантаження на нижню частину вкладиша і відповідно на кришку мінімальні.

В результаті запропоновано у нижній частині корпуса виконати радіальну канавку під фіксуюче розпірне пружинне кільце по ГОСТ 13943–88, що дозволить значно зменшити час складання і замінити операцію вальцювання, яка досить трудомістка в умовах серійного виробництва.

Для дослідження напружено-деформованого стану модернізованого корпуса, пружинного кільця і кришки проведено комп’ютерне моделювання, результати якого наведені на рис. Д.11.



а) б) с)

Рис. Д.11. Дослідження напружено-деформованого стану елементів СШ:

а – дослідження корпуса в зоні канавки; б – дослідження кільця;

с – дослідження кришки

Проведено дослідження в лабораторії опору матеріалів на випробувальній машині моделі УМ – 5 (рис. Д.12) у відповідності з ГОСТ Р 52433-2005 «Шарниры шаровые. Технические требования и методы испытаний» [140]. Дослідження проводились з метою перевірки зусилля видавлювання кульового пальця в напрямку кришки зі стопорним кільцем.

Величина зусилля для кульових шарнірів з діаметром сфери пальця 25 – 27 мм лежить в межах 21000 – 30000 Н, [140].

Під час експериментальних досліджень до вузла прикладалось зусилля приблизно в 1.5…2 рази вище від зазначеного у ГОСТ і складало 44000Н. На рис. Д.12 відображено фрагмент випробувань СШ на експериментальній машині моделі УМ – 5.

Рис. 5.20. Фото випробування СШ під час експерименту

Після навантаження СШ знімався з експериментальної машини, а його деталі піддавались дослідженню на предмет пошкоджень.

В результаті досліджень пошкоджень не виявлено, тобто конструктивні рішення спрямовані на удосконалення фіксації кришки стопорним кільцем можуть бути прийняті до впровадження.

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

ДОДАТОК Е

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У фахових виданнях України

1. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення довговічності сферичних шарнірних з'єднань. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2017. № 2. Ч1. Т1. С. 47–51.

Здобувачем запропоновано методику діагностування сферичних шарнірів та встановлені основні фактори впливу на працездатність сферичних шарнірів.

2. Косіюк М.М., Костюк С.А. Формоутворення неповних сферичних поверхонь на універсальних верстатах токарної групи. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2017. № 3. С. 47-52.

Здобувачем запропоновано методику розрахунку режимів обробки та конструкцію пристрою для обточування неповних сферичних поверхонь.

3. Костюк С.А., Косіюк М.М. Удосконалення конструкції кульового шарніра підвіски автомобіля. *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., Косіюк М.М. Удосконалення конструкції та технології виготовлення кульової опори підвіски автомобіля. *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., Косіюк М.М. Підвищення ефективності використання енергії удару при статико-імпульсному зміцненні поверхневим пластичним деформуванням.

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., Косіюк М.М. Механічний генератор імпульсів машини ударної дії для статико-імпульсного зміцнення. *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., Косіюк М.М. Машина для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання статико-імпульсною обробкою. *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., Косіюк М.М. Підвищення довговічності сферичних шарнірів зміцненням кульових пальців статико-імпульсною обробкою. *WORLD SCIENCE. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws RSGlobalSp. zO.O.,* Warsaw, Poland, 2019. № 5(45) Vol.1. May 2019. P. 4–12.

Здобувачу належать результати дослідження формування мікрорельєфу на сферичній поверхні та побудова геометричної моделі формування мікропрофілю.

Патенти на корисні моделі

9. Кульовий шарнір: пат. 116145 Україна: МПК F16C11/06. №u201611725; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

Внесок здобувача полягає у розробленні конструкції шарніра.

10. Пристрій для точіння зовнішніх сферичних поверхонь: пат 116147 Україна: МПК B23B5/00. №u201611728; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

Внесок здобувача полягає у розробленні ідеї створення пристрою.

11. Пристрій для зміцнення сферичних поверхонь: пат 116148 Україна: МПК B23B5/00. №u201611738; заявл. 21.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

Внесок здобувача полягає у розробленні ідеї створення ударної системи пристрою.

12. Спосіб збільшення ресурсу сферичного шарніра: пат 132728 Україна: МПК F16C11/06. №u201809330; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5.

Внесок здобувача полягає у розробленні схеми біполярної обробки неповних сферичних поверхонь.

13. Пристрій для зміцнення неповних сферичних поверхонь статико-імпульсною обробкою: пат 132726 Україна: МПК B24B 5/00. №u201809328; заявл. 01.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5.

Внесок здобувача полягає у розробленні ідеї створення ударної системи генератора механічних імпульсів.

14. Машина для зміцнення зовнішніх поверхонь обертання статико-імпульсною обробкою: пат 147855 Україна: МПК B23B5/00. №u202100056; заявл. 11.01.2021; опубл. 16.06.2021, Бюл. № 24.

Внесок здобувача полягає у розробленні концепції створення головних вузлів машини.

Матеріали науково-технічних конференцій

15. Костюк С.А., Косіюк М.М. Зміцнення неповних сферичних поверхонь поверхневим пластичним деформуванням. *Перші наукові кроки:* матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (м. Кам'янець-Подільський 23-24 квітня 2014 р.). Кам'янець-Подільський, 2014. С.183.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання процесу зміцнення.

16. Костюк С.А., Косіюк М.М. Комп'ютерне моделювання зміцнення поверхневого шару металевих деталей пластичним деформуванням. *Актуальні проблеми комп'ютерних технологій (АПКТ-2015)*: збірник наукових праць за матеріалами дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції (м. Хмельницький 21-22 травня 2015 р.). Хмельницький, 2015. С.128–132.

Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання процесу зміцнення.

17. Костюк С.А., Косіюк М.М. Підвищення зносостійкості поверхневого шару неповних сферичних поверхонь. *АВІА-2017*: матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ 19-21 квітня 2017р.). Київ, 2017. С.100–103.

Здобувачу належить ідея вдосконалення технології зміцнення неповних сферичних поверхонь.

18. Костюк С.А., Косіюк М.М., Костюк М.А. Пристрій для обточування неповних сферичних поверхонь. *Технічна творчість:* збірник наукових праць (м. Хмельницький 18 липня 2018р.). Хмельницький, 2018. С.6–7.

Здобувачу належить ідея створення пристрою.

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

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

ДОДАТОК Є

ПАТЕНТИ ТА АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 116148

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.05.2017.**

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України А.А.Малиш

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552556
№1

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 116147

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ТОЧІННЯ ЗОВНІШНІХ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.05.2017.**

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України А.А.Малиш

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552556
№1

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 116145

КУЛЬОВИЙ ШАРНІР

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.05.2017.**

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України А.А.Малиш

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552555
№1

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 132728

СПОСІБ ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ СФЕРИЧНОГО ШАРНІРА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **11.03.2019.**

Заступник Міністра економічного розвитку і торгівлі України Ю.П. Бровченко

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ
ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 132726

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ НЕПОВНИХ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **11.03.2019.**

Заступник Міністра економічного розвитку і торгівлі України Ю.П. Бровченко

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ
ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 147855

МАШИНА ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ЗОВНІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей **16.06.2021.**

Генеральний директор
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»

А.В. Кудін

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ» Ідентифікаційний код 31032378

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор «СТО Зварювання»

_____ О.В. Павлов

м. Хмельницький

«_____» березня 2021р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Костюка С.А. «Технологічне забезпечення підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів статико-імпульсною обробкою».

Цим актом підтверджується впровадження результатів наукових досліджень у технологічних процесах виготовлення та реновації деталей машин з неповними сферичними поверхнями.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень представлена науково-технічна розробка, яка включає методику вибору технологічних режимів для токарної та зміцнювальної обробки деталей з неповними сферичними поверхнями, та технологічне оснащення (Пристрій для точіння зовнішніх сферичних поверхонь: патент №116147 Україна: МПК B23B5/00. Пристрій для зміцнення неповних сферичних поверхонь статико-імпульсною обробкою: патент №132726 Україна: МПК B24B 5/00). Формоутворення неповної сферичної поверхні досягається за рахунок узгоджених кінематичних рухів заготовки та інструмента. Запропонована технологія реалізується на базі універсального токарно-гвинторізного верстата.

Даний документ не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Провідний фахівець _____ О.В. Павлов

Інженер кафедри ТМ «ХНУ» _____ С.А. Костюк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Хмельницького національного університету

професор, д.т.н. _____ Синюк О.М.

«20» травня 2021 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів досліджень інженера кафедри технології машинобудування Костюка Сави Андрійовича за темою дисертаційної роботи «Технологічне забезпечення підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів статико-імпульсною обробкою».

Результати дисертаційної роботи Костюка С.А. використовуються в навчальному процесі підготовки бакалаврів за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт» при проведені лабораторних робіт з дисципліни «Основи технічної діагностики автомобілів» (методика діагностування та прогнозування ресурсу сферичних шарнірів підвіски автомобіля).

Акт обговорений і схвалений на засіданні кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства (протокол № 8 від 19 травня 2021р)

Завідувач кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства професор, д.т.н. Диха О.В.

Секретар засідань кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, доцент, к.т.н. Дробот О.С.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи

Хмельницького національного університету

професор, д.т.н. _____ Синюк О.М.

«3» листопада 2020 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів досліджень інженера кафедри технології машинобудування Костюка Сави Андрійовича за темою дисертаційної роботи «Технологічне забезпечення підвищення працездатності пальців сферичних шарнірів статико-імпульсною обробкою».

Результати дисертаційної роботи Костюка С.А. використовуються в навчальному процесі підготовки бакалаврів за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» при проведені практичних та лабораторних робіт з дисципліни «Експлуатація та обслуговування машин», яку веде проф. Гладкий Я.М. При цьому використовується методика діагностування працездатності та технологічні способи відновлення деталей «типу палець сферичного шарніра» з неповними сферичними робочими поверхнями, а також огляд технологій та устаткування, які можуть бути використані у технологічних процесах виготовлення та відновлення деталей машин з неповними сферичними поверхнями.

Впровадження в навчальний процес результатів досліджень інженера кафедри технології машинобудування Костюка С.А. схвалене на засіданні кафедри технології машинобудування (протокол №3 від 29 жовтня 2020 р.)

Завідувач кафедри технології машинобудування, к.т.н., доцент _____ Урбанюк Є.А.

Секретар засідань кафедри ТМ, к.т.н., доцент _____ Соколан К.С.