Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Кваліфікаційна наукова
праця на правах
рукопису

ГАЛАН ЮРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 621.923.9.048

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В СИПУЧОМУ АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

13 «Механічна інженерія»
за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії)

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

_____Галан Ю.Я.

Науковий керівник:
Ляшук Олег Леонтійович,
доктор технічних наук, професор

Тернопіль – 2021

АНОТАЦІЯ

Галан Ю.Я. Підвищення ефективності технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей в сипучому абразивному середовищі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2021.

У дисертації виконано теоретичне та експериментальне нове вирішення науково-прикладної задачі технологічного забезпечення вібраційно-відцентрового оброблення деталей складного профілю в сипучому абразивному середовищі із розробленням теоретичних передумов, технологічних процесів, проектуванням та виготовленням технологічного устаткування, що забезпечує підвищення продуктивності із забезпеченням встановленої якості оброблених поверхонь.

На основі системного підходу до дослідження технологічних процесів вібраційно-відцентрового оброблення деталей в сипучому абразивному середовищі у роботі отримано такі наукові результати:

- набули подальшого розвитку аналітичні залежності для визначення кінетичної енергії силової взаємодії елементів сипучого абразивного середовища з поверхнями оброблюваних деталей, що дають можливість підібрати раціональні конструктивні та кінематичні параметри нового устаткування і властивості абразивного робочого середовища;

- вперше розроблена пружно-в’язка модель руху сипучого абразивного середовища із визначенням динамічних параметрів при його взаємодії із поверхнями деталі у камері устаткування для вібраційно-відцентрового оброблення, що дозволяє прогнозувати амплітудно-частотну характеристику коливань абразивного робочого середовища, яка впливає на інтенсивність зрізання матеріалу;

-вперше на основі динаміки вібраційно-відцентрової обробки виведено аналітичні залежності, які встановлюють співвідношення параметрів процесу механічної обробки поверхонь деталей сипучим абразивним середовищем для резонансного і нерезонансного випадку.

Розроблено математичну модель дії абразивної частинки на поверхню деталі, яка враховує параметри гранули сипучого робочого середовища і кута її взаємодії з оброблюваною поверхнею, що визначається кінематикою вібраційної установки, яка встановлює вид циркуляції робочого середовища для певного технологічного процесу обробки деталей. Встановлено, що при меншому значенні коефіцієнта форми гранули k зміна значень коефіцієнта миттєвого тертя λ гранули від кута орієнтації гранули φ є значною, з синусоїдальною періодичністю, приблизно рівною 22°-25°, що відповідає переходу від режиму шліфування до режиму полірування абразивними гранулами оброблюваної поверхні.

Отримана математична модель руху сипкого середовища на основі закону Фохта, що дозволяє описати динамічні процеси в оброблювальному середовищі для широкого спектру типів його матеріалів.

Встановлено характеристики частоти власних коливань шару середовища, яка залежить від амплітуди його коливань за різних значень його густини: для м'яких матеріалів оброблювального середовища ($-1<\nu<0$), для жорсткого оброблювального середовища ($\nu>0$); для середовища з лінійно-пружними властивостями матеріалу ($\nu=0$), який не залежить від амплітуди.

Описано методику використання стендового обладнання для проведення експериментальних досліджень процесу з визначенням зміни продуктивності питомого зняття металу, шорсткості та визначення мікротвердості з використанням частотного перетворювача Altivar 71 з програмним продуктом PowerSuite v.2.5.0.

Проведено експериментальні дослідження на спроектованій та виготовленій вібраційно-відцентровій установці обробленням деталей з робочим середовищем: природний байкаліт та гранульований абразивний матеріал ПТС-8. Параметри експериментальної установки: об'єм робочої камери 14 дм^3, амплітуда коливань – 2...6 град., частота коливань - 15...25 Гц, потужність електродвигунів 0,55 кВт, коефіцієнт заповнення камери 50...80%.

Встановлено, що із збільшенням коефіцієнта форми гранули k, амплітуди кутових коливань A та кута повороту робочої камери β величина питомого зняття металу під час обробки деталей зростає. Максимальна величина

питомого зняття металу складає 63 г/см^2, а мінімальна – 46 г/см^2. Збільшення коефіцієнта форми гранули k від 0,1 до 0,5 призводить до підвищення питомого зняття металу на 9%.

При цьому збільшення амплітуди кутових коливань A від 2 град. до 4 град. надає приросту питомого зняття металу на 15%. Збільшення кута повороту робочої камери β від 15 град. до 35 град. призводить до підвищення питомого зняття металу на 13%.

Проведено експериментальні дослідження шорсткості оброблених поверхонь деталей машин, виготовлених із сталі Ст 3 після вібраційно-відцентрового оброблення з виведенням рівняння регресії. Встановлено, що найінтенсивніша зміна відбувається протягом перших 15 хв. обробки. Максимальне значення шорсткості оброблених поверхонь складає Ra 4,53 мкм., а мінімальне – Ra 1,22 мкм.

Збільшення частоти коливань ω від 15 Гц до 18 Гц призводить до зниження шорсткості оброблених поверхонь, при цьому подальше збільшення частоти коливань до 25 Гц призводить до зростання шорсткості оброблених поверхонь. Збільшення тривалості обробки заготовки T від 15 хв. до 35 хв. призводить до зниження шорсткості оброблених поверхонь, а подальше збільшення тривалості обробки до 55 хв. призводить до зростання шорсткості оброблених поверхонь.

Тому раціональний час обробки становить 35 хв. Збільшення ступеня заповнення робочої камери K від 50 % до 80 % призводить до зростання шорсткості оброблених поверхонь на 12%.

Наведено результати досліджень мікротвердість поверхневого шару деталей після вібраційно-відцентрового оброблення з виведенням рівняння регресії. Максимальне значення мікротвердості поверхневого шару деталей складає 259 H_v МПа, а мінімальне – 140 H_v МПа,. Збільшення тривалості обробки заготовки T від 15 хв до 55 хв. призводить до зростання мікротвердість поверхневого шару деталей на 22%. Збільшення кута повороту робочої камери β від 15 град. до 27 град. призводить до зростання мікротвердість поверхневого шару, при цьому подальше збільшення кута повороту робочої

камери до 35 град. призводить до зменшення мікротвердість поверхневого шару. Тому раціональний кут повороту робочої камери становить 27 град.

При цьому збільшення амплітуди кутових коливань A від 2 град. до 5,5 град. призводить до зростання мікротвердості поверхневого шару, а подальше збільшення амплітуди кутових коливань до 6 град. призводить до зменшення мікротвердості поверхневого шару. Тому раціональна амплітуда кутових коливань становить 5,5 град.

Виведено аналітичні залежності для визначення кінематичних параметрів абразивної частинки процесу вібраційно-відцентрового оброблення. Запропонована візуалізація процесу вібраційно-відцентрового оброблення та блок-схема програми розрахунку технологічного процесу, що дозволяє прогнозувати продуктивність зняття металу, шорсткість та твердість одержаної поверхні, уникати дискретного характеру технологічного процесу та знаходити оптимальне співвідношення режимів обробки, використовуючи технологію LINQ.

Приведений річний економічний ефект від впровадження технологічного процесу вібраційно-відцентрового оброблення при заміні базового варіанту оброблення усієї партії виробів на розроблений становить 24251,5 грн. Одержані наукові і практичні результати частково впроваджено для використання у ТДВ «Булат» (смт Микулинці) та ТзОВ «ВМП енергоконструкція» (м. Рівне). Технічна новизна захищена 3 патентами України на корисні моделі.

Ключові слова: технологічний процес, шорсткість, вібраційно-відцентрова установка, амплітуда, мікротвердість.

ABSTRACT

Galan Yu. Ya. The improvement of technological process efficiency of vibration-centrifugal processing of parts in a loose abrasive medium. – Qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis for the scientific degree of Doctor of Philosophy, speciality 131 «Applied Mechanics». – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021.

A theoretical and experimental completely new solution of the scientific-applied problem consisting in technological provision of vibration-centered treatment of intricate shape workpieces in granular abrasive medium has been carried out in the thesis under discussion. Moreover, some theoretical prerequisites and technological processes have been developed, the necessary technological equipment has been designed and made to provide the efficiency increase and the required quality of the surfaces under treatment.

The following scientific results have been obtained in the paper under discussion on the basis of system approach to the study of technological processes of vibration-centered treatment of workpieces in granular abrasive medium:

- analytic dependencies have been further developed to determine the kinetic energy of force interaction of granular abrasive medium elements with the surfaces of the workpieces under treatment that makes possible to choose the most efficient design and kinematic parameters of new equipment and properties of the abrasive medium;

- for the first time an elastic-viscous model of granular abrasive medium motion has been developed and the dynamic parameters have been determined under its interaction with the workpiece surface conditions in the equipment chamber for vibration-centered treatment that makes possible to predict the amplitude-frequency characteristics of vibrations in abrasive medium making impact on the material removal intensity;

- for the first time on the basis of vibration-centered treatment dynamics some analytic dependencies have been derived determining the parameters balance of the

workpieces surfaces mechanical treatment process by granular abrasive medium for resonant and non-resonant cases.

A mathematical model of an abrasive particle action on the workpiece surface taking into account the granule parameters of granular operating medium and the angle of its interaction with the surface under treatment determined by the vibration machine kinematics finding a kind of the operating medium circulation for certain technological process of the workpiece machining has been developed. We have come to the conclusion that the smaller value of the granule k shape coefficient, the more considerable the dependence of the granule immediate friction coefficient λ values on the orientation angle of the granule φ is, with sinusoidal intervals, and it is approximately equal to 22°-25° that corresponds to the transition from grinding conditions to the polishing mode by abrasive granules of the surface under treatment.

The mathematical model of granular medium motion has been obtained on the basis of Voigt law and it allows us to describe some dynamic processes in the medium under treatment for the large range of its materials types.

It has been stated that, frequency characteristics of natural oscillations of medium layer, which depends on the amplitude of its oscillations at different values of its density: for soft materials of the processing medium ($-1<\nu<0$), for hard processing medium ($\nu>0$); for medium with linear-elastic properties of the material ($\nu=0$) which does not depend on the amplitude.

The method of using bench equipment for experimental studies of the process to determine changes in the productivity of specific removal of metal, roughness and determination of microhardness using the frequency converter Altivara-71 with the software PowerSuite v.2.5.0. has been described.

Some experimental study has been conducted on the designed and manufactured vibration-centered machine on the workpieces machining by the following operating medium: natural baikalite and granular abrasive material PTS-8. The parameters of an experimental unit are as follows: the chamber volume is 14 dm^3, the vibrations amplitude is 2...6 degrees, the vibrations frequency is 15...25 Hz, the power of electrical motors is 0,55 kW, the chamber coefficient is 50...80%.

It was found, that the higher granule shape coefficient k, the angular vibrations amplitude A and the chamber turning angle β, the larger value of the of the metal

specific removal rate under the workpieces machining conditions is. The maximum value of the metal specific removal rate is 63 g/cm^2, and the minimum one equals to 46 g/cm^2. An increase of the granule shape coefficient k from 0,1 to 0,5 has resulted in 9% increase of the metal specific removal rate.

Moreover, the increase of angular vibrations amplitude A from 2 deg. to 4 deg. has added 15% increase of the metal specific removal rate. An increase of the chamber turning angle β from 15 degrees to 35 degrees has caused the 13% increase of the metal specific removal rate.

The surface roughness of the machine parts made of steel St 3 has been studied by means of experiments after vibration-centered treatment with the required regression equation deriving. We have found that the most intensive change is taking place during the first 15 minutes of treatment. The maximum value of the surface roughness is Ra 4,53 mkm., and the minimum one equals to Ra 1,22 mkm.

The increase of the vibrations frequency ω from 15 Hz to 18 Hz has resulted in the decrease of the surface roughness, but further increase of the vibrations frequency to 25 Hz has caused some increase of the surface roughness. The increase of the workpiece treatment time T from 15 min. to 35 min. results in the decrease of the surface roughness, and further increase of the machining time to 55 min. has caused some increase of the surface roughness.

Thus, the most efficient time of treatment should be 35 min. The increase of the chamber filling degree K from 50 % to 80 % has resulted in 12% increase of the surface roughness.

The micro hardness of the workpiece surface layer has been studied by means of experiments after the vibration-centered treatment and the regression equation has been derived. The maximum value of the workpiece surface layer micro hardness is equal to 259 H_v MPa, and the minimum one equals to 140 H_v MPa. The increase of the workpiece treatment time T from 15 min. to 55 min. has resulted in the 22% increase of the workpieces surface layer micro hardness. The increase of the chamber turning angle β from 15 deg. to 27 deg. has resulted in the increase of surface layer micro hardness, but the further increase of the chamber turning angle to 35 deg. has caused the decrease of the surface layer micro hardness. That is why the chamber turning rational angle is 27 deg.

In this case the increase of angular vibrations amplitude A from 2 deg. to 5,5 deg. has resulted in the increase of surface layer micro hardness, and further increase of the angular vibrations amplitude to 6 deg. has caused the decrease of the surface layer micro hardness. Thus, the most efficient amplitude of the angular vibrations should be equal to 5,5 deg.

Some analytic dependencies have been derived to find the kinematic parameters of an abrasive particle of the vibration-centered treatment process. Some visualization of the vibration-centered treatment process and a block-scheme of the technological process calculation program have been proposed that make possible to predict the efficiency of metal removal, roughness and hardness of the obtained surface, avoid the discrete behavior of the technological process and find the most efficient combination of the treatment modes using LINQ technology.

The given annual economic effect due to the introduction of the technological process of the vibration-centered treatment in case of changing of the production items run conventional treatment process for the developed one was equal to 24251,5 hrn. The obtained scientific and practical results have been partially introduced to be used in Superadded Liability Company “Bulat” (Mykulyntsi town) and LLC “VMP energy construction” (Rivne city). The technical novelty has been covered by 3 useful model patents of Ukraine.

Keywords: technological process, roughness, vibration-centrifugal installation, amplitude, microhardness.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Гевко Б.М., Підвищення ефективності вібраційно-відцентрового оброблення деталей вільними абразивами./ Б.М. Гевко, О.М. Кондратюк, О.Л. Ляшук, М.М. Марчук, Л.С. Серілко, Ю.Я. Галан. Монографія. – Рівне: НУВГП, 2017. – 136 с. (*Автором теоретично обґрунтовано основні параметри вібраційно-відцентрового оброблення деталей вільними абразивами*)

Публікації в наукових фахових виданнях України та закордоном

2. Theoretical substantiation of vibration- centrifugal finishing of parts by loose abrasive / Oleksandr Kondratiuk, Volodymyr Teslia, Ivan Kuchvara, Pavlo Bosiuk, Yuriy Galan // Motrol. Commission of motorization and energetic in agriculture. − Lublin-Rzeszow, 2018. − Vol. 20, № 1. − P. 73–79. (*Автором запропоновано схему процесу регулювання тиску абразивної частинки на поверхню деталі при вібраційно-відцентровій обробці*)

3. Interaction of abrasive working environment particles at vibrating processing with the treated surface details / Oleksandr Kondratyk, Oleg Lyashuk, Volodymyr Klendii, Yuri Galan // Вісник ТНТУ. – Т.: ТНТУ, 2017. – Том 86. – № 2. – С. 32–40. (*Автором запропоновано технологічні можливості вібраційної обробки деталей)*

4. Investigation of abrasive granule movement relatively to the workpiece surface during vibration treatment / Olexander Kondratiuk; Leonid Serilko; Oleg Lyashuk; Yuriy Galan. // Вісник ТНТУ. – Т.: ТНТУ, 2020. – Том 98. – № 2. – С. 59–68. *(Автором отримано аналітичні залежності вібраційної обробки деталей)*

5. Investigation of the operation of vibration-centrrifugal installation for automobile parts machining / Oleg Lyashuk, Leonid Serilko, Ivan Hevko, Olexander Kondratiuk, Oleg Tsion, Yuriy Galan // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2021. – Vol 101. – №1. — P. 79–88. (*Автором запропоновано математичне моделювання впливу оброблюваного середовища на технологічний процес вібраційного оброблення та визначення його оптимальних параметрів)*

6. Кондратюк О.М., Регулювання тиску абразивної частинки на поверхню деталі при вібраційно- відцентровій обробці / О.М.Кондратюк, Ю.Я.Галан, П.В. Босюк // Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» – Випуск 11. – Харків, 2018. – С.105-113. (*Автором визначено ефективні шляхи оптимізації параметрів технологічного процесу)*

7. Розширення технологічних можливостей вібраційної обробки деталей / О.М.Кондратюк, Б.М.Гевко, О.Л.Ляшук, Ю.Я.Галан // ВІСНИК Національного університету водного господарства та природокористування – ВИПУСК 2(74). – Рівне, 2016. – С. 276-286. (*Автором визначено шляхи поліпшення технологічного процесу та формування шорсткості і якості поверхні деталей проходить по певній закономірності вібраційно-відцентрового процесу)*

8. Галан Ю.Я. Оптимізація технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей / Б.М. Гевко, О.М.Кондратюк, Ю.Я. Галан// «Перспективні технології та прилади» Луцький НТУ, – Луцьк, 2015. – С.8-13. (*Автором виявлено зв'язок параметрів вібраційно-відцентрового процесу з режимами обробки)*

Матеріали і тези конференцій

9. Галан Ю.Я. Вібраційно-відцентрова установка для технологій обробки деталей машин/ О.М.Кондратюк, Іг.Б. Гевко Ю.Я. Галан // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2015 р.: тези допов. – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – С. 160-162. (*Автором запропоновано технологічні можливості вібраційно-відцентрова установки*)

10. Галан Ю. Я., Устаткування для проведення експериментальних досліджень обробки деталей в абразивному середовищі. / О. М.Кондратюк, Іг.Б. Гевко, Ю. Я. Галан //XVI ММНТК "Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво", 26-29 жовтня. – Суми, 2016. – С48-50. *(Автором узагальнено опис проведення експериментальних досліджень)*

11. Кондратюк О.М. Дослідження роботи вібраційно-відцентрової установки / О.М. Кондратюк, Л.С. Серілко, Ю.Я. Галан// Міжнародна науково-

технічна конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя 22–24 травня – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – С 112-115. *(Автором здійснено опис вібраційно-відцентрової установки).*

12. Ляшук О.Л. Дослідження взаємодії абразивної гранули з поверхнею деталі при вібраційній обробці / О.Л. Ляшук, О.М. Кондратюк, Ю.Я. Галан // Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція " Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного фунціонування транспортних систем" Національний університет водного господарства та природокористування 21-23 травня 2019р, м. Рівне. *(Автором здійснено опис технологічного оснащення).*

Патенти України на корисні моделі

13. Пат.№ 113428. Україна, МПК(2016.01) B24B 31/073 . Пристрій для вібраційної обробки/ Гевко Б. М.; Кондратюк О. М.; Ляшук О. Л.; Серілко Л. С.; Галан Ю.Я. (Україна). – №u201608015. заявл. 19.07.2016.; опубл. 25.01.2017р., Бюл.№2. *(Частка всіх авторів однакова).*

14. Пат. № 109876. Україна, МПК (2016.01) G01D 3/00. Індикатор універсальний / Ляшук О.Л.; Марчук Н.М.; Третьяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Галан Ю.Я.; заявники і патентоотримувачі Ляшук О.Л.; Марчук Н.М.; Третьяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Галан Ю.Я. – №u201602943; заявл. 22.03.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. №17. *(Частка всіх авторів однакова).*

15. Пат. № 109854. Україна, МПК B24B 31/06 (2006.01), B06B 1/02(2006.01). Вібраційно-відцентрова установка / Кондратюк О. М.; Галан Ю.Я. Ляшук О. Л.; Скиба О. П.; заявники і патентоотримувачі Кондратюк О. М.; Галан Ю.Я. Ляшук О. Л.; Скиба О. П.; – №u201602643; заявл. 17.03.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. №17. *(Частка всіх авторів однакова).*

ЗМІСТ

ВСТУП 16

РОЗДІЛ І СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз конструкцій устаткування для вібраційного оброблення деталей машин 22

1.2. Аналіз досліджень вібраційного оброблення деталей з робочим абразивним середовищем 39

1.3. Аналіз параметрів процесів при вібраційному оброблені деталей в робочому середовищі 50

1.4. Висновки та завдання дослідження 54

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ СИПУЧИМ АБРАЗИВНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

2.1. Дослідження технологічного процесу об‘ємної роботи вібраційно-відцентрової оброблення деталей сипучим абразивним середовищем 56

2.2 Дослідження роботи вібраційно-відцентрової обробки деталей сипучим абразивом 59

2.3. Дослідження тиску абразивної частинки на поверхню деталі 68

2.4. Математична модель динаміки вібраційно-відцентрової обробки деталей сипучим абразивом при контакті з стінками установки. 74

2.5. Динаміка незбуреного руху вібраційно-відцентрової обробки деталей сипучим абразивом 78

2.6. Методика дослідження динаміки збуреного руху оброблювального середовища 81

2.7. Висновки 88

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень 89

3.2. Технологічне оснащення для технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей в сипучому абразивному середовищі

3.2.1 Вібраційно-відцентрова установка 90
3.2.2 Пристрій для вібраційної обробки 91
3.3. Характеристика зразків та устаткування для експериментального дослідження 94
3.4. Методика проведення багатофакторних експериментальних досліджень технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей в сипучому абразивному середовищі 99
3.5. Висновки 104
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
4.1. Результати досліджень вібраційно-відцентрового оброблення з визначенням питомого зняття металу 105
4.2. Результати досліджень вібраційно-відцентрового оброблення з визначенням зміни шорсткості 112
4.3. Графоаналітичне оброблення результатів вібраційно-відцентрового оброблення з визначенням шорсткості 116
4.4. Результати експериментальних досліджень вібраційно-відцентрового оброблення на зміну мікротвердості поверхневого шару деталей 120
4.5. Графоаналітичне оброблення результатів експериментальних досліджень вібраційно-відцентрового оброблення на мікротвердість поверхневого шару деталей 125
4.6 Металографія при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей 129
4.7. Висновки 132
РОЗДІЛ 5 ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ
5.1. Дослідження руху абразивної гранули відносно оброблюваної поверхні деталі при вібраційній обробці 133
5.2. Типовий технологічний процес вібраційно-відцентрової обробки деталей 139
5.3. Алгоритм роботи перевірки математичної моделі для процесу 141

вібраційно-відцентрової обробки деталей
5.4. Техніко-економічне обґрунтування вібраційно-відцентрового оброблення деталей 145
5.5. Висновки 150
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 154
ДОДАТКИ 170

ВСТУП

Актуальність теми. Важливим напрямком розвитку машинобудування є широке впровадження передових технологій, матеріалізації обґрунтованих науково-технічних ідей, створення нових знарядь праці, систем машин, які визначають прогрес в різних галузях народного господарства.

Для забезпечення якості машинобудівної продукції широко використовують високопродуктивні технологічні методи обробки деталей складних профілів. Застосування технологічних методів дозволяє забезпечити зростання рівня автоматизації робіт, підвищення економічної ефективності та продуктивності праці.

Підвищенні вимоги до якості виробів призводить до різкого росту об’єму технологічних операцій обробки деталей, що складають 10…20% від загальної трудоємності. В основу цього закладено ресурсозберігаючі технології нового формату, що сприяють підвищенню продуктивності праці, якості продукції.

Дані вимоги потребують наступних різносторонніх досліджень процесу вібраційного оброблення, вивчення ряду питань конструювання обладнання і оснастки з дослідженням нових різноманітних вібраційних методів для обробки деталей складних профілів.

Тому для вирішення поставлених завдань є важливою розробка та впровадження нових високопродуктивних технологічних методів обробки деталей складних профілів при вібраційно-відцентровому процесі.

Основні закономірності процесу, визначені під час дослідження вібраційно-відцентрового оброблення деталей в сипучому абразивному середовищі, що дають можливість визначити вплив технологічних параметрів на продуктивність процесу та характер взаємодії абразивної гранули з поверхнею деталі і є **актуальними** для створення та практичної реалізації раціональних технологічних процесів машинобудівної галузі України.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідної роботи кафедри «Автомобілів» та наукового напрямку Тернопільського

національного технічного університету імені Івана Пулюя в рамках науково-дослідних держбюджетних тем: «Моделювання, синтез та розробка гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення сільськогосподарських вантажів» (№державної реєстрації 0120U102048)»; Створення нового покоління методів фрактодіагностування матеріалів і конструкцій на основі використання нейронних мереж (№ держреєстрації: 0119U001323) та відповідає напрямкам і завданням «Енергетична стратегія України «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» на період до 2035 року», схваленою Розпорядженням КМУ від 18 серпня 2017 р. № 605-р.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертації є удосконалення технології та устаткування вібраційно-відцентрового оброблення деталей складного профілю із підвищенням продуктивності формування якості їх поверхневих шарів.

Для досягнення мети в роботі поставлені та вирішені такі завдання:

- проведено аналіз основних видів вібраційного і вібраційно-відцентрового оброблення деталей та визначено взаємодію гранули з елементами деталі, рівень енергії робочого середовище, способи їх підвищення;

- виведено аналітичні та емпіричні залежності для визначення швидкості, прискорення, траєкторії руху абразивної частинки процесу вібраційно-відцентрового оброблення для визначення основних силових параметрів процесу та інших параметрів;

- виведено аналітичні залежності, які визначають вплив параметрів вібраційно-відцентрової установки, її руху, фізико-механічних характеристик оброблювального середовища на амплітудно-частотну характеристику коливань – базових параметрів, які характеризують інтенсивність процесу вібраційно-відцентрової оброблення деталей;

- розроблено математичну модель процесу взаємодії гранули з поверхнею деталі, на яку одночасно діють сили вібрації і відцентрові сили, збільшуючи об’єм матеріалу, що зрізається;

- розроблено динамічну модель процесу руху сипкого середовища вібраційно-відцентрового оброблення деталей, яка характеризується певною універсальністю за наявності нерезонансних та резонансних коливань;

- спроектовано і виготовлено технологічне устаткування для забезпечення процесу руху сипкого середовища вібраційно-відцентрового оброблення деталей з визначенням питомого зняття металу, шорсткості, мікротвердості, якості деталей складних профілів;

- проведено експериментальні дослідження вібраційно-відцентрового оброблення деталей з метою оцінки теоретичного моделювання та встановлення розбіжності результатів теоретичних розрахунків із результатами експериментальних досліджень;

- розроблено методику проектування технологічного устаткування для технологічного процесу вібраційно-відцентрового оброблення деталей складного профілю із подальшим впровадженням у виробництво результатів досліджень.

Об'єкт дослідження – прогресивні технологічні процеси вібраційно-відцентрового оброблення поверхонь деталей складного профілю в сипучому абразивному середовищі.

Предмет дослідження – взаємозв'язки конструкторсько-технологічних параметрів вібраційно-відцентрового оброблення з показниками якості поверхонь оброблюваних деталей.

Методи дослідження. В основу роботи покладений системний підхід щодо визначення технологічних процесів формування оброблених поверхонь з врахуванням технологічних факторів та фізико-механічних параметрів якості поверхні. Теоретичні дослідження базуються на загальних положень технології машинобудування, теорії формування якісних показників поверхні при різних технологічних методах обробки, а також на математичному апараті аналізу моделювання фізичних та механічних методів оцінки стану поверхонь оброблюваних деталей, принципу Д'Аламбера, методу Фур'є, періодичних Ateb-функцій, ідеї методу Ван-дер-Поля та асимптотичних методах нелінійної механіки. Для експериментального дослідження параметрів та перевірки

теоретичних результатів застосовано математичне моделювання та планування експерименту із застосуванням сучасних ЕОМ і програмного забезпечення. Статистичну обробку результатів експериментів та уточнення достовірності запропонованих теоретичних розрахунків проведено із застосуванням спеціального спроектованого обладнання та устаткування.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі системного підходу до дослідження технологічних процесів вібраційно-відцентрового оброблення деталей в сипучому абразивному середовищі у роботі отримано такі наукові результати:

- набули подальшого розвитку аналітичні залежності для визначення кінетичної енергії силової взаємодії елементів сипучого абразивного середовища з поверхнями оброблюваних деталей, що дають можливість підібрати раціональні конструктивні та кінематичні параметри нового устаткування і властивості абразивного робочого середовища;
- вперше розроблена пружно-в’язка модель руху сипучого абразивного середовища із визначенням динамічних параметрів при його взаємодії із поверхнями деталі у камері устаткування для вібраційно-відцентрового оброблення, що дозволяє прогнозувати амплітудно-частотну характеристику коливань абразивного робочого середовища, яка впливає на інтенсивність зрізання матеріалу;
- вперше на основі динаміки вібраційно-відцентрової обробки виведено аналітичні залежності, які встановлюють співвідношення параметрів процесу механічної обробки поверхонь деталей сипучим абразивним середовищем для резонансного і нерезонансного випадку.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано і експериментально обґрунтовано нову конструкцію вібраційно-відцентрової установки та визначено її основні параметри, характеристики інтенсивності процесу. Практичні рекомендації дали змогу одержати збільшення площі вібраційного впливу для обробляючого абразивного робочого середовища та зменшення його товщини, що приводить до збільшення сили взаємодії абразивної гранули з оброблюваною поверхнею деталі, розширення

технологічних можливостей вібраційної обробки і підвищення продуктивності вібраційного пристрою.

Дані результати частково використовувалися при підготовці бакалаврів за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» на кафедрі інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя при викладанні дисциплін «Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин», «Технологія обробки типових деталей та складання машин», «Технологія та устаткування машинобудівних виробництв». Дослідно-промислова перевірка результатів досліджень була виконана у виробничих умовах на ТДВ «Булат» (смт Микулинці) та ТзОВ «ВМП енергоконструкція» (м. Рівне). Технічна новизна отриманих досліджень захищена 3 патентами України на корисні моделі.

Особистий внесок здобувача. Результати роботи отримані автором особисто. Основні дослідження, описані в дисертації, були виконані автором піл керівництвом наукового керівника. Особистий внесок автора полягає у запропонованій вібраційно-відцентровій установці, постановці завдань, їх експериментальному виконанні, аналізі та узагальненні отриманих результатів, розробці математичних моделей. В опублікованих роботах автору належить: теоретично обґрунтовано основні параметри вібраційно-відцентрового оброблення деталей вільними абразивами [36, 42], регулювання тиску абразивної частинки на поверхню деталі при вібраційно-відцентровій обробці [72], технологічні можливості вібраційної обробки деталей [37, 124], обґрунтовання вібраційно-відцентрової установка для технологій обробки деталей машин [155], дослідження взаємодії абразивної гранули з поверхнею деталі при вібраційній обробці [150-151], оптимізація технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей [38, 68], дослідження руху абразивної гранули відносно оброблюваної поверхні деталі при вібраційній обробці [83, 152]. Технічну новизну роботи захищено патентами України на корисні моделі [115-117]. Постановка задачі та аналіз досліджень здійснено спільно з науковим керівником та частково із співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Результати наукових досліджень, які викладені в дисертації, доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях: IV Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій” (м. Тернопіль, ТНТУ, 2015); XVI ММНТК “Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво” (м. Суми, СумДУ, 2016); Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам’яті Івана Пулюя (м. Тернопіль, ТНТУ, 2018); "Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем" Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне, 2019); Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», (м. Тернопіль, ТНТУ, 2020). В повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на розширеному засіданні кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (2021 р.).

Публікації. Результати наукових досліджень викладено в 15 друкованих працях, з яких 1- монографія у співавторстві, 7 статей у фахових виданнях, 3 патентах України на корисні моделі і в 4 матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, п’яти розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Повний обсяг дисертації – 194 сторінок, в тому числі 72 рисунків, 20 таблиць, переліку посилань із 157 найменувань та 6 додатків. Обсяг основного тексту дисертації - 136 сторінок.

РОЗДІЛ І
СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз конструкцій устаткування для вібраційного оброблення деталей машин

На сьогоднішній день додаткові пристрої використовують як допоміжне устаткування для певних умов обробки при визначених конструкціях обробки деталей. Це пояснюється тим, що для виконання певних завдань використовують універсальне обладнання досліджувальних процесів при вібраційній обробці із спрощеними підходами при виборі оснащення.

Конструкції вібраційного устаткування, щодо їх оптимальної продуктивності, надійності та якості отриманих виробів, не достатньо є висвітленими та не спостерігається їх системних досліджень [4, 5, 19, 113-114].

Існуючі конструкції вібраційного устаткування можна поділити на дві великі групи: конструкції, що дозволяють здійснити коливання контейнера по двох взаємно перпендикулярним напрямках, а інші - у трьох напрямках.

В роботі [5] відмічено, що для випадку реалізації коливань у трьох напрямках вібраційні конструкції є більш продуктивними, а в роботі [8] наведено, що при двох взаємно перпендикулярних напрямках знімання металу за одиницю оброблюваної поверхні на 20 -25% є продуктивніше.

При виборі конструкції вібраційних верстатів необхідно перевіряти технічні характеристики, а саме: собівартість процесу, продуктивність процесу та параметри. [9, 10]. Конструкції вібраційних верстатів можуть мати додаткові пристрої (вібросита, сепаратори та ін.), внаслідок чого це дасть скорочення часу, яке пов'язане з вивантаженням деталей і відділенням їх від гранул. Одним із провідних світових виробників вібраційних верстатів є фірма Rösler, що має вбудовані різновиди пристроїв [4].

В загальному машинобудуванні регламентують довговічність агрегатів та механізмів машин їх надійністю. Деталі пар тертя характеризуються

зносостійкістю матеріалу та здатністю витримувати експлуатаційні навантаження та вплив на навколишнє середовище.

На якість процесу вібраційного оброблення впливають характеристики сипучого робочого матеріалу та деталь, що обробляють. Основні фактори, які впливають на процес є режими коливання, конструкція робочої камери, об’єм і коефіцієнт заповнення.

Дані фактори мають значний вплив на силу мікроударів, тиск, напруження і температуру, що утворюються внаслідок дії мікроударів, температури в робочій камері, швидкості та прискорення частинки робочого середовища процесу вібраційного оброблення.

Внаслідок цього можна вібраційні машини класифікувати на два класи - конструктивно-технологічні та структурні.

Конструктивно-технологічні дають можливість застосовувати вібраційні машини для різного робочого процесу, а саме подрібнення, сортування, ущільнення із конструктивними параметрами робочих органів.

Структурна класифікація дає можливість застосовувати загальні технічні характеристики вібраційних машин та взаємодію робочого органа із середовищем. Дана класифікація дозволяє розробити єдину теорії вібраційних машин для подальшого розвитку.

Характерними параметрами роботи вібраційних машин зумовлені частотою коливань, характеристикою пружних зв'язків та відношення мас деяких елементів системи. Характерними ознаками структурної класифікації вібраційних машин є степінь вільності динамічної схеми та привід вібраційних машин.

Для подальшого вивчення взаємодія робочих органів вібраційних машин з оброблюваним середовищем може трансформуватися і є досить умовною. Окреслені вібраційні машини, які відносять до однієї групи, мають спільну принципову будову.

На основі цього розрізняють такі види вібрації в залежності від зміни координат об’єкта, що здійснюють процес коливання: лінійна (рух деталі прямолінійно); плоска (рух деталі в одній площині); просторова (рух деталі по

просторовій траєкторії); кутова (коли рух деталі здійснюється обертовій траєкторії); комбінована.

В роботах [19, 28, 35, 43, 121] зазначено фактори, які впливають на динамічний рух, а саме режим руху, робоче середовище та хімічна активізація процесу. За характером впливу вібраційні процеси системи поділяються на насипні і дисперсні системи, деформування та руйнування, подрібнення сипких матеріалів та сепарація.

На підставі цих факторів та характеру стиків приведена класифікація процесу віброоброблення деталей, яка наведена на рис. 1.1.

Проаналізувавши дану класифікацію процесу вібраційної обробки деталей, встановлено що конструкції вібраційних машин відрізняються залежно від сфери застосування. Процес обробки деталі можна поділити на три способи: при повному заповнені установки середовищем, при періодичному заповненні середовищем або сухому середовищі. За способом обробки деталей процес вібраційної обробки поділяють: вільно завантажених деталей; деталі, які закріплені допоміжними пристроями; габаритні деталей (тип труб). За динамічним характером вібраційні машини поділяють на: тип привода (електромагнітний, електричний, пневматичний, гідравлічний, механічний, комбінований); форму коливання робочої камери (кругова, еліптична, прямокутна, комбінована); - співвідношення вимушених та власних частот; кількість коливальних мас.

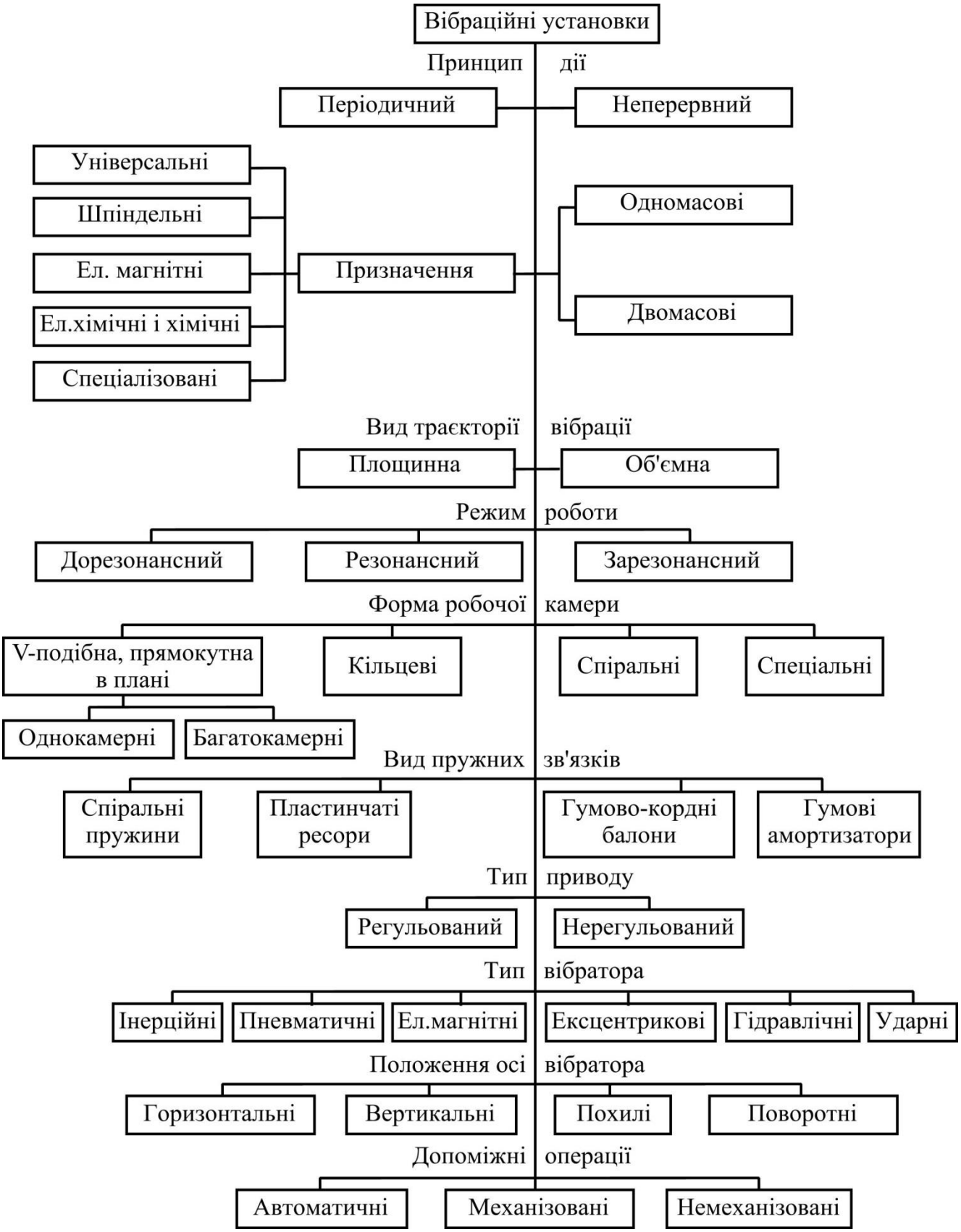


Рисунок 1.1. Класифікація вібраційних машин

Встановлено [4, 75, 144], що існуючі класифікатори не задовольняють розкрити весь спектр номенклатури оброблюваного матеріалу, при цьому не охоплено обробку дрібних і великогабаритних деталей (рис.1.2). На (рис.1.3) наведено аналіз поділу деталей на дрібні, середні і великогабаритні, а також відображені обмеження щодо можливостей обробки деталей на вібраційних машинах (рис. 1.4). Із (рис. 1.3) вказано, що є типові технологічні процеси, які використовуються при вібраційній обробці одночасно великої кількості деталей простої або складної форми.

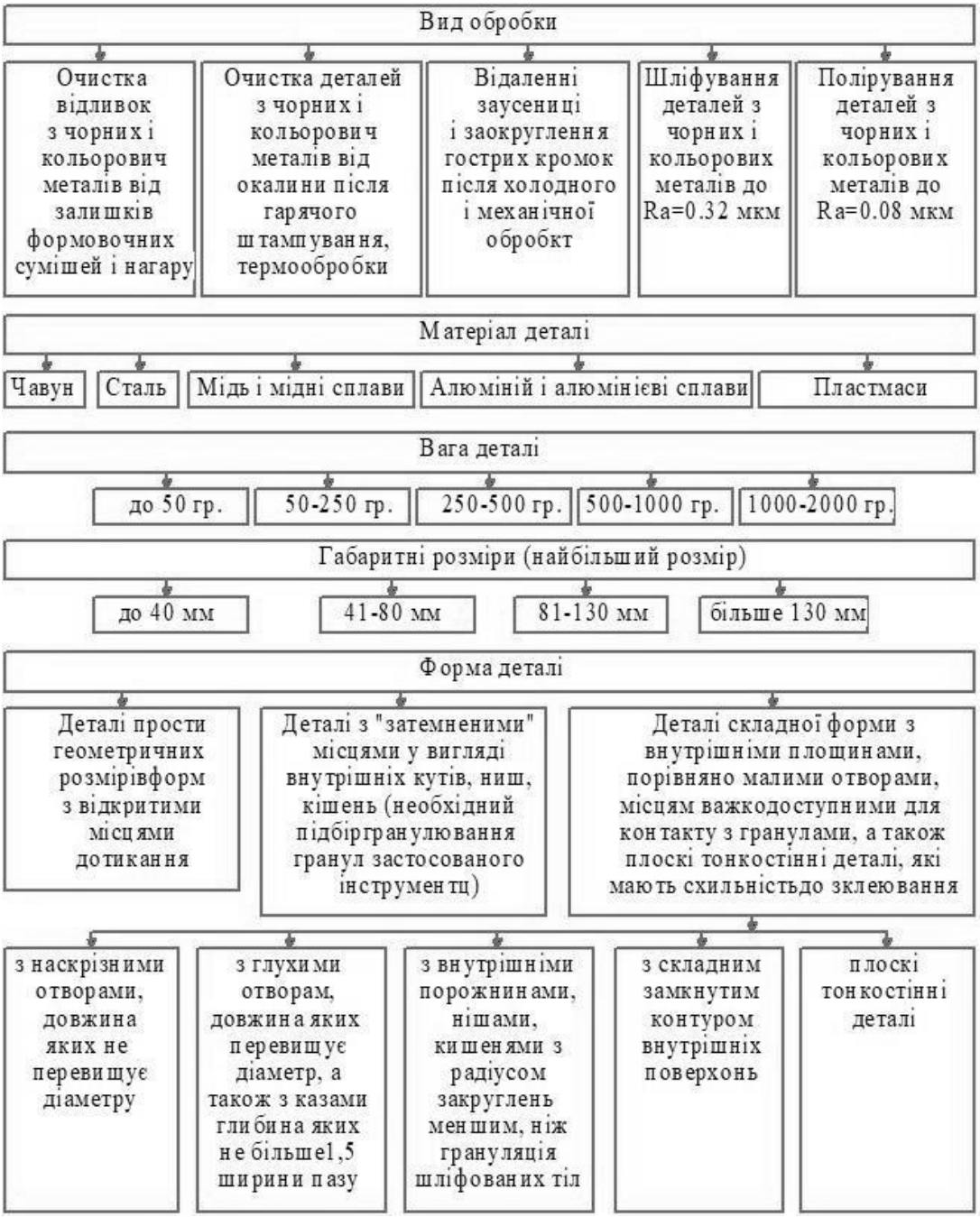


Рисунок 1.2. Класифікатор обробки деталей

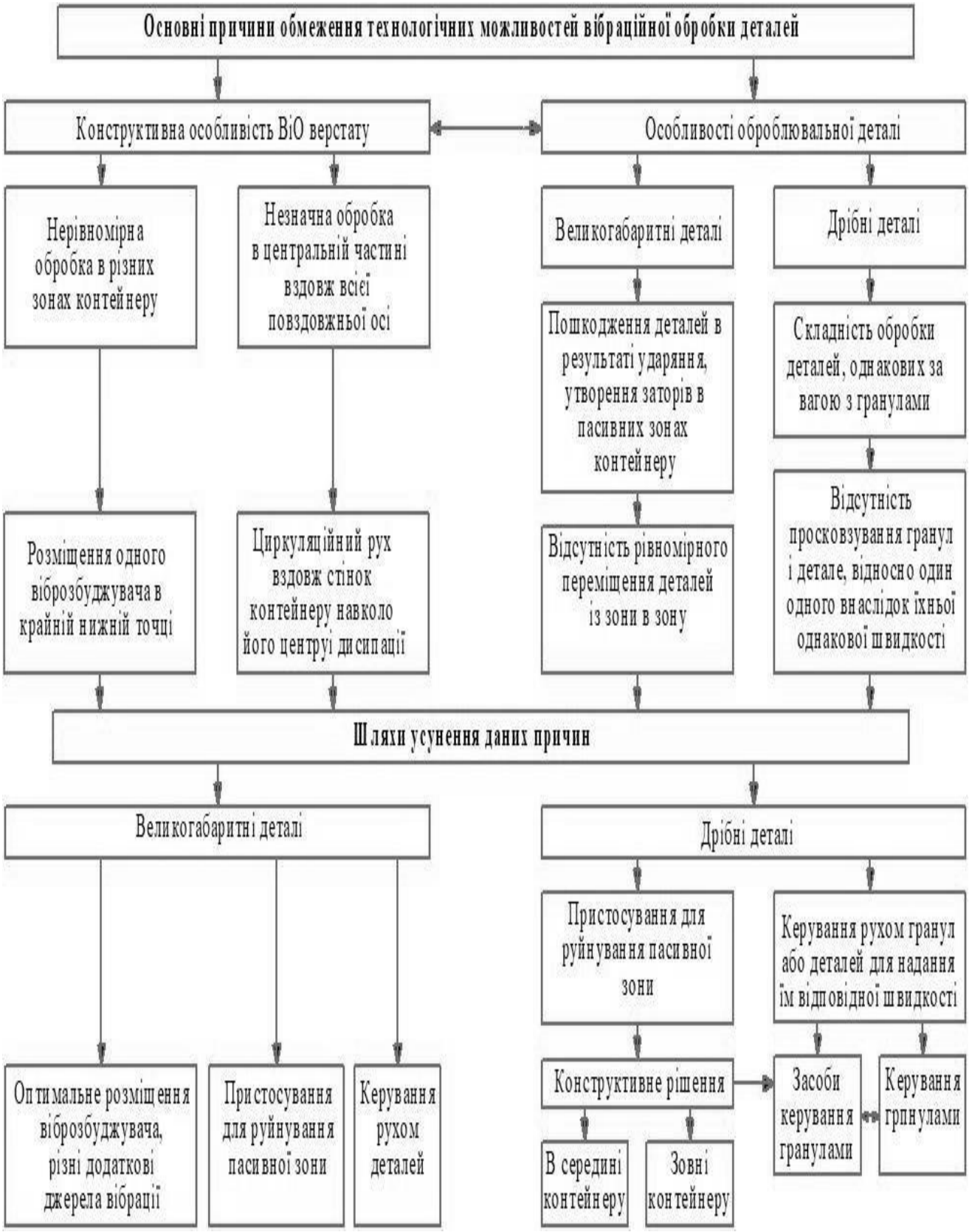


Рисунок 1.3. Схема класифікації деталей, що підлягають обробці

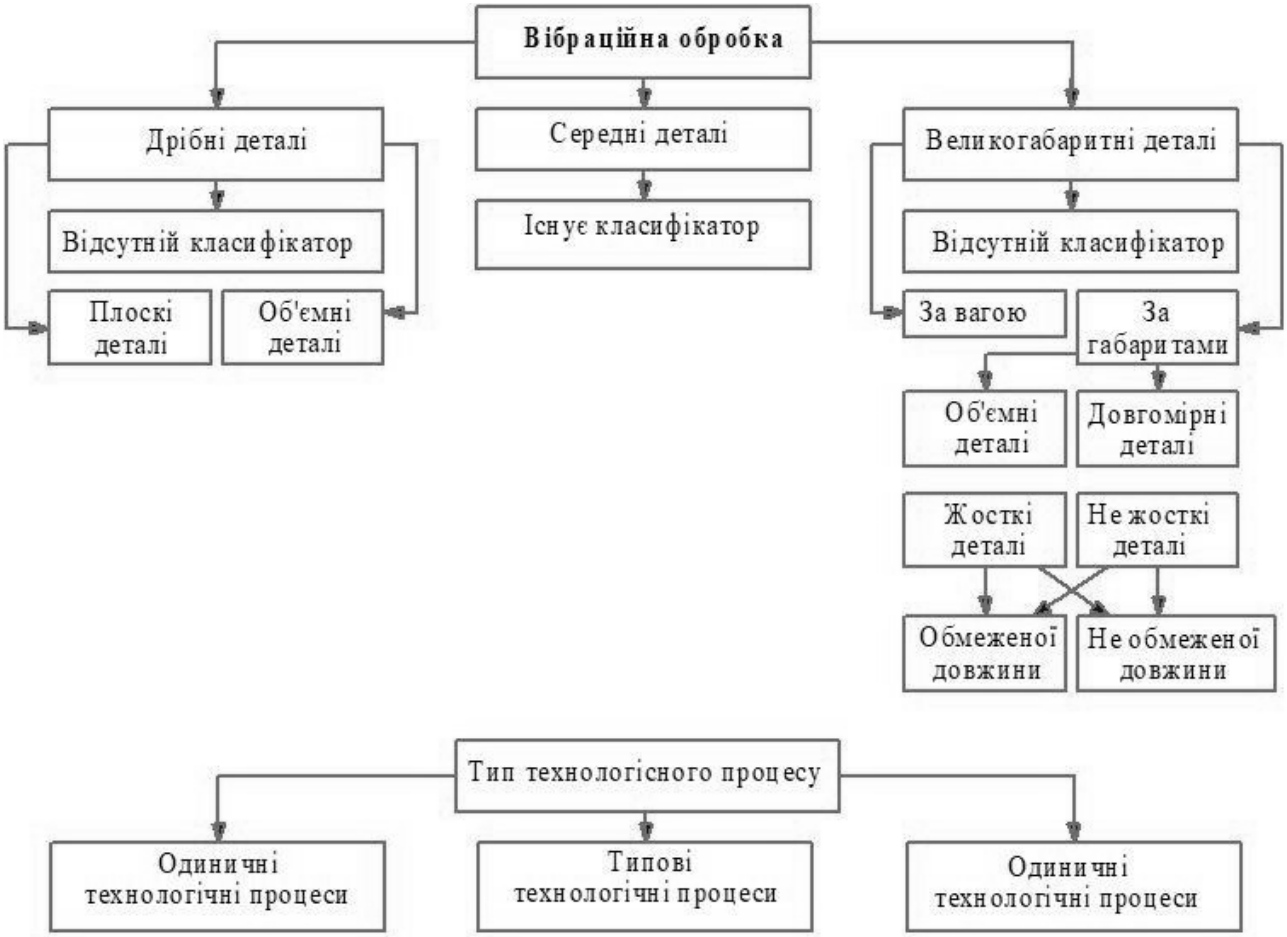


Рисунок 1.4. Схема обмежень по обробці деталей на вібраційних машинах

На основі цих тверджень на рис.1.5 наведена технологічна схема вібраційної установки з обертовим рухом маси завантаження, що дає можливість збільшити зону активної взаємодії робочого середовища та деталі, яка обробляються [24, 56-57, 100]. Коливальний рух сферичної робочої камери залежить від технологічного процесу.

Для підвищення якості поверхні наведено технологічну схему обробки ущільненим шаром абразиву (рис. 1.6) для інтенсифікації процесу оброблення, внаслідок надання низькочастотної осьової вібрації через шток [16-17, 61]. Заготовки, що обробляються завантажують в циліндричний контейнер. Рух з кутовою швидкістю ω_1 навколо центральної осі і кутовою швидкістю $\omega_г$ навколо власної осі.

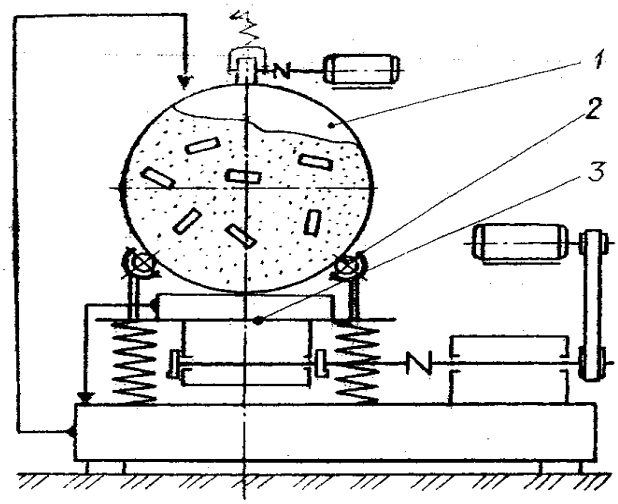


Рисунок 1.5. Технологічна схема вібраційної установки з обертовим рухом маси завантаження

Внаслідок здійснення обертання робочої камери навколо власної осі з кутовою швидкістю переміщається абразивне середовище відносно поверхні деталей, що обробляються.

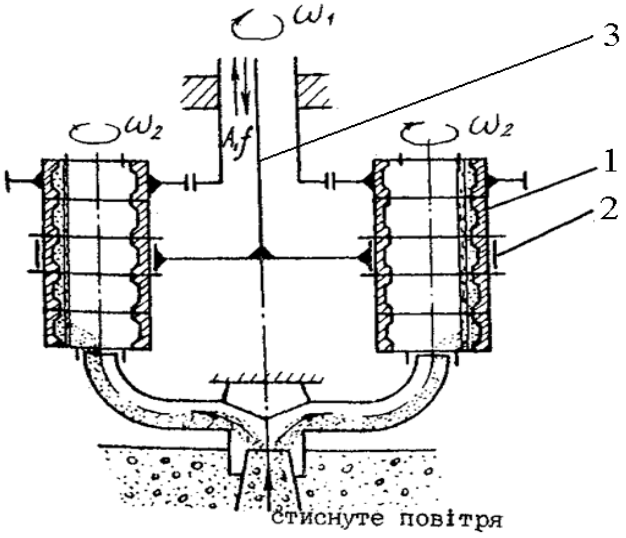


Рисунок 1.6. Технологічна схема обробки ущільненим шаром абразиву: 1-заготовка; 2-циліндричний контейнер; 3- осьовий шток

Конструктивними ознаками даних типів установок є з’єднання простого обертового руху і вібрацій елементів робочого контейнера в площині.

На рис. 1.7 представлено вібраційно-відцентрове оброблення [23, 136], яке здійснює процес обробки за рахунок просторового руху робочої камери по складній траєкторії. Установка працює наступним чином: в камеру 1 встановлено ротор 2, в який закріплено валу 3, з муфтою 4, що з'єднані з

електродвигуном 5. Під камерою кріпиться до рами пружина 6 та встановлений електромагнітний вібратор 7. В камері розміщено екран 8, який через гвинтову пару 9-10 може переміщається по висоті камери 1. Для здійснення обробки подають рідину через насос 11 по трубопроводам 12, із зони *А* в зону *В*, перетинаючи найбільшу зону інтенсивності оброблення *Б*.

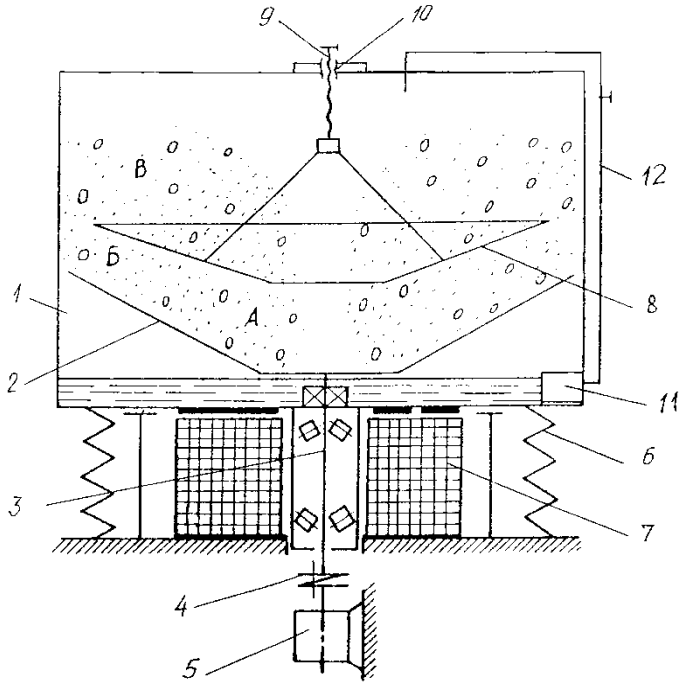


Рисунок 1.7. Технологічна схема вібраційно-відцентрової установки

Вібраційно-відцентрове оброблення може бути здійснюється без надання камері додаткових обертових рухів. Камера здійснює складні кутові коливання з одночасною взаємодію вібрацій та знакозмінних відцентрових сил, що проходять у вібраційній установці (рис. 1.8).

При змінні напрямку та величини відцентрові сили, які виникають при планетарних рухах та кутових коливаннях робочої камери, сили тяжіння і коріолісового прискорення здійснюється перемішування сипкого середовища всередині сфери камери [9, 12, 20, 42].

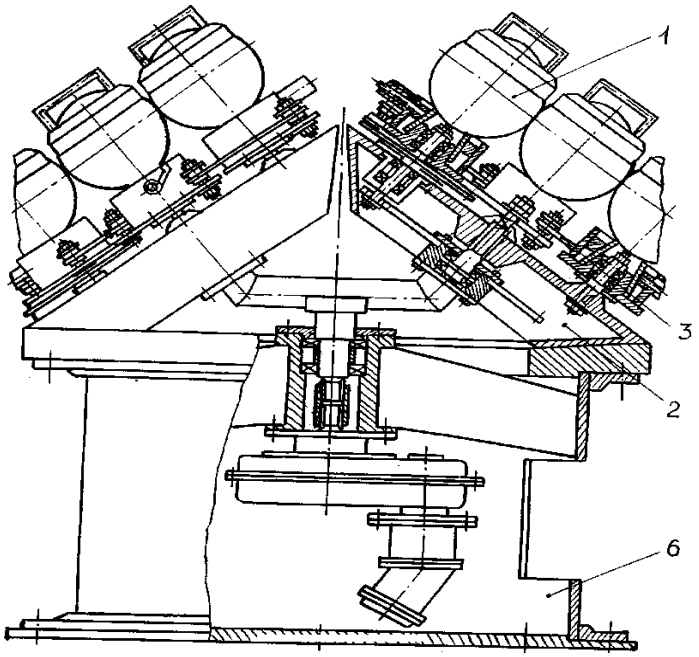


Рисунок 1.8. Вібраційно-відцентрова установка

Дана конструкція машини використовується фірмою Brunimat [150]. Деталі поміщалися в камеру без зупинки машини. Обробка деталей закінчується, і завантажені деталі легко виймаються за допомогою спеціальної кошика (рис. 1.9). Застосовують декілька видів сортувальних кошиків з різними розмірами для виробів різного розміру деталей.

б)

Рисунок 1.9. Вібраційно-відцентрова установка з карданним підвісом: зовнішній вигляд контейнера (а) і етапи вилучення деталей (б)

Для підвищення довговічності деталей пар тертя забезпечується застосування зміцнення технологічними операціями робочих поверхонь деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД) [10, 54]. Однак, для

підвищення рівня фізико-механічних характеристик матеріалу поверхневих шарів деталей до вимог експлуатації наведено вібраційна машина на рис.1.10.

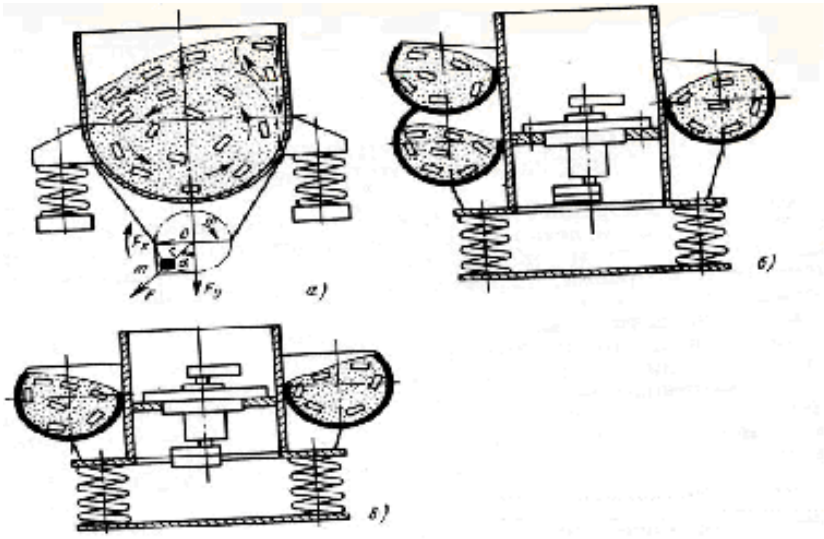


Рисунок 1.10. Форма робочих камер: а) – прямолінійна, б) – тороїдально – гвинтова, в)- тороїдальна.

Процес вібраційної обробки деталей у середовищі вільно коливальних тіл - це багатофакторний процес, який залежить від амплітуди та частоти коливань робочої камери, траєкторії, тривалості обробки, розміру частинок робочого середовища, об'єму та коефіцієнту камери, механічних властивостей матеріалу деталей. Дослідження вібраційної обробки (рис. 1.11) та встановлення основних законів вібраційно-відцентрового методу обробки, які визначають продуктивність та якість обробленої поверхні за незалежних змінних параметрів: амплітуда кутових коливань A, град; частота коливань, ω, Гц; час обробки T, хв; коефіцієнт заповнення робочої камери K,% [7, 122].

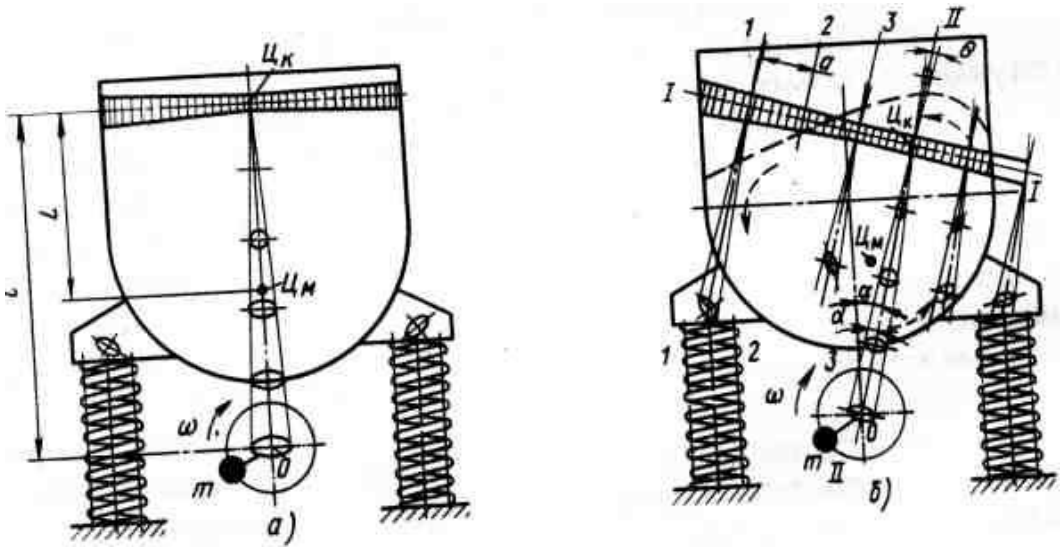


Рисунок 1.11 Схема траєкторії руху робочої камери:
а)- без завантаження, б)- із завантаження.

На рисунку 1.12 показано пристрій для вібраційної обробки довгих деталей в контейнері, що складається з пружно закріплених на основі оболонки вібратора і торцевих стінок із наскрізними вікнами, забезпеченими ущільненнями, що відрізняється тим, що для збільшення ступеня зміцнення деталей самокомпресійним середовищем в процесі обробки, торцеві стінки жорстко закріплені на основі і забезпечені кишенями, днища яких виконані під кутом 35-55 ° до оболонки, встановлені з зазором між торцеві стіни.

Машина для вібраційної обробки гранульованим робочим середовищем, що містить пружно встановлену на підставі камеру, що одержує коливання від вібратора (рис.1.13) [9, 30-31, 49]. В всередині камери розташований пристрій для транспортування оброблюваних деталей, де на стінках камери здійснюється коливальний рух.

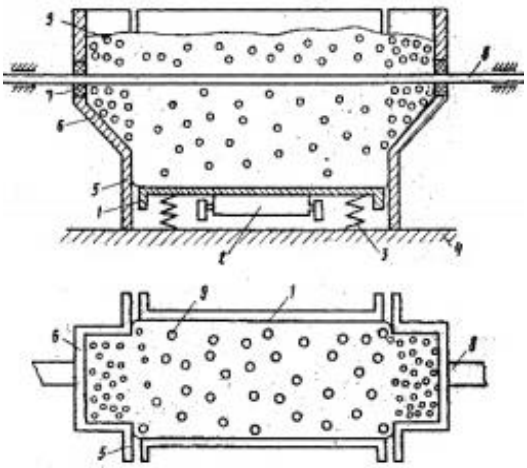


Рисунок 1.12 Пристрій для вібраційного обробки довгомірних деталей в контейнері: 1 - обичайка; 2 - віброзбудник; 3 - пружини; 4 - підстава; 5 - торцеві стінки; 6 - кишеня; 7 - ущільнювач; 8 - довгомірних деталь; 9 - робочі тіла.

Для забезпечення обробки деталей з усіх боків та підвищення продуктивності, пристрій для транспортування виконано у вигляді труби, сформовано з дротяного матеріалу, що утворює сітку з осередками, розмірами не більше гранул робочого середовища.

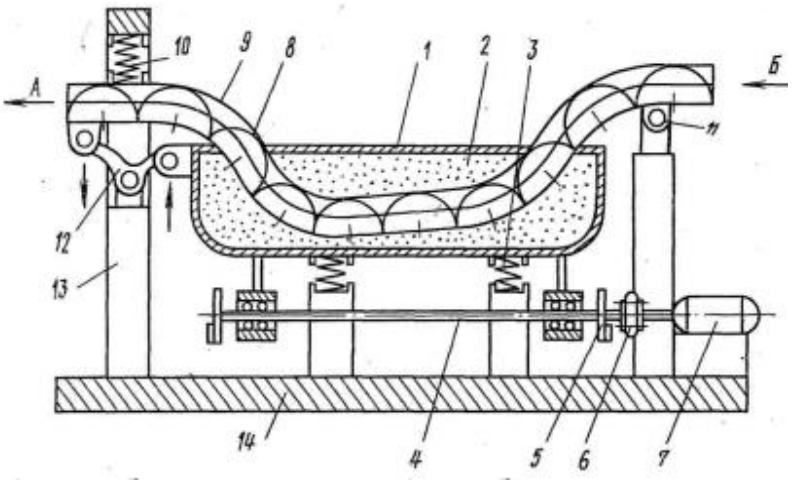


Рисунок 1.13 Машина для вібраційної обробки гранульованим робочим середовищем 1 - робоча камера; 2 – абразивна середовище; 3 - пружина; 4 - вал; 5 - дебаланс; 6 - еластична муфта;

На рис. 1.14 наведено контейнер для безперервної обробки, яка здійснюється секціями рівносторонніх трикутників, що з'єднані між собою двома сторонами. Дані секції з'єднані із іншою секцією вільною стороною

трикутника. Недоліком конструкції є не забезпечення підвищення ступеня зміцнення поверхневого шару деталей в процесі обробки по всій довжині камери [25-26, 50].

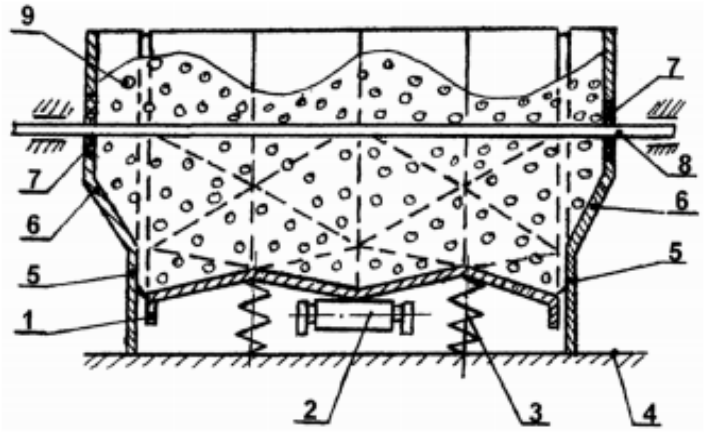


Рисунок 1.14 Контейнер для безперервної обробки

На (рис. 1.15) наведено вібромашину, яка здійснює колові коливання, що збурюються дебалансним приводом та змушує робоче середовище виконувати коловий рух. Деталі, що обробляються, кріпляться в спеціальні базуючі упори, на обертовому пристрої [101].

Робочий процес машини виконується з деталями та обертається навколо осі контейнера, що здійснює віброобробку рівномірно порівняно з просторовим розташуванням деталей.

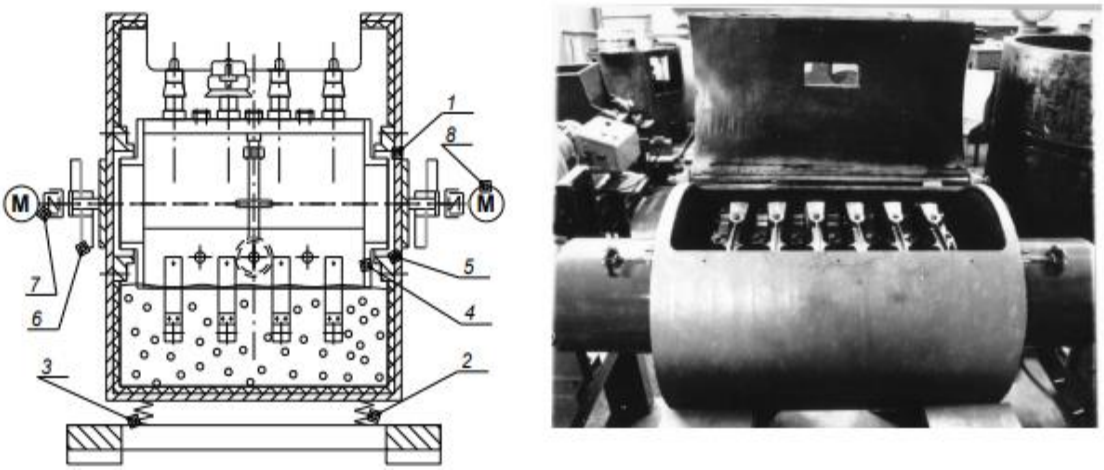


Рисунок 1.15. Схема машини з обертовим пристроєм для обробки деталей

Слід відмітити фірми закордонних розробників та виробників вібраційних технологічних машин для вібраційної обробки деталей це «Wibral»

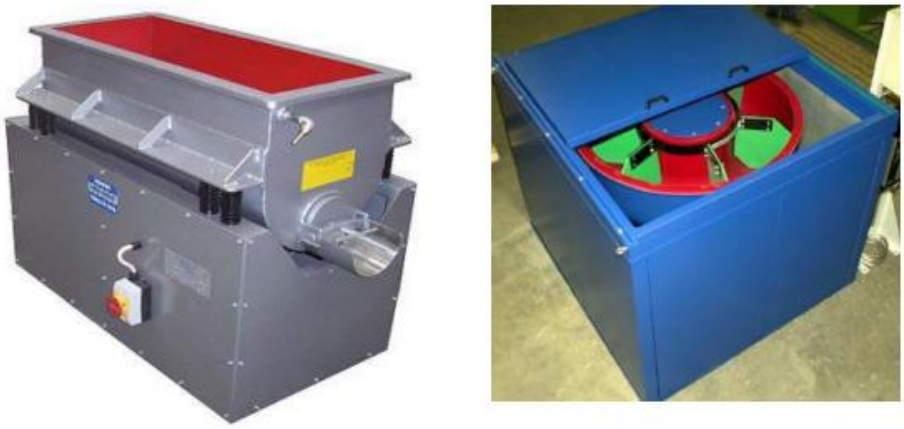
(Франція), «Sweco» (Швеція), «Pangborn CO», «Abrodo-Finichers», «Roto-Finish», (США), «Vijimech» (Індія), «Walther Trowal» (Німеччина), «William Boulton Limited», «Almco» (Великобританія), які запропонували використання вібраційних технологій в багатьох галузях промисловості.

На рис. 1.16. представлено вібраційна технологічна машина фірми «Walther Trowal» для віброабразивної обробки деталей, яка випускається як автоматичні, напівавтоматичні та неавтоматичні машини для обробки деталей [149].

Рисунок 1.16. Комплекс фірми «Walther Trowal» для віброабразивної обробки деталей: 1 – тороїдальна вібраційна технологічна машина; 2 – вібраційний бункерний живильник; 3 – вібросепаратори; 4 – вібролоток

Неавтоматизовані використовуються в виробництві для послідовної вібраційної обробки деталей на очисних, зачисних технологічних операціях.

На рис 1.17 наведено однокамерну та багатокамерні (рис. 1.18) неавтоматизовані вібраційні машини, в яких всі операції для виконання технологічного процесу віброобробки деталей є механізовані [3, 34, 35]. Неавтоматизовані вібраційні машини поділяють на два класи: безперервної дії; циклічної дії.



а) б)

Рисунок 1.17. Однокамерні неавтоматизовані машини фірм а)-«SPALECK Oberflachentechnik»; б) - «WaltherTrowal»

Рисунок 1.18.Багатокамерні неавтоматизована машина фірми «Walther Trowal»

П.Д. Денісовим (НУ «Львівська політехніка») було автоматизовані вібраційні машини безперервної дії (СВА-25, СВА-250, …, СВА-750). Автоматизовані вібраційні машини безперервної дії, які мають форму кільцеву (рис. 1.19), недоліком яких є складність у виготовлені та величина злому металу на 20…25 % менша за вібромашини, камери яких мають прямокутну форму [46].

Рисунок 1.19. Схема тороїдальної вібромашини фірми «WaltherTrowal

Неавтоматизовані вібраційні машини циклічної дії можуть мати кільцеву форму контейнера. На рис. 1.20 наведено вібромашини серії GLM, маса завантаження становить 320 кг та фірми «Walther Trowal».

Рисунок 1.20. Неавтоматизована вібраційна машина спіратрон фірми «SPALECK Oberflachentechnik» марка DL 1000

В результаті проведеного огляду встановлено, що конструктивні схеми вібраційно-відцентрових установок для обробки деталей є затребувані в технологічному процесі для зняття частинок металу з поверхні, яка обробляється.

1.2. Аналіз досліджень вібраційного оброблення деталей з робочим абразивним середовищем

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження механічної обробки деталей встановили її важливу роль при формуванні експлуатаційних властивостей деталей машин та механізмів.

Широке застосування вібраційних машин на практиці при реалізації різноманітних технологічних процесів таких як, поверхневе оброблення деталей сукупністю незв'язаних тіл із малим розміром, процеси сепарування та змішування, спричинює розроблення нових підходів при проектуванні такого обладнання із застосуванням сучасного обчислювального обладнання та програмного забезпечення. Обґрунтованими є методи проектування нових конструкцій вібраційних машин, які базуються на проведених експериментальних дослідженнях та практичному досвіді розроблення прототипів [97, 99, 144]. Наукові дослідження динаміки при виконанні технологічного процесу вібраційними машинами широко описані у літературі, але вони обмежені дослідженням руху окремих елементів машин [62, 109 153]. Теоретичні дослідження динамічних процесів вібраційних машин із використанням аналітичного моделювання широко описані у наукових працях, однак отримані математичні моделі відображені виключно у лінійній постановці задачі, що в свою чергу накладає ряд обмежень при їх використанні [136, 143]. Також існують інші методики проведення аналітичних дослідження динамічних процесів при роботі вібраційних машин із застосуванням обчислювальної техніки, зокрема чисельні [137, 155]. Науковцями обґрунтовано ряд нелінійних математичних моделей для опису динамічних процесів у вібраційних машинах для виконання різноманітних технологічних операцій [7, 10, 55, 63], за допомогою яких встановлено оптимальні значення їх параметрів.

Аналітичне дослідження технологічного процесу поверхневого оброблення деталей у вібраційних машинах, що базується на дослідженні динаміки даних механізмів, є швидшим, універсальнішим та фінансово

вигіднішим ніж проведення громіздких експериментальних досліджень з використанням реальних макетів чи прототипів вібраційних машин. Отримані дані при проведені натурних досліджень матимуть вузьке коло застосування, оскільки вони є актуальними лише для машин конкретного типорозміру. Аналітичні дослідження динамічних процесів у вібраційних машинах можна використати для цілої низки механізмів та машин із широким спектром зміни їх динамічних, кінематичних та геометричних параметрів, оскільки вони ґрунтуватимуться на запрограмованих нелінійних параметричних математичних моделях опису руху даних машин (рис. 1.21) [47, 144, 156-157].

Рисунок 1.21. Етапи проведення теоретичного дослідження динамічних процесів вібраційних машин поверхневого оброблення деталей сукупністю незв’язаних тіл малого розміру

Етап I. На даному етапі необхідно виконати вибір певного типу або класу вібраційної машини чи механізму, яку буде використано на вказаному конкретному виробництві. Дана машина буде застосовуватися для виконання конкретної технологічної задачі. Також необхідним є проведення аналізу

конструкцій вібраційних машин, за результатами якого буде здійснено вибір уніфікованої конструкції, для якої буде побудована математична модель.

Етап II. Вказаний етап є найбільш важливим та ресурсоємним. На ньому, ґрунтуючись на обраній уніфікованій схемі конструкції, буде виконана побудова нелінійної параметризованої моделі опису динамічних процесів для даної машини. Саме вказана модель дозволить отримати адекватний теоретичний опис складних динамічних процесів у вібраційній машині. Модель машини повинна бути параметричною та включати в себе основні динамічні, кінематичні та геометричні параметри вібраційної машини. Для майбутніх досліджень, при існуванні бази вказаних моделей, нові аналітичні моделі можна отримувати із синтезу вже наявних.

Етап III. На вказаному етапі проводять аналітичні дослідження впливу конструктивних параметрів вібраційної машини на інтенсивність виконання поверхневої обробки деталей у ній. Застосовуючи комплекси автоматизованих математичних розрахунків, динамічних, кінематичних та геометричних параметрів вібраційної машини, що отримані при реальних умовах експлуатації.

Етап IV. На даному етапі проводять вибір оптимальних параметрів для майбутньої конструкції вібраційної машини, вказують оптимальні режими її роботи відповідно до вибраного критерію. Обґрунтовані параметри забезпечують оптимальну поверхневу обробку деталей сукупністю незв’язаних тіл малого розміру. На четвертому етапі також є можливим проведення певних експериментальних досліджень на готових макетах та прототипах вібраційних машин з метою встановлення відповідності одержаних теоретичних результатів, що ґрунтуються на математичних моделях, реальним даним експлуатації машини.

Вібраційна обробка з вільним завантаженням заготовок у залежності від характеру робочого середовища, яке застосовується, являє собою механічний або хіміко-механічний процес зняття мікрочастин металу та його окисів з поверхні, що оброблюється, а також зглажування мікронерівностей шляхом проведення їх пластичного деформування частинками розміщеними у робочому

середовищі, які при здійснені технологічного процесу виконують коливні рухи. Технологічний процес супроводжується послідовними нанесеннями на поверхню оброблюваних заготовок значної кількості мікроударів за допомогою частинок робочого абразивного середовища, при їх взаємних співударах і ковзаннях.

На даний час існує декілька основних технологічних схем для здійснення технологічного процесу вібраційного оброблення:

- вібраційна обробка без використання рідкого робочого середовища або із циркуляцією робочого розчину;

- обробка вільно-завантажених заготовок із малими геометричними розмірами, з їх періодичним або неперервним завантаженням і вивантаженням;

- вібраційне оброблення важких та крупно-габаритних вузлів та деталей, що закріплені у спеціальні пристрої;

- оброблення довгомірних деталей типу труб, прутків, профілів шляхом проштовхування їх через вікна, виконаних в стінках робочої камери та ін.

Великі можливості технологічного процесу вібраційного оброблення деталей у поєднанні із високою продуктивністю та можливістю оброблення заготовок із складною конфігурацією та малою жорсткістю при виконанні фінішних операцій ставить його в число найбільш актуальних та перспективних методів механічної обробки різновидних деталей машин та механізмів і зумовлює необхідність проведення всебічних теоретико – експериментальних досліджень.

На сьогодні існує велика кількість проведених теоретичних та експериментальних досліджень технологічного процесу вібраційного оброблення деталей, а також дослідження одної із його типу – вібраційно-абразивного оброблення. У загальному наукові роботи А.П. Бабічева [7, 10], П.С. Берника, І.С. Афтаназіва, Б.Б. Ходоша [147], В.І. Дяченка [53], І.Н. Карташова [56-57], В.А. Власова [33-34], М.Є. Шаінського [148], Е.А. Кочана, А.М. Тамаркіна [139-140], В.М. Мороза [94-95], Ю.М. Самодумського спрямовані на дослідження сутності та технологічних можливостей ВіО, в

деяких із них подано отримані результати взаємовпливу технологічних параметрів процесу на зняття металу і шорсткості оброблюваної поверхні.

Актуальні дослідження були проведені закордонними науковцями такими як М. Матсунац та Уш Хагіуб (Японія), А. Поліш (Англія), К. Веллінгер (Німеччина), В. Брандж і Ю. Раош (США).

Більша частина науковців вивчала, як правило, два параметри ВіО, які описують показники продуктивності та технічну спроможність процесу: зняття металу із поверхні заготовки і шорсткості поверхні, що оброблялась, однак отримані результати в певних випадках не співпадають, а іноді і суперечать один одному.

Дослідження, проведенні А.П. Бабичевим, спрямовані на вивчення: швидкості та сили співудару частин робочого середовища та деталей, що обробляються; контактних напружень та температури, що виникає у зоні удару; технологічного процесу мікрорізання та формування поверхневого шару; інтенсивності зняття металу, шорсткості поверхні і глибини наклепу [5-6, 12, 32, 89, 93].

За результатами проведених досліджень встановлено, що швидкість частинок робочого середовища визначається за допомогою амплітуди та частоти коливань робочої камери і досягають значень 0,3…1 м/с, прискорення змінюються в діапазоні від 15…30 до 100…150 м/с^2. Сили, спричинені мікроударами частинок робочого середовища, досягають значень 15…45 Н і більше, величина контактного тиску змінюється у діапазоні від 0,15…0,30 до 7…8 кПа. Середнє значення температурних показників в зоні дії мікроударів знаходиться у діапазоні від 50…80° С до 500…700° С, середні температурні показники у робочій камері перебувають у межах 35…50° С.

За результатами експериментальних досліджень процесу ВіО отримані аналітичні вирази, що описують вплив амплітуди та частоти коливань контейнера, об’єму завантаження, грануляції і зернистості робочого середовища на показники продуктивності технологічного процесу і шорсткість поверхні, що піддається обробці.

Для знаходження показників зняття металу із поверхні заготовки при ВіО

А. П. Бабічев [12] запропонував аналітичну формулу:

$$Q = N_{д} \cdot q_{р} \cdot t' \cdot S \cdot K_{в} \cdot K_{зор}, \qquad (1.1)$$

де $N_{д}$ –число мікроударів;

$q_{р}$ – зняття металу при одиничному різання-дряпання, кг;

t' – технологічна обробка за певний час, с;

S – площа поверхні заготовки, м^2;

$K_{в}$ – коефіцієнт витісненого металу;

$K_{зор}$ – коефіцієнт, має вплив на охолоджувальної рідини.

Для знаходження маси одиничного зняття металу $q_{р}$ взаємодії частинки робочого середовища із поверхнею деталі моделюється вдавленням сфери радіуса $R_{ш}$ у поверхню деталі нормальною силою P_{n}. Геометричні характеристики слідів обробки знаходяться за аналітичною залежністю [6] :

$$h = \frac{P_{n}}{\pi \cdot H \cdot D}, \qquad (1.2)$$

де P_{n}– сила співудару, Н;

H – пластична твердість матеріалу, Па;

D– діаметр сфери, м.

Довжина сліду обробки $l_{р}$ прирівнюється до амплітуди коливання контейнера.

Сила співудару знаходиться за формулою [8]:

$$P = 6\sqrt{\frac{m_1 \cdot V^2_{ч.р.с} \cdot \sigma_s \cdot R_{ш} \cdot K_{т} \cdot K_{д} \cdot B}{K_2}}, \qquad (1.3)$$

де m_1– маса одної частинки, кг;

$V_{ч.р.с.}$– швидкість руху частинки, м/с;

σ_s – границя текучості матеріалу заготовки, Па;

$R_ш$ – радіус сфери (або зерна), м;

K_m – коефіцієнт, що враховує одночасність дії стовбця частинок середовища;

$K_д$ – коефіцієнт, що враховує демпферні властивості середовища і стінок робочої камери;

B – коефіцієнт, що враховує загальну кількість енергії удару, що йде на пружний відсоток та на переміщення деталі, яка обробляється;

K_2 – коефіцієнт повторних ударів.

Б.Б. Ходош [147] опублікував отримані результати дослідження щодо якості поверхонь деталей машин при їх вібраційній обробці. Доведено, що формування поверхонь деталей при їх механічній обробці супроводжується технологічними процесами мікрорізання, дряпання, пластичного деформування і передеформування найтонших поверхневих шарів металу при динамічному контактуванні частинок робочого середовища з поверхнею деталей.

В. Л. Д'яченко проводив дослідження впливу режимів оброблення, твердості металу, зернистості та грануляції робочого середовища на продуктивність процесу ВіО та якість оброблюваної поверхні. Встановлено, що зняття шару металу та шорсткість поверхні при ВіО знаходиться у залежності від механічних властивостей матеріалу: при підвищенні твердості матеріалу зняття металу відповідно зменшується, а шорсткість поверхні знижується. Зернистість абразивного середовища також чинить суттєвий вплив на зняття металу та показники шорсткості поверхні: із збільшенням зернистості підвищується зняття металу, шорсткість поверхні при цьому стає набагато гіршою. Зі збільшенням грануляції робочого середовища зняття металу відповідно підвищується, а шорсткість оброблюваної поверхні - погіршується.

І.Н. Карташов, М.Є. Шаінський, В.А. Власов [33-34] здійснивши швидкісні кінозйомки при ВіО встановили, що кількість прямих ударів гранули по поверхні заготовки є незначним і не перевищує одного на 70…120. Встановлена величина середньовірогідного кута зустрічі, що становить $\alpha_{ср} \approx 28^0$. Для знаходження маси зняття металу за один удар частинки за

формулою отриманою по аналогу із різанням металу абразивним зерном при шліфуванні слід використовувати аналітичну залежність:

$$q = \frac{P_N^2 \cdot \Delta T^2 \cdot K_c \left(m + M\right) \cdot \delta}{3n \cdot \left(1 + K\right) \cdot \left(1 - \lambda\right) \cdot m \cdot M} \times$$

$$\times \frac{\sin\theta \left[\left(1 + f \cdot f'\right)\cos\left(\gamma_x + \theta\right) + \left(f + f'\right)\sin\left(\gamma_x + \theta\right)\right]}{\tau_s \left(\cos\gamma_x + f \cdot \sin\gamma_x\right)}, \quad (1.4)$$

де P_n – нормальна складова сили затраченої на процес різання, Н;

n – коефіцієнт, що враховує залежність нормальної і дотичної сили різання від глибини проникнення робочого органу;

ΔT – часова характеристика взаємодії частинок з оброблюваною поверхнею, с;

K_c – коефіцієнт ковзання частинки по заготовці;

K – коефіцієнт відновлення;

λ – коефіцієнт миттєвого тертя;

θ – кут зсуву, град.;

f – коефіцієнт тертя по попередній поверхні частинки;

f' – коефіцієнт внутрішнього тертя;

τ_s – дотичні напруження у площині зсуву, Па;

m – маса робочої частинки, кг;

M – маса заготовки, кг;

δ – питома вага матеріалу деталі, кг/м^3.

В науковій праці [18], де описано кінематичні умови взаємодії оброблюваних деталей із абразивними тілами, встановлено, що відносна швидкість руху, а також сила взаємодії будуть набувати максимальних значень при виконанні обробки заготовок у спеціальних обертових пристроях, де деталі рухаються у протилежному напрямку до направленого руху абразивних тіл. Показники продуктивності оброблення при такій схемі закріплення деталей будуть набувати максимальних значень, а кількість матеріалу, що знімається з одиниці поверхні, обчислюється за залежністю

$$Q = \frac{28 \cdot 10^{-6} \cdot P_n \cdot t \cdot \omega \cdot (m + M) \cdot \delta}{c \cdot \rho_x \cdot \tau_s \cdot m \cdot M}, \qquad (1.5)$$

де Q – продуктивність знімання матеріалу, мг/год;

ω – частота коливання камери, кол/хв;

P_n – нормальна складова сили косого удару абразивних тіл, кгс;

t – час затрат на технологічну операцію, хв;

m –маса частини абразиву, кг;

M – маса заготовки, кг;

c – коефіцієнт з врахуванням кількості абразивів, які контактують;

ρ_x – радіус відбитку абразивної частини;

τ_x – величина контактних дотичних напружень, кг/см^2;

δ – питома вага матеріалу заготовки.

Класифікація вібраційних механізмів відбувається за наступними ознаками:

- об’єм, кількість та форма робочого середовища;
- тип та загальна чисельність вібраторів;
- метод відновлення робочого середовища;
- цикл роботи обладнання;
- траєкторія коливання робочої камери;
- метод кріплення камери;
- тип приводу вібратора;
- тип використовуваних пружних елементів;
- метод встановлення режимів роботи;
- конструктивна особливість додаткових механізмів.

Конструктивний розвиток вібраційного обладнання та відповідних технологічних процесів може відбуватися при вирішенні питань, пов’язаних із удосконаленням типів вібраційних приводів, створенням різних типів конструкцій пружних підвісок робочої камери, знаходженні характеру взаємодії абразивної гранули з поверхнями що оброблюються, різновидністю їхньої форми.

Е.А. Коган [60] для виконання оцінки ефективності технологічного процесу віброоброблення ввів новий критерії E, який визначається за формулою:

$$E = \frac{\omega}{2\pi V} \cdot \int_{0}^{\frac{2\pi}{\omega}} \int_{(V)} K \cdot V^2 \cdot dtdV, \tag{1.6}$$

де K – коефіцієнт, що враховує масу співударяючих тіл.

А.П. Бабічев [9] для знаходження часу необхідного для утворення встановленої шорсткості запропонував спрощену схему утворення профілю шорсткості поверхні, для якого проводиться моделювання у вигляді рівнобедреного трикутника. Аналітична залежність для знаходження часу, має вигляд:

$$t_{\min} = \frac{1{,}9 d_{ч.р.с} \cdot K_{пер} \cdot K}{n_к \sqrt{\frac{P}{2} \cdot \sigma_S} \cdot K_N}, \tag{1.7}$$

де $K_{пер}$ – коефіцієнт перекриття;

K – коефіцієнт, що враховує повторне попадання робочого матеріалу в одну точку.

Параметр, який характеризує шорсткість поверхні R_z для випадку $R_z > R_{z.ус}$ знаходять за залежністю [12-13]:

$$R_z = R_{z\ вих} - \frac{N_д \cdot q_{ср} \cdot t \cdot S \cdot K_в \cdot K_\Delta}{\gamma \cdot h_{пр} \sum_{i=1}^{n} l_\Delta}, \tag{1.8}$$

де R_z, $R_{z вих}$ – висота одержаної та вихідної шорсткості, мкм;

K_Δ – коефіцієнт, що враховує скруглення мікронерівностей;

$\sum_{i=1}^{n} l_\Delta$ – загальна довжина основ трикутників для досліджуваної ділянки, м;

$h_{пр}$ – висота трикутників, м.

$$R_{z.ус} = \frac{P}{\pi \cdot H \cdot D_3} \cdot K_E, \qquad (1.9)$$

де K_E – емпіричний коефіцієнт.

А.П. Бабічевим [12] та Б.Б. Ходошом [146 - 147] були проведені великі експериментальні дослідження впливу різних факторів на технологічний процес утворення шорсткості оброблюваної поверхні при ВіО. Встановлено вплив амплітуд та частот коливань, зернистості та грануляції робочого середовища на оброблювану поверхню, а також вплив механічних властивостей матеріалу заготовок на шорсткість поверхонь.

У наукових працях В.А. Власова [34] була запропонована розрахункова формула для знаходження шорсткості оброблюваної поверхні:

$$R_z = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot A \cdot \omega \cdot m \cdot M}{c\sigma_S \cdot \rho_X (m + M)}, \qquad (1.10)$$

де K_1 – емпіричний коефіцієнт;

K_2 – абразивна здатність шліфуючих тіл;

c – коефіцієнт, що враховує кількість одночасно проникних зерен.

Проведений аналіз наукових праць щодо дослідження процесу ВіО дозволив зробити висновок про те, що процес механічного оброблення знаходиться у залежності від режимів і тривалості, від характеристик та розмірів частинок робочого середовища. Головними параметрами даного процесу є характеристика руху робочої камери та частинок робочого середовища, їх швидкісні параметри та прискорення, сили мікроударів, контактний тиск, напруженість та температура, яка виникає в зоні дії мікроударів.

1.3. Аналіз параметрів процесів при вібраційному оброблені деталей в робочому середовищі

Для підвищення продуктивності очисних, шліфувально-полірувальних, доводочних, зміцнюючих операцій елементів процесу необхідне послідовне нанесення великої кількості мікроударів, інтенсивне переміщення робочого середовища в залежності від складу робочого середовища та режимів оброблення.

Даний процес робочого середовища вібраційного оброблення забезпечується гармонійними, бі-гармонійними коливаннями робочої камери, які залежатимуть від кінематичної компоновки установки. Рух робочого абразивного середовища здійснюється періодичним коливанням на ділянці разом із камерою, внаслідок чого проходить відрив частинки робочого абразивного середовища від стінок робочої камери із неспівпадання напрямку швидкості та прискорення. В наслідок чого здійснює відрив частинки по складній траєкторії.

Обробляюча гранула отримує імпульс енергії від поверхні камери, що коливається, вдаряється по поверхні деталі з силою удару при вібраційній обробці, яка визначає швидкість відривання частинки робочого середовища. Внаслідок цього для визначення продуктивності вібраційного процесу отримані аналітичні залежності траєкторії, швидкості, прискорення, які характеризують кінематику робочої камери установки [65-66, 138].

На (рис. 1.22) для установки з площинною вібрацією і просторовим обертанням робочої камери наведено зміну швидкості та прискорення в залежності від часу [90, 94].

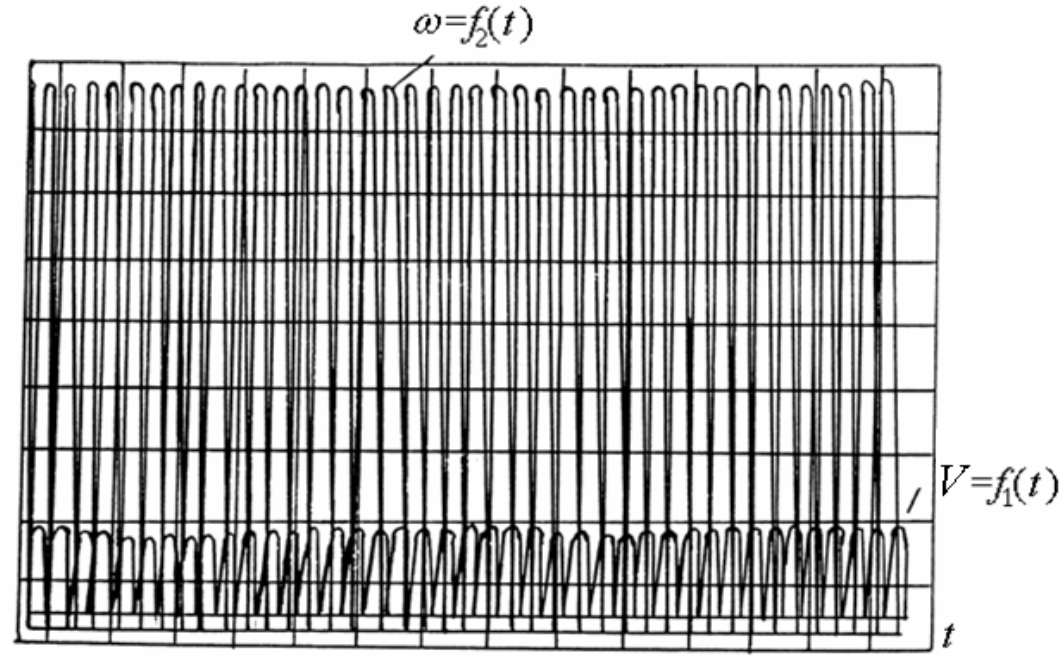


Рисунок 1.22. Залежність при площинній вібрації швидкості та прискорення камери від часу з просторовим обертанням робочої камери

Із залежності видно, що напрямок руху абразивного робочого середовища залежить від швидкості та прискорення. Установки, в яких робоча камера здійснює складний просторовий рух з накладеною на неї різного роду коливань, здійснюється одночасно обертовий рух відносно двох осей, які перетинаються, характеризує залежність змін швидкості та прискорення від часу, що представлено на рис. 1.23 і 1.24. [42, 90, 145]

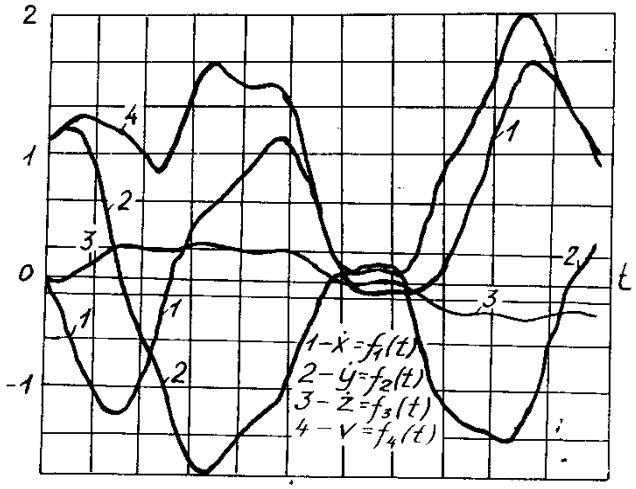


Рисунок 1.23. Графік змін швидкості камери від часу

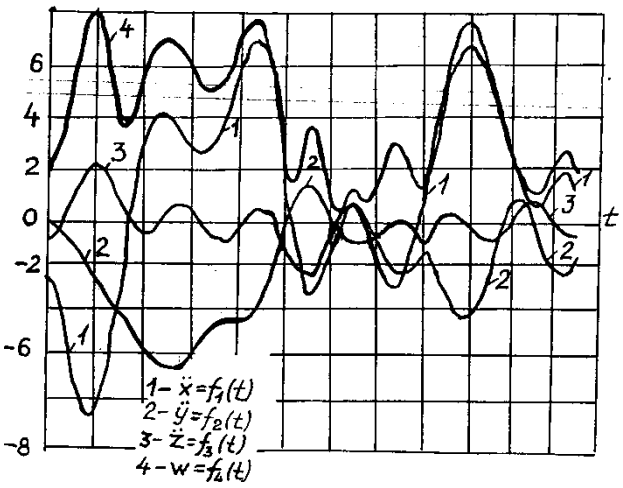


Рисунок 1.24. Графік змін прискорення камери від часу

Із графічних залежностей видно, що швидкість та прискорення

змінюється з циклічною періодичністю відносно осей координат робочої камери, що призводить до складного руху сипкого матеріалу.

На (рис. 1.25-1.28.) наведені графічні залежності кінематичних характеристик вібраційно-відцентрових установок, де робоча камера здійснює рух по складній просторовій траєкторії з находженням кутовими коливаннями [94].

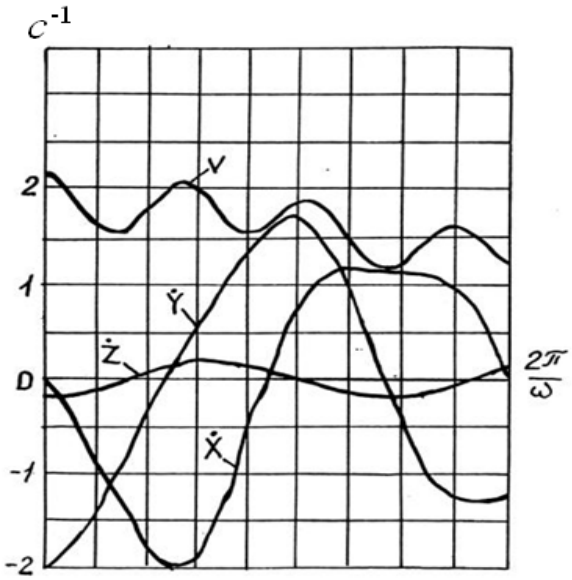


Рисунок 1.25. Графічні залежності змін швидкості камери від часу

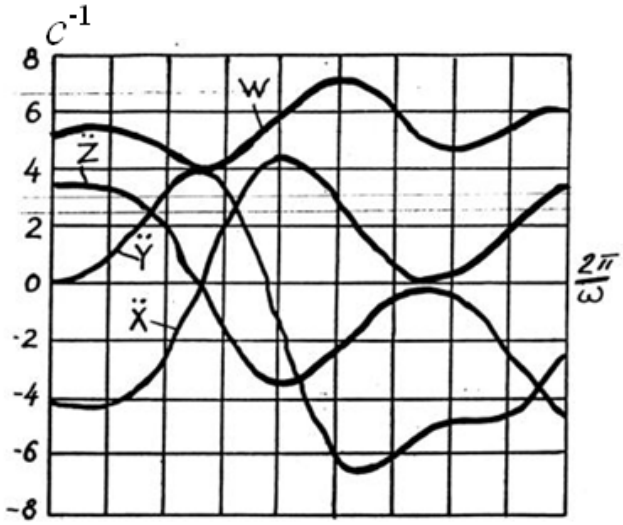


Рисунок 1.26. Графічні залежності змін прискорення камери від часу

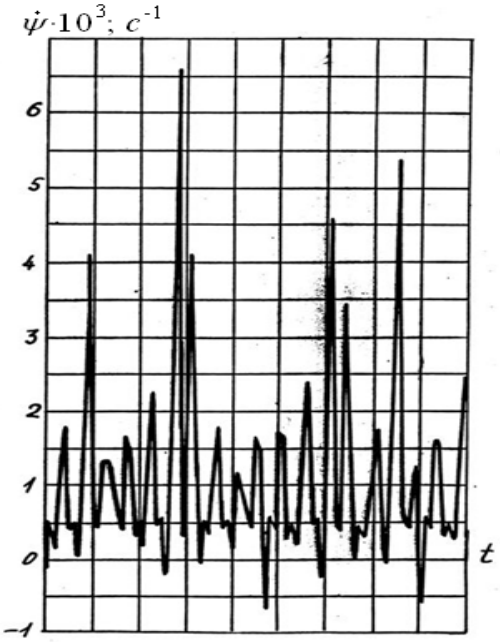


Рисунок 1.27. Графічні залежності змін кутової швидкості камери від часу

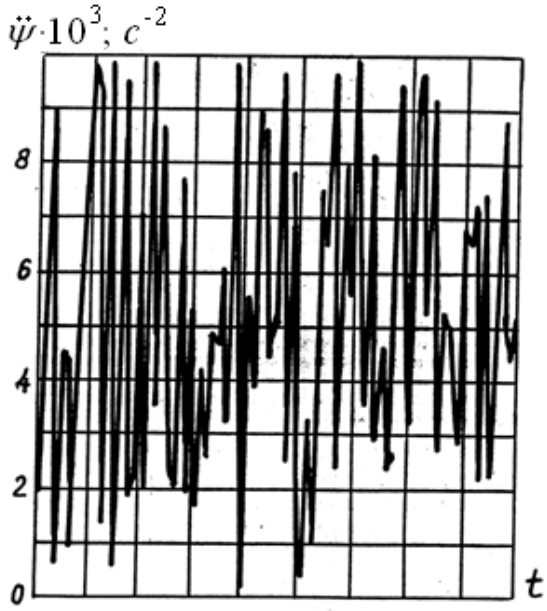


Рисунок 1.28. Графічні залежності змін кутового прискорення робочої камери від часу

Із залежностей видно, що швидкість та прискорення робочої камери змінюється періодично зсувом по фазі, що дає можливість плавного руху робочого середовища, а при змінні кутової швидкості та кутового прискорення визначається сила зрізу металу та переміщення.

На (рис. 1.29) наведено графіки для різних комбінацій частоти та амплітуди, що визначає шорсткості, де горизонтальна наведена різними лініями комбінаціями частоти та амплітуди [157].

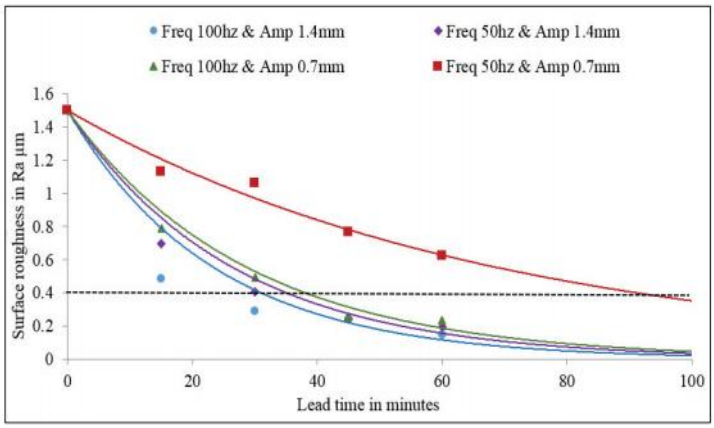


Рисунок 1.29. Порівняння часу, для досягнення цільової шорсткості поверхні Ra = 0,4 мкм

Експериментальні дані випробувань показали, що коли більша амплітуда поєднується з меншою частотою, результати, отримані з точки зору шорсткості поверхні (Ra), ведуть до часу порівняно із комбінованим ефектом більш високої частоти та меншої амплітуди, яка показано на рис. 1.30.

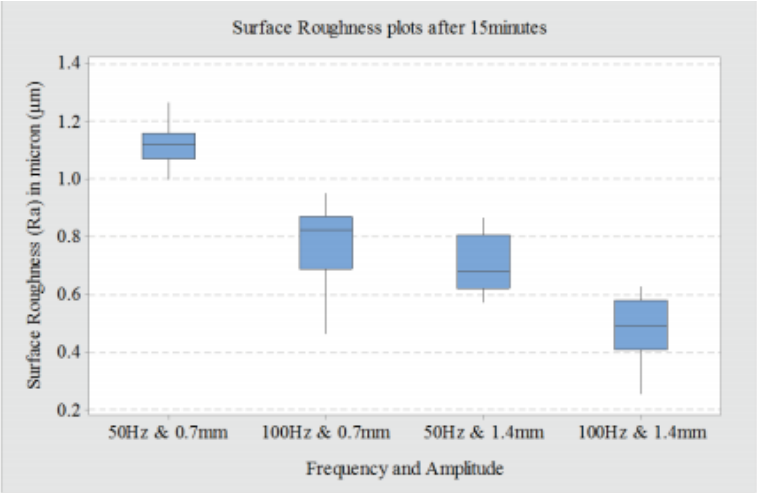


Рисунок 1.30 Вплив визначених комбінацій частоти та амплітуди на шорсткість поверхні

Високочастотні та амплітудні ефекти в обробці вібраційним середовищем показують більш високі частоти та амплітуди, оскільки час досягнення рівня шорсткості 0,4 мкм поверхні був меншим порівняно з іншими комбінаціями, які наведені [154].

Встановлено, що при вібраційно-відцентровій обробці підвищення інтенсивності процесу обробки деталей досягається за рахунок дії на робоче середовище енергії додаткового переміщення камери установки. Для вибору технологічного процесу при вібраційно-відцентровому оброблені деталей основним параметром є сила взаємодії абразивної гранули з оброблюваною поверхнею.

1.4. Висновки

На основі проведеного патентного пошуку та наведених конструктивних схем вібраційно-відцентрових установок встановлено, що вібраційна обробка деталей для зняття дрібних частинок металу з поверхні, яка обробляється та згладжування мікронерівностей шляхом пластичної деформації за рахунок, робочого середовища отримуючи від стінок робочої камери, яка коливається.

Для підвищення продуктивність під час обробки змінюється характер взаємодії деталей з абразиву внаслідок чого на робоче середовище діє дві і більше видів енергій. В основу розроблення нових процесів вібраційно-відцентрового оброблення та удосконалення кінематичного руху камери необхідно завантажене робоче середовище спрямовувати на одночасну взаємодію вібрацій, відцентрових сил, додаткових обертань.

Для збільшення інтенсивності процесу оброблення та підвищення якості поверхні, що обробляються здійснена розробка вібраційно-відцентрової установки із складним кінематичним рухом робочої камери. На основі розробленої вібраційно-відцентрової установки *в роботі поставлені такі завдання:*

- провести аналіз основних видів вібраційного і вібраційно-відцентрового оброблення деталей та визначено взаємодію гранули з елементами деталі, рівень енергії робочого середовище, способи їх підвищення;

- вивести аналітичні та емпіричні залежності для визначення швидкості, прискорення, траєкторії руху абразивної частинки процесу вібраційно-відцентрового оброблення для визначення основних силових параметрів процесу та інших параметрів;

- вивести аналітичні залежності, які визначають вплив параметрів вібраційно-відцентрової установки, її руху, фізико-механічних характеристик оброблювального середовища на амплітудно-частотну характеристику коливань – базових параметрів, які характеризують інтенсивність процесу вібраційно-відцентрової оброблення деталей;

- розробити математичну модель процесу взаємодії гранули з поверхнею деталі, на яку одночасно діють сили вібрації і відцентрові сили, збільшуючи об’єм матеріалу, що зрізається;

- розробити динамічну модель процесу руху сипкого середовища вібраційно-відцентрового оброблення деталей, яка характеризується певною універсальністю за наявності нерезонансних та резонансних коливань;

- спроектувати і виготовити технологічне устаткування для забезпечення процесу руху сипкого середовища вібраційно-відцентрового оброблення деталей з визначенням питомого зняття металу, шорсткості, мікротвердості, якості деталей складних профілів;

- провести експериментальні дослідження вібраційно-відцентрового оброблення деталей з метою оцінки теоретичного моделювання та встановлення розбіжності результатів теоретичних розрахунків із результатами експериментальних досліджень;

- розробити методику проектування технологічного устаткування для технологічного процесу вібраційно-відцентрового оброблення деталей складного профілю із подальшим впровадженням у виробництво результатів досліджень.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ СИПУЧИМ АБРАЗИВНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

2.1. Дослідження технологічного процесу об‘ємної роботи вібраційно-відцентрової оброблення деталей сипучим абразивним середовищем

Вібраційне оброблення являє собою механічний чи механо-хімічний спосіб зняття з поверхні оброблювального тіла частинок металу. Також використовується для поверхневого зміцнення деталей, згладжування мікронерівностей шляхом деформування його частинами робочого середовища. Останнє, як правило, здійснює складні коливні рухи.

Оброблювальні деталі завантажують у контейнер, заповнений робочим (оброблювальним) середовищем. Контейнер здійснює коливання із частотою 15-50 Гц і амплітудою 0,5-9 мм. Для їх збудження використовують різні способи від дебалансного до кривошипно-шатунного. Робоче середовище, взаємодіючи із стінками контейнера, здійснює коливання, а відтак інтенсивно діє на оброблювальні деталі. Під час віброоброблення оброблювальне тіло займає різноманітні положення, а це забезпечує відносно рівномірну обробку його поверхні відповідними елементами [11, 64, 102-103].

Операції віброоброблення проводять, як правило, за неперервної або періодичної подачі рідкого розчину для відведення частинок металу і абразиву з поверхонь оброблювального тіла. За оброблювальне середовище використовують абразивні матеріали різних характеристик, а також металічні і неметалічні матеріали різної форми та розмірів [14-15, 39].

Процес об‘ємного вібраційного оброблення деталей представлено наступним чином: робочому контейнеру разом із оброблювальним середовищем та оброблювальними тілами надають за допомогою приводу обертального руху і одночасно збуджують його коливання.

На рис. 2.1 наведена схема вібраційно-відцентрової установки, в якій здійснюються складні кутові коливання та обертання навколо похилої осі робочої камери [37, 118]. Принцип роботи здійснюється за допомогою підшипників, що кріпляться до ведучої вилки, де робоча камера шарнірно встановлена в кільце. Рух вилки з'єднаний з пустотілим валом, що здійснюється за допомогою електродвигуна через пасову передачу. Для здійснення кутових коливань робочої камери кривошипний механізм.

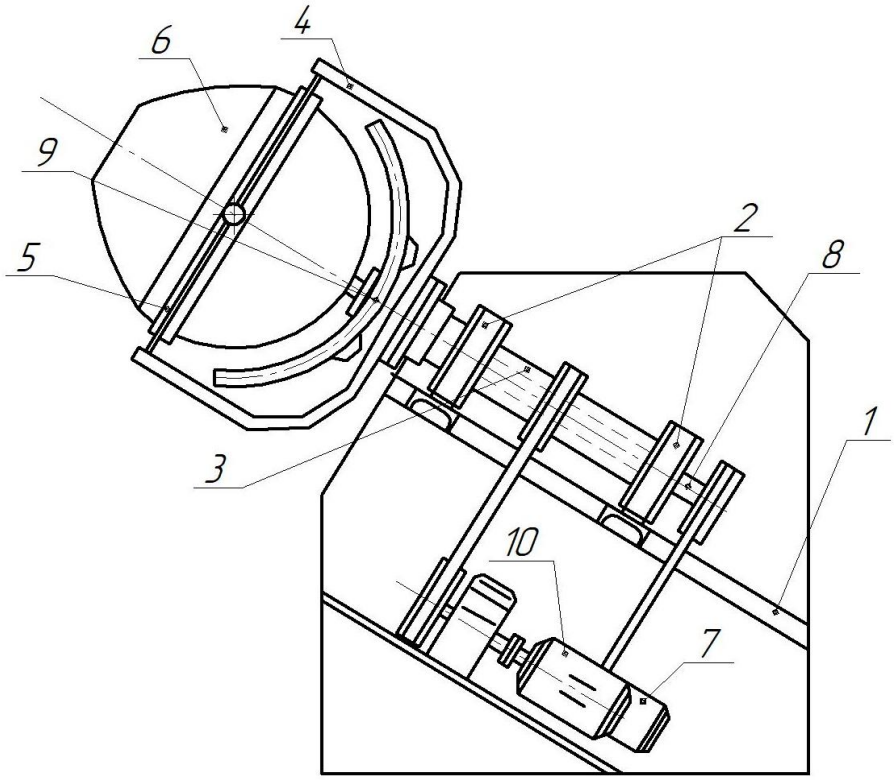


Рисунок 2.1. Кінематична схема вібраційно-відцентрової установки.
1 – станина; 2 - підшипникові вузли; 3 - пустотілий вал; 4 - ведуча вилка;
5- кільце карданного підвісу; 6 - робоча камера; 7- електродвигун; 8 - вал приводу кривошипного механізму; 9 – кривошипний; 10 - електродвигун.

Різної маси і форми частинки оброблювального середовища та тіл, які обробляються, спричиняють різні за величиною взаємодії між собою, а тому мають різні швидкості та пришвидшення. Одночасно вказаний процес викликає взаємне тертя, динамічний тиск між ними та мікроудари. Кінематичні та динамічні характеристики вказаного внутрішнього процесу оброблювального середовища визначається частково кутовою швидкістю обертання контейнера,

його фізико-механічним властивостями та значною мірою коливаннями його корпусу. Частота коливань корпусу прямим чином впливає на швидкість циркуляції робочого середовища. Треба відзначити, що сили взаємодії між окремими частинками середовища, оброблюваного тіла зростають із збільшенням амплітуди та частоти коливань контейнера та віброзбудника. Крім того, інтенсивність відрооброблення деталі залежить від глибини його занурення, ваги, розмірів, питомої ваги частинок робочого середовища.

Вібраційне оброблення характеризується такими параметрами:

- швидкістю частинок робочого середовища $0{,}3-1$ м/с;
- прискорення частинок робочого середовища $20-150$ м/с^2 ;
- сила мікроударів 15 – 30Н;
- контактні напруження, $300-7000$ МПа;
- температури в зоні дії мікроударів $20-90\,^0$С;
- середня температура в робочій камері $30-40\,^0$С [11].

Як було наголошено вище, формування поверхневого шару оброблювального тіла відбувається за рахунок дії мікроударів частинок робочого середовища. Багаторазове повторення їх змінює частково геометричну його форму і фізико-механічні властивості поверхневого шару (у багатьох випадках воно пов’язане із явищем наклепу). Результати вібраційного оброблення визначаються характеристиками робочого середовища, режимами оброблення та характеристикою оброблюваного тіла.

Формування поверхневого шару при вібраційній обробці супроводжується зміною його шорсткості, мікротвердості, залишкових напружень та структури.

Технологічні властивості вібраційної оброблення визначаються особливостями взаємодії робочого середовища з поверхнею заготовок та режимом роботи. Поєднання таких елементів, як послідовне нанесення мікроударів, інтенсивність перемішування робочого середовища і деталей, створює умови для виконання фінішно-зачисних та шліфувальних операції (очищення відлитих заготовок, видалення облою на заготовках, округлення гострих кромок), зміцнення поверхонь виробів.

Визначення впливу параметрів вібромашини та її завантаження на інтенсивність оброблення виробів у ній за допомогою побудови математичних моделей руху вібромашини та її сипкого середовища проводиться відповідно до певного обраного критерію інтенсивності віброоброблення. Характеристикою інтенсивності процесу об‘ємного віброоброблення є матеріалозняття з поверхні оброблюваних деталей за одиницю часу, або швидкість збільшення чистоти поверхні деталі [46, 73, 86, 120, 135]. Матеріалозняття за одиницю часу під час об‘ємного вібраційного оброблення в контейнерах, які гармонічно збуджуються, залежить від багатьох факторів, де основним параметром є частота та амплітуда коливань контейнера.

Матеріалозняття визначається із виразу $q = kf(A,\omega)$, де q - матеріалозняття за одиницю часу, $f(A,\omega)$ - певні функції частоти ω і амплітуди A коливань контейнера, k - коефіцієнт, який враховує вплив інших параметрів вібромашини та технологічних параметрів процесу ($f(A,\omega) = k_0 A^2 + \tilde{k}_0 \omega^3,\ k_0, \tilde{k}_0 - сталі$).

Обробка деталей збільшується за нелінійним законом коливань контейнер. Із збільшення амплітуди і частоти коливань контейнера вібромашини суттєво підвищує силу удару частинок сипкого середовища по поверхні деталі.

2.2 Дослідження роботи вібраційно-відцентрової обробки деталей сипучим абразивом

Процес вібраційно-відцентрової обробки деталей визначається динамікою оброблювального середовища Однак, враховуючи широке розповсюдження об‘ємного вібраційно-відцентрової обробки, робляться різні шляхи для вирішення цих задач шляхом математичного моделювання [4, 27, 51]. Пропонується використовувати математичне моделювання при розв’язуванні наступних задач для машин:

- розробка оптимальних режимів руху сипкого середовища;

- дослідження динаміки;

- вибір оптимального виду руху контейнерів;

- вибір оптимальної структури приводу;

- дослідження оптимальних параметрів , що проектуються;

- дослідження динаміки машин (на стадії проектування);

- прогноз продуктивності (на стадії проектування).

Виберемо нерухому систему координат Oxyz (рис 2.2), яка зв'язана з корпусом вібраційно-відцентрової установки (ВВУ). Вилка 1 повертається навколо осі Oy на кут α, рамка 2 - навколо осі Oz на кут β, а камера 3 - навколо осі Ox на кут γ. Зв'яжемо з вилкою 1 систему координат $Ox_1y_1z_1$, з рамкою 2 $Ox_2y_2z_2$, із камерою 3 $Ox_3y_3z_3$. Оскільки вилка 1 обертається навколо осі Oy з постійною кутовою швидкістю ω_1, то $\alpha = \omega_1 \cdot t$. Кривошип O_1A обертається навколо осі Oy з постійною кутовою швидкістю ω_2, отже $\varphi = \omega_2 \cdot t$, тоді кути β і γ будуть рівні: [128]

$$\begin{cases} \beta = arctg \dfrac{r \cdot \sin\varphi}{H}; \\ \gamma = -arctg \dfrac{r \cdot \cos\varphi}{\sqrt{H^2 + r^2 \sin^2\varphi}}. \end{cases} \tag{2.1}$$

де r - радіус кривошипа, $H = O_1O$ відстань між початком координат Oxyz і площиною обертання кривошипа O_1A.

Приймемо відношення конструктивних параметрів $\lambda = \dfrac{r}{H}$. Згідно досліджень [128] величина $\lambda \le 0,25$, що забезпечує стійку роботу ВВУ з амплітудою кутових коливань β і γ не більше 15^0.

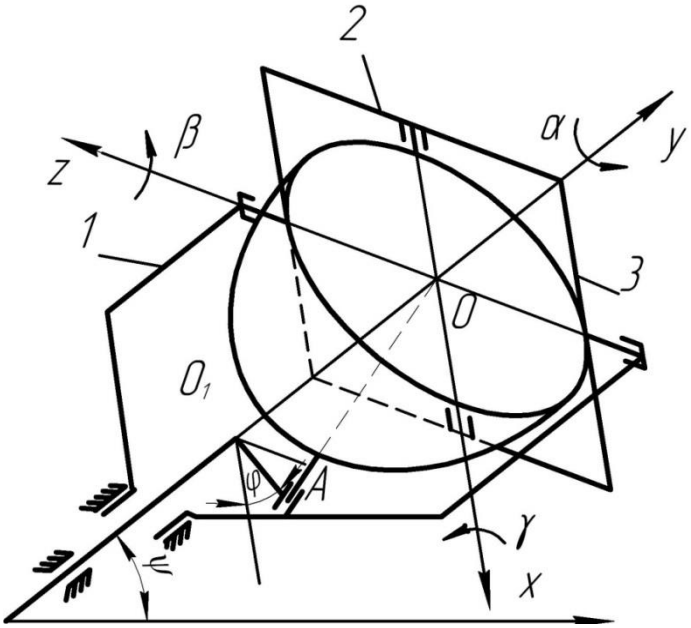


Рисунок 2.2. Кінематична схема вібраційно-відцентрової установки

Взаємне положення тіл і відповідних систем координат показано на рис.2.3.

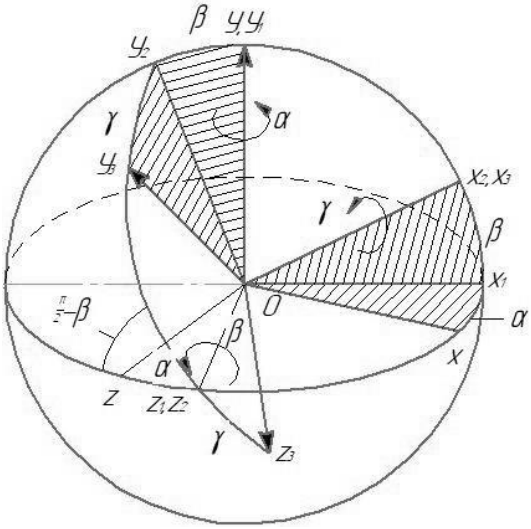


Рисунок 2.3. Схема руху камери

Кардановий підвіс моделює кути Ейлера-Крилова. Обчислимо таблицю напрямних косинусів тіла матричним методом [119, 152].

$$[x, y, z]^T = \overline{B}_1 [x_1, y_1, z_1]^T,$$

$$[x_1, y_1, z_1]^T = \overline{B}_2 [x_2, y_2, z_2]^T,$$

$$[x_2, y_2, z_2]^T = \overline{B}_3 [x_3, y_3, z_3]^T,$$

$$[x, y, z]^T = \overline{B}[x_3, y_3, z_3]^T$$

Тут

$$\overline{B}_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix},$$

$$\overline{B}_2 = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\overline{B}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$$

Результуючу матрицю повороту $\overline{B}$ знайдемо як добуток

$$\overline{B} = \overline{B}_1\overline{B}_2\overline{B}_3 =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\gamma - \cos\alpha\cos\gamma\sin\beta & \sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\gamma \\ \sin\beta & \cos\beta\cos\gamma & -\cos\beta\sin\gamma \\ -\sin\beta\cos\beta & -\cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\cos\gamma\sin\beta & \cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\sin\gamma\sin\beta \end{bmatrix}$$

Отже параметричні рівняння точок внутрішньої поверхні камери в будь-який момент часу в залежності від кутів $\alpha,\ \beta\ i\ \gamma$ матимуть вигляд:

$$\begin{cases} x = x_3\cos\alpha\cos\beta + y_3\sin\beta - z_3\sin\alpha\cos\beta; \\ y = x_3(\sin\alpha\sin\gamma - \cos\alpha\cos\gamma\sin\beta) + y_3\cos\beta\cos\gamma + z_3(\cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\cos\gamma\sin\beta); \\ z = x_3(\sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\gamma\sin\beta) - y_3\cos\beta\sin\gamma + z_3(\cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\sin\gamma\sin\beta). \end{cases} \quad (2.2)$$

Оскільки $\beta_{max} = \gamma_{max} = 15^0$, $\cos 15^0 = 0{,}966$, то з похибкою, яка не перевищує 3,3% можна прийняти, що $\cos\beta \approx 1,\ \cos\gamma \approx 1$.

Тоді рівняння (2.2) будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} x = x_3\cos\alpha + y_3\sin\beta - z_3\sin\alpha; \\ y = x_3(\sin\alpha\sin\gamma - \cos\alpha\sin\beta) + y_3 + z_3(\cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta); \\ z = x_3(\sin\alpha + \cos\alpha\sin\gamma\sin\beta) - y_3\sin\gamma + z_3(\cos\alpha - \sin\alpha\sin\gamma\sin\beta). \end{cases} \quad (2.3)$$

Розглянемо випадок, коли амплітуди коливань рамки і робочої камери знаходяться в межах $3^0 \ldots 6^0$, тоді можна прийняти, що:

$$\begin{cases} \gamma = -\lambda \cos\omega_2 t; \\ \beta = \lambda \sin \omega_2 t. \end{cases} \qquad (2.4)$$

Продиференціювавши ліві і праві частини системи рівнянь (2.3) по часу, отримаємо залежності швидкості будь-якої точки М з координатами (x_3;y_3;z_3) від часу

$$\begin{cases} \dot{x} = -x_3 \sin\alpha \cdot \dot{\alpha} + \dot{y}_3 \cdot \dot{\beta} - z_3 \cos\alpha \cdot \dot{\alpha}; \\ \dot{y} = x_3\left(\cos\alpha \cdot \sin\gamma \cdot \dot{\alpha} + \sin\alpha \cdot \dot{\gamma} - \dot{\alpha} \sin\alpha \cdot \sin\beta + \dot{\beta} \cdot \cos\alpha\right) + z_3\left(-\dot{\alpha} \sin\alpha \cdot \sin\gamma + \dot{\gamma} \cos\alpha\right); \\ \dot{z} = x_3\left(\cos\alpha \cdot \dot{\alpha} - \sin\alpha \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma + \cos\alpha\left(\dot{\beta} \cdot \sin\gamma + \dot{\gamma} \cdot \sin\beta\right)\right) - y_3 \cdot \dot{\gamma} + \\ z_3\left(-\sin\alpha \cdot \dot{\alpha} - \cos\alpha \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma + \sin\alpha\left(\dot{\beta} \cdot \sin\gamma + \dot{\gamma} \cdot \sin\beta\right)\right). \end{cases}$$

де $\dot{\beta} = \lambda \cdot \omega_2 \cdot \cos\varphi$, $\dot{\gamma} = \lambda \cdot \omega_2 \cdot \sin\varphi$.

Розіб’ємо внутрішню поверхню робочої камери (сфери) на рівні частини, для цього впишемо в сферу ікосаедр, всі вершини якого рівновіддалені одна від одного, що наведено в додатку А . Розглянемо “динамічну рівновагу” частинки абразиву, яка знаходиться на внутрішній поверхні камери. Згідно принципу Д’Аламбера [104-105] будемо мати:

$$\vec{P} + \vec{N} + \vec{F}_T + \vec{\phi} = 0, \qquad (2.5)$$

де $\vec{P}$ – сила тяжіння, $\vec{N}$ – нормальна реакція поверхні камери, $\vec{F}_T$ – сила тертя, $\vec{\phi}$ – сила інерції, $\vec{\phi} = -m\vec{a}$.

Проведемо через кожну точку M_i з координатами (x_i, y_i, z_i), ($i = 1...12$) нормаль, вектор якої матиме координати:

$$X_i = -x_i;\ Y_i = -y_i;\ Z_i = -z_i. \qquad (2.6)$$

Проектуючи рівняння (2.5) на нормаль отримаємо:

$$N = P_n + \phi_n, \text{ де } \vec{P} = m\vec{g},\ N' = \frac{N}{m} = g_n + a_n. \qquad (2.7)$$

Вектор прискорення земного тяжіння проектується наступним чином

$$g_x = -g\cos\psi;\ g_y = g\sin\psi,\ g_z = 0, \qquad (2.8)$$

де ψ кут нахилу осі Оу до горизонту.

Знаючи проекції прискорення точки M_i на координатні осі a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}, можна визначити величину N'.

$$N^{'} = \frac{(g_x + a_{xi})X_i + (g_y + a_{yi})Y_i + (g_z + a_{zi})Z_i}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}}. \qquad (2.9)$$

Визначимо кінетичну енергію частинки абразиву, яка знаходиться в точці M_i в моменти часу, коли проходить відрив частинки абразив від камери $N^{'} > 0$.

$$E_k = \frac{mV_i^2}{2} = \frac{m(V_{xi}^2 + V_{yi}^2 + V_{zi}^2)}{2}, \qquad (2.10)$$

де V_{xi}, V_{yi}, V_{zi} – проекції швидкості точки M_i на осі координат в момент часу t_k.

Кінетична енергія, що віддає камера частинкам абразиву в точці M_i за час t_1 буде рівна:

$$T_i = \sum_{k=1}^{t_1} E_k . \qquad (2.11)$$

Кінетична енергія, яку отримають частинки абразиву від всієї камери за час t_1 буде рівна:

$$T = \sum_{i=1}^{80} T_i . \qquad (2.12)$$

Величина t_1 визначається з умови, що за цей час робоча камера здійснить повне число обертів навколо осі Оу.

$$t_1 = \frac{60}{\Delta n_1}, \qquad (2.13)$$

де Δn_1 – крок зміни частоти обертання камери навколо осі Оу.

Після цього визначаємо кінетичну енергію, яку віддає камера частинці абразиву одиничної маси за час t_1.

$$T^{'} = \frac{T}{m \cdot t_1}. \qquad (2.14)$$

На рис. 2.4 наведена поверхня відгуку залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання вилки n_1 і кривошипа n_2.

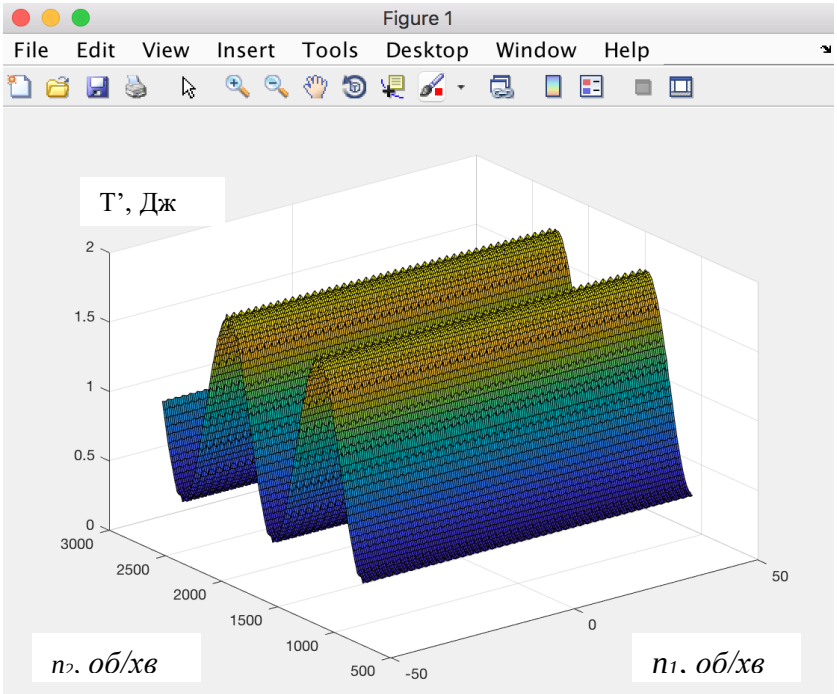


Рисунок 2.4. Поверхня відгуку залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання вилки n_1 і кривошипа n_2

На рис. 2.5 -2.7 подано залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання кривошипа при різних значеннях частоти обертання вилки.

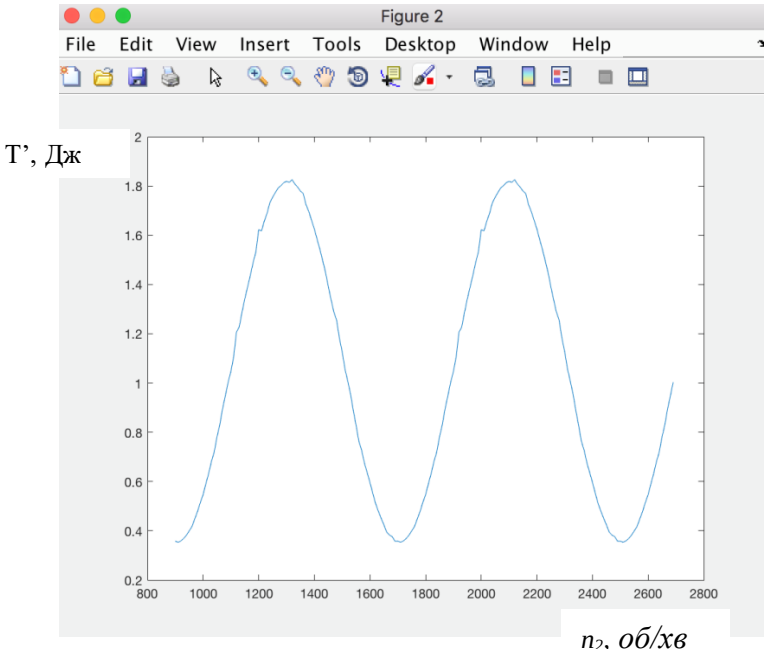


Рисунок 2.5. Залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання кривошипа ($n_1 = -30\ об/хв$)

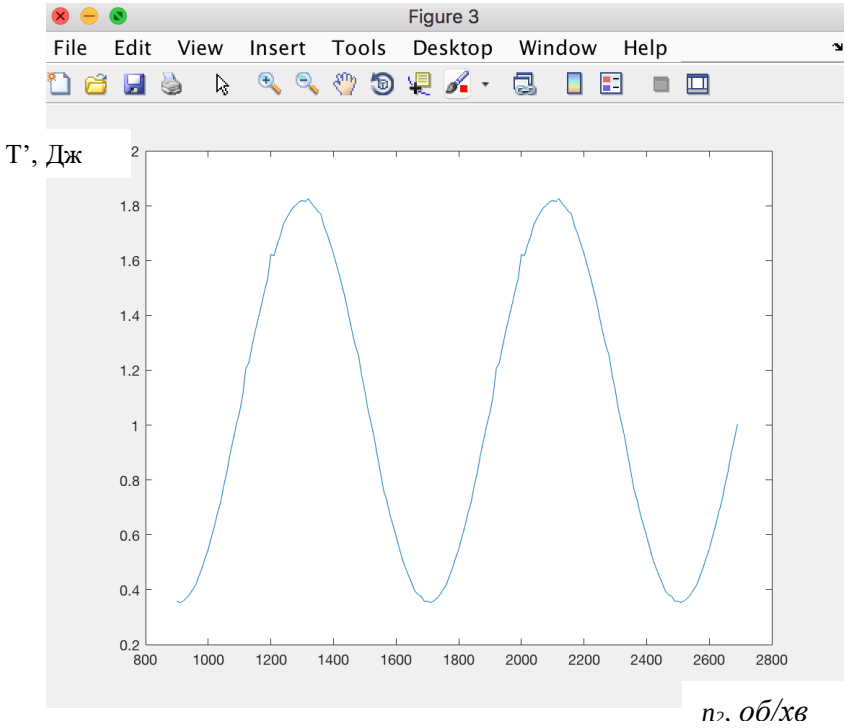


Рисунок 2.6. Залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання кривошипа ($n_1 = 0$ *об / хв*)

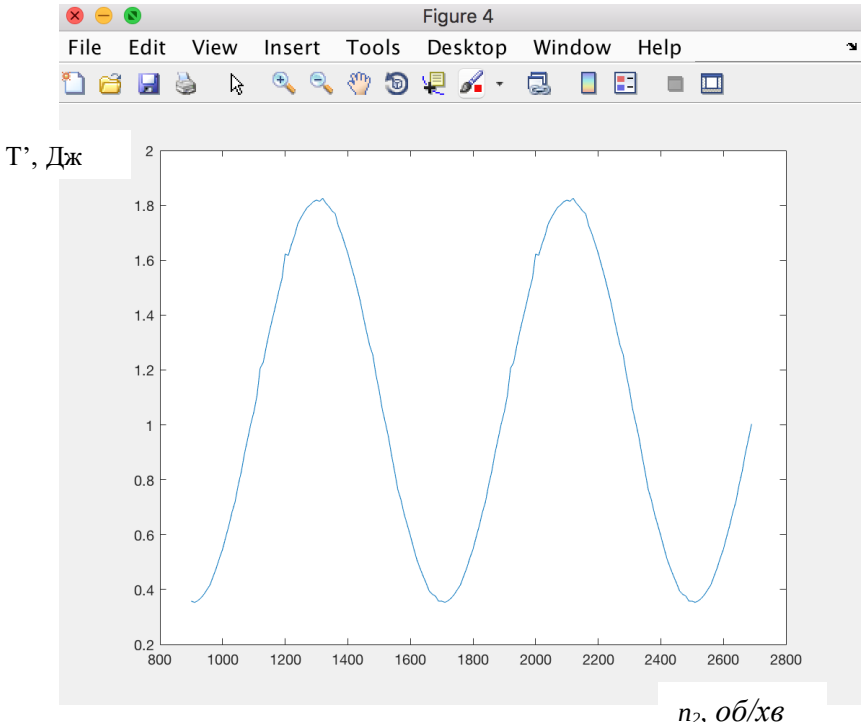


Рисунок 2.7. Залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання кривошипа ($n_1 = 30$ *об / хв*)

На рис. 2.8 – 2.10 подано залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання вилки при різних значеннях частоти обертання кривошипа.

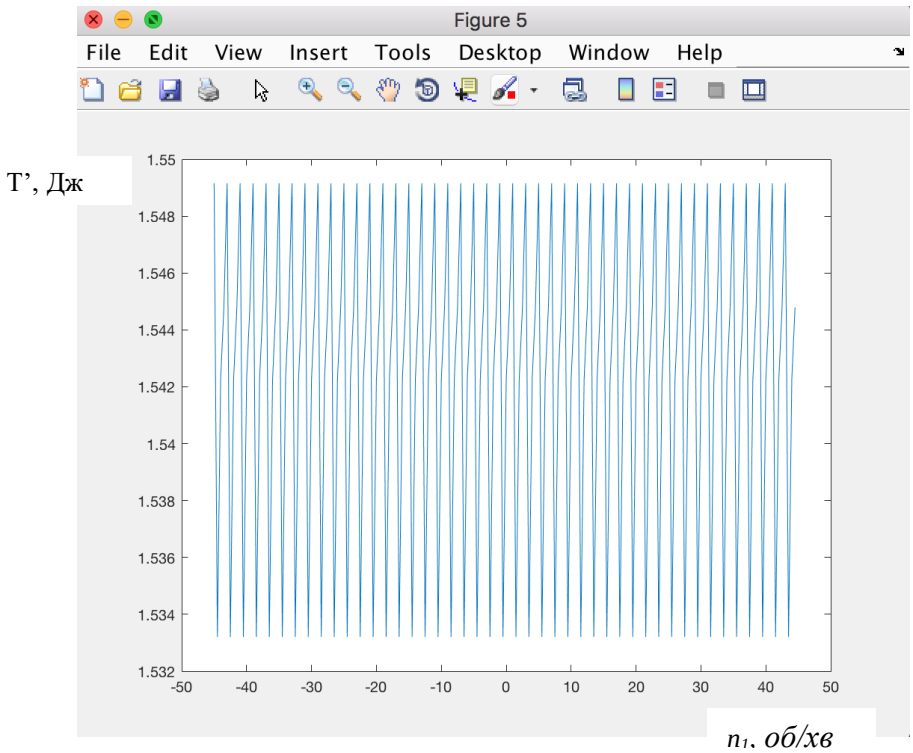


Рисунок 2.8. Залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання вилки

$(n_2 = 1200\ об/хв)$

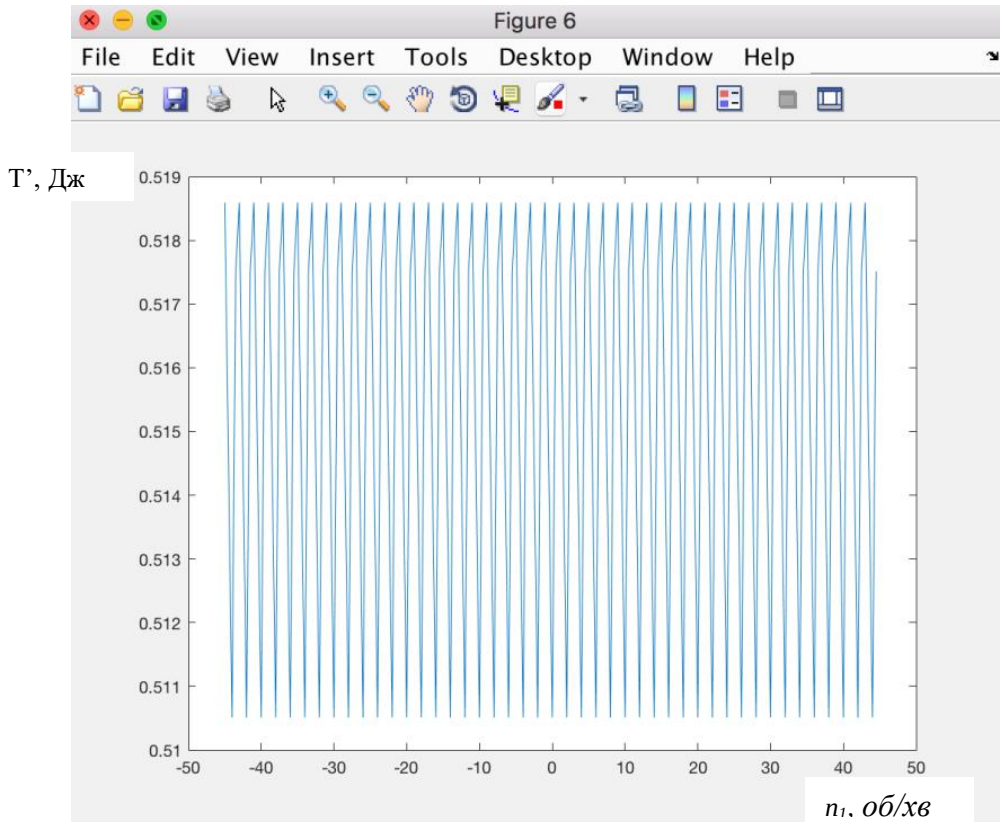


Рисунок 2.9. Залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання вилки

$(n_2 = 1800\ об/хв)$

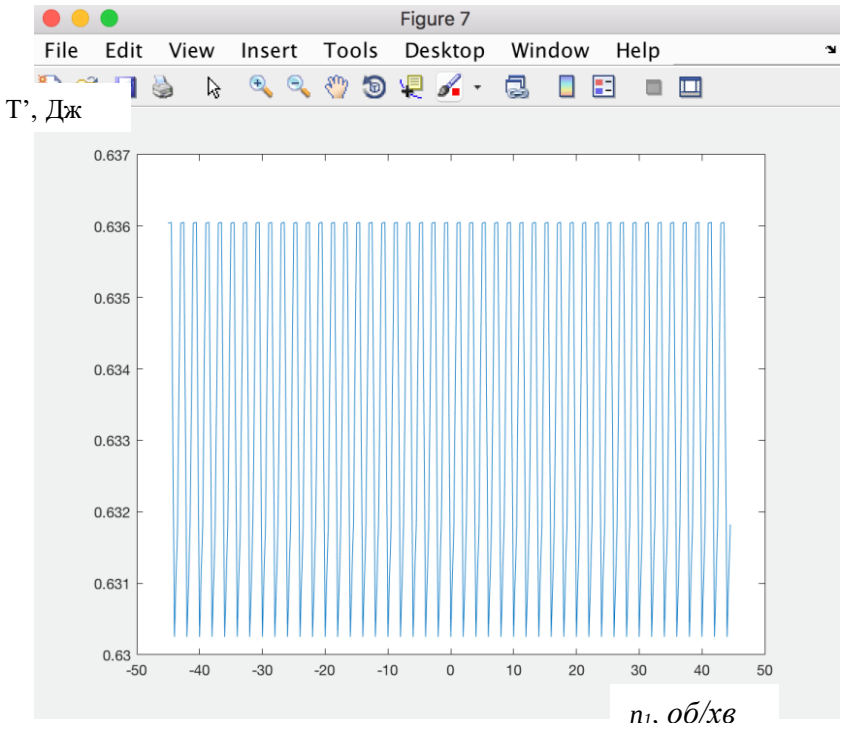


Рисунок 2.10. Залежності питомої кінетичної енергії $T^{'}$ від частоти обертання вилки ($n_2 = 2400\ об/хв$)

Очевидно, що чим більшу кінетичну енергію надає камера частинкам абразиву, тим буде більшою робота, яка затрачується на очищення деталей. Отже знаючи параметри вібраційно-відцентрової установки можна підібрати раціональні значення кутових швидкостей вилки і кривошипа, які забезпечують необхідну чистоту обробки деталей.

2.3. Дослідження тиску абразивної частинки на поверхню деталі

Інтенсивність процесу вібраційно-відцентрового оброблення (ВВО) визначається питомим зняттям металу в результаті взаємодії абразивної гранули з деталлю, миттєвим її тиском на оброблювальну поверхню.

Вібраційно-відцентрове оброблення з вільним завантаженням деталей у залежності від характеру робочого середовища, яке використовується, являє собою механічний або хіміко-механічний процес зняття мікрочастин металу і його окисів з поверхні, яка обробляється, а також зглажування

мікронерівностей шляхом їх пластичного деформування частинками робочого середовища, які в процесі роботи здійснюють коливний рух.

При визначенні сили співудару частки робочого середовища з деталями, які обробляються вібраційно-відцентровим методом, наряду з іншими параметрами важливе місце займає коефіцієнт μ миттєвого тертя гранули до відповідної робочої поверхні, який характеризує жорсткість поверхні тіл в зоні контакту при ударі.

Припустимо, що імпульс сил, діючих на гранулу при ударі по дотичній, зумовлений тільки силою тертя, і гранула починає зміщуватись по робочій поверхні при найбільшому граничному значенні імпульсу цієї сили [42].

$$\left|P_\tau\right| = \mu\left|P_n\right|, \tag{2.15}$$

де P_n - імпульс нормального тиску при ударі.

По аналогії з тертям ковзання прийнято, що коефіцієнт μ буде максимальним в момент переходу від удару без ковзання гранули до удару з ковзанням по робочій поверхні

$$\mu = \left|\frac{P_\tau}{P_n}\right|, \tag{2.16}$$

Для визначення коефіцієнту μ тертя гранули до відповідної робочої поверхні деталі, розглянемо розрахункову схему удару гранули до робочої площини показаної на рис. 2.11 [83, 77, 118].

В момент переходу одного виду удару гранули в другий справедлива залежність, яка описує удар без ковзання:

$$\left.\begin{aligned} & m\left(V_{1\xi} - V_\xi\right) = P_\tau \\ & m\left(V_{1\eta} - V_\eta\right) = P_n \\ & I_c\omega_1 = P_\tau \cdot p_\eta - P_n \cdot p_\xi \\ & V_{1\xi} - \omega_1 \cdot p_\eta = 0 \end{aligned}\right\} \tag{2.17}$$

де m - маса гранули; $V_{1\xi}$, $V_{1\eta}$ і V_{ξ}, V_{η} - проекції швидкості центра С маси гранули в кінці і початку удару; ω_1 - кутова швидкість гранули після удару; e - коефіцієнт відновлення нормальної складової швидкості гранули при ударі.

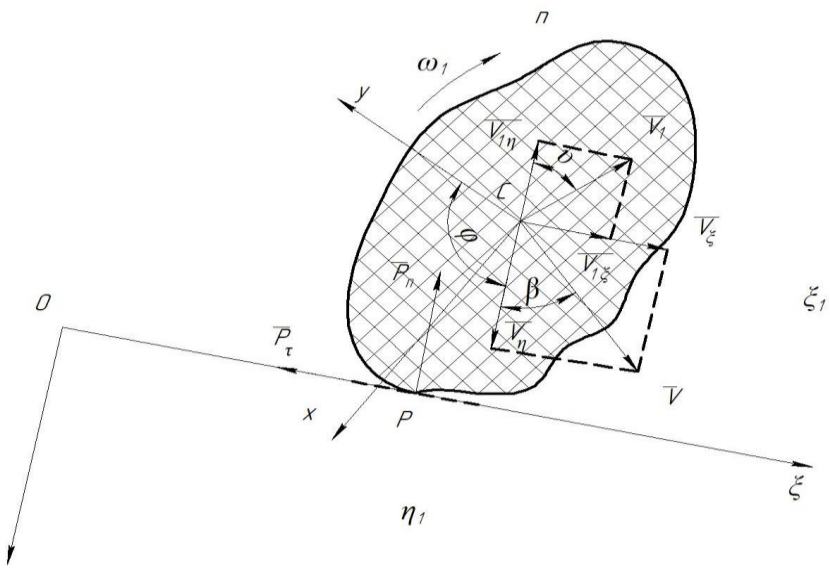


Рисунок 2.11. Розрахункова схема удару гранули на площину

$\xi O\eta$ - нерухома система координат; $\xi_1 O\eta_1$; Cxy - рухомі системи координат, зв'язаних з гранулою; n - нормаль до площини; β, ν, φ - кути падіння, відбиття і орієнтації гранули

Момент інерції гранули відносно головної осі, перпендикулярної площині удару $\xi O\eta$ [42]

$$I_c = \frac{1}{5} m\left(a^2 + b^2\right), \tag{2.18}$$

де a, b - розміри головних напівосей середнього перерізу, який лежить в площині удару $(b<a)$.

Проекції радіуса - вектора CP, визначаючого орієнтацію гранули відносно площини

$$p_\eta = \sqrt{b^2 + \left(a^2 - b^2\right) \cdot \sin^2 \varphi}, \tag{2.19}$$

$$p_\xi = \left(a^2 - b^2\right) \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi / \sqrt{b^2 + \left(a^2 - b^2\right) \cdot \sin^2 \varphi}, \tag{2.20}$$

Із рівняння (2.15), з врахуванням підстановки в неї вирази (2.18)-(2.20), отримаємо

$$P_\tau = \frac{mV\left|5(1+e)\left(1-k^2\right)\sin\varphi\cdot\cos\varphi+\left(1-k^2\right)\sin\beta\right|}{6+k^2-5\left(1-k^2\right)\cos\varphi}, \qquad (2.21)$$

$$P_n = mV(1-e)\cos\beta, \qquad (2.22)$$

де $k = b/a.$

Якщо підставити (2.21) і (2.22) в (2.16), після перетворень будемо мати рівняння, зручне для аналізу

$$\lambda = \frac{5\left[\left(1-k^2\right)\Big/\left(1+k^2\right)\right]\cdot\sin 2\varphi + 2tg\beta/(1+e)}{7-5\left[\left(1-k^2\right)\Big/\left(1+k^2\right)\right]\cdot\cos 2\varphi}. \qquad (2.23)$$

Як видно із залежності (2.23), із збільшенням коефіцієнта e і зменшенням витянутості форми гранули (тобто при більшому значенні k) величина μ зменшується. Параметр β визначений для конкретних умов удару, кут падіння гранули, при якому удар без ковзання гранули переходить в удар з ковзанням. Прийняті на початку передумови при рішенні поставленої задачі обґрунтовують кут β як величину постійну в рівнянні (2.23). Кут β визначається рухом робочої камери, який обумовлюється кінематикою вібраційної установки. Також коефіцієнт μ залежить від кута орієнтації φ гранули відносно робочої поверхні при ударі і конкретних фрикційних властивостей поверхні тіл, які співударяються.

Максимальне значення коефіцієнта μ відповідає моменту переходу від удару без ковзання гранули до удару з ковзанням по оброблюваній поверхні. Це значення коефіцієнта μ може бути границею між двома технологічними процесами вібраційної обробки, що відповідає максимальному зняттю матеріалу з оброблюваної поверхні (металу, корозії, ливарного штаму та ін.)

при максимальному значенні P_n, до шліфування оброблюваної поверхні (зминання виступів мікронерівностей, згладжування нерівностей і т. д.) при збільшенні значення P_τ з переходом до режиму полірування.

Отримані графіки залежності коефіцієнта миттєвого тертя μ гранули від коефіцієнта форми гранули $k=b/a$ та кута орієнтації гранули φ (рис. 2.12, рис. 2.13), дають можливість визначити потрібні параметри гранули сипучого робочого середовища і кута її взаємодії з оброблюваною поверхнею, що визначається кінематикою вібраційної установки, яка встановлює вид циркуляції робочого середовища для певного технологічного процесу обробки деталей [72].

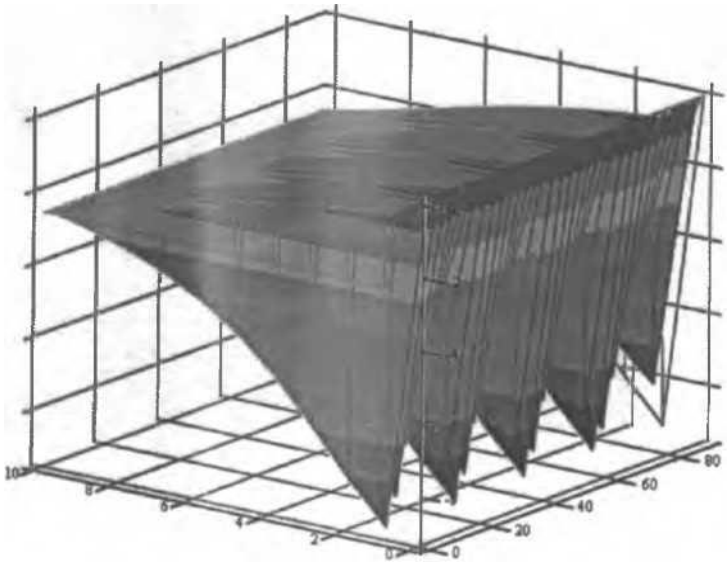


Рисунок 2.12. Залежність μ від кута φ= 0 - 90°, співвідношення b/a= 0 - 0.9

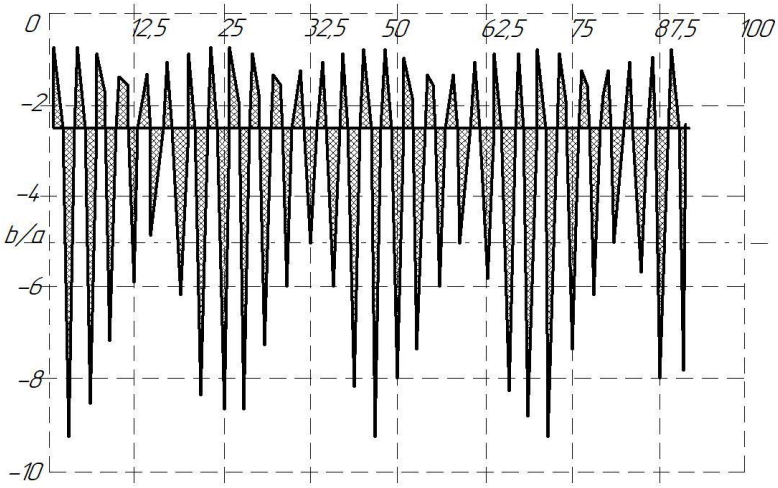


Рисунок 2.13. Залежність μ від кута φ= 0 - 90°, співвідношення b/a = 0-0,9 при V= 25 м/с, m = 0.01 кг, β= 30°

Аналізуючи отримані графіки, можна констатувати факт, що при меншому значенні коефіцієнта k (витягнута, еліптична форма гранули) перепад (зміна) значень μ від величини φ є значною, з синусоїдальною періодичністю, приблизно рівною 22° (23°, 25°, 47°...), що відповідає переходу від режиму різання до режиму шліфування абразивної гранули і оброблюваної поверхні. При збільшенні коефіцієнта k (округлюється форма гранули) зміна значень коефіцієнта μ від величини φ незначна і відповідає в більшості режиму різання або проникнення абразивної гранули в оброблювану поверхню.

Наведені висновки аналізу графіків дають можливість стверджувати, що для певної форми (коефіцієнта k) гранули сипучого абразивного робочого середовища, змінюючи значення кута її орієнтації φ, можна визначити чи задати потрібну величину сили різання P_n і сили зминання P_τ, або їх певне співвідношення, яке б відповідало потрібному технологічному процесу вібраційного оброблення деталей.

Проведені експериментальні і аналітичні дослідження вібраційно-відцентрового процесу оброблення деталей [48, 80-82], дають можливість розділити його на наступні етапи. В початковий період оброблення удари гранул приходяться по вершинам мікронерівностей вихідної поверхні зразків. Проходить інтенсивне зминання гребенів мікрорельєфу, в результаті інтенсивно знижується шорсткість і підвищується поверхнева міцність оброблюваної поверхні. Цей етап закінчується формуванням поверхні, яка має більш високі значення показників якості поверхні. Умовно можна назвати таку частину технологічної операції вібраційним проходом. Тривалість такого проходу при ВВО находиться в межах 15-30 хв. За цей час вся вихідна поверхня деталі покривається слідами взаємодії з гранулами робочого середовища.

Другий вібраційний прохід характеризується підвищенням параметрів шорсткості, але числове значення R_a в кінці проходу менше вихідного (до оброблення). Цей прохід закінчується приблизно в 45 хвилин після початку оброблення.

Наступний прохід відрізняється зниженням шорсткості. Це пояснюється двома факторами. Перший це те, що з кожним наступним проходом зона взаємодії гранули з поверхнею наближається до основ виступів мікрорельєфу, в результаті чого збільшується площа взаємодії гранули з поверхнею. Другий, те що перших два проходи привели до підвищення поверхневої міцності матеріалу зразка. Це додатково приводить до збільшення реакції поверхні при силовій взаємодії з нею гранули робочого середовища. Таким чином від проходу до проходу пружна фаза удару гранули об поверхню буде збільшуватись.

Аналіз перших проходів ВВО свідчить, що при меншому значенні коефіцієнта k (витягнута, еліптична форма гранули) режим різання абразивної гранули буде найбільш продуктивним. Характеристика другого і третього проходів ВВО пропонує збільшення коефіцієнта k (округлюється форма гранули), що відповідає режиму більшого проникнення абразивної гранули в оброблювану поверхню. Ці спостереження дають можливість підібрати абразивне робоче середовище з певними фізико-механічними властивостями і певною геометричною формою для зрізання мікронерівностей вихідної поверхні мікрорельєфу, шліфування і полірування оброблюваної поверхні [52, 76, 107].

2.4. Математична модель динаміки вібраційно-відцентрової обробки деталей сипучим абразивом при контакті з стінками установки.

Все математичне описання динаміки оброблювального середовищ при теоретичному дослідженні об‘ємного віброоброблення та інших технологічних процесів, які використовуються явища вібрації в сипкому середовищі [2, 135] виконано із застосуванням закону Фохта [22]. Вибір моделі зумовлено тим, що динамічні процеси у середовищі описуються диференціальним рівняннями з частинними похідними. Методика дослідження даних лінійних диференціальних рівнянь розроблена достатньому рівні, при відповідних

дослідженнях, заміні нелінійних пружних характеристик лінійними або зовсім нехтувати ними.

Це дозволяє представити однорідне суцільне середовище з достатньою точністю. Припустимо, що деталі, як слід оброблювати та сипке середовище виготовлене з матеріалу одного виду і даній однорідній суміші можна надати властивості суцільного матеріалу як пружність і в‘язкість, застосовуючи лінійний чи нелінійний закон Фохта [133]

$$\sigma = E \cdot \zeta + k_0 \left(\frac{d\zeta}{dt} \right)^{k_1}, \tag{2.24}$$

де σ - нормальне напруження в моделі Фохта; ζ - відносна деформація моделі вздовж осі ξ; E – модуль пружності матеріалу моделі; k_0, k_1– сталі, що характеризує в’язкі властивості моделі.

Закон Фохта можна узагальнити як нелінійну модель шляхом введення степеневого показника нелінійності, який залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу середовища та його структури. Математичний апарат нелінійних диференціальних рівнянь з частинними похідними дозволить застосувати метод відокремлення змінних Фур‘є. Представлено обмеження динамічних властивостей оброблювального середовища за умов:

1. Матеріал середовища суцільний і однорідний, представлений як нашарування плоских пружно-пластичних балок, товщини яких значно менші довжин та доторкаються із стінками контейнера.

2. Середовище рухається пошарово, внаслідок чого перебуває в складному русі (в площині руху контейнера): переносний рух шару – це рух разом з контейнером вібромашини, відносний рух шару середовища - повздовжні коливання вздовж горизонтальної осі шару ξ.

3. Матеріал середовища задовольняється нелінійним законам Фохта [134]

$$\sigma = E(\zeta)^{\nu+1} + k_0\left(\frac{d\zeta}{dt}\right)^{k_1}. \qquad (2.25)$$

де σ - нормальне напруження в шарі середовища, $\zeta = \frac{\partial u}{\partial \xi}$ - відносна деформація шару середовища відносно повздовжньої осі шару ξ, $u = u(\xi, t)$ - переміщення вздовж осі ξ довільного поперечного січення моделі середовища за деякий момент часу t, E, k_0, k_1, ν – сталі, що характеризують узагальнені в'язкі і пружні властивості середовища.

4. Сила внутрішнього тертя R в шарі середовища визначається за законом Болотіна [111]:

$$R = u_t\left(B + B_0 u^2\right), \qquad (2.26)$$

де B, B_0 – сталі, які визначаються видом матеріалу середовища; $u_t = \frac{\partial u}{\partial t}$.

Залежність повздовжніх нелінійних коливань відносного руху поперечного перерізу шару абразивного середовища контейнера вібромашини матиме вигляд:

$$\rho\frac{\partial^2 u(\xi,t)}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial \xi}\left\{EF\left(\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial \xi}\right)^{\nu+1} - \left(k_0\frac{\partial^1 u(\xi,t)}{\partial \xi \partial t}\right)^{k_1}\right\} = \frac{\partial u(\xi,t)}{\partial t}\left\{\vartheta + \delta\left[u(\xi,t)\right]^2\right\}, \qquad (2.27)$$

де $\vartheta = \frac{B_0}{F}$, $\delta = \frac{B}{F}$, F – площа поперечного січення шару моделі середовища, ρ - еквівалентна густина моделі середовища.

При дослідженні рівняння (2.27) приймаються наступні припущення:

- сили в'язкого тертя є малими у порівнянні з нелінійно-пружною (відновлюючою) силою в цьому ж шарі;
- в процесі віброоброблення густина середовища як і площа поперечного січення та характеристики в'язких сил умовної його моделі є незмінними.

Вказане вище дозволяє диференціальне рівняння (2.27) представити у вигляді

$$\rho\frac{\partial^2 u(\xi,t)}{\partial t^2}-EF\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial\xi}\right)^{\nu+1}\right]=k_0\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(\frac{\partial^2 u(\xi,t)}{\partial\xi\partial t}\right)^{k_1}\right]+\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial t}\left\{\vartheta+\delta\left[u(\xi,t)\right]^2\right\} \qquad (2.28)$$

Рівняння (2.28) є базовим узагальненим для описання динаміки оброблювального середовища та із запропонованими пунктами припущень 3-4 руху середовища набуде вигляд:

$$\rho\frac{\partial^2 u(\xi,t)}{\partial t^2}-EF\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial\xi}\right)^{\nu+1}\right]=\varepsilon G(u,\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial t},...\frac{\partial^3 u(\xi,t)}{\partial\xi^2\partial t}), \qquad (2.29)$$

де $\varepsilon G(u,\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial t},...\frac{\partial^3 u(\xi,t)}{\partial\xi^2\partial t})=k_0\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(\frac{\partial^2 u(\xi,t)}{\partial\xi\partial t}\right)^{k_1}\right]+\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial t}\left\{\vartheta+\delta\left[u(\xi,t)\right]^2\right\}$

максимальне значення вказаної функції є величина мала відносно значення другого доданку лівої його частини, тобто $EF\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial\xi}\right)^{\nu+1}\right]$. Вказане є підставою для використання загальних ідей методів збурень [21, 91-92, 85, 108, 129,] при побудові розв’язку. Останній крім силових чинників визначається ще й крайовими умовами. При недосконалому контакті середовища і стінок контейнера вони мають вигляд

$$u(\xi,t)\Big|_{\xi=0}=\varepsilon f_1\left(u,\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial\xi},\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial t},\gamma\right)\Big|_{\xi=0},\quad u(\xi,t)\Big|_{x=l}=\varepsilon g_1\left(u,\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial\xi},\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial t},\gamma\right)\Big|_{\xi=l} \qquad (2.30)$$

де $f_1\left(u,\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial\xi},\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial t},\gamma\right)$, $g_1\left(u,\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial\xi},\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial\xi},\gamma\right)$ - аналітичні 2π-періодичні по γ функції, $\dot{\gamma}=\mu=const$. Вказані функції враховують дію стінок контейнера на оброблювальне середовище, ε - малий параметр.

Розв'язок крайової задачі (2.29) (2.30) дозволяє встановити закон руху шару середовища - $u(\xi,t)$, тому нижче перейдемо до його побудови. Побудуємо спочатку одночастотні розв'язки відповідного незбуреного $\varepsilon = 0$ руху, для якого не має місця принцип суперпозиції.

2.5. Динаміка незбуреного руху вібраційно-відцентрової обробки деталей сипучим абразивом

Для розв'язку рівняння, яке описує з фізичної точки коливання середовища – при відсутності впливу зовнішніх сил та контейнера на середовище, застосовуємо метод відокремлення змінних Фур'є.

$$\rho \frac{\partial^2 u(\xi,t)}{\partial t^2} - EF \frac{\partial}{\partial \xi}\left[\left(\frac{\partial u(\xi,t)}{\partial \xi}\right)^{\nu+1}\right] = 0\,. \tag{2.31}$$

Згідно вказаного методу функцію $u(\xi,t)$ представлено у вигляді $u(\xi,t) = \Xi(\xi)T(t)$, для визначення невідомих функцій $\Xi(\xi)$ і $T(t)$ отримуємо звичайні нелінійні диференціальні рівняння:

$$\begin{aligned} &\frac{d}{d\xi}\left(\frac{d\Xi}{d\xi}\right)^{\nu+1} + \lambda\Xi(\xi) = 0, \\ &\rho\frac{d^2T}{dt^2} + EF(\nu+1)\lambda T^{\nu+1}(t) = 0, \end{aligned} \tag{2.32}$$

де λ - невідомий параметр, який буде виходити із крайових умов (2.32) при $\varepsilon = 0$ для функції $\Xi(\xi)$ матиме вигляду

$$\Xi(0) = \Xi(l) = 0\,. \tag{2.33}$$

Диференціальне рівняння для функції $\Xi(\xi)$ визначаються за допомогою спеціальних періодичних Ateb-функцій [96, 105, 127]:

$$\Xi(\xi)=\Xi_0\begin{cases} sa\left(1,\dfrac{1}{\nu+1},\left(\lambda\dfrac{\nu+2}{2\Xi_0^{\nu}}\right)^{\frac{1}{\nu+2}}\xi\right) \\ ca\left(1,\dfrac{1}{\nu+1},\left(\lambda\dfrac{\nu+2}{2\Xi_0^{\nu}}\right)^{\frac{1}{\nu+2}}\xi\right)\end{cases}, \tag{2.34}$$

де Ξ_0 - стала інтегрування.

В (2.34) параметр $\nu+1$ задовольняється умові: $\nu+1=\dfrac{2n+1}{2m+1}$, де $m,n=0,1,2,.....$, тобто $\nu>-1$, а коли $\nu=0$ модель коливання шару середовища переходить з нелінійної в лінійну.

Враховуючи (2.33), знайдемо λ із розв'язком крайової задачі для функції $\Xi(\xi)$ у вигляді:

$$\lambda=\frac{2\Xi_0^{\nu}}{\nu+2}\left(\Pi_{\xi}\frac{1}{l}\right)^{\nu+2}, \qquad \Xi(\xi)=\Xi_0 sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_{\xi}\frac{1}{l}\xi\right), \tag{2.35}$$

де $2\Pi_{\xi}$ - період використання спеціальних Ateb-функцій, тобто $2\Pi_{\xi}=2\dfrac{\sqrt{\pi}\Gamma(\bar{\nu})}{\Gamma(0.5+\bar{\nu})}$, $\Pi_{\xi}=\dfrac{\sqrt{\pi}\Gamma(\bar{\nu})}{\Gamma(0.5+\bar{\nu})}$, $\bar{\nu}=\dfrac{\nu+1}{\nu+2}$, $\Gamma(...)$ - гама-функція відповідного аргументу.

Рівняння для функції $T(t)$, з врахуванням (2.33), приймає вигляд:

$$T(t)=T_0 ca(\nu+1,1,\omega^*(a)t), \tag{2.36}$$

де $\omega^{*2}(a)=\dfrac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\dfrac{\Pi_{\xi}}{l}\right)^{\nu+2}a^{\nu}$, T_0 - стала, $a=\Xi_0 T_0$.

Власні коливання шару моделі середовища можна записати у вигляді:

$$u(\xi,t)=a\cdot sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_{\xi}\frac{\xi}{l}\right)ca\left[\nu+1,1,\left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{\Pi_{\xi}}{l}\right)^{\nu+2}a^{\nu}\right]^{\frac{1}{2}}t+\theta\right], \tag{2.37}$$

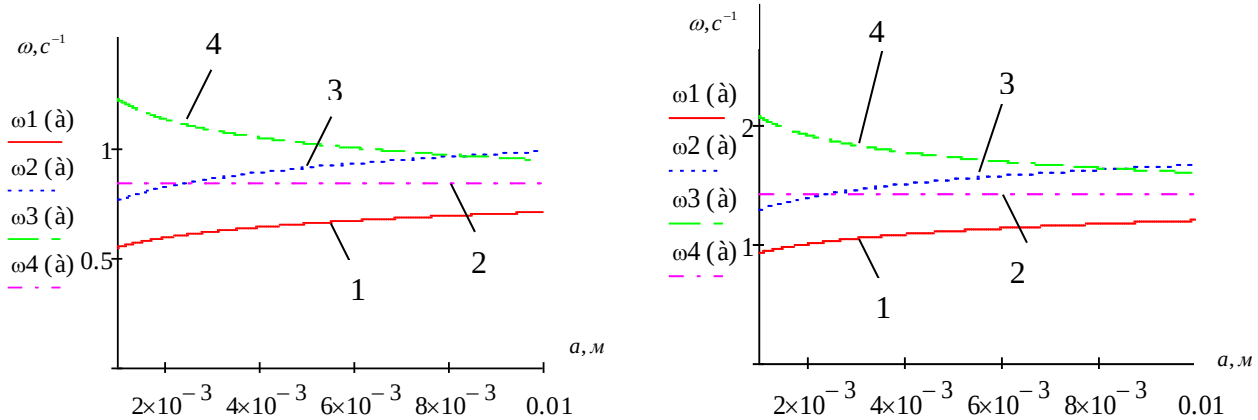
де θ - стала.

В моделі шару середовища (2.37), встановлено, що частота власних коливань залежить від амплітуди і набуде вигляд

$$\omega^{*2}(a)=\left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{\Pi_{\xi}}{l}\right)^{\nu+2}a^{\nu}\right]^{\frac{1}{2}}=\left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{1}{l}\frac{\sqrt{\pi}\Gamma(\bar{\nu})}{\Gamma(0.5+\bar{\nu})}\right)^{\nu+2}a^{\nu}\right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (2.38)$$

На рис. 2.14 представлено для різних значень параметру ν залежність частоти власних коливань середовища від амплітуди при значень його густини: а) $\rho=5000$ кг/м^3 ; б) $\rho=2500$ кг/м^3 .

Отже, власна частота (період) коливань моделі середовища у вигляді нашарування плоских нелінійно-пружних балок залежить від амплітуди. З ним пов'язані значні математичні труднощі дослідження динамічних процесів таких систем, які піддаються дії зовнішнього збурення.



а) б)

Рисунок 2.14 Залежність частоти власних коливань оброблювального середовища від амплітуди за різних значень його густини: а) $\rho=5000$ кг/м^3 ; б) $\rho=2500$ кг/м^3 $E=1\cdot10^6$ Н/м^2, $F=0{,}001$ м^2, (1-$\nu=\frac{2}{9}$;2 - $\nu=0$;3 – $\nu=\frac{4}{9}$;4 – $\nu=\frac{-2}{9}$)

Із графіків (рис. 2.14.) випливає, що частота власних коливань шару середовища із зростанням амплітуди для:

- м’яких матеріалів оброблювального середовища ($-1<\nu<0$)- спадає;

- жорсткого оброблювального середовища ($\nu>0$)– зростає;

- для середовища з лінійно-пружними властивостями матеріалу ($\nu = 0$) не залежить від амплітуди (на рис. 2.14 горизонтальна лінія).

Отримана математична модель руху сипкого середовища характеризується певною універсальністю, що за допомогою наведених вище залежностей дозволяє описати динамічний процес оброблення середовищем для різних типів його матеріалів.

2.6. Методика дослідження динаміки збуреного руху оброблювального середовища

Виходячи із збурених крайових умов неавтономного типу (2.30) застосувати безпосередньо основну ідею методу Ван-дер-Поля [129, 133] для дослідження динаміки збуреного руху не вдається. Тому у базовому рівнянні (2.29) зробимо заміну змінних

$$u(\xi,t) = V(\xi,t) + \varepsilon w(\xi,t), \tag{2.39}$$

де функція $w(\xi,t)$ є розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{\partial^2 w(\xi,t)}{\partial \xi^2} = 0 \tag{2.40}$$

і задовольняє крайові умови

$$\begin{aligned} w(\xi,t)\Big|_{\xi=0} &= f_1\left(a \cdot sa\left(1, \frac{1}{\nu+1}, \Pi_\xi \frac{\xi}{l}\right) ca\left[\nu+1, 1, \left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{\Pi_\xi}{l}\right)^{\nu+2} a^{\nu}\right]^{\frac{1}{2}} t + \theta\right], ..., \gamma \right)\Big|_{x=0}, \\ w(\xi,t)\Big|_{\xi=l} &= g_1\left(a \cdot sa\left(1, \frac{1}{\nu+1}, \Pi_\xi \frac{\xi}{l}\right) ca\left[\nu+1, 1, \left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{\Pi_\xi}{l}\right)^{\nu+2} a^{\nu}\right]^{\frac{1}{2}} t + \theta\right], ..., \gamma \right)\Big|_{x=l} \end{aligned} \tag{2.41}$$

Таким чином, за допомогою функції $w(\xi,t)$ враховується частково збурення руху оброблювального середовища зумовлене дією стінок контейнера.

Щодо функції $V(\xi,t)$ в (2.39), то вона повинна бути розв'язком хвильового рівняння

$$\rho\frac{\partial^2 V(\xi,t)}{\partial t^2}-EF\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(\frac{\partial V(\xi,t)}{\partial\xi}\right)^{\nu+1}\right]=\varepsilon G(V,\frac{\partial V(\xi,t)}{\partial t},...\frac{\partial^3 V(\xi,t)}{\partial\xi^2\partial t})-\varepsilon\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+$$
$$+\varepsilon EF\left[\nu\left(\frac{\partial V}{\partial\xi}\right)^{\nu-1}\frac{\partial^2 V}{\partial\xi^2}\frac{\partial w_k}{\partial\xi}+\left(\frac{\partial V}{\partial\xi}\right)^{\nu}\frac{\partial^2 w}{\partial\xi^2}\right] \qquad (2.42)$$

і задовольняти вже однорідні крайові умови

$$V(\xi,t)\Big|_{\xi=0}=0,\quad V(\xi,t)\Big|_{\xi=l}=0. \qquad (2.43)$$

Знайти розв’язок крайової задачі для функції $w(\xi,t)$ не становить труднощів

$$w(\xi,t)=\left\{g_1\left(a\cdot sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_\xi\frac{\xi}{l}\right)ca\left[\nu+1,1,\left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{\Pi_\xi}{l}\right)^{\nu+2}a^{\nu}\right]^{\frac{1}{2}}t+\theta\right],..,\gamma\right)\Bigg|_{\xi=l}-\right.$$
$$\left.-f_1\left(a\cdot sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_\xi\frac{\xi}{l}\right)ca\left[\nu+1,1,\left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{\Pi_\xi}{l}\right)^{\nu+2}a^{\nu}\right]^{\frac{1}{2}}t+\theta\right],..,\gamma\right)\Bigg|_{\xi=0}\right\}\frac{\xi}{l}+$$
$$+f_1\left(a\cdot sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_\xi\frac{\xi}{l}\right)ca\left[\nu+1,1,\left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{\Pi_\xi}{l}\right)^{\nu+2}a^{\nu}\right]^{\frac{1}{2}}t+\theta\right],..,\gamma\right)\Bigg|_{\xi=0}, \qquad (2.44)$$

тому якщо підставити у праві частини диференціального рівняння (2.41) на місце функції $w(\xi,t)$ і її похідних відповідні вирази згідно (2.41), отримаємо

$$\frac{\partial^2 V(\xi,t)}{\partial t^2}-EF\frac{\partial}{\partial\xi}\left[\left(\frac{\partial V(\xi,t)}{\partial\xi}\right)^{\nu+1}\right]=\varepsilon\hat{G}(V,\frac{\partial V(\xi,t)}{\partial t},...\frac{\partial^3 V(\xi,t)}{\partial\xi^2\partial t},\gamma), \qquad (2.45)$$

де

$$\hat{G}(V,\frac{\partial V(\xi,t)}{\partial t},...\frac{\partial^3 V(\xi,t)}{\partial\xi^2\partial t},\gamma)=G(V,\frac{\partial V(\xi,t)}{\partial t},...\frac{\partial^3 V(\xi,t)}{\partial\xi^2\partial t})+\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+$$
$$+EF\left[\nu\left(\frac{\partial V}{\partial\xi}\right)^{\nu-1}\frac{\partial^2 V}{\partial\xi^2}\frac{\partial w_k}{\partial\xi}+\left(\frac{\partial V}{\partial\xi}\right)^{\nu}\frac{\partial^2 w}{\partial\xi^2}\right]$$

Одночастотні розв'язки крайових задач для незбуреного рівняння (2.45)

мають вигляд

$$V(\xi,t)=a\cdot sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_{\xi}\frac{\xi}{l}\right)ca[\nu+1,1,\psi],\ \psi=\left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{\Pi_{\xi}}{l}\right)^{\nu+2}a^{\nu}\right]^{\frac{1}{2}}t+\theta \quad (2.46)$$

Співвідношення (3.22) відповідно до загальної ідеї методу Ван-дер-Поля адаптованої для крайових задач рівнянь із частинними похідними та однорідними крайовими умовами можна вважати заміною змінних для збурених рівнянь, тільки для вказаного випадку величини a і θ будуть вже деякими функціями часу. Для знаходження закону їх зміни отримуємо звичайні диференціальні рівняння у вигляді

$$\begin{aligned}\dot{a}&=\varepsilon\frac{sa(1,\nu+1,\psi)}{\mathrm{P}\omega^{*}(a)}\int_{0}^{l}sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_{\xi}\frac{\xi}{l}\right)G_{1}(a,\xi,\psi_{k},\gamma)d\xi,\\ \dot{\theta}&=\varepsilon\frac{(\nu+2)ca(\nu+1,1,\psi)}{2a\mathrm{P}\omega^{*}(a)}\int_{0}^{l}sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_{\xi}\frac{\xi}{l}\right)G_{1}(a,\xi,\psi_{k},\gamma)d\xi,\end{aligned} \quad (2.47)$$

де $G_{1}(a,\xi,\psi_{k},\gamma)=\hat{G}(x,aX_{k}(x)ca(\nu+1,1,\psi_{k}),...,\gamma)$.

Права частина рівняння (2.47) є періодичною за аргументом γ. Саме вказана величина враховую дію стінок контейнера на оброблювальне середовище. У зв’язку із наведеним для системи диференціальних рівнянь (2.47) будемо розглядати два випадки: нерезонансний $\mu_{1}\neq\pi\Pi_{T}^{-1}\omega^{*}(a)$ і резонансний $\mu_{1}\approx\pi\Pi_{T}^{-1}\omega^{*}(a)$. Треба відзначити, що явище резонансу оброблювального середовища принципово відрізняється від явища резонансу навіть квазілінійних ($\nu=0$) моделей оброблювальних середовищ. Із наведеної умови резонансних коливань сипких оброблювальних середовищ випливає, що воно має місце при наближенні амплітуди коливань до певного значення, яке залежить не тільки від частоти зовнішнього збурення (частоти коливань стінок контейнера μ_{1}), але й параметру ν. Крім того, у зв’язку із тим, що процес віброоброблення супроводжується силами в’язко-пружного тертя, які

впливають на закон зміни амплітуди коливань оброблювального середовища саме проходження резонансу значно відрізняється від вказаного явища у квазілінійних системах.

Систему диференціальних рівнянь (2.47) у нерезонансному випадку представлено заміною змінних

$$\begin{aligned} a &= \bar{a} + \varepsilon W_1(\bar{a}, \bar{\psi}, \gamma), \\ \psi_k &= \bar{\psi}_k + \varepsilon W_2(\bar{a}, \bar{\psi}, \gamma), \end{aligned} \tag{2.48}$$

де $W_i(\bar{a}, \bar{\psi}, \gamma)$ - деякі обмежені періодичні по $\bar{\psi}$ і γ функції можна привести до вигляду

$$\begin{aligned} \dot{\bar{a}} &= \varepsilon A_1(\bar{a}), \\ \dot{\bar{\psi}}_k &= \omega^*(\bar{a}) + \varepsilon B_1(\bar{a}). \end{aligned} \tag{2.49}$$

В останніх співвідношеннях функції $A_1(\bar{a})$ і $B_1(\bar{a})$ виражаються через праві частини диференціальних рівнянь (2.47) і вони показують, що для нерезонансного випадку амплітудно-частотна характеристика оброблювального середовища не залежить значною мірою від сил дії стінок контейнера на оброблювальне середовище

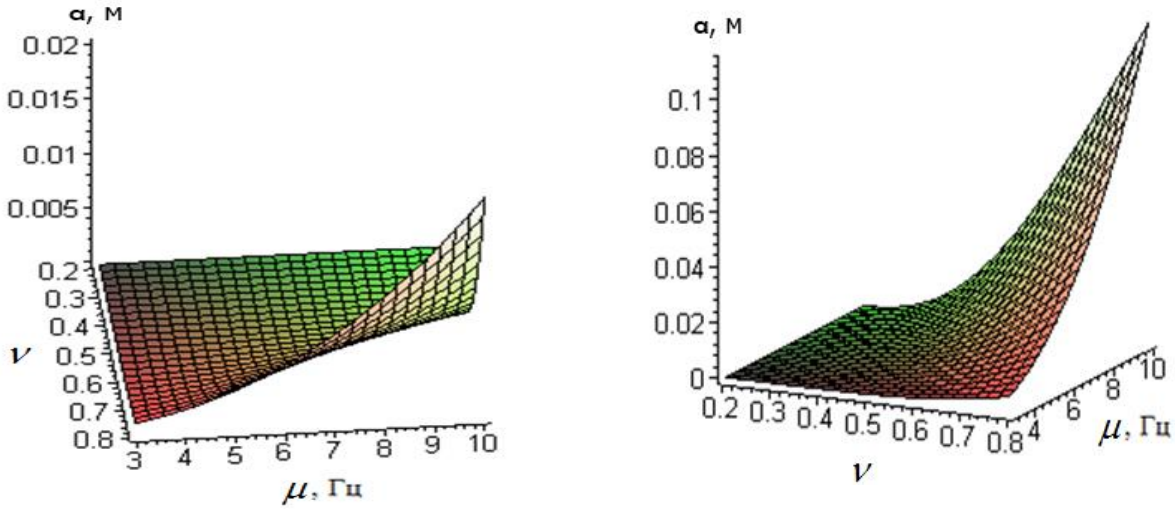
$$\begin{aligned} A_1(\bar{a}) &= \frac{\varepsilon}{4\pi \Pi_T \mathrm{P} \omega^*(\bar{a})} \int_0^{2\Pi_T} \int_0^{2\pi} \int_0^{l} sa\left(1, \frac{1}{\nu+1}, \Pi_\xi \frac{\xi}{l}\right) sa(1, \nu+1, \psi_k) F_1(a, \xi, \psi_k, \gamma) d\xi d\gamma d\psi_k, \\ B_1(\bar{a}) &= \frac{\varepsilon(\nu+2)}{8\pi \Pi_T \mathrm{P} \bar{a} \omega^*(\bar{a})} \int_0^{2\Pi_T} \int_0^{2\pi} \int_0^{l} sa\left(1, \frac{1}{\nu+1}, \Pi_\xi \frac{\xi}{l}\right) ca(\nu+1, 1, \psi_k) F_1(a, \xi, \psi_k, \gamma) d\xi d\gamma d\psi_k. \end{aligned} \tag{2.50}$$

.

Розглянемо тільки випадок головного резонансу, тобто $\omega_k(a) = \pi^{-1} \Pi_T \mu_1 + \varepsilon \delta(a)$. Очевидно він має місце, як було наголошено вище, при наближенні амплітуди коливань оброблювального середовища до a^*- корінь рівняння $\omega_k(a^*) = \pi^{-1} \Pi_T \mu$, тобто

$$a^* = \left\{ \left(\frac{\Pi_T}{\pi} \mu_1 \right)^2 \left[\frac{EF}{\rho} (\nu+1) \left(\frac{\Pi_\xi}{l} \right)^{\nu+2} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{\nu}} \tag{2.51}$$

На рис.2.15 подано залежність амплітуди коливань сипкого середовища, за якої має місце резонанс від параметрів μ_1, ν.



а) б)

Рисунок 2.15. Залежності резонансної амплітуди від параметру ν та частоти коливання сипкого середовища для різних характеристик середовища та контейнера а) $\frac{EF}{\rho} = 400, l = 1{,}2м$ б) $\frac{EF}{\rho} = 100, l = 1{,}2м,$

Проаналізувавши графічні залежності на рис. 2.15, можна зазначити, що зростання резонансної частоти коливань призводить до різкого збільшення амплітуди коливань сипкого середовища, причому остання досягає свого максимуму при мінімальній довжині робочого контейнера.

Тоді при зміні амплітуди коливань у малому околі a^* з точністю до величин вищого порядку мализни має місце співвідношення

$$\varepsilon\delta(a) = \frac{d\omega_k(a^*)}{da}(a - a^*). \tag{2.52}$$

У резонансному випадку амплітуда і частота коливань зв'язані із фазою зовнішніх сил, тому введемо у систему диференціальних рівнянь (2.47) “різницю фаз” $\varphi = \psi - \frac{\Pi_T}{\pi}\gamma$. З врахуванням останнього, рівняння для амплітуди й фази динамічного процесу запишемо у вигляді

$$\dot{a} = \frac{\varepsilon sa\left(1, \nu+1, \frac{\Pi_T}{\pi}\gamma + \varphi_k\right)}{\mathrm{P}\omega_k(a)} \int_0^l sa\left(1, \frac{1}{\nu+1}, \Pi_\xi \frac{\xi}{l}\right) F_1\left(a, \xi, \frac{\Pi_T}{\pi}\gamma + \varphi_k, \gamma\right) d\xi,$$

$$\dot{\varphi} = \frac{d\omega_k(a^*)}{da}(a - a^*) + \\ + \frac{\varepsilon(\nu+2)ca\left(\nu+1,1,\frac{\Pi_T}{\pi}\gamma+\varphi_k\right)}{2a\mathrm{P}\omega_k(a)}\int_0^l sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_\xi\frac{\xi}{l}\right)F_1\left(a,\xi,\frac{\Pi_T}{\pi}\gamma+\varphi_k,\gamma\right)d\xi. \tag{2.53}$$

З другого рівняння системи (2.53) випливає, що введена “різниця фаз” є повільно змінною величиною. Усереднюючи останні рівняння по швидкій змінній γ, маємо

$$\dot{a} = \varepsilon A(a,\varphi_k), \\ \dot{\varphi}_k = \frac{d\omega_k(a^*)}{da}(a - a^*) + \varepsilon B(a,\varphi_k), \tag{2.54}$$

де

$$A(a,\varphi_k) = \int_0^{2\pi}\frac{sa\left(1,\nu+1,\frac{\Pi_T}{\pi}\gamma+\varphi_k\right)}{2\pi\mathrm{P}\omega_k(a)}\int_0^l sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_\xi\frac{\xi}{l}\right)F_1\left(a,\xi,\frac{\Pi_T}{\pi}\gamma+\varphi_k,\gamma\right)d\xi d\gamma,$$

$$B(a,\varphi_k) = (\nu+2)\int_0^{2\pi}\frac{ca\left(\nu+1,1\frac{\Pi_T}{\pi}\gamma+\varphi_k\right)}{4\pi\mathrm{P}a\omega_k(a)}\int_0^l sa\left(1,\frac{1}{\nu+1},\Pi_\xi\frac{\xi}{l}\right)F_1\left(a,x,\frac{\Pi_T}{\pi}\gamma+\varphi_k,\gamma\right)d\xi d\gamma\ . \tag{2.55}$$

Система диференціальних рівнянь (2.55) у випадку:

а) в’язкого тертя відповідно до закону Болотіна на рис.2.16;

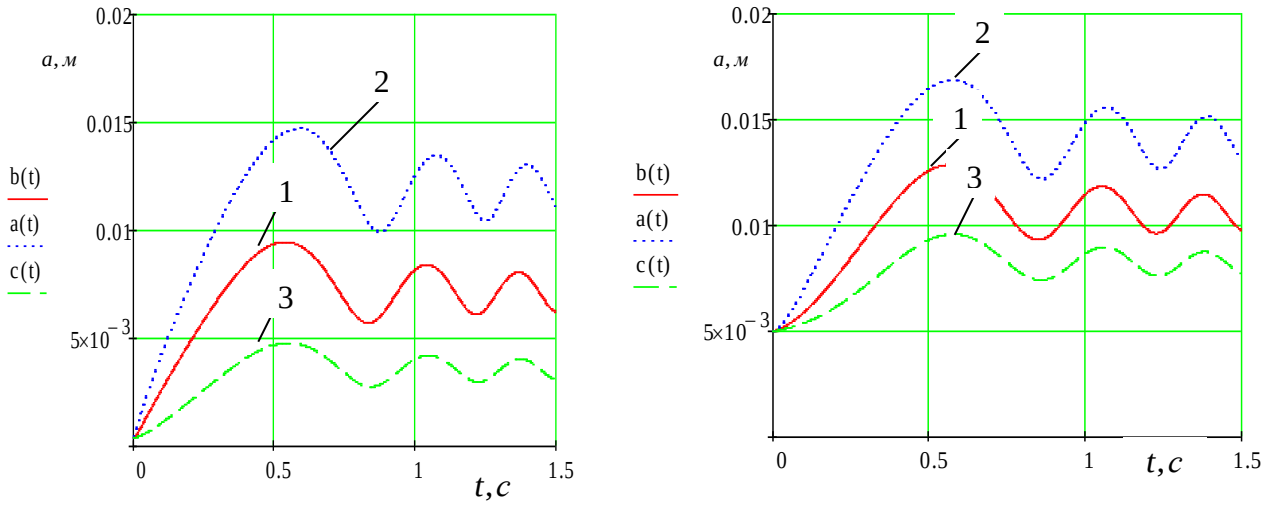
б) зовнішньої дії стінок контейнера за гармонійним законом $w(\xi,t)\big|_{\xi=0}=h\sin\gamma,\ w(\xi,t)\big|_{\xi=l}=h\sin\gamma$, що трансформується до вигляду

$$\dot{a} = \frac{4\varepsilon\vartheta\pi\Gamma(\bar{\nu})\Gamma\left(0.5+\frac{1}{\nu+2}\right)\Gamma\left(\frac{1}{\nu+2}\right)}{l^2(\nu+2)^2\Gamma^2(0.5+\bar{\nu})\Gamma^2\left(1.5+\frac{1}{\nu+2}\right)}a - \frac{3\delta\Gamma\left(\frac{3}{\nu+2}\right)\Gamma\left(0.5+\frac{1}{\nu+2}\right)}{2(\nu+2)\Gamma\left(\frac{1}{\nu+2}\right)\Gamma\left(1.5+\frac{3}{\nu+2}\right)\Gamma(1.5+\bar{\nu})}a^3 \\ + \frac{h}{a\omega^*(a)}\cdot\cos\left(\frac{\pi}{\Pi_T}\varphi\right),$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\nu}{2}\left[\frac{EF}{\rho}(\nu+1)\left(\frac{1}{l}\frac{\sqrt{\pi}\Gamma(\bar{\nu})}{\Gamma(0.5+\bar{\nu})}\right)^{\nu+2}\right]^{\frac{1}{2}}(a^*)^{\frac{\nu-2}{2}}(a-a^*) - \frac{h}{\omega^*(a)}\cdot\sin\left(\frac{\pi}{\Pi_T}\varphi\right). \tag{2.56}$$

На рис. 2.16 представлено зміна амплітуди при переході через резонанс за

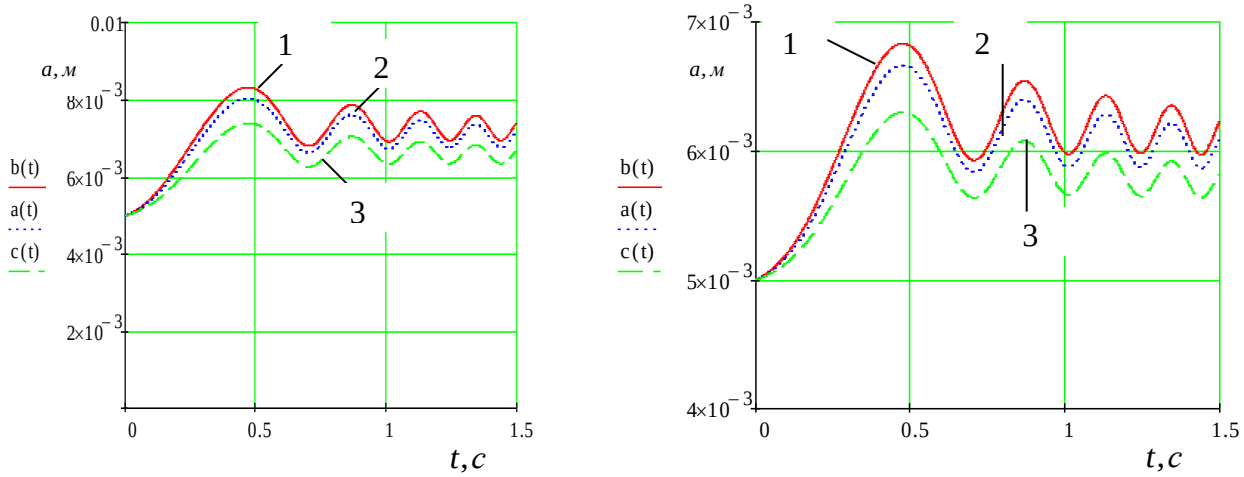
різних початкових її значень, а на рис. 2.17 - при різних густинах при таких значеннях параметрів $E = 1 \cdot 10^6$ Н/м^2, $k = 0{,}018$, $B = 400$, $B_0 = 0{,}01$, $F = 0{,}001$ м^2.



а) б)

Рисунок 2.16. Зміна амплітуди при проходженні через резонанс за різних початкових її значень

При різних густинах1- $\rho = 2500$ кг/м^3; 2- $\rho = 2700$ кг/м^3, 3- $\rho = 3750$ кг/м^3



а) $\nu = 0.22$ б) $\nu = -0.22$

Рисунок 2.17. Зміна амплітуди при проходженні через резонанс за різних густин середовища

Представлені графічні залежності показують що амплітуда проходження через резонанс приймає більше значення, а відтак процес віброоброблення є інтенсивнішим для: оброблювальних середовищ із більшим значенням показника нелінійності його пружних властивостей; більшої величини початкового її значення; повільнішого проходження резонансної зони; середовищ меншої густини; якщо амплітуда коливань оброблювального

середовища є меншою за значення параметру a^*, то резонансні коливання у системі не будуть мати місця, якщо ж більшою – то сили тертя, поступово зменшуючи останню до значення a^*, переведуть систему у резонансний стан.

2.7. Висновки

1. Побудована на основі закону Фохта пружнов'язка модель руху сипкого середовища контейнера вібромашини, представлено однорідне середовище у вигляді нашарування пружно-пластичних балок, товщина яких значно менша їх ширини. Взаємодія сипкого середовища із контейнером описується жорсткою, пружною, шарнірною моделями контакту.

2. Шляхом використання загальних ідей збурень побудовано і досліджено розв'язки отриманих рівнянь руху шару сипкого середовища для нерезонансного та резонансного випадків.

3. Показано, що амплітуда проходження через резонанс приймає більше значення, а відтак процес віброоброблення є інтенсивнішим для:

- оброблювальних середовищ із більшим значенням показника нелінійності його пружних властивостей;
- більшої величини початкового її значення;
- повільнішого проходження резонансної зони;
- середовищ меншої густини.

4. Встановлено, якщо амплітуда коливань оброблювального середовища є меншою за значення параметру a^*, то резонансні коливання у системі не будуть мати місця, якщо ж більшою – то сили тертя, поступово зменшуючи останню до значення a^*, переведуть систему у резонансний стан. Так процес буде повторюватись.

РОЗДІЛ 3
ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

Програма та методика експериментальних досліджень базується на основі викладеної мети та задач дисертаційної роботи, згідно якої передбачається:

1. На основі проведених досліджень технологічних процесів та оснащення для зачистки, шліфування та полірування деталей різної геометричної форми в сипучому абразивному середовищі розробити технологічний процес та необхідне технологічне оснащення.

2. Спроектувати та виготовити технологічне обладнання для проведення експериментальних досліджень вібраційно-відцентрової установки з сипучим абразивним середовищем, а саме байкаліт зелений та абразив ПТС-8 для оброблення деталей складної форми.

3. Провести дослідження технологічного процесу обробки деталей складної форми для визначення силових параметрів процесу вібраційно-відцентрового оброблення, продуктивність та якість.

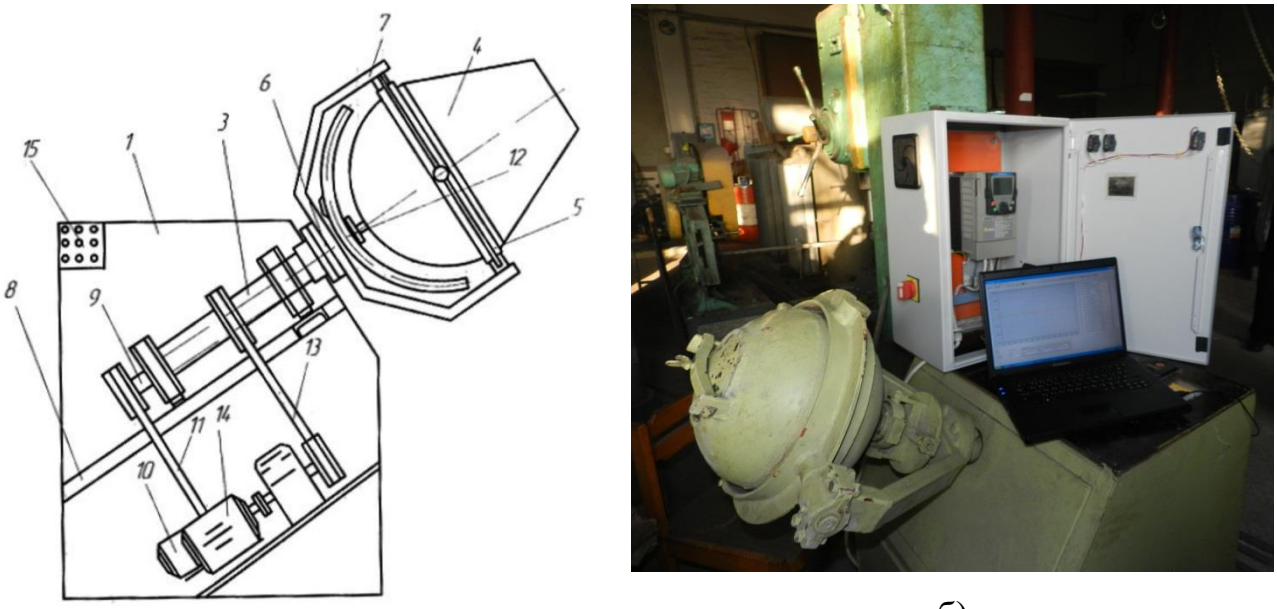
4. Розробити програму та методику проведення багатофакторного експерименту з виведенням рівнянь регресії впливу конструктивних і кінематичних параметрів технологічного процесу на силові показники вібраційно-відцентрового оброблення деталей.

5. Статистично обробити результати експериментів та уточнити достовірність запропонованих теоретичних розрахунків, щодо визначення силових та конструктивних параметрів устаткування, що адекватно описують досліджувані процеси з подальшим впровадженням у виробництво результатів досліджень.

3.2. Технологічне оснащення для технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей в сипучому абразивному середовищі

3.2.1 Вібраційно-відцентрова установка

Вібраційно-відцентрова установка зображена рис. 3.1 (загальний вигляд) [115].



а) б)

Рисунок 3.1. Стендове обладнання - вібраційно-відцентрова установка
а) конструктивна схема; б) загальний вигляд експериментальної установки

Вібраційно-відцентрова установка виконана у вигляді закритого корпуса 1, зрізаного зверху спереду 2 під кутом 30° до горизонту, в зоні якого на пустотілому валу 3 встановлена робоча камера 4 конічно-сферичної форми, яка встановлена в рухоме кільце 5, яке при допомозі підшипникового вузла 6 зв'язано з ведучою вилкою 7 і жорстко з'єднано з пустотілим валом 3 під кутом 30° до горизонту. Останній жорстко встановлений на підставці 8 всередині закритого корпуса 1 і при допомозі підшипникових вузлів зв'язано з ведучою вилкою 7, а всередині пустотілого вала 3 вільно встановлено другий вал 9 з можливістю кругового провертання.

Останній має привід від окремого двигуна 10 через пасову передачу 11, і цей вал є приводом кривошипного механізму зі складними кутовими коливаннями робочої камери 4. Пустотілий вал 3 жорстко встановлений в опори 12 і за допомогою пасової передачі 13 жорстко під'єднано до другого електродвигуна 14. У верхній частині камери встановлено пульт керування 15, який підключений до електросилового поля.

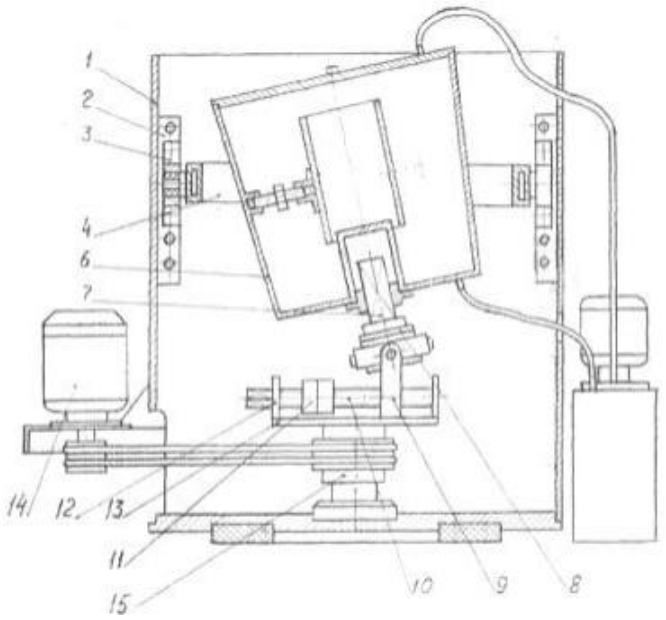
Робота вібраційно-відцентрової установки здійснюється наступним чином. В робочу конічно-сферичну камеру 4 завантажують готові деталі для їх гартування, поверхневої обробки або інших цілей і абразивні матеріали в певних пропорціях. За допомогою пульта керування 15 включають установку і задають відповідні параметри процесу обробки. При цьому: ємність робочої камери 14 дм^3, частота обертання камери – 15-45 об/хв. Характеристики коливань - амплітуда 4°, частота 15…25 Гц. Потужність електродвигуна віброприводу - 0,5 кВт. Час обробки визначається заданими технологічними параметрами. До переваг установки належить розширення технологічних параметрів і підвищення якості оброблення.

3.2.2 Пристрій для вібраційної обробки

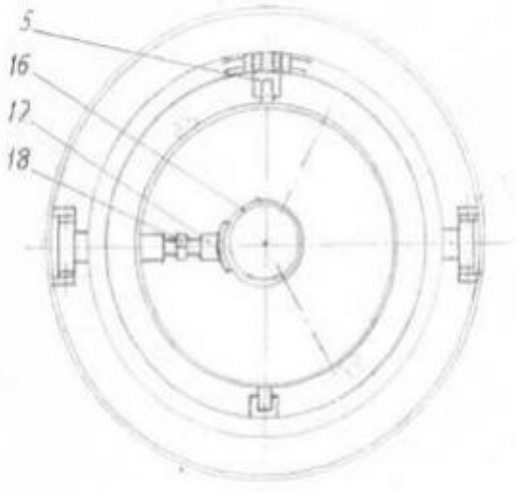
Пристрій для вібраційної обробки (рис. 3.2) включає основу, в опорах якої встановлено за допомогою цапф поворотне кільце, шарнірно зв'язане за допомогою двох опор з вертикальною камерою, рухомо з'єднаною з віброзбуджувачем за рахунок водила. Крім цього, всередині робочої камери за допомогою спеціальних гвинтів з лівою і правою різями та захватами закріплені активатори або великогабаритні деталі для обробки.

Пристрій для вібраційної обробки складається зі станини 1, виконаної із сталевої труби, до нижнього торця якої приварено основу, виготовленої із товстого стального листа. Вздовж діаметрально протилежних твірних в середині поверхні станини приварені кронштейни 2 для кріплення опор 3, які є зварним корпусом, в який завулканізована гумою капронова втулка 50 рухомого з'єднання з цапфами рамки 4. За допомогою знімних цапф 5 з рамкою

4 шарнірно з'єднана робоча камера 6. До дна робочої камери приварена ступиця з квадратним отвором, в який вільно входить водило 7, посаджене нижнім своїм кінцем в сферичний підшипник кочення. Корпус сферичного підшипника 8, за допомогою шарнірів, зв'язаний з вилкою 9, яка має різьбовий отвір для з'єднання з ходовим гвинтом 10, який має в наявності праву і ліву різі. На ділянку з лівою різзю накручується противага 11.



а)



б)

Рисунок 3.2. Конструктивна схема пристрою для вібраційної обробки [117]

Ходовий гвинт 10 встановлено в опорах 12 кривошипа 13, який обертається за допомогою клиноремінної передачі від електродвигуна 14, а стійка 15 кривошипа 13 жорстко кріпиться до основи станини. Активатор 16, який збільшує площу передачі імпульсу сипучому абразивному робочому середовищу, чи великогабаритна деталь, різної складності геометричної форми, закріплюється захватами 17 за допомогою спеціальних гвинтів 18, які мають в наявності праву і ліву різі. Пристрій працює наступним чином. В першому варіанті в робочу камеру 6 завантажують гранули сипучого абразивного середовища і деталі, які потрібно обробити. В другому варіанті в робочій камері 6 замість активатора 16 закріпляють великогабаритну деталь, яку потрібно обробити, завантажують гранули сипучого абразивного середовища і деталі малої геометричної 5 форми, які оброблятимуть. за допомогою ходового гвинта 10 переміщується вилка 9 і противага 11 на задану величину, що визначає потрібний амплітудний режим обробки. Після процесу завантаження і встановлення потрібного режиму обробки здійснюється пуск електродвигуна 14. Електродвигун 14 через клинопасову передачу обертає кривошип 13 ходового гвинта 10, який знаходиться на опорі 12. Через корпус сферичного підшипника 8 і водила 7, зв'язаного 10 ступицею з квадратним отвором з робочою камерою 6, від електродвигуна 14, за допомогою стінок робочої камери і активатора 16, передаються вібраційно-відцентрові коливання абразивному робочому середовищу. Після закінчення обробки на заданому амплітудному режимі здійснюється зупинка електродвигуна 14. За рахунок збільшення площі надання вібраційного імпульсу для обробляючого абразивного робочого середовища і зменшення його товщини, що приводить до збільшення сили взаємодії абразивної гранули з оброблюваною поверхнею деталі, розширяються можливості технологічного процесу вібраційної обробки і підвищується продуктивність вібраційного пристрою.

Для заміру вимірювальних вузлів наведено індикатор універсальний зображено в додатку Б.

3.3. Характеристика зразків та устаткування для експериментального дослідження

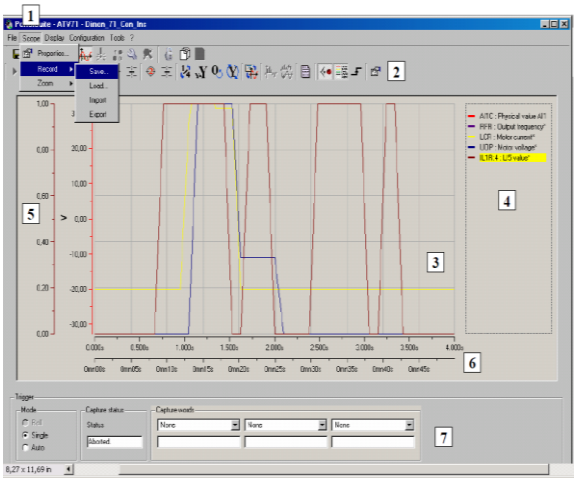
Для визначення продуктивності процесу та якості оброблення поверхні деталі при проведенні експериментальних досліджень було встановлено основні закономірності процесу вібраційно-відцентрового оброблення. При розробці експериментальної частини здійснено визначення технічної можливості установки при операціях виготовлення та ремонті деталей машин і приладів.

Для зняття показів експериментальних даних використовували частотний перетворювач Altivar 71 з регульованою частотою обертання для запуску двигуна в діапазоні 0,3 кВт до 2,2 кВт та програмним забезпеченням PowerSuite v.2.5.0. [58].

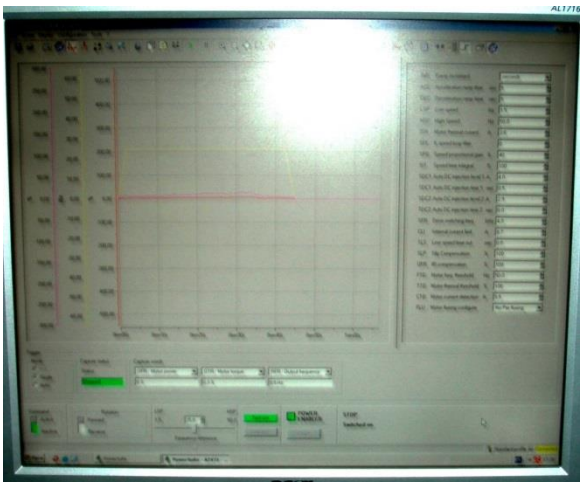
Через силові кабелі здійснювали з’єднання Altivara 71 до електросистеми вібраційно-відцентрової установки та ПК для виконання технологічного процесу та запуску вібраційно-відцентрової установки, а також для проведення експериментальних досліджень.

Під час проведення технологічного процесу вібраційної обробки деталей підвищується продуктивність вібраційного пристрою та на дисплеї комп’ютера відображаються дані зміни крутного моменту двигуна в часі та графічні залежності у вікні програми PowerSuite v.2.5.0., що відтворювалися у вікні осцилографа (рис.3.3).

Дані виміри технологічного процесу вибиралися з кроком в діапазоні 0,001-1 с з максимальною кількістю точок, яка становила 4000. У вікні осцилографа (Scope) наведено кількість сигналів, що становило 4, а кількість точок одного сигналу: 2-2000, 4-1000.



а) - вікно осцилографа



б) загальний вигляд процесу зняття даних на ЕОМ

Рисунок 3.3. Процес зняття даних у вікні програми Power Suite

Загальний вигляд перетворювача частоти Schneider Electric ALTIVAR 71 для проведення експериментальних досліджень наведено на рис. 3.4.

Рисунок 3.4. Загальний вигляд перетворювача частоти Schneider Electric ALTIVAR 71 (ATV 71)

Експериментальні дослідження фіксувалися у відсотках від номінального значення крутного моменту та потужності двигуна. Визначення номінального значення крутного моменту двигуна наведено [58]:

$$M_n = \frac{9554 \cdot P_n}{n} \quad \text{(Н·м)},$$

де P_n – номінальна потужність двигуна (кВт);

n – частота обертання (об/хв).

В процесі проведення експериментального дослідження використовували контрольно-вимірювальну апаратуру. При визначенні шорсткості та оцінці якісних показників поверхні використовували стандарт ГОСТ 2798-73. Здійснення вимірювань та зняття профілограм проводили за допомогою профілографа-профілометра заводу „Калібр” моделі 296 (рис. 3.5).

Рисунок 3.5. Загальний вигляд профілографа-профілометра заводу „Калібр” моделі 296

Вимірювання мікротвердості на стальних зразках проводили згідно відповідного ГОСТ 9450-60 та методиці за допомогою приладу ПМТ-3, що наведено на рис.3.6, технічна характеристика якого представлена в додатку В1.

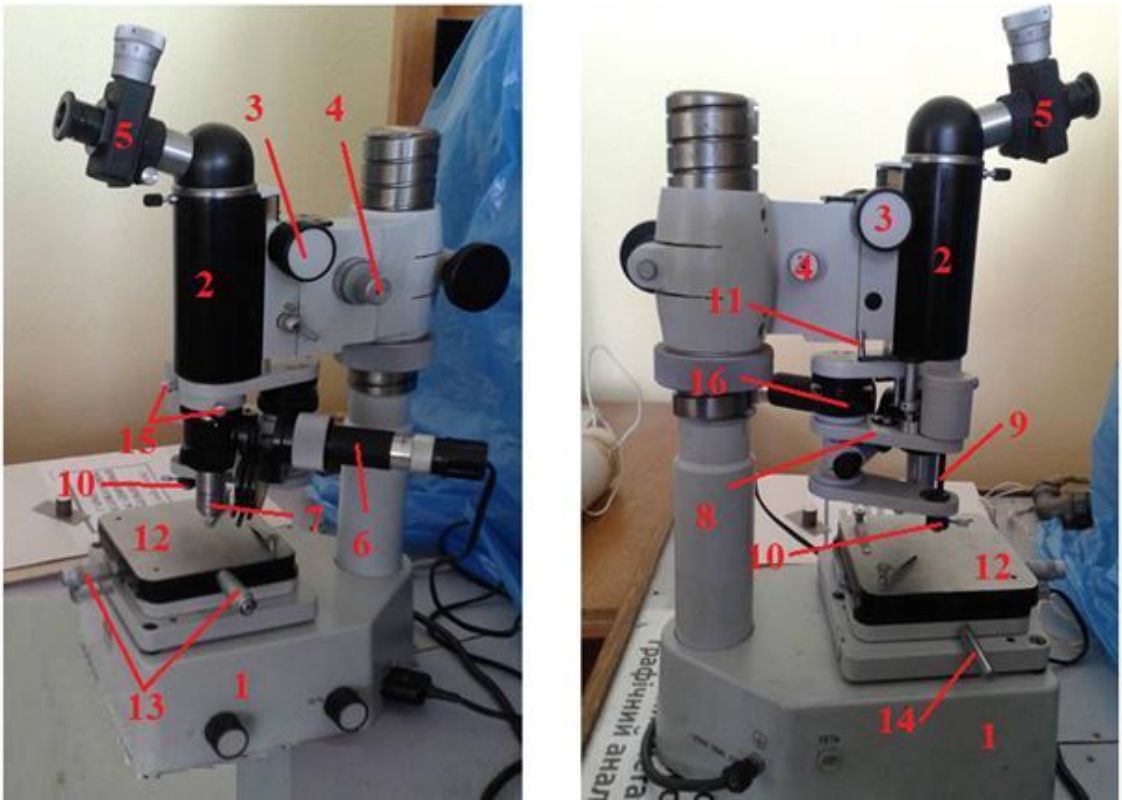


Рисунок 3.6. Загальний вигляд приладу типу ПМТ-3 для визначення мікротвердості

На результати вимірюванню мікротвердості важливий вплив має підготовча поверхня деталі до випробування. При шліфуванні і поліруванні покриття відбувається наклеп, що збільшує твердість поверхневих шарів. Встановлено, що товщина наклепу залежить від виду покриття, а саме для сталі - 7мкм. При підвищених навантаженнях вплив наклепу практично не позначається на результатах.

Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено деталі з вуглецевих і легованих конструкційних сталей та алюмінію, що дозволило здійснити визначення продуктивності процесу. Дані деталі із сталі Ст3, сталі 45 наведено на рис. 3.7.[36, 106]

Рисунок 3.7. Експериментальні зразки для проведення експериментальних досліджень

В якості робочих середовищ використовували відходи битих абразивних кругів та природний байкаліт рис. 3.8. При цьому абразивні частинки попередньо галтувалися і розділялися на фракції за величиною гранул: 5...10 мм, 15...20 мм, 25...30 мм.

б)

а)

Рисунок 3.8. Робоче середовище а) природний байкаліт б) гранульований абразивний матеріал ПТС-8

Критерієм оцінки продуктивності процесу вібраційно-відцентрового оброблення вибрано вагове зняття металу з одиниці поверхні обробленого зразка (Q, г/см^2). Зважування зразків проводилось на аналітичних вагах моделі ВЛА-200М з точністю до 0,1 мг. Зняття металу фіксувався через 15 хв. до 90 хв. оброблення. Об'єм деталей, робочого середовища і вільного незаповненого простору в % від робочої камери становить 20:50:30, амплітуда кутових коливань А° (2…10 град.), частота коливань ω (15 Гц), час обробки Т (90 хв.). Робочим середовищем вибрано битий круг марки 24А, 40НСТ і грануляцією 10…30 мм.

3.4. Методика проведення багатофакторних експериментальних досліджень технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей в сипучому абразивному середовищі

Методика проведення багатофакторного експерименту з виведенням рівнянь регресії впливу конструктивних і кінематичних параметрів технологічного процесу на силові показники вібраційно-відцентрового оброблення деталей з визначенням продуктивності, шорсткості, мікротвердості (параметр оптимізації) дало можливість провести три окремі експерименти, тобто визначення залежності від зміни трьох основних факторів наведена в додатку В2.

Для статистичної обробити результати експериментів та уточнення достовірність запропонованих теоретичних розрахунків щодо визначення силових та конструктивних параметрів устаткування, що адекватно описують досліджувані процеси адекватності теоретичних досліджень (теоретичної моделі) продуктивності зняття металу з одиниці площі вібраційно-відцентрового оброблення деталей $Q_{пит}$, г/см^2, шорсткості R_a, мкм та мікротвердості H_V, МПа проведено експериментальні дослідження за допомогою лабораторного обладнання, яке наведена на рис. 3.1.

Основні незалежні змінні фактори, які впливають на процес вібраційно-відцентрового оброблення деталей:

а) визначення продуктивності питомого зняття металу:

- коефіцієнт форми гранули $k = b/a$, який кодували індексом x_1;

- амплітуда кутових коливань A , яку кодували індексом x_2;

- кута повороту робочої камери β, який кодували індексом x_3.

б) визначення шорсткості:

- частота коливань ω, яку кодували індексом x_1;

- тривалість обробки деталі T , яку кодували індексом x_2;

- ступінь заповнення робочої камери K (%), яку кодували індексом x_3;

в) визначення мікротвердості:

- кута повороту робочої камери β, який кодували індексом x_1.

- тривалість обробки деталі T , яку кодували індексом x_2;

- амплітуда кутових коливань A , яку кодували індексом x_3.

На основі незалежних змінних факторів встановлено, що для визначення продуктивності питомого зняття металу, шорсткості та мікротвердості, було вибрано апроксимуючі математичні моделі у вигляді функціональної залежності $Q_{пит} = f_{пит}(x_1, x_2, x_3)$, $R_a = f_{Ra}(x_1, x_2, x_3)$; $H_V = f_V(x_1, x_2, x_3)$.

Для реалізації експериментальних досліджень з визначення продуктивності питомого зняття металу, шорсткості та мікротвердості було складено процес роботи лабораторної установки, що дає можливість визначити функціональні залежності, а саме $Q_{пит} = f_{пит}(x_1, x_2, x_3)$, $R_a = f_{Ra}(x_1, x_2, x_3)$, $H_V = f_V(x_1, x_2, x_3)$ був таким:

- здійснення кодування змінних вхідних факторів,

- побудова таблиць вхідних факторів, визначення верхнього і нижнього рівнів варіювання кожного фактора та інтервалу його варіювання;

- побудова загального числа експериментів однієї повторності;

- побудова план-матриці порядку проведення експериментальних досліджень;

- побудова рандомізації план-матриці;

- побудова експериментів згідно з рандомізованою план-матрицею;

- опрацювання експериментального масиву даних з метою одержанням емпіричного залежностей та коефіцієнтів;

- здійснення перевірки відтворення одержаних експериментальних даних;

- значимість коефіцієнтів емпіричних залежностей;

- побудова адекватної математичної моделі в реальних коефіцієнтів емпіричних залежностей;

- побудова графоаналітичних результатів експериментального масиву дослідження

Для побудови план-матриці планування експериментальних досліджень [44] вводилося незалежні змінні фактори верхнього, нижнього та нульового рівнів варіювання факторів, відповідно +1, -1, 0, тобто багатофакторний експеримент будували на трьох рівнях варіювання вхідних незалежних факторів та реалізовували експеримент типу ПФЕ 3^3.

Таким чином, при проведенні експериментальних досліджень незалежні змінні фактори є неоднорідні, а їх одиниці вимірювання є різні, внаслідок чого їх приводили до єдиної системи розрахунків шляхом переходу від дійсних значень до кодованих.

Встановлено, що зв'язок між кодованим x_i та натуральним X_i змінним фактором виражали із залежністю [1]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \tag{3.1}$$

де X_{i0} – натуральне значення і-го фактору на нульовому рівні;

ΔX_i – інтервал варіювання і-го фактору.

Багатофакторний експеримент проводився на трьох рівнях варіювання факторів. Нульовий рівень кожного вхідного незалежного фактора, виразили за залежністю [1]:

$$X_0 = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}, \tag{3.2}$$

де X_0 – числове значення нульового рівня вхідного фактору;

X_{max} – числове значення верхнього рівня вхідного фактору;

X_{min} – числове значення нижнього рівня вхідного фактору.

Інтервал варіювання факторів [1]:

$$\Delta X_i = \frac{X_{max} - X_{min}}{2}. \qquad (3.3)$$

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання наведено у табл. 3.1 для визначення продуктивності питомого зняття металу, визначення шорсткості наведено у табл. 3.2 та визначення мікротвердості у табл. 3.3

Таблиця 3.1.

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання для проведення експериментальних досліджень з визначенням продуктивності питомого зняття металу

Фактори	Позна-чення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур./кодовані		
	натур.	код.				
коефіцієнт форми гранули $k = b/a$	X_1	x_1	0,2	0,5/(+1)	0,3/(0)	0,1/(-1)
амплітуда кутових коливань A ,град	X_2	x_2	2	6/(+1)	4/(0)	2/(-1)
кута повороту робочої камери β, град	X_3	x_3	10	35/(+1)	25/(0)	15/(-1)

Таблиця 3.2.

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання для проведення експериментальних досліджень з визначенням шорсткості

Фактори	Позна-чення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур./кодовані		
	натур.	код.				
частота коливань ω, Гц	X_1	x_1	5	25/(+1)	20/(0)	15/(-1)
тривалість обробки заготовки T, хв	X_2	x_2	15	45/(+1)	30/(0)	15/(-1)
ступінь заповнення робочої камери K (%),	X_3	x_3	15	80/(+1)	65/(0)	50/(-1)

Таблиця 3.3.

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання для проведення експериментальних досліджень з визначенням мікротвердості

Фактори	Позна-чення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур./кодовані		
	натур.	код.				
тривалість обробки заготовки T, хв	X_1	x_1	20	55/(+1)	35/(0)	15/(-1)
кута повороту робочої камери β, град	X_2	x_2	10	35/(+1)	25/(0)	15/(-1)
амплітуда кутових коливань A ,град	X_3	x_3	2	6/(+1)	4/(0)	2/(-1)

Після проведення кодувань вхідних незалежних факторів будували план-матриці багатофакторного експерименту типу ПФЕ 3^3 для числа дослідів $N = P^k$, де Р – кількість рівнів варіювання, к – кількість діючих незалежних вхідних факторів експерименту, які представлено для проведення експериментальних досліджень з визначенням продуктивності питомого зняття металу, шорсткості та мікротвердості, які відповідно наведено у додатку Б.

Статистична обробка результатів експериментального масиву даних та достовірність запропонованих теоретичних розрахунків щодо визначення силових та конструктивних параметрів устаткування здійснювалася за допомогою пакету прикладних програм на ПК „Statistica 6.0”.

На основі програмного продукту побудували залежності поверхонь відгуку параметра оптимізації та двомірний перерізів поверхонь відгуку для наочного зображення результатів проведених експериментальних досліджень [1, 40, 67,-68, 98, 112, 130], що адекватно описують досліджувані процеси з подальшим впровадженням у виробництво результатів досліджень.

3.5. Висновки

1. Розроблено програму експериментальних досліджень технологічних процесів та оснащення для зачистки, шліфування та полірування деталей різної геометричної форми в сипучому абразивному середовищі та необхідне технологічне оснащення.

2. Описана методика використання стендового обладнання для проведення експериментальних досліджень процесу з визначенням зміни продуктивності питомого зняття металу, шорсткості та визначення мікротвердості з використанням частотного перетворювача Altivar 71 з програмним продуктом PowerSuite v.2.5.0.

3 Розроблено методику експериментальних досліджень ПФЕ 3^3, яка дала можливість визначити зміни продуктивності питомого зняття металу при вібраційно-відцентровому обробленні деталей від зміни величин коефіцієнта форми гранули $k = b/a$, амплітуда кутових коливань A та кута повороту робочої камери β, град, тобто $Q_{пит} = f_{пит}(k = b/a, A, \beta)$.

4. Наведена методика проведення багатофакторного експерименту типу ПФЕ 3^3, яка передбачала визначення шорсткості R_a при вібраційно-відцентровому обробленні деталей від зміни основних факторів: частота коливань ω, тривалість обробки деталі T, ступінь заповнення робочої камери K тобто, $R_a = f_{Ra}(\omega, T, K)$ а також мікротвердість при поліруванні від основних факторів: кута повороту робочої камери β, тривалості обробки деталі T та амплітуди кутових коливань A тобто, $H_v = f_v(\beta, T, A)$.

5. Приведено послідовність статистичної обробки результатів досліджень для одержання коефіцієнтів рівнянь регресії, що адекватно описують досліджуваний технологічний процес.

РОЗДІЛ 4
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Результати досліджень вібраційно-відцентрового оброблення з визначенням питомого зняття металу

Для оцінки методів обробки деталей в сипучому абразивному середовищі використовують продуктивність, яка дозволяє визначити відносне зняття металу оброблюваної поверхні з одиниці площі. На основі проведених теоретичних досліджень технологічних процесів вібраційно-відцентрової обробки можна сказати, що коливні або інші види руху підвищують процес вібраційної обробки деталей. Для проведення експериментальних досліджень використовували матеріали: Ст 3 (σ_{TO}=368 МПа, *П*= 526 МПа), сталь 45 [29, 132] для визначення продуктивності питомого зняття металу на установках, які приведено в розділі 3.

В процесі встановлення питомого зняття металу від часу обробки деталей визначено, що на цю величину впливає вихідна шорсткість поверхні. Для цього експериментальні зразки оброблювались на режимах, що забезпечують шорсткість поверхні одного класу з вихідною величиною R_a≈4,3 мкм.

Для отримання результатів математичної моделі, що характеризують залежність продуктивності процесу питомого зняття металу від зміни коефіцієнта форми гранули $k = b/a$, амплітуди кутових коливань *A* та кута руху робочої камери *β* було проведено багатофакторний експеримент типу ПФЕ 3^3, методику якого приведено в підрозділі 3.4. Одержання результатів дозволили побудувати таблицю експериментів типу ПФЕ 3^3, яка наведена згідно табл. 3.2 та в додатку В 1.

Вхідні змінні фактори типу ПФЕ 3^3 мали вигляд:

- коефіцієнт форми гранули $k = b/a$, який кодували індексом x_1;
- амплітуда кутових коливань *A* , яку кодували індексом x_2;
- кута повороту робочої камери *β*, який кодували індексом x_3.

Отримані експериментальні дані дали змогу побудувати регресійні залежності в кодованій формі, що характеризують залежність питомого зняття металу від часу обробки деталей, $Q_{пит} = f_{пит}(x_1, x_2, x_3)$ відповідно для сталі Ст 3 і сталі 45 в кодованих величинах:

$$Q^{ст3}{}_{пит(x_1,x_2,x_3)} = 35,635 - 7,084x_1 + 0,336x_2 + 3,826x_3 + 0,417x_1x_2 - \\ +1,667x_1x_3 - 0,054x_2x_3 + 9,723x_1^2 + 0,006x_2^2 - 0,236x_3^2 \quad (4.1)$$

$$Q^{ст45}{}_{пит(x_1,x_2,x_3)} = 15,634 - 7,071x_1 + 0,311x_2 + 3,716x_3 + 0,41x_1x_2 - \\ +1,647x_1x_3 - 0,049x_2x_3 + 9,701x_1^2 + 0,0042x_2^2 - 0,286x_3^2 \quad (4.2)$$

де x_1 – коефіцієнт форми гранули, мм;

x_2 – амплітуда кутових коливань, град;

x_3 – кут руху робочої камери, град.

Дані характеристики факторів та їх значення результатів наведено у табл. 4.1

Таблиця 4.1

Характеристика факторів та значення їх рівнів

Кодоване позначення фактора	Найменування фактора	Значення рівнів фактора
x_1	коефіцієнт форми гранули $k = b/a$	0,1-0,3-0,5
x_2	амплітуда кутових коливань A, град	2-4-6
x_3	кута повороту робочої камери β, град	15-25-35

Перевірено значимості коефіцієнтів регресійної залежності та адекватності одержаного теоретичного розподілу випадкових величин, яке одержано із залежності (4.1) та здійснено опис за даною методикою в розділі 3 рівняннями (3.7-3.14) досліджуваного процесу. Статистичні розрахунки перевірок значимості коефіцієнтів регресійних залежностей на адекватність моделі наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Результати експериментальних досліджень питомого зняття металу від часу обробки деталей

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У повторюваність			Середні значе-ня, У
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	1	2	3	$У_{сер.}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	45	47	46	46
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	51	49	50	50
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	46	48	51	48
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	53	56	50	53
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	58	62	54	58
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	55	55	55	55
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	48	52	50	50
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	50	56	53	53
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	51	51	51	51
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	52	54	50	52
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	57	59	55	57
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	55	55	55	55
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	53	56	50	53
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	60	66	63	63
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	57	59	55	57
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	53	56	50	53
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	58	62	54	58
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	54	55	56	55
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	51	49	50	49
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	54	54	54	54
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	52	49	51	51
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	53	56	50	53
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	60	62	64	62
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	55	59	57	57
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	50	50	50	50
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	60	62	58	61
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	55	55	55	55

Внаслідок здійснених розрахунків (додаток В.2) значень коефіцієнтів регресійної залежності рівняння (3.15) для сталі Ст 3 $b_{11} = -7,084$; не виконує умов значимості відповідно до формули (3.10).

На основі цього регресійна залежність, яка відтворює функціональну залежність зміни продуктивності питомого зняття металу з деталей від коефіцієнта форми гранули, амплітуди кутових коливань та кута руху робочої камери для Ст 3 та сталі 45:

$$Q^{cm3}{}_{num(k,A,\beta)} = 34,33 + 0,372A + 3,86\beta + 0,388kA + 1,552k\beta - \\ -0,054A\beta - 0,236\beta^2 . \quad (4.3)$$

$$Q^{cm45}{}_{num(k,A,\beta)} = 17,481 + 0,372A + 1,971\beta + 0,388kA + 1,552k\beta - 0,052A\beta . \quad (4.4)$$

Розрахункова регресійна модель (4.3-4.4) дає можливість визначити продуктивності питомого зняття металу з деталей від коефіцієнта форми гранули, амплітуди кутових коливань та кута повороту робочої камери в межах $0,1 \le k = b/a \le 0,5$; $2 \le A \le 6$ (град), $15 \le \beta \le 35$ (град).

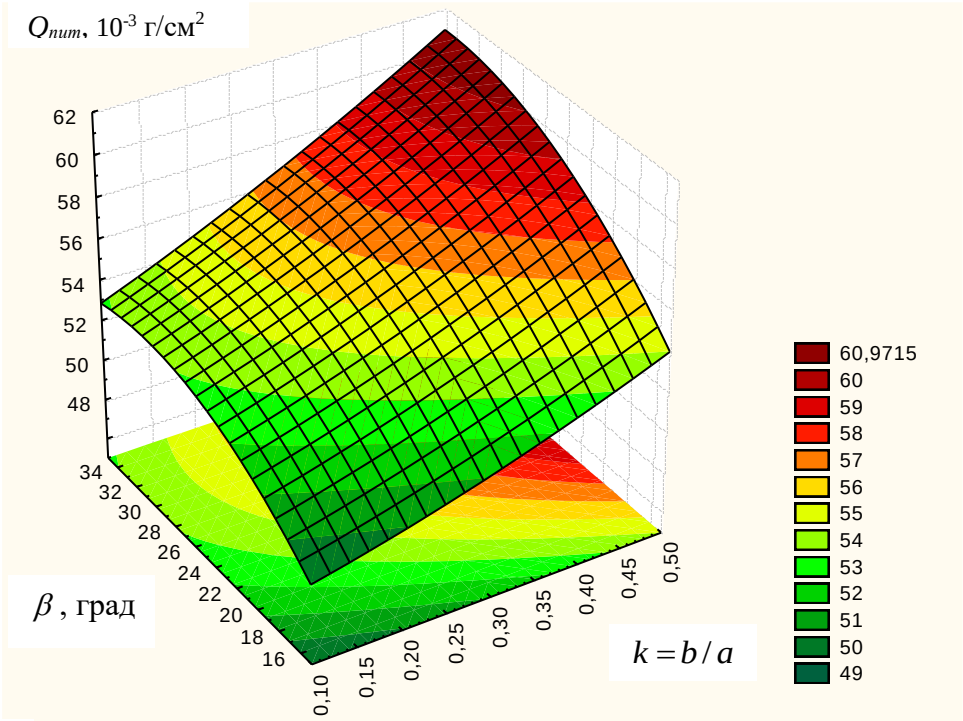
Адекватність моделі регресійної залежності здійснювали за критерієм Фішера, що дозволяє підтвердити, що адекватність даної моделі при п’яти відсотках значимості не відкидається.

На основі регресійної моделі побудовано графічні залежності поверхонь відгуку параметра оптимізації й двомірний переріз поверхонь, які відображають результат експериментальних досліджень. Статистична обробка результатів експериментів та уточнення достовірність запропонованих результатів експериментальних досліджень здійснювалася на ПК.

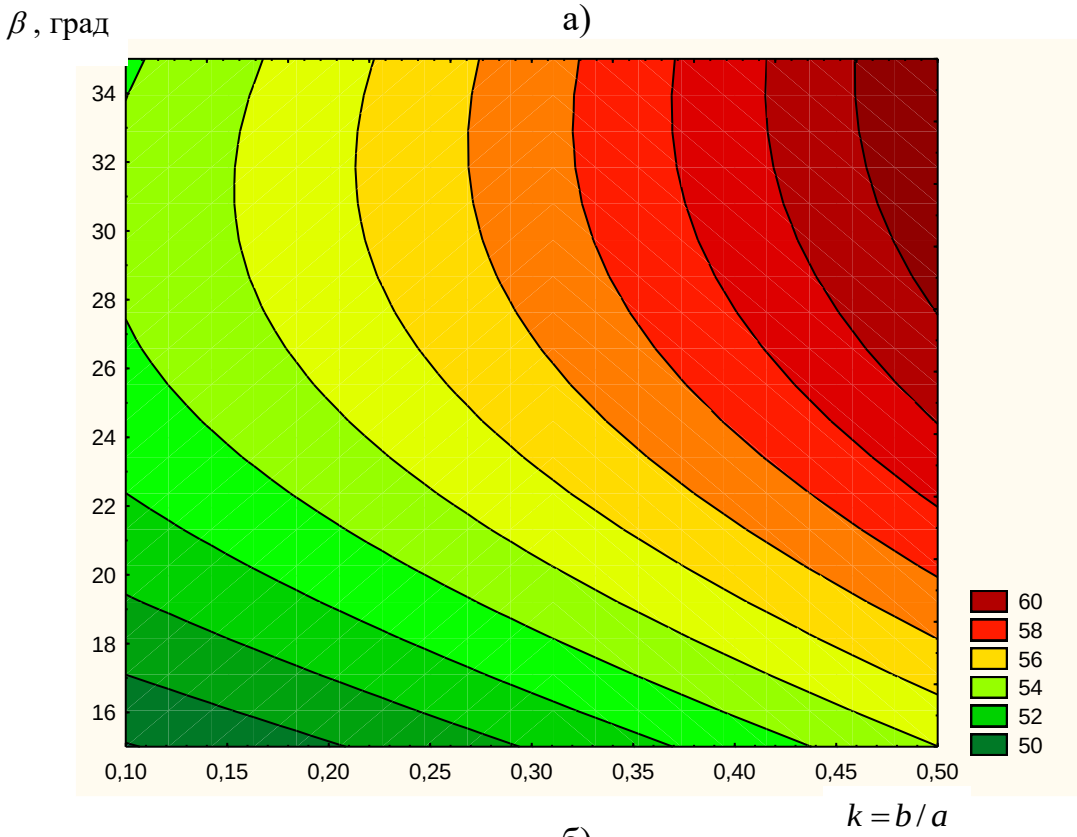
На основі пакету статистичної програми для ПК „Statistica” було побудовано залежності зміни продуктивності питомого зняття металу з деталей від коефіцієнта форми гранули, амплітуди кутових коливань кута повороту робочої камери та здійснена оцінка за стандартними методиками [1, 98, 112].

На рис. 4.1- 4.3 наведено відповідно поверхні відгуку та двомірні перерізи поверхонь відгуку залежності продуктивності питомого зняття металу з деталей

від коефіцієнта форми гранули, амплітуди кутових коливань та кута руху робочої камери для Ст 3.

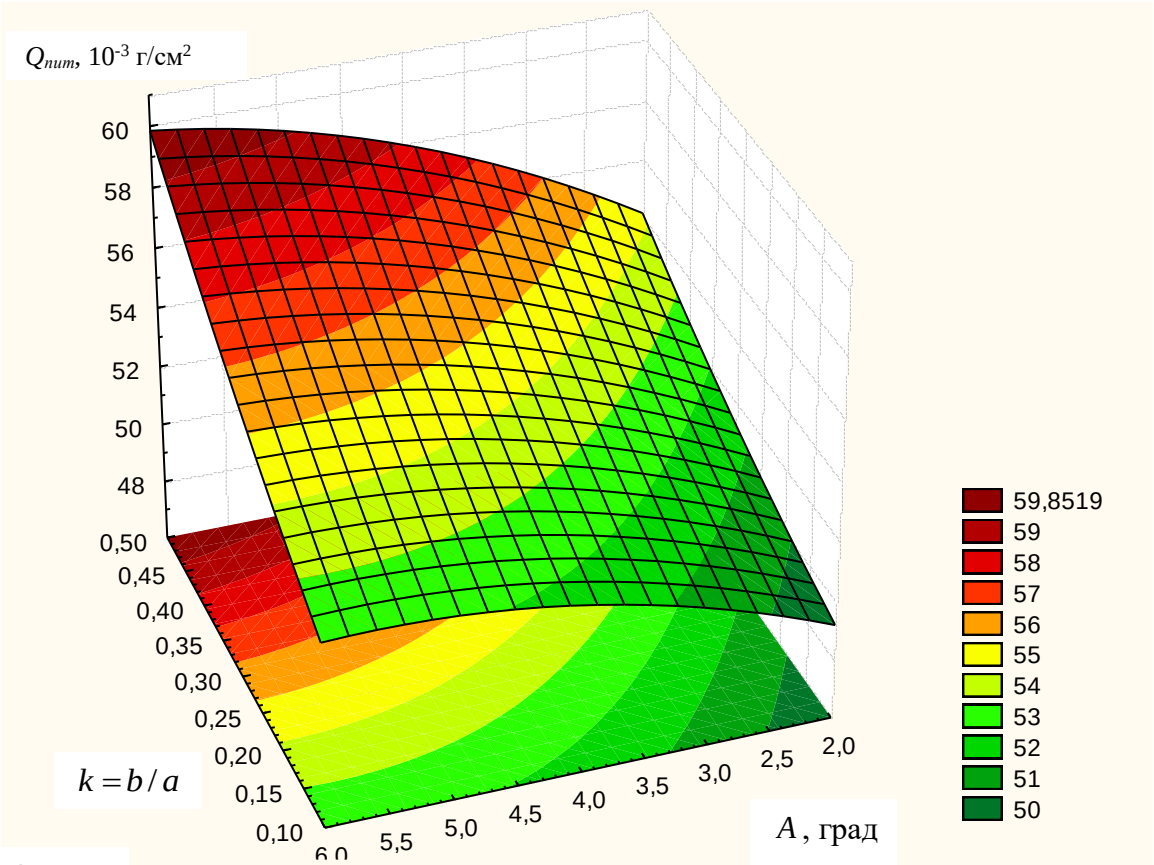


а)



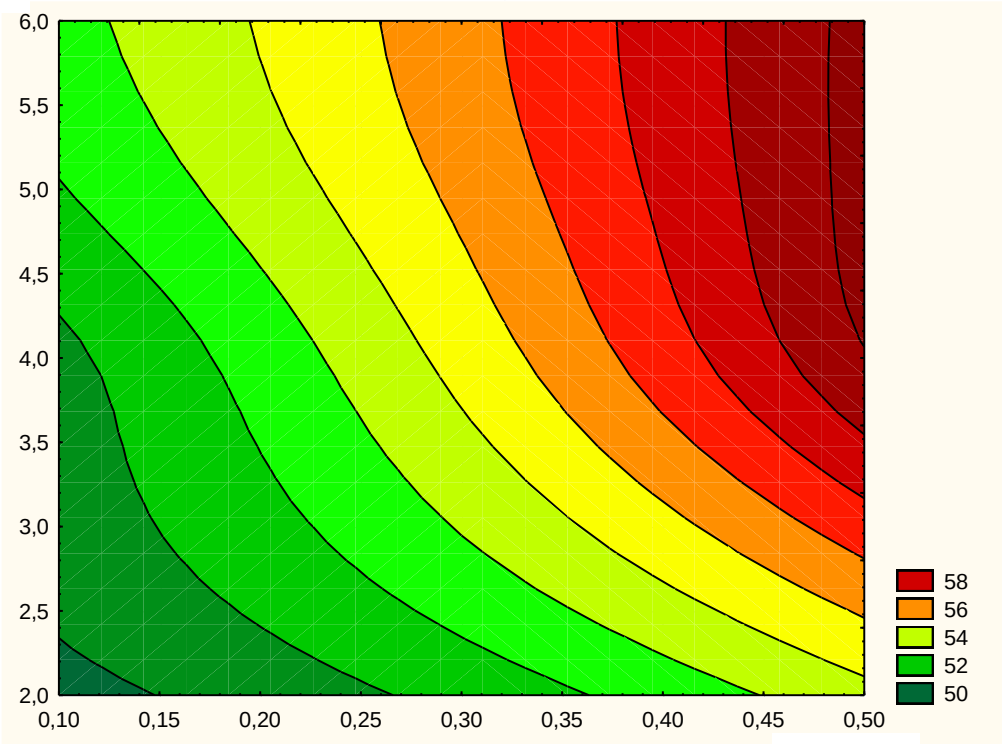
б)

Рисунок 4.1. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності питомого зняття металу $Q_{пит(k=b/a,\beta)}^{Ст3}$ з деталей із матеріалу Ст 3 (A=4град)



A, град

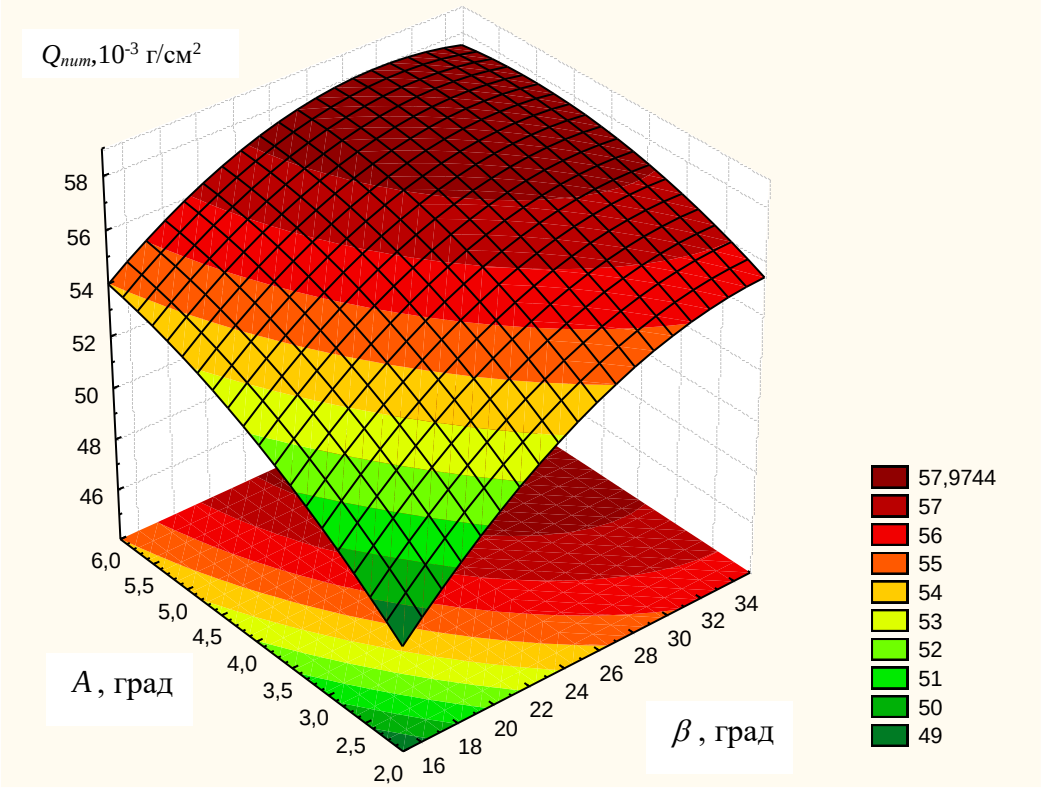
а)



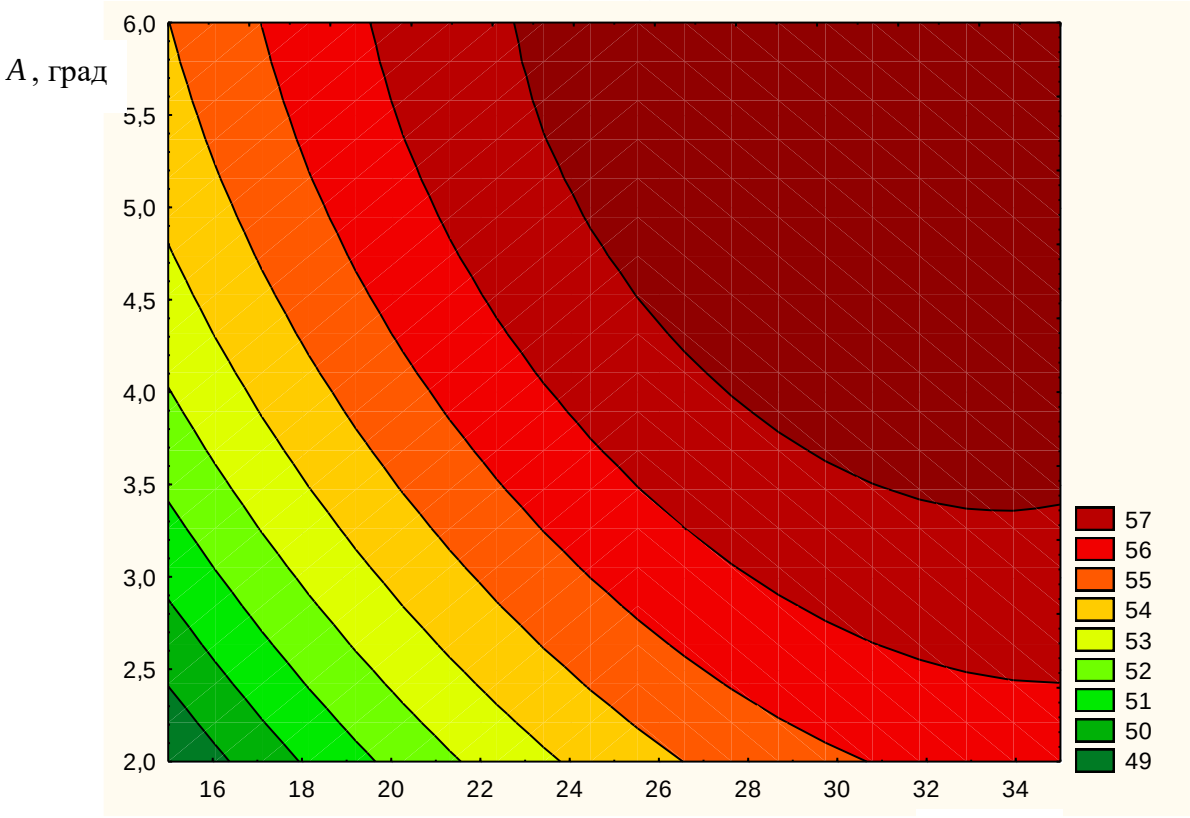
б)

$k = b/a$

Рисунок 4.2. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності питомого зняття металу $Q_{num(k=b/a,A)}^{Cm3}$ з деталей із матеріалу Ст 3(β =25град)



а)



б) β, град

Рисунок 4.3. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) залежності питомого зняття металу $Q_{пит(A,\beta)}^{Ст3}$ з деталей із матеріалу Ст 3($k = b/a$ =0,3)

З представлених графічних залежностей рис. 4.1.-4.3 встановлено, що на питоме зняття металу найбільше впливає механічні властивості оброблюваного матеріалу, а саме твердість (HV); пластичність (δ %); границя текучості ($\sigma_в$). При оброблені вуглецевої сталі із збільшенням місткості вуглецю продуктивність вібраційно-відцентрового процесу обробки деталей зменшується. Як видно найбільше впливає на продуктивність питомого зняття металу зміна коефіцієнта форми гранули $k = b/a$ =0,5 та амплітуди кутових коливань A=6 (град) для сталі Ст 3, а найменше - кута повороту робочої камери β.

Отримані результати підтверджують, що продуктивність питомого зняття металу вібраційно-відцентрового обробки збільшується на експериментальному обладнанні в 2...2,2 рази в порівнянні із приведеними роботами [36, 38, 42, 68, 141].

4.2. Результати досліджень вібраційно-відцентрового оброблення з визначенням зміни шорсткості

На основі експериментальних досліджень перевірено адекватність теоретичних досліджень з визначення впливу матеріалу заготовки та її геометричних параметрів на силові показники процесу вібраційно-відцентрового оброблення з визначенням шорсткості обробленої поверхні.

Дослідження в області вібраційного оброблення дають обґрунтування таких основних закономірностей вібраційно-відцентрового методу оброблення як якість обробленої поверхні. Незалежними перемінними прийняли: частоту коливань ω, Гц; термін оброблення T, хв.; ступінь заповнення робочої камери K, %.

В якості робочих середовищ використовували природний байкаліт та гранульований абразивний матеріал ПТС-8 рис. 4.4. При цьому абразивні частинки попередньо розділялися на фракції за величиною гранул: 5...10 мм, 15...20 мм, 25...30 мм.

а)

б)

Рисунок 4.4. Робоче середовище а) природний байкаліт б) гранульований абразивний матеріал ПТС-8

Об’єм деталей, робочого середовища і вільного незаповненого простору в % від робочої камери становить 20:50:30, частота коливань ω (20 Гц), час обробки Т (60 хв.). Робочим середовищем вибрано битий круг марки 24А, 40НСТ і грануляцією 10…30 мм.

Для кожного з незмінних факторів експеримент проводився не менше 3 разів, після чого визначалося середнє значення результату, яке використовувалось для подальшого статистичного оброблення результатів експерименту. Характеристику факторів та значення їх рівнів для оброблюваних матеріалів наведено у табл. 4.3

Таблиця 4.3

Характеристика факторів та значення їх рівнів

Кодоване позначення фактора	Найменування фактора	Значення рівнів фактора
x_1	Частота коливань ω, Гц	15-20-25
x_2	Тривалість обробки заготовки T, хв	15-35-55
x_3	ступінь заповнення робочої камери K (%)	50-65-80

Визначено невідомі коефіцієнти регресії квадратичного полінома за формулами (3.7), (3.8) і отримані значення коефіцієнтів регресії зведено у табл. 4.4, а масив даних отриманих експериментальних даних для шорсткості *Ra*, наведено в таблиці 4.5.

Загальний вигляд рівнянь регресії шорсткості *Ra*, залежно від зміни частоти коливань ω, тривалості обробки заготовки T, ступеня заповнення робочої камери K (%), тобто $Ra = f_{(x_1, x_2, x_3)}(\omega, T, K)$ для кодованих значень факторів матеріалу сталь 45 має вигляд:

- для визначення шорсткості Ra:

$$\begin{aligned} Ra_{(x_1,x_2,x_3)} &= 13,29 - 0,35x_1 - 0,51x_2 + 0,0046x_3 + 0,0097x_1x_2 - \\ &-0,000011x_1x_3 - 0,00041x_2x_3 + 0,0019x_1^2 + 0,0049x_2^2 + 0,00014x_3^2 \end{aligned}; \qquad (4.5)$$

де x_1 – кодоване значення частоти коливань; x_2 – кодоване значення тривалості обробки заготовки; x_3 – кодоване значення ступеня заповнення робочої камери.

Таблиця 4.4.

Значення коефіцієнтів рівняння регресії для матеріалу сталь 45

Коефіц.	шорсткість Ra
b_0	13,29
b_1	-0,35
b_2	-0,51
b_3	0,0046
b_{12}	0,0097
b_{13}	-0,0000110
b_{23}	-0,00041
b_{11}	0,0019
b_{22}	0,0049
b_{33}	0,00014

Таблиця 4.5

Результати експериментальних досліджень шорсткості після ВВО

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У			Середні значе-ня, У
									повторюваність			
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	1	2	3	$У_{сер.}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	4,56	4,53	4,5	4,53
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	2,4	2,45	2,5	2,45
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	4	4,05	4,1	4,05
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	1,8	1,84	1,88	1,84
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	3,56	3,5	3,62	3,56
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	2,02	2	2,04	2,02
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	1,22	1,22	1,22	1,22
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	2	2,05	1,95	1,95
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	1,47	1,5	1,53	1,47
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	4,16	4,16	4,16	4,16
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	3	3,08	3,04	3,04
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	4,44	4,44	4,44	4,44
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	2,2	2,24	2,22	2,22
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3	3,1	3,05	3,05
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	1,65	1,65	1,65	1,65
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	2	2,02	2,01	2,01
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	2,6	2,72	2,66	2,66
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	2,4	2,4	2,4	2,40
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	4,3	4,42	4,36	4,36
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	2,56	2,56	2,56	2,56
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	4,2	4,22	4,21	4,21
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	1,9	1,9	1,9	1,90
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	3,12	3,1	3,14	3,12
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	1,97	1,98	1,99	1,98
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	1,86	1,86	1,86	1,86
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	2,3	2,36	2,42	2,33
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	1,77	1,77	1,77	1,77

Для натуральних значень факторів рівняння регресії (4.6) прийме вигляд:

- для визначення шорсткості R_a

$$R_{a(\omega,T,K)} = 13,28 + 0,29\omega - 0,54T + 0,0097\omega T + 0,00495T^2. \qquad (4.6)$$

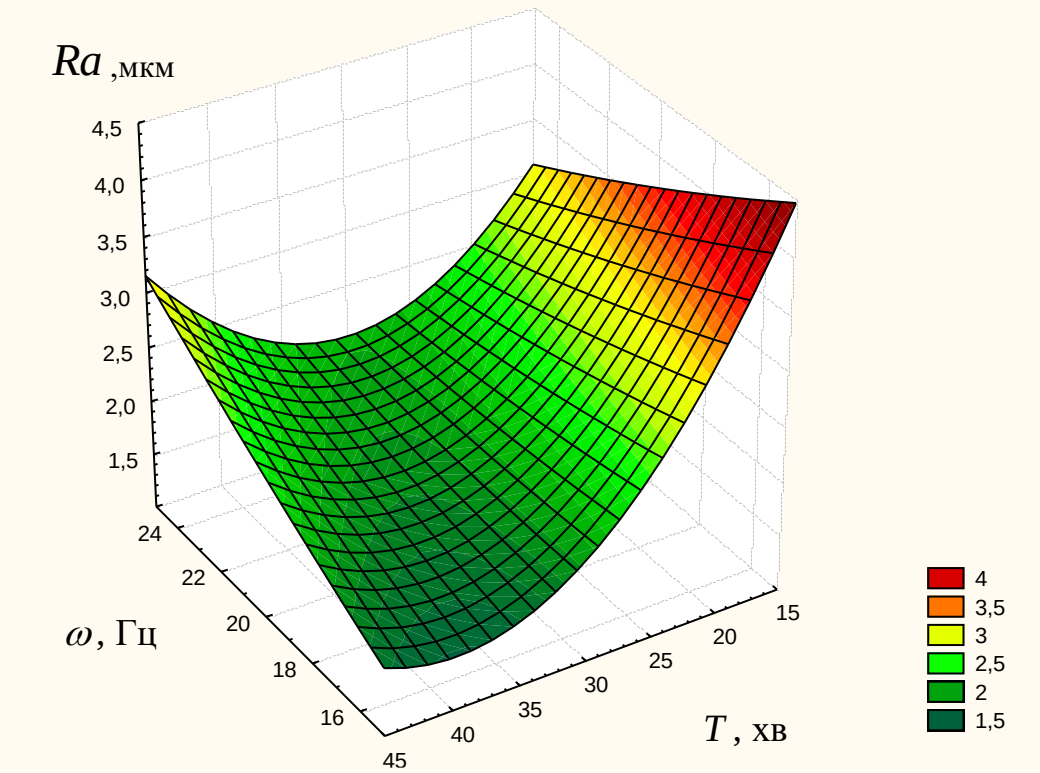
Отримане рівняння регресії (4.6) може бути використані для визначення залежності шорсткості оброблення циліндричних деталей від зміни трьох основних факторів: від частоти коливань ω, тривалість обробки заготовки T, ступеня заповнення робочої камери K для матеріалу сталь Ст3.

Побудова графічного відтворення регресійних моделей у вигляді квадратичних поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів шорсткості Ra здійснювалася програмним продуктом Statistica 6.0 на ПК, як функцію від двох незалежних змінних факторів $x_{i(1,2)}$ за постійним незмінним третім фактором $x_{i(3)} = const$.

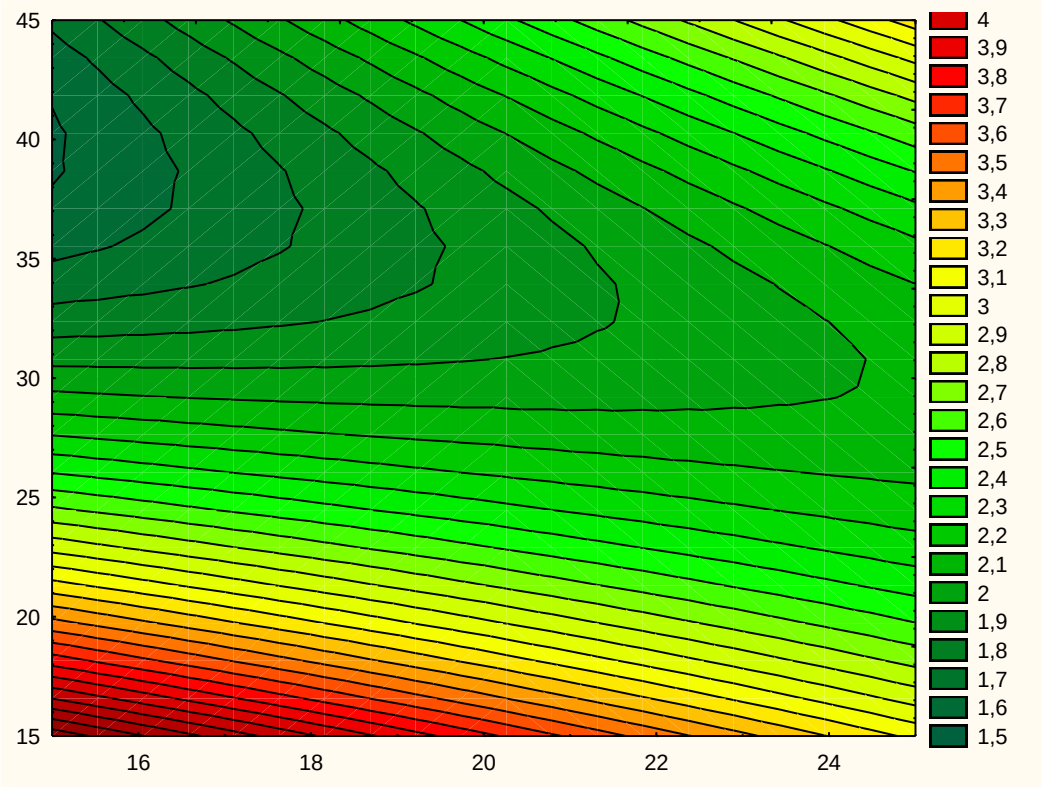
4.3. Графоаналітичне оброблення результатів вібраційно-відцентрового оброблення з визначенням шорсткості

Графічні залежності результатів залежності шорсткості Ra, одержані з використанням «Statistica 6.0”» наведено на рис. 4.4 – 4.6.

Наведені залежності рис. 4.4-4.6 показують, що найбільша інтенсивна зміна шорсткості проходить в перші 15 хв. обробки. Покращення якості поверхні здійснюється внаслідок підвищення механічних властивостей оброблюваного матеріалу.

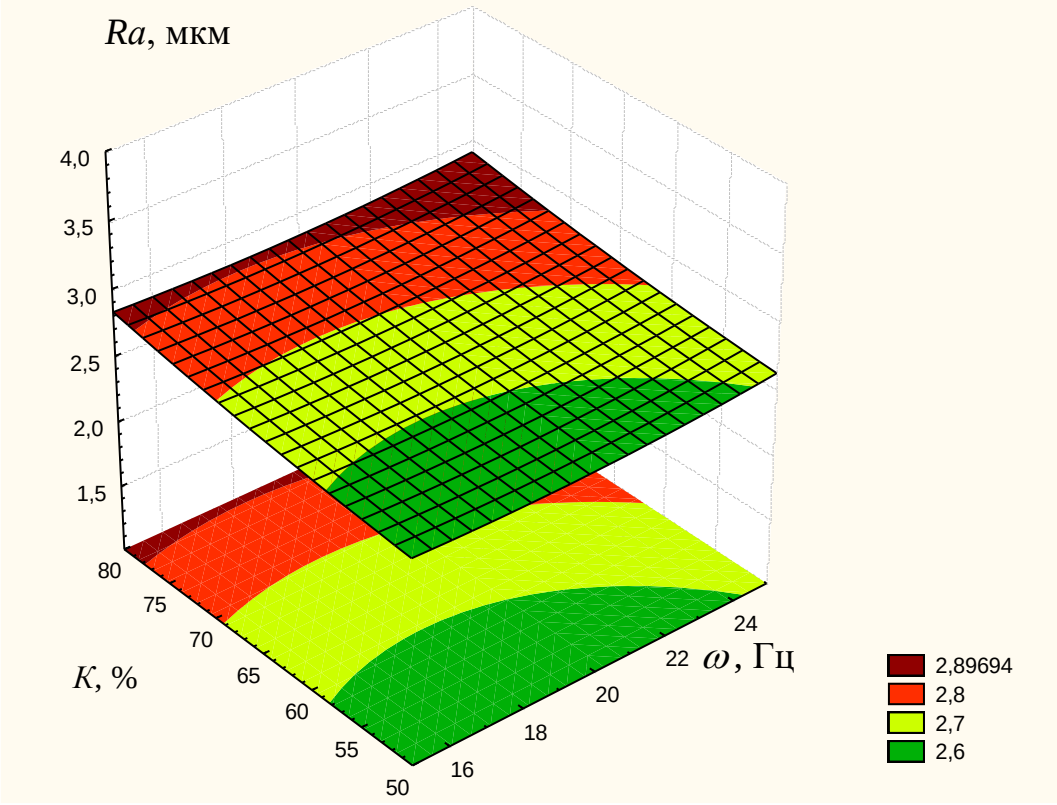


а)

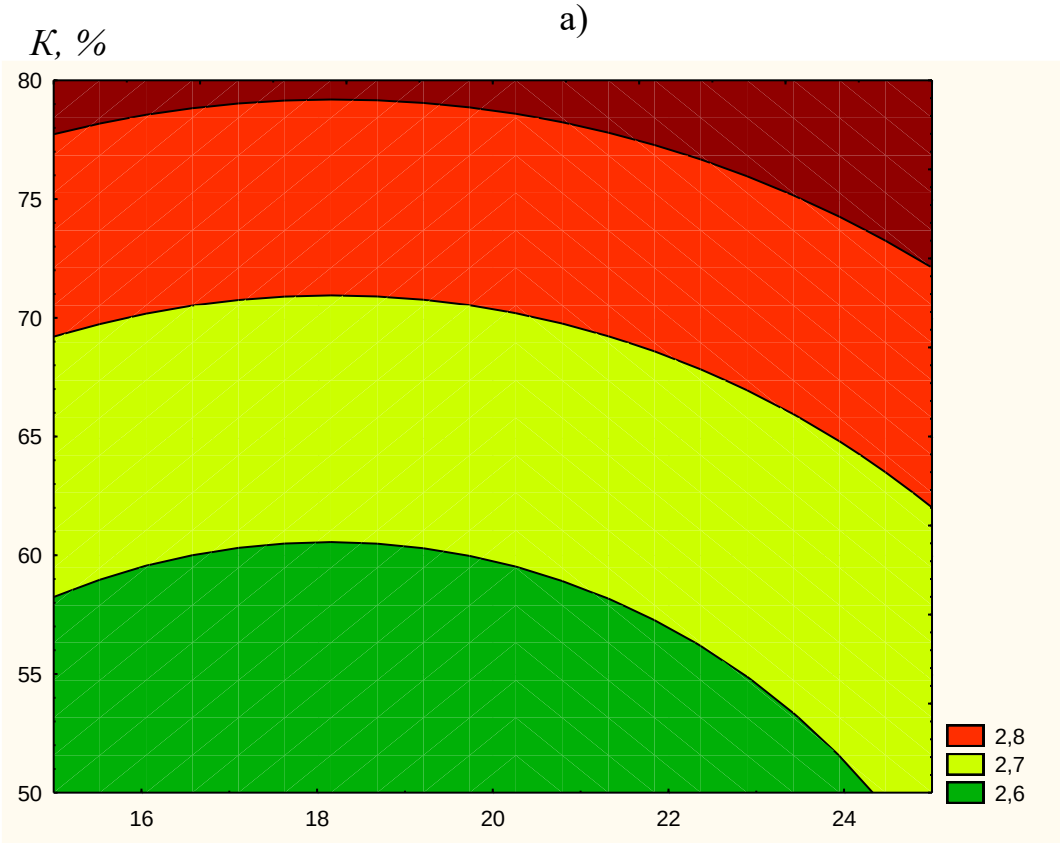


б) ω, Гц

Рисунок 4.4. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) визначення шорсткості поверхні циліндричних деталей $Ra_{(\omega,T)}$ під час процесу ВВО (K=65%) для сталі 45

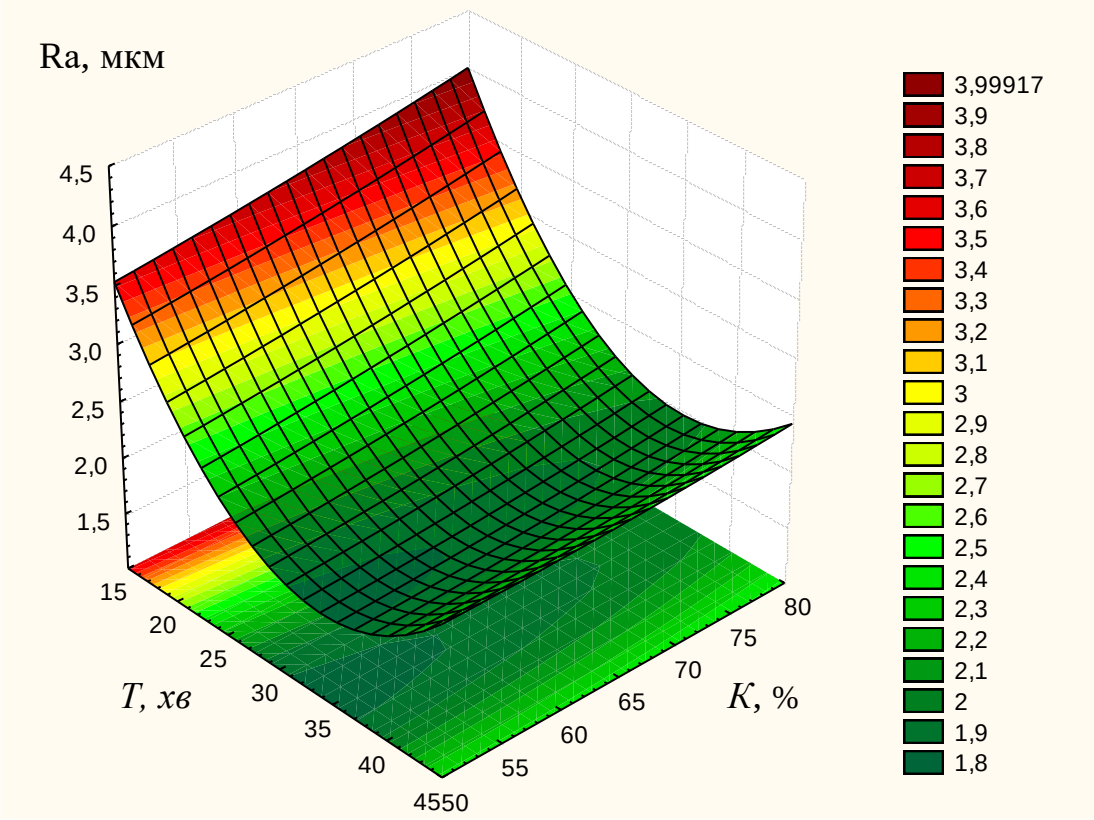


а)

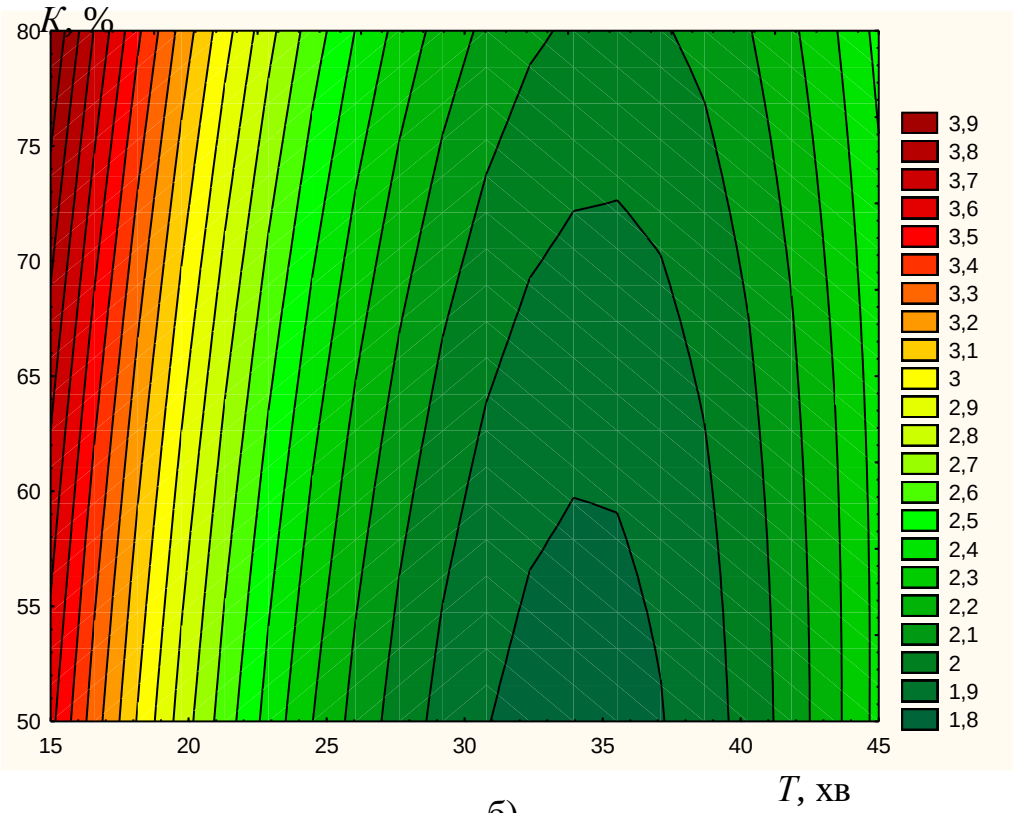


б) ω, Гц

Рисунок 4.5. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) визначення шорсткості поверхні циліндричних деталей $Ra_{(\omega,K)}$ під час процесу ВВО (T=30 хв) для сталі 45



а)



б)

Рисунок 4.6. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) визначення шорсткості поверхні циліндричних деталей $Ra_{(T,K)}$ під час процесу ВВО (ω=20 Гц) для сталі 45

Процес формування шорсткості при вібраційно-відцентровому обробленні деталей показує, що в перші 15 хвилин обробки зменшується утворення інтенсивність мікронерівностей. В подальшому на протязі 15 хв. інтенсивне значення зниження шорсткості незначна, а подальшому від 30 до 45 хв. шорсткість збільшується, при цьому параметр R_a не перевищує заданий. В процесі обробки на протязі 45 до 60 хв. здійснюється повторне зниження шорсткості, рівна інтенсивності зниження в період від 0 до 15 хв.

Аналіз графічних залежностей показав, що формування шорсткості поверхні вібраційно-відцентрового оброблення деталей здійснюється із зменшенням степені дискретності при збільшенні часу обробки. Встановлено, що взаємодія гранули з поверхнею деталі набуває характеру пружного удару, що доходить до сталої шорсткості. Факторне поле визначалось таким діапазоном зміни параметрів: $15 \leq \omega \leq 25$ (Гц); $15 \leq T \leq 45$ (хв); $50 \leq K \leq 80$ (%).

4.4. Результати експериментальних досліджень вібраційно-відцентрового оброблення на зміну мікротвердості поверхневого шару деталей

Під час проведення багатофакторного експерименту одержано цілий ряд експериментальних досліджень, які обробляли за відомою методикою та визначалась залежність мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей від величини тривалості обробки заготовки, кута руху робочої камери, амплітуди кутових коливань.

Мікротвердість вібраційно-відцентрового оброблення поверхневого шару деталей отримували за допомогою пристроїв та способів, наведених в розділі 3. Для одержання експериментальних досліджень використовували матеріал – Сталь 45. Експеримент здійснювали не менше 3 разів для незмінного фактору та знаходили середнє значення для розрахунку. Статистично обробляли результати експериментів та уточнювали достовірність запропонованих теоретичних розрахунків.

Для отримання теоретичних результатів, які оперуються закономірностями зміни мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей із матеріалу: Сталь 45 від зміни тривалості обробки заготовки, кута руху робочої камери, амплітуди кутових коливань. Проведено лабораторні експериментальні дослідження, відповідно до методики, що приведена у підрозділі 3.4.

Результати багатофакторного експерименту типу ПФЕ 3^3 зводилися в таблицю для побудови математичної моделі з всього масиву напрацьованого згідно табл. 3.4 (розділ 3).

Вхідним змінним факторам типу ПФЕ 3^3 є:

- тривалість обробки заготовки T, який кодували індексом x_1;
- кут руху робочої камери β, який кодували індексом x_2;
- амплітуда кутових коливань A, який кодували індексом x_3.

Значення мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей H_v в залежності від параметрів технологічного процесу експериментальних даних масиву записували в табл. 4.7. Обробка експериментального масиву даних мікротвердість при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей H_v, яка наведена в таблиці 4.2, і обробка аналізу результатів здійснювали за методикою, приведеною в пункті 3.4 розділу 3.

Незалежні фактори та їх значення наведено у табл. 4.6

Таблиця 4.6

Характеристика факторів та значення їх рівнів

Кодоване позначення фактора	Найменування фактора	Значення рівнів фактора
x_1	тривалість обробки заготовки T, хв	15-35-55
x_2	кута повороту робочої камери β, град	15-25-35
x_3	амплітуда кутових коливань A ,град	2-4-6

Відповідно залежності (3.5), (3.6) дають можливість отримати невідомі коефіцієнти регресії квадратичного полінома та отримані результати

коефіцієнтів регресії заведено у табл. 4.6.

Таблиця 4.7

Результати експериментальних досліджень мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей H_v

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У повторюваність			Середні значе-ня, У
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	1	2	3	$У_{сер.}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	140	145	135	140
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	158	162	160	160
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	151	150	149	149
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	170	170	170	170
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	180	186	183	183
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	181	178	175	178
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	175	175	175	175
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	201	202	200	201
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	185	186	187	186
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	209	210	211	210
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	240	240	240	240
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	220	226	223	223
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	230	230	230	230
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	250	253	256	253
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	241	241	241	241
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	225	225	225	225
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	260	259	261	259
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	248	248	248	248
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	210	214	212	212
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	245	245	245	245
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	229	233	231	231
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	212	214	216	214
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	245	245	245	245
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	234	236	232	234
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	215	217	219	217
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	232	240	236	236
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	225	225	225	225

Отримані середні значення експериментальних даних згідно заданої методики дають можливість навести рівняння регресії мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей H_v залежно від зміни тривалості обробки заготовки, кута руху робочої камери, амплітуди кутових коливань тобто $H_v = f_\mu(\beta, T, A)$, а залежність приведено у кодованих величинах типу ПФЕ 3^3:

-мікротвердість при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей H_v із сталі 45:

-

$$H_{V(x_1,x_2,x_3)} = -47,481 + 0,715x_1 + 6,653x_2 + 67,159x_3 - 0,007x_1x_2 + \\ +0,06x_1x_3 - 0,129x_2x_3 - 0,002x_1^2 - 0,103x_2^2 - 6,208x_3^2. \quad (4.7)$$

де x_1 – кодоване значення величини тривалість обробки заготовки T; x_2 – кодоване значення кута руху робочої камери β; x_3 – кодоване значення амплітуди кутових коливань A.

Таблиця 4.8

Значення коефіцієнтів рівнянь регресії

Коеф.	Сталь 45
b_0	-47,481
b_1	0,715
b_2	6,653
b_3	67,159
b_{12}	-0,007
b_{13}	0,06
b_{23}	-0,129
b_{11}	-0,002
b_{22}	-0,103
b_{33}	-6,208

Статистичне оброблення результатів експериментів та відповідність

отриманих випадкових величин рівнянь регресії (4.7), в натуральних значеннях реальних даних експерименту проводили згідно методики, яка наведена у підрозділі 3.4.

В натуральних величинах регресійна залежність (4.7) після перетворення та спрощення виразів прийнято в кінцевому вигляді:

- мікротвердість при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей H_v із сталі 45:

$$H_{V(T,\beta,A)} = -34,901 + 0636T + 5,933\beta + 65,972A - 0,103\beta^2 - 6,208A^2. \quad (4.8)$$

Одержані регресійні залежності (4.7) та (4.8) мають можливість використання для визначення мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей H_v залежно від величини тривалості обробки заготовки, кута руху робочої камери, амплітуди кутових коливань у межах зміни вхідних факторів:

$$15 \leq T \leq 55 \text{ (хв)}; \; 15 \leq \beta \leq 35 \text{ (град)}; \; 2 \leq A \leq 6 \text{ (град)}.$$

Для визначення впливу основних кінематичних і геометричних показників на зміну мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей H_v із матеріалу сталь 45 використали програмний продукт для ПК, за допомогою якого побудували графічне відображення загальних моделей у вигляді квадратичних поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів зміни мікротвердості H_v для матеріалу сталь 45 як функцію від двох змінних факторів $x_{i(1,2)}$ та постійного третього фактора $x_{i(3)} = const$.

Аналізуючи регресійну залежність, встановлено, що основними факторами, які найбільш впливають на збільшення мікротвердості є фактори x_1, x_3, (T, A), та комбінація даних факторів. Фактор x_2 (β) призводить до

зменшення мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей.

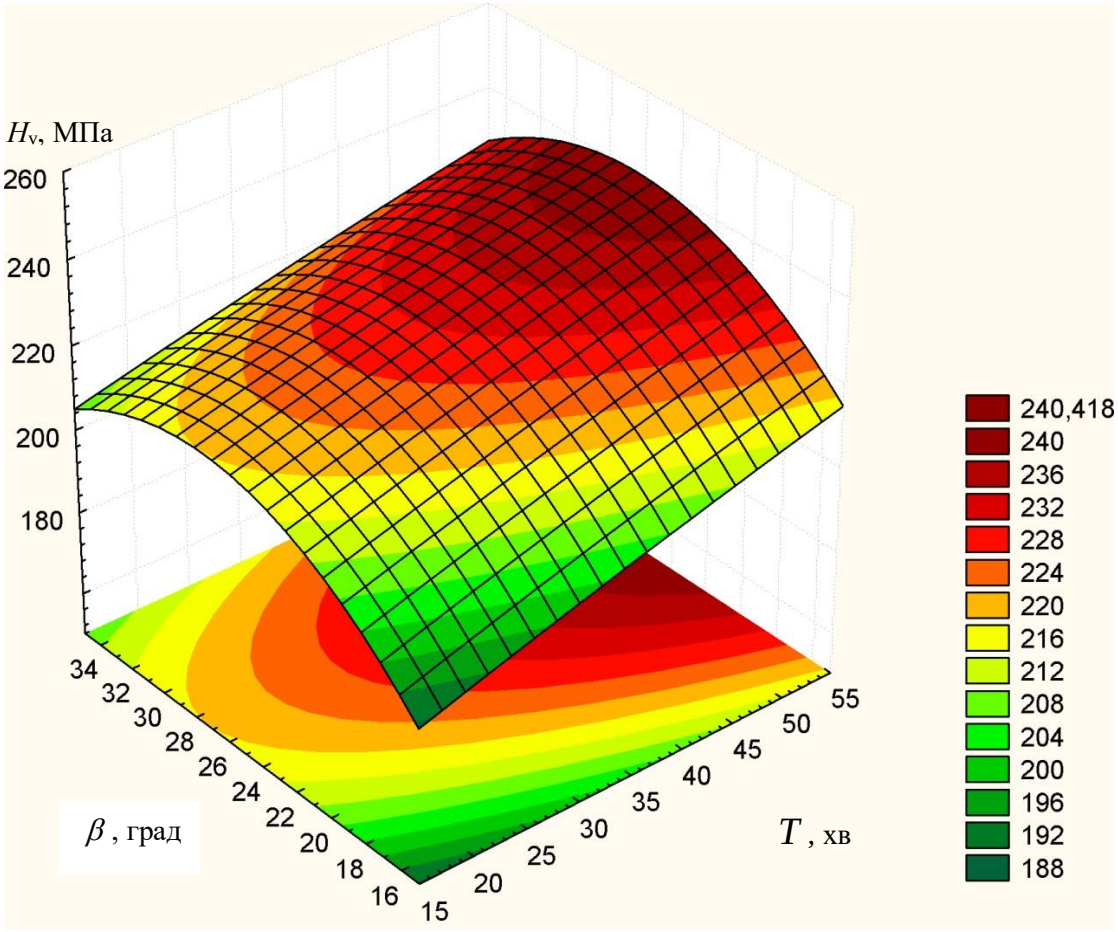
На основі одержаного рівняння регресії побудовано поверхні відгуку та двомірні їх перерізи мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей від зміни двох факторів для $x_3 = const$, приведено відповідно в підрозділі 4.5.

4.5. Графоаналітичне оброблення результатів експериментальних досліджень вібраційно-відцентрового оброблення на мікротвердість поверхневого шару деталей

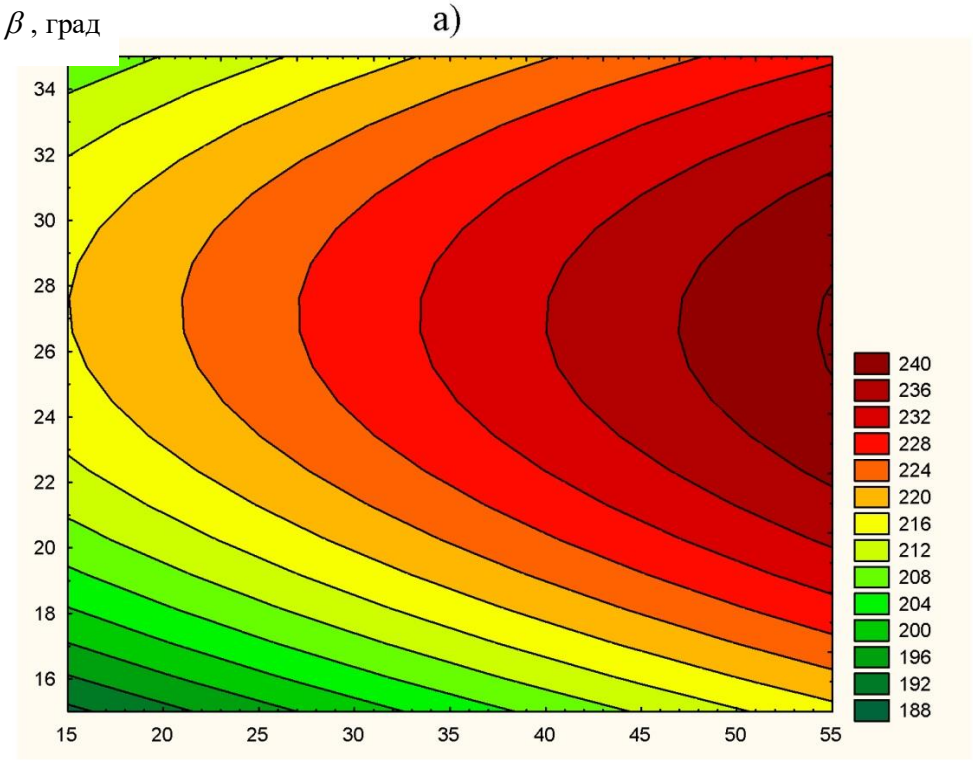
Під час експерименту проводили дослідження мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей із сталі 45.

Для встановлення експериментального масиву даних проводили експерименти в трьохкратній повторюваності, та визначали середнє значення результату.

На основі експериментального масиву даних значення результатів мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей із сталі 45 будували поверхні відгуку та двомірні їх перерізи з використанням «Statistica 6.0», які приведено на рис. 4.7 – 4.9.

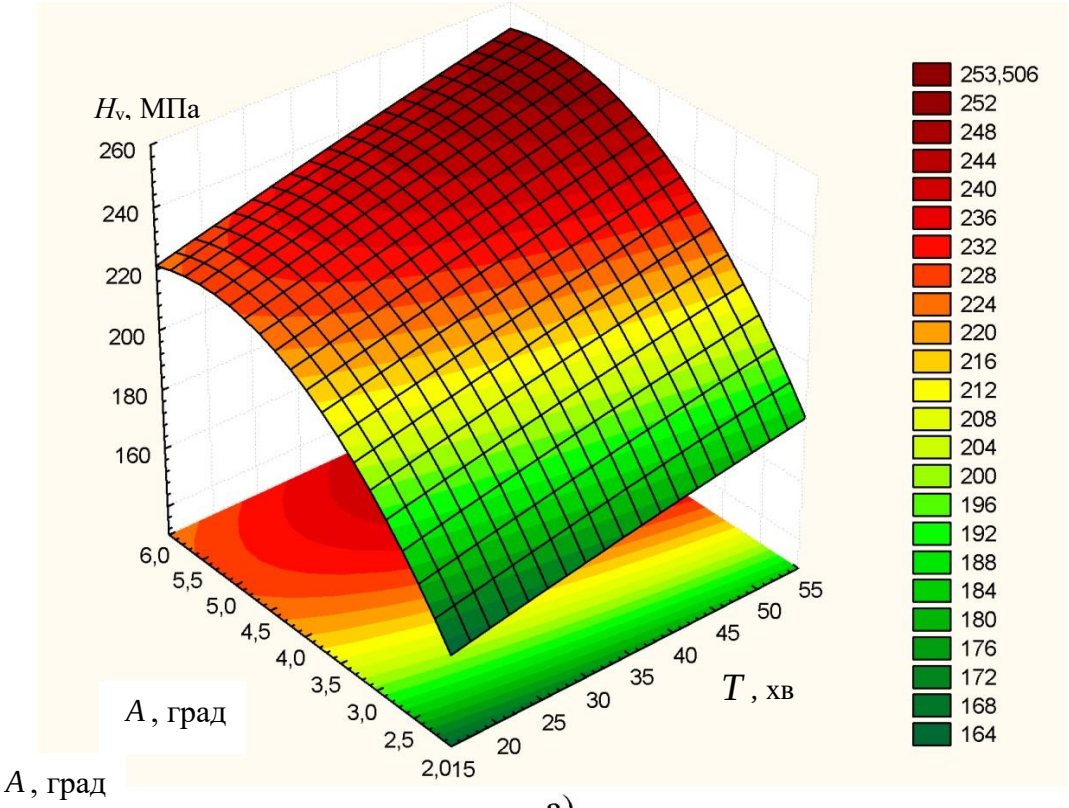


а)

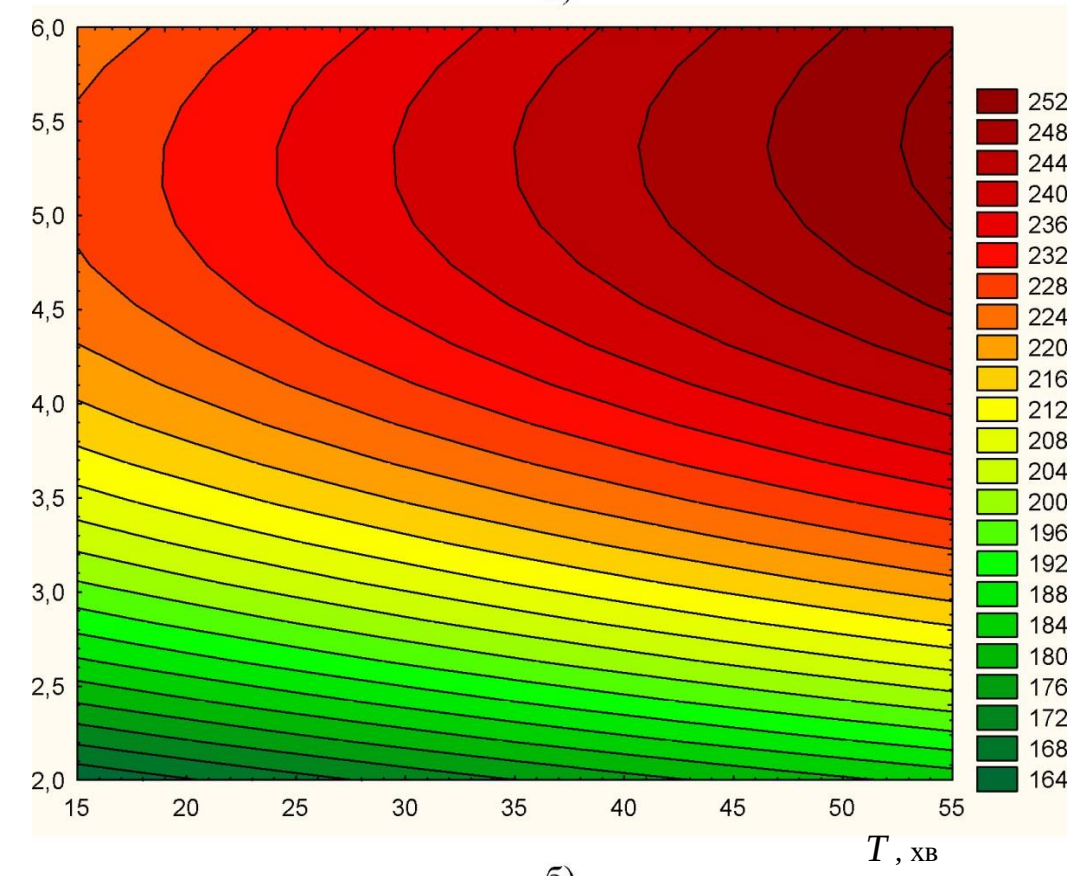


б) T, хв

Рисунок 4.7. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) визначення мікротвердості $H_{V(T,\beta)}$ під час процесу вібраційно-відцентрового оброблення поверхневого шару деталей із сталі 45 (A=4 град)

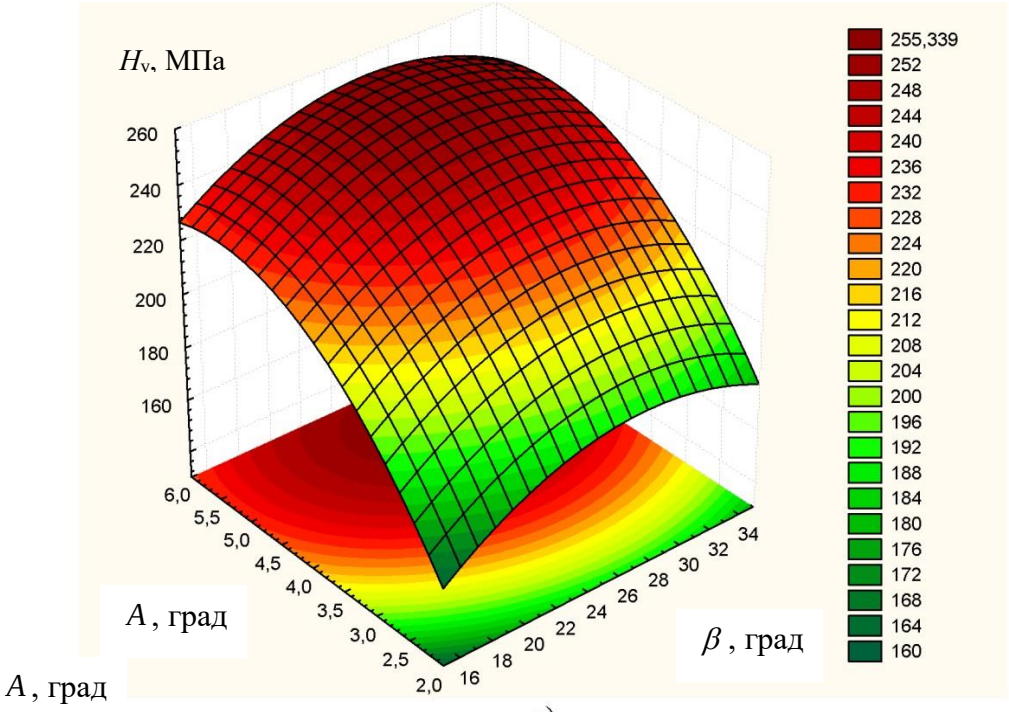


а)

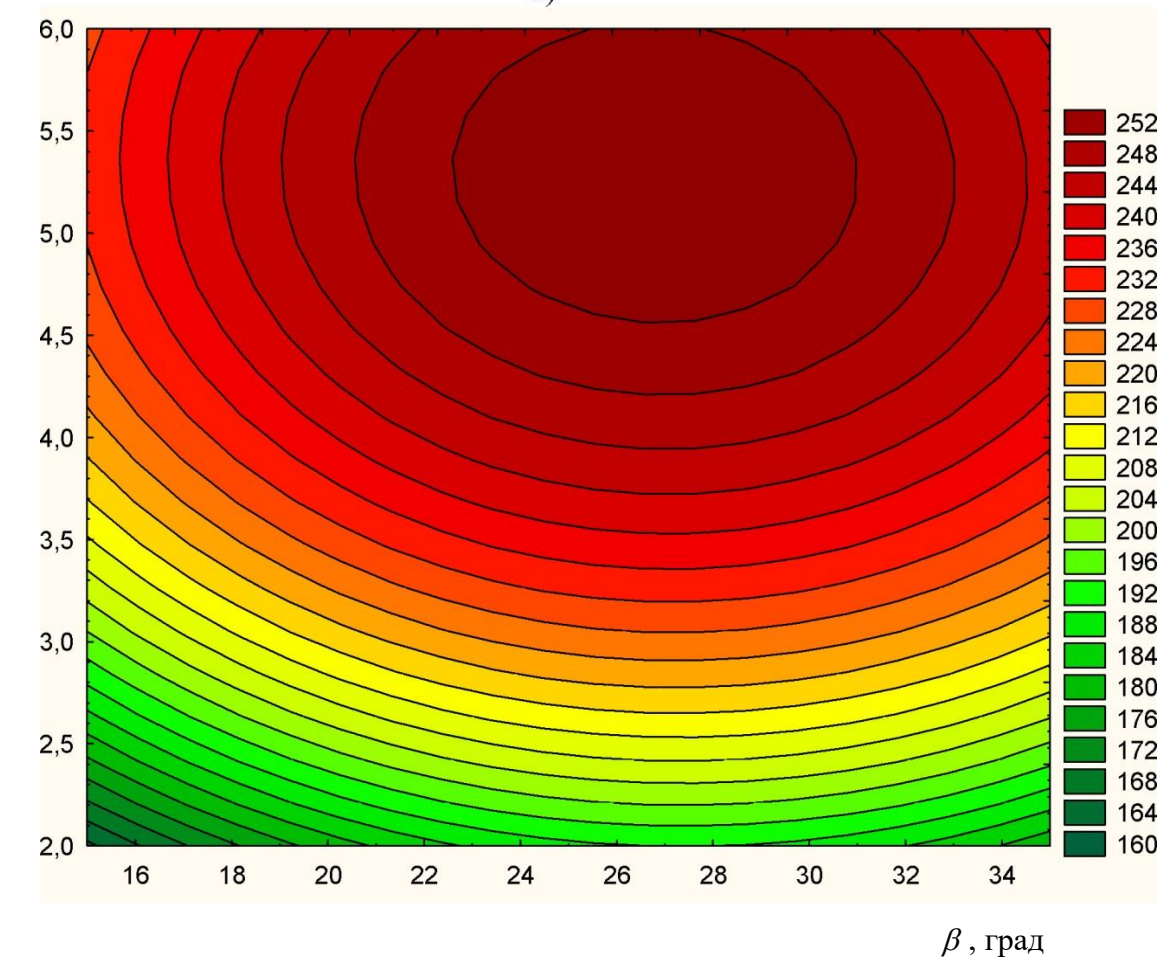


б)

Рисунок 4.8. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) визначення мікротвердості $H_{V(T,A)}$ під час процесу вібраційно-відцентрового оброблення поверхневого шару деталей із сталі 45 (β=25 град)



а)



б)

Рисунок 4.9. Поверхня відгуку (а) та двомірний переріз поверхні відгуку (б) визначення мікротвердості $H_{V(\beta,A)}$ під час процесу вібраційно-відцентрового оброблення поверхневого шару деталей із сталі 45 (T=35 хв)

Наведені результати досліджень процесу вібраційно-відцентрового оброблення поверхневого шару деталей із сталі 45 з отриманням рівнянь регресії, можуть використовуватися для визначення мікротвердості обробленої поверхні залежно від величини тривалості обробки заготовки, кута повороту робочої камери, амплітуди кутових коливань у межах зміни вхідних факторів: $15 \leq T \leq 55$ (хв); $15 \leq \beta \leq 35$ (град); $2 \leq A \leq 6$ (град).

4.6 Металографія при вібраційно-відцентровому обробленні поверхневого шару деталей

Вібро-відцентрова обробка деталей являє собою складний комплекс механо-фізико-хімічних явищ, які здійснюють істотний вплив на стан, передусім поверхні і поверхневого шару деталі [45, 59, 84, 88, 131]. Фізична сутність процесу характеризується комплексним впливом на оброблювані поверхні деталей рядом факторів [87, 125-126]:

– сукупність мікроударів абразивних частинок робочого середовища у різних напрямках, що забезпечує рівномірний всебічний вплив на матеріали деталей;

– створюються умови для процесів мікрорізання, багатократного тонкого пружно-пластичного деформування, стиральних та згладжуючих дій;

– змінність прискорень абразивних частинок викликає ударно-хвильові процеси та згинальні напруження в матеріалах;

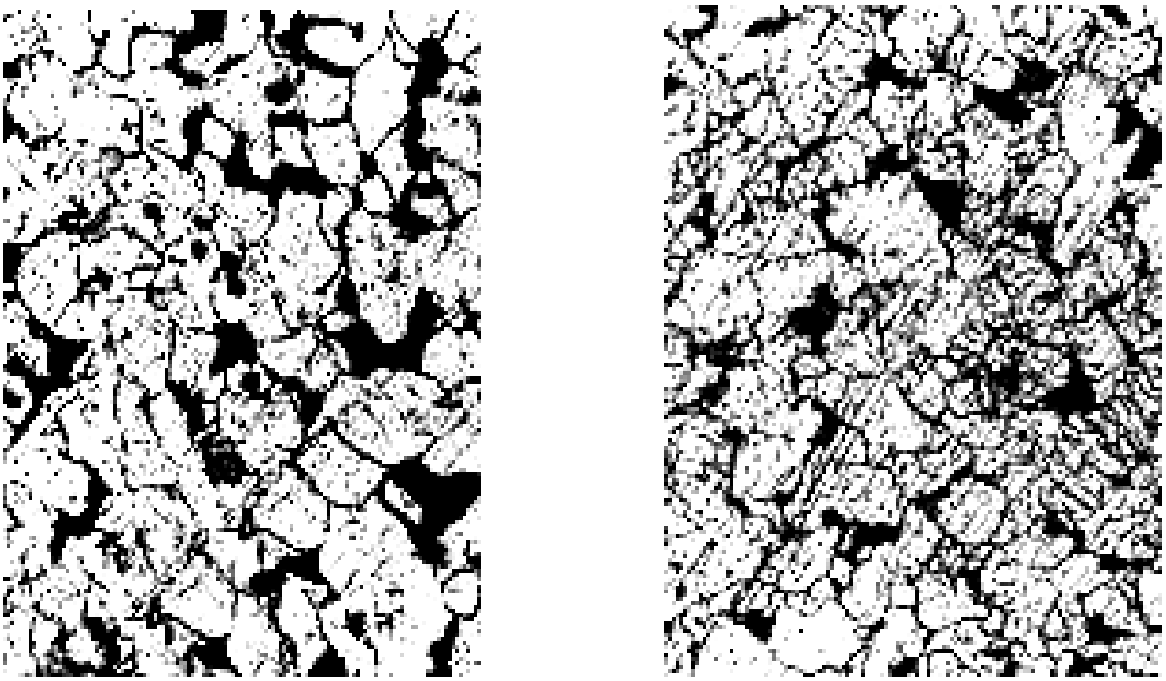
– хімічно-активні і поверхнево-активні речовини можуть викликати фізико-хімічні процеси;

– спостерігається механо-хімічний вплив абразивного середовища, що активується вібраційним впливом.

Стан поверхневого шару і поверхневі дефекти впливають на механічні і фізичні властивості матеріалів. Особливо велике значення мають границі (величина) зерен в структурі матеріалу. Межа текучості σ_T зв’язана з розміром зерен d залежністю $\sigma_T = \sigma_o + k\, d^{-1/2}$, де σ_0 і k– постійні для данного матеріалу. Чим менше (дрібніше) зерно, тим вища межа текучості, в’язкості і менша

небезпека крихкого руйнування. Аналогічно, але більш слабо впливає на механічні властивості розмір субзерен.

Виходячи із вище наведеної характеристики впливу на механічні і фізичні властивості поверхневого шару матеріалів, проводимо аналіз структури поверхневого шару сталей Ст3 та сталі 45 до впливу і після дії на нього сипучого абразивного середовища в вібраційно-відцентровій установці.



а б

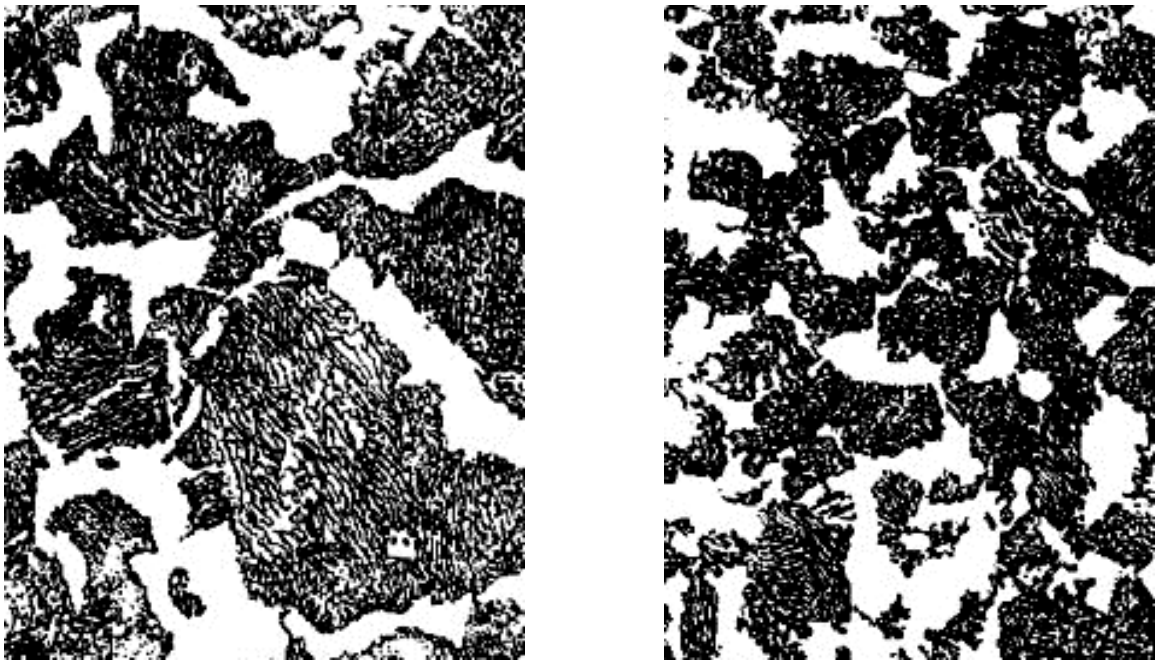
Рисунок 4.10. Фрагменти структури поверхневого шару деталі, виготовленої зі Ст3: а – вихідний стан; б – стан після вібро-відцентрової обробки, х100

Структура сталі Ст3 (0,18 % С) у вихідному стані є типовою для доевтектоїдних вуглецевих сталей, що складається із пластинчатого перліту (темні зерна) у кількості 21 об. %, та фериту (світлі зерна) – решта (рис. 4.10а).

Аналіз структури поверхневого шару деталей, виготовлених сталі Ст3 після вібро-відцентрової обробки свідчить про зменшення розміру зерен та збільшення концентрації дефектів.

Дослідженнями встановлено, що у вихідному стані зразки сталі 45 (0,44 % С) мають ферито-перлитну структуру із середнім розміром феритних зерен 40...60 мкм (рис. 4.11а). Щільність дислокацій у надлишковому фериті і феритній складовій перліту не перевищують $5 \cdot 10^8$ см$^{-2}$. Перлітна складова характеризується пластинчатою будовою, з відстанню між пластинами 0,1...0,3

мкм. У зразку з деталі, виготовленої зі сталі 45, що підлягала вібро-відцентровій обробці (рис. 4.11б) спостерігається зменшення розміру феритних зерен 25...40 мкм. Щільність дислокацій в феритній складовій перлита та надлишковому фериті $8 \cdot 10^8$ см$^{-2}$. Визначено, що в пластинах перліту присутні багаточисельні розриви, які є дефектами структури цементитного каркасу колоній. Ці розриви пов'язані з тим, що в процесі обробки спостерігається розвиток цементитної складової, яка зазнає ряд морфологічних перетворень.



а б

Рисунок 4.11. Фрагменти структури поверхневого шару деталі, виготовленої зі сталі 45: а – вихідний стан; б – стан після вібро-відцентрової обробки, х50

Можна бачити, що поверхня деталей після вібро-відцентрованої обробки не має мікротріщин і спрямованих рисок, характерних для звичайних методів механічної обробки. Деталь, яка підлягала вібро-відцентровій обробці являє собою однорідну поверхню, яка забезпечує підвищену утомлену міцність в умовах знакозмінних навантажень під час дії абразивних частинок. Крім зрізання металу з поверхні деталі спостерігається її зміцнення і зміна шорсткості, а в тонких поверхневих шарах виникають залишкові напруження стиску.

Проведені металографічні дослідження свідчать, що після вібро-відцентрової обробки підвищується межа текучості та в'язкість матеріалів деталей. Це зменшує небезпеку крихкого руйнування деталей.

4.7. Висновки

1. Продуктивність вібраційно-відцентрової обробки в великій мірі залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, а саме твердості (НВ); пластичності (δ %); границі текучості ($\sigma_в$). Зміна коефіцієнта форми гранули $k = b/a$ =0,5 та амплітуди кутових коливань A=6 (град) для сталі Ст 3 впливає на продуктивність питомого зняття металу найбільше, а найменше - кута повороту робочої камери β.

2. Досліджено шорсткість оброблених поверхонь деталей машин виготовлених із сталі Ст 3. Умови оброблення: абразив байкаліт зелений, грануляція 15...20 мм. В залежності від тривалості часу оброблення встановлено, що найбільш інтенсивна зміна шорсткості відбувається на протязі перших 15 хв. При обробленні зразків, виготовлених із сталі 45, використовуючи повнофакторний експеримент типу ПФЕ 3^3 з заданою генеруючою відповідністю, виведено рівняння регресії зміни шорсткості оброблюваної поверхні. Факторне поле визначалось таким діапазоном зміни параметрів: $15 \le \omega \le 25$ (Гц); $15 \le T \le 45$ (хв); $50 \le K \le 80$ (%). Формування шорсткості поверхні при вібраційно-відцентровому обробленні деталей здійснюється із зменшення степені дискретності при збільшенні часу обробки. Встановлено, що взаємодія гранули з поверхнею деталі набуває характер пружного удару, що доходить до сталої шорсткості.

3. Наведені результати досліджень процесу зміни поверхневого шару деталей із сталі 45 при вібраційно-відцентровому обробленні з отриманням рівнянь регресії, можуть використовуватися для визначення мікротвердості обробленої поверхні в залежності від величини тривалості обробки заготовки, кута руху робочої камери, амплітуди кутових коливань. Встановлено, що взаємодія гранули з поверхнею деталі набуває характер пружного удару, так як і при зміні шорсткості, що доходить до сталої мікротвердості обробленої поверхні.

РОЗДІЛ 5
ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

5.1. Дослідження руху абразивної гранули відносно оброблюваної поверхні деталі при вібраційній обробці

Одним із головних напрямів інтенсифікації вібраційного оброблення є розробка нових її різновидностей. Інтенсивність вібраційного оброблення (ВіО) визначається зняттям металу, або ступенем пластичного деформування поверхні в результаті взаємодії абразивної гранули з деталлю. Чим вище енергетичний рівень середовища, тим більша сила такої взаємодії. Для цього використовують різні шляхи активізації різних видів ВіО.

В розглянутих випадках підвищення інтенсивності ВіО досягається за рахунок одночасної дії на робоче середовище двох і більше видів енергій, або додаткових рухів деталей, які обробляються. Енергетичний рівень робочого середовища можна підвищити, якщо вібруючій камері надати додаткові переміщення [41, 71, 78-79, 124, 142, 151]. Ускладнення кінематичного руху камери потрібно проводити таким чином, щоб завантажене робоче середовище піддавати одночасній взаємодії направлених вібрацій і відцентрових сил інерції. При вібраційному обробленні (ВіО) визначаються такі різновидності руху робочої камери: -з площинною вібрацією робочої камери;

- з об'ємною вібрацією робочої камери;
- з простим обертанням робочої камери;
- зі складним обертовим рухом камери відносно двох або трьох власних осей;
- з кутовими коливаннями робочої камери;
- з кутовою вібрацією робочої камери, яка рухається по складній просторовій кривій;
- з планетарним рухом робочої камери;
- з об'ємною кутовою вібрацією робочої камери;
- з комбінованою (поєднання або накладання одна на одну вище наведених різновидностей) вібрацією робочої камери.

Цю ідею покладено в основу розроблення нових процесів вібраційно-відцентрового оброблення (ВВО) і обладнання для його здійснення особливо для деталей складної конфігурації і малої жорсткості. Для повного аналізу процесів ВіО спочатку розглянемо взаємодію абразивної гранули з поверхнею деталі з площинною вібрацією робочої камери для класичної схеми вібраційної установки. Для визначення значення швидкості абразивної частинки в момент відриву від поверхні робочої камери використовуємо відому залежність А.П.Бабічева [7]

$$V = k_v \cdot A_1 \cdot \omega \qquad (5.1)$$

де A_1 – амплітуда коливань робочої камери, м; ω – частота коливань, с$^{-1}$; k_v – коефіцієнт втрати швидкості при віддаленні гранули від стінок робочої камери.

При значенні амплітуди коливань робочої камери A_1 = 0,004м, частоти коливань ω= 15 с$^{-1}$, коефіцієнта втрати швидкості k_v = 1 швидкість абразивної гранули буде рівна V = 0,06 м/с.

На рис.5.1 показана схема взаємодії абразивної гранули з поверхнею деталі при площинній вібрації робочої камери.

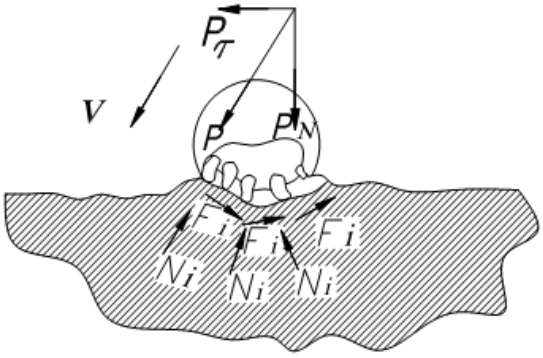


Рисунок 5.1. Схема взаємодії гранули з оброблюваною поверхнею при площинній вібрації робочої камери

Обробляюча гранула, отримавши імпульс енергії від поверхні камери, яка коливається зі швидкістю V, вдаряється по поверхні деталі. Силу вібрації P розкладемо на дві складові: нормальну P_N, при допомозі якої гранула проникає в поверхню, яка обробляється, і дотичну P_τ, яка зміщує гранулу вздовж поверхні. Зі сторони деталі на зерна абразивної гранули, які знаходяться в зоні різання, діють складові нормальної реакції N_i та сили тертя F_i. Вид циркуляції

сипучого абразивного середовища під дією цих сил в основному проходить по плоскій еліптичній траєкторії.

Аналіз процесів ВВО ґрунтується на характеру взаємодії абразивної гранули з поверхнею деталі з об'ємною кутовою вібрацією робочої камери. При ВВО на гранулу крім сили вібрації P діє відцентрова сила $P_в$ (рис. 5.2) [70]. Сумарна сила удару R при ВВО рівна геометричній сумі сил P і $P_в$. Гранула під дією складових R_τ і R_N лишає на поверхні подряпину більшого об'єму ніж при дії P_N і P_τ. Циркуляція робочого середовища під дією сумарних сил проходить по спіралі, яка координується точками кріплення рухомої робочої камери до нерухомої частини (корпуса) вібраційно-відцентрової установки. Визначення значення швидкості абразивної частинки в момент відриву від поверхні для цього випадку проводиться по формулі [70]:

$$V^*_{0\max} = R\omega_1 + A_1\omega \cdot \cos\omega t_0, \qquad (5.2)$$

де ω – кругова частота коливного руху, с$^{-1}$; ω_1 – кутова швидкість повороту радіус-вектора положення початку рухомої системи координат с$^{-1}$; R – радіус траєкторії руху відносно початку координат системи м; A_1 – амплітуди коливань робочої камери, м; t – час, с.

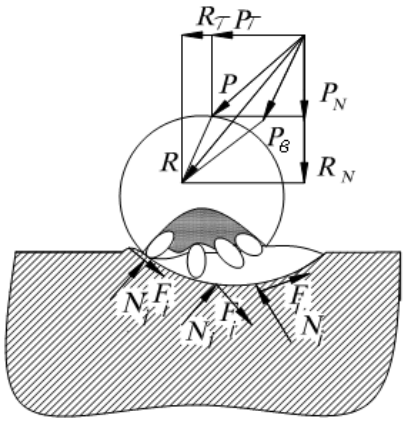


Рисунок 5.2. Схема взаємодії абразивної гранули із оброблюваною поверхнею при ВВО

Підставляючи значення кругової частоти коливного руху ω =15 с$^{-1}$, кутової швидкості повороту радіус-вектора положення початку рухомої системи координат ω_1=15 рад/с, радіуса траєкторії руху відносно початку координат системи R = 0,15м, амплітуди кутових коливань A від 2 град. до 5,5 град; отримаємо графік зміни швидкості абразивної частинки в момент відриву від поверхні робочої камери при ВВО (рис. 5.3). Це дозволяє визначити зміну і

напрямок сили взаємодії абразивної гранули з оброблюваною поверхнею деталі.

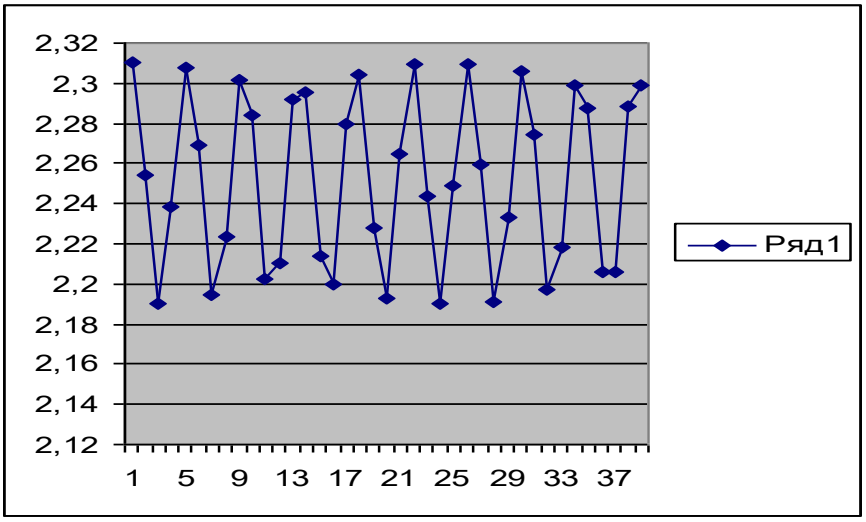


Рисунок 5.3. Графік зміни швидкості абразивної частинки в момент відриву від поверхні робочої камери при ВВО

Для розширення можливостей вібраційно-відцентрового оброблення створюються нові пристрої, в яких крім сил вібрації P і відцентрових сил $P_в$, діють ще дотаткові сили, наприклад сили від обертання робочої камери з механізмом вібраційно-відцентрових коливань $P_{об}$. Характер виду сумарних сил взаємодії абразивної гранули сипучого робочого середовища з оброблюваною поверхнею деталей і їх різновидність запропоновано на схемах (а) і (б) рис.5.4, що відповідають комбінованій вібрації робочої камери.

Аналізуючи наведені схеми можливих варіантів взаємодії абразивної гранули з поверхнею деталі, можна зробити висновок, що сумарна сила удару залежить від напрямків обертання робочої камери з механізмом вібраційно-відцентрових коливань. Значення швидкості абразивної частинки в момент відриву від поверхні робочої камери для цього випадку проводиться по формулі [157]:

$$V^{сум} = V^{*}_{0mac} + signV = R\omega_1 + A_1\omega \cdot \cos\omega\ t_0 + sign(\omega_ц R + \omega_ч r), \qquad (5.3)$$

де ω – кругова частота коливного руху, с$^{-1}$; ω_1 – кутова швидкість повороту радіус-вектора положення початку рухомої системи координат, с$^{-1}$; R – радіус траєкторії руху відносно початку координат системи, м; A_1 – амплітуди

коливань робочої камери, м; $\omega_ц$ – кутова швидкість повороту робочої камери , $с^{-1}$; $\omega_ч$ – кутова швидкість повороту абразивної частинки , $с^{-1}$.

При співпадінні напрямків обертання робочої камери і вібраційно-відцентрових коливань (рис. 5.4 а) сумарна сила удару $R_{сум}$ буде рівна геометричній сумі вібраційно-відцентрових сил R і сили обертання робочої камери з механізмом вібраційно-відцентрових коливань $P_{об}$. [150] Процес формування шорсткості в початковий період оброблення, на відміну від попереднього процесу ВВО, буде проходити швидше. Гранула під дією складових $R_{сум}$ і $P_{об}$ лишає на поверхні подряпину ідентичну подряпині при ВВО, так як R_N рівна $R_{Nсум}$ і тиск абразивної гранули на оброблювану поверхню не змінюється. При цьому швидкість переміщення абразивної гранули відносно оброблюваної поверхні збільшується, тому що $R_{\tau сум}$ більша від R_τ. Всі інші етапи формування шорсткості і міцності оброблюваної поверхні будуть подібні етапам попереднього процесу ВВО. При цьому циркуляція робочого середовища під дією сумарних сил буде проходить по спіралі, в якій крок між витками буде збільшений, що приведе до “ламінарного”, більш лагідного характеру руху сипучого абразивного середовища. Дискретність зміни шорсткості поверхні за весь період обробки не суттєво, але зменшується.

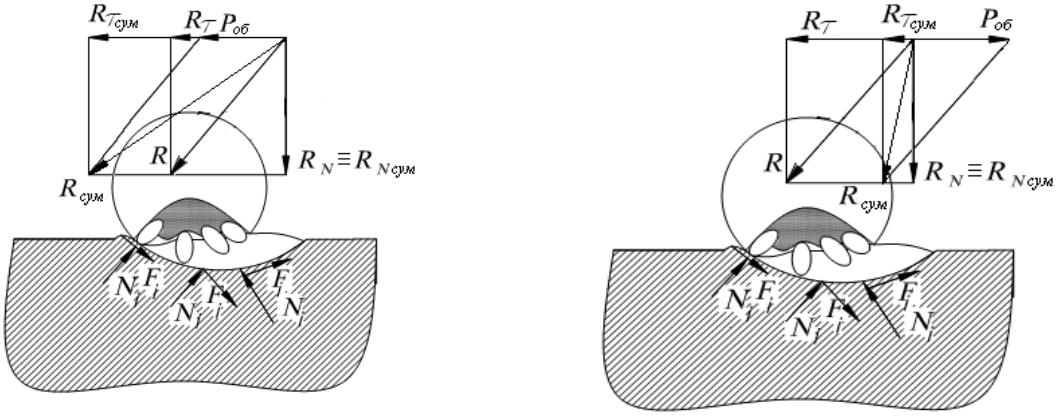
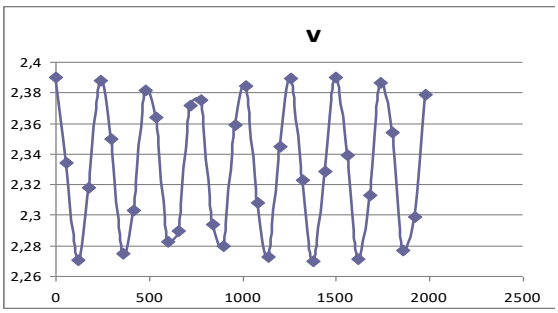


Рисунок 5.4. Схема взаємодії абразивної гранули з оброблюваною поверхнею при поєднанні ВВО і обертанні робочої камери

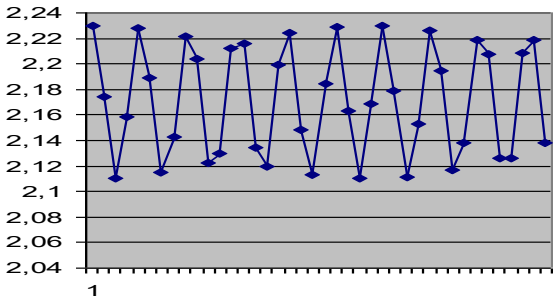
При протилежних напрямках обертання робочої камери і вібраційно-відцентрових коливань (рис.5.4 б) сумарна сила удару $R_{сум}$ буде рівна геометричній сумі R і $P_{об}$. Гранула буде лишати на поверхні подряпину подібну подряпині при ВВО, так як R_N рівна $R_{Nсум}$ і тиск абразивної гранули на оброблювану поверхню не змінюється. При цьому швидкість переміщення

абразивної гранули відносно оброблюваної поверхні зменшується, тому що $R_{\tau сум}$ менша від R_{τ}. Процес формування характеризується інтенсивним зниженням шорсткості і підвищенням поверхневої міцності оброблюваної поверхні за рахунок збільшення кількості (частоти) ударів абразивної гранули. Це збільшить дискретність зміни шорсткості поверхні на всьому періоді обробки. Циркуляція робочого середовища під дією сумарних сил буде проходить по спіралі, в якій крок між витками буде зменшений, що приведе до “турбулентного”, більш агресивного характеру руху сипучого абразивного середовища.

Підставляючи значення кругової частоти коливного руху ω =15 с$^{-1}$, кутової швидкості повороту радіус-вектора положення початку рухомої системи координат ω_1=15 с$^{-1}$, радіуса траєкторії руху відносно початку координат системи R = 0,15м, амплітуди кутових коливань A = 4град, кутової швидкості повороту робочої камери $\omega_ц$=0,5 с$^{-1}$, кутової швидкості повороту абразивної частинки $\omega_ч$ = 1 с$^{-1}$, отримаємо графік зміни швидкості абразивної частинки в момент відриву від поверхні робочої камери при ВВО зі змінним обертанням робочої камери (рис. 5.5).



а)



б)

Рисунок 5.5. Графік зміни швидкості абразивної частинки в момент відриву від поверхні робочої камери при ВВО зі змінним обертанням робочої камери

Отримані графіки зміни швидкості абразивної частинки в момент відриву від поверхні робочої камери констатують факт, що характер зміни прискорень частинок і величини їх швидкості визначається основним, біль інтенсивним, методом вібраційної обробки. Тому вібраційно-відцентровий процес оброки поверхні деталей абразивними гранулами рахуємо основним, а інші являються

допоміжними для корегування технологічного процесу в ту чи іншу сторону. Це дозволяє розширити можливості існуючого технологічного процесу ВВО.

5.2. Типовий технологічний процес вібраційно-відцентрової обробки деталей

Деталі, які підлягають обробки, із сталі 45. Номер і призначення операції: 010 – зачисна; 015 – шліфування; 20 – полірування. Технологічний процес оснащений необхідним обладнанням, комплектом технологічної оснастки і інструмента, апробований на партії виробів в кількості 100 шт. і забезпечує виготовлення в повній відповідності з вимогами конструкторської документації і технічних умов, що наведено в табл. 5.1-5.3.

Таблиц. 5.1. Ручна робота

Назва і номер операції	Кіль. дет.	Базовий варіант (ручна обробка)		Впроваджений варіант ВВУ І		+перерозхід - економія	
		Норма часу (н-хв.)	Розцінка (грн.)	Норма часу (н-хв.)	Розцінка (грн.)	Трудо-ємкість (н-хв.)	Затра-ти (грн.)
010 зачисна	1	0,2	0,2	0,0779	0,071		
015 шліфування	1	0,2	0,2	0,07	0,066		
020 полірування	1	0,16	0,15	0,07	0,07		
Всього		0,56	0,55	0,2179	0,207	-0,3421	-0,343

Ручна обробка:

- 010 зачисна - стіл слюсарний, тиски, напилок, фартух, рукавиці;
- 015 шліфування - стіл слюсарний, тиски, шліфінструмент, фартух, рукавиці;
- 020 полірування - галтовочний барабан (об’єм робочої камери 10л), бруски дуба, водяний розчин NaOH, Na_2CO_3;

Для ВВО І:

- 010 зачисна – абразив формований ПТС-8, варіант І (водяний рощин Na3PO4),
- варант ІІ (водяний рощин NaOH, Na2CO3);

- 015 шліфування – байкаліт зелений (фракція 5 – 8 мм), варіант I (водяний рощин Na3PO4), варант II (водяний рощин NaOH, Na2CO3);
- 020 полірування – кулі стальні поліровані ДСТУ 3722-81 (Ø2, Ø3.5, Ø5), варіант I (водяний рощин Na3PO4), варант II (водяний рощин NaOH, Na2CO3);

Таблиця 5.2 ВВО I

Назва і номер операції	Кіль. дет.	Базовий варіант (ручна обробка)		Впроваджений варіант ВВУ II		+перерозхід - економія	
		Норма часу (н-хв.)	Розцінка (грн.)	Норма часу (н-хв.)	Розцінка (грн.)	Трудо-ємкість (н-хв.)	Затра-ти (грн.)
010 зачисна	1	0,2	0,2	0,07	0,066		
015 шліфування	1	0,2	0,2	0,06	0,05		
020 полірування	1	0,16	0,15	0,06	0,06		
Всього		0,56	0,55	0,19	0,176	-0,47	-0,374

Для ВВО II;

- 010 зачисна – абразив формований ПТС-8;
- 015 шліфування – байкаліт зелений (фракція 5 – 8 мм);
- 020 полірування – кулі стальні поліровані ДСТУ 3722-81 (Ø2, Ø3.5, Ø5);

Таблиця 5.3 ВВО II

Назва і номер операції	Кіль. дет.	Базовий варіант ВВУ I		Впроваджений варіант ВВУ II		+перерозхід - економія	
		Норма часу (н-хв.)	Розцінка (грн.)	Норма часу (н-хв.)	Розцінка (грн.)	Трудо-ємкість (н-хв.)	Затра-ти (грн.)
010 зачисна	1	0,0779	0,071	0,07	0,066		
015 шліфування	1	0,07	0,066	0,06	0,05		
020 полірування	1	0,07	0,07	0,06	0,06		
Всього		0,2179	0,207	0,19	0,176	-0,0279	-0,031

5.3. Алгоритм роботи перевірки математичної моделі для процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей

Для перевірки корректності математичної моделі [72] обрахунку шорсткості поверхні деталі, одержаної за допомогою абразивних гранул, була розроблена програма на мові C#, яка наведена в додатку. На основі математичної моделі нами було розроблемно наступний алгоритм роботи програми додаток Г. Враховуючи складність математичної моделі, ми відібрали найбільш істотні параметри і реалізували їх як динамічні змінні, а менш важливі були запрограмовані як константи.

Для пошуку роз'язку ми скористалися наступним алгоритмом.

1. Першим кроком ми вводимо константи для зупинки рекурсії, якщо очікувана шорсткість деталі не буде досягнута в наслідок роботи алгоритму при заданих вхідних параметрах.

2. Другим кроком ми задаємо початкову шорсткість і матеріал деталі, кутову амплітуду і величину грануляції, а також задаємо коефіцієнт корисного використання робочої камери, тощо.

3. Розглянемо окремий удар.

4. Обраховуємо силу, яка притискає гранулу до оброблюваної поверхні.

5. Обрахунок тангенціальної сили.

6. Обрахунок енергії сил різання і зняття металу.

7. Обрахунок відхилення профілю шорткості протягом одного удару. Це є найбільш ресурсозатратна частина розрахунків.

8. Обрахунок відхилення профілю шорткості при заданій частоті обертання.

Цей крок базується на результатах попереднього кроку, тому для пришвидчення роботи програми, нами було використано симплексний метод рішення задач лінійного програмування.

9. Перевірка величини отриманої шорсткості поверхні.

Якщо очікувані показники були досягнуті, то програма завершує свою роботу, в противному випадку повторюється крок 2, і обрахунок стартує з початку з новою зміненою початковою шорсткістю.

Для захисту від зависання програми алгоритм додатково перевіряє кількість ітерацій (обрахунків), якщо очікувані показники не можуть бути досягнені при заданих вхідних параметрах, то програма завершується з повідомленням про відсутність розв'язку.

10. Вивід результа.

Враховуючи складність математичної моделі, нами були використані наступні технології для пришвидчення розрахунків.

1. Рекурсія. Для розрахунку зміни шорсткості поверхні деталі в наслідок обробки поверхні при заданій частоті обертання.

2. LINQ. Для збереження результатів обрахунків енергій сил різання і зняття металу був використаний список (List), а робота з ним здійснювалася за допомогою LINQ (мова запитів).

3. ADO.NET. Всі результати обрахунків зберігаються в таблицях DBF для подальшого аналізу і побудови графіків.

4. DynamicDataDisplay. Бібліотека з відкритим кодом для побудови графіків.

5. Parallel Tasks. За допомогою цієї технології нами були проведені розрахунки в окремому фоновому потоці.

6. Linear Programming. Бібліотека математичних обрахунків.

Програма додатково зберігає інформацію про зміну відхилення шорсткості протягом одного зіткнення, яку можна використати для аналізу впливу зміни вихідних параметрів на результат проміжних обрахунків блок схема наведено на рис. 5.6.

Для візуалізації залежності впливу основних вхідних параметрів (грануляція, коефіцієнт корисного використання робочої камери, кутова амплітуда) на результат були побудовані відповідні графіки. Графіки будувалися на основі збережених даних з таблиць DBF, які були обраховані попередньо на рис. 5.7.

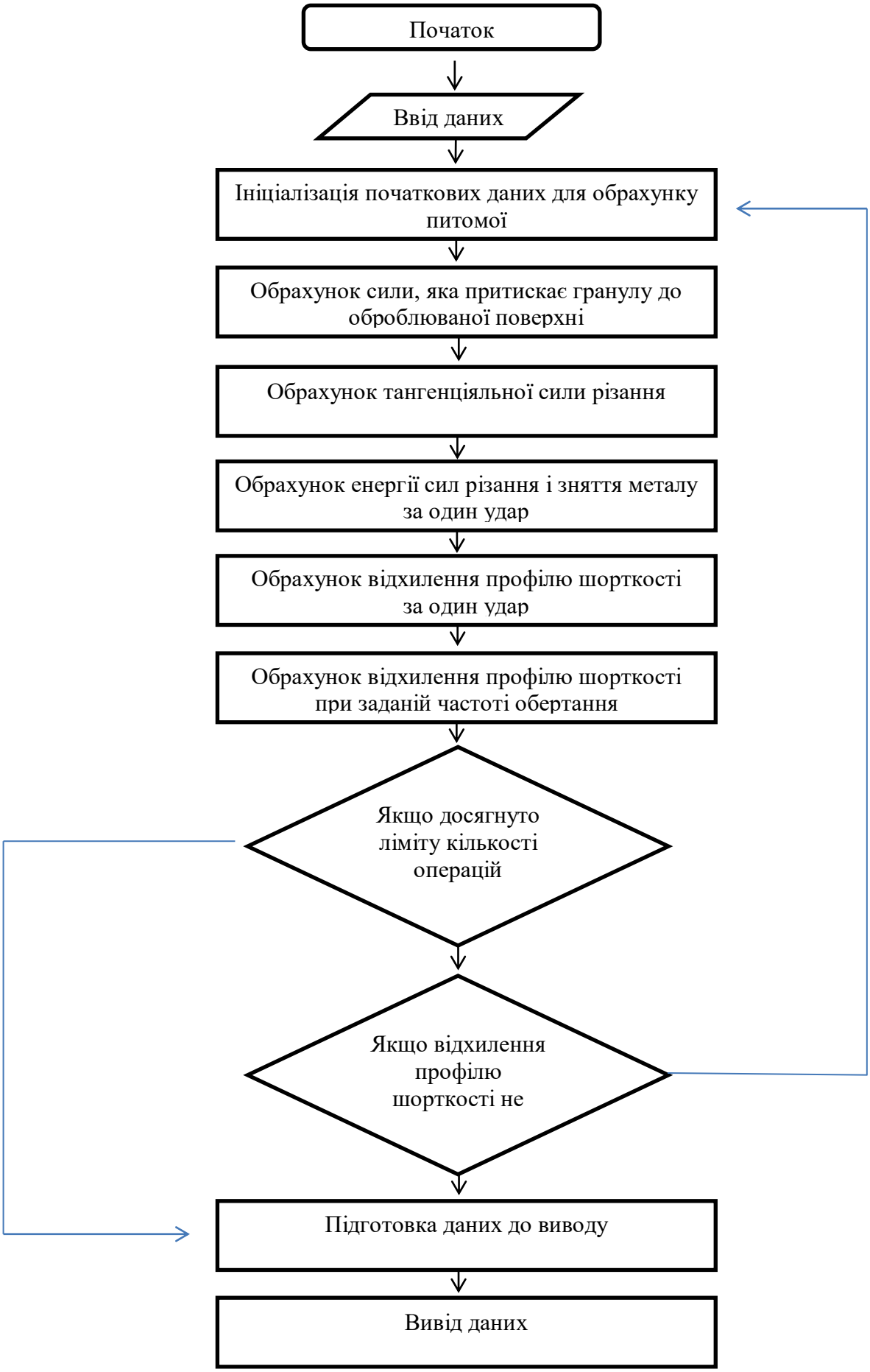
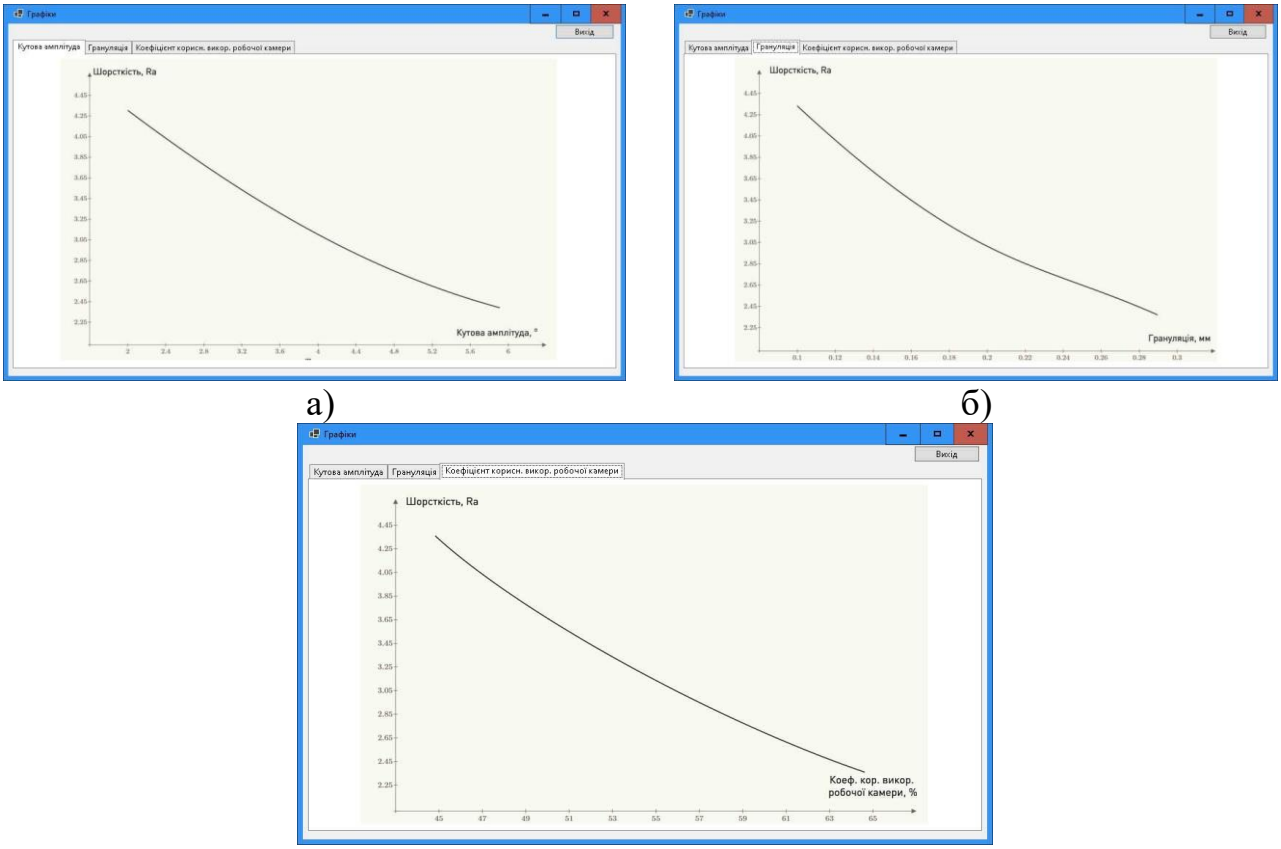


Рисунок 5.6 Блок-схема роботи алгоритму при процес вібраційно-відцентрової обробки деталей

Для пришвидчення роботи з даними були використані змінні типу даних Dictionary. Цей тип даних дозволяє здійснювати пошук елементів швидше ніж стандартні типи List і Array. Для передачі параметрів в процедури обрахунку енергій сил різання і зняття металу було використано reference типи даних, це дало можливість отримати виграш в часі на етапі ініціалізації вхідних об’єктів для обрахунку результату роботи функції. Ця функція викликається рекурсивно. Frontend програми був реалізований на елементах Windows Form.



а) б)

в)

Рисунок 5.7. Візуалізації залежності впливу основних вхідних параметрів на шорсткість: а) – кутова амплітуда; б)- грануляція; в) - коефіцієнт корисного використання робочої камери

Запропонована візуалізація процесу вібраційно-відцентрової обробки та блок-схема програми розрахунку технологічного процесу дозволить визначити продуктивності зняття металу, шорсткості і якості поверхні та дозволяють досить точно прогнозувати і розраховувати даний процес та уникнути дискретного характеру технологічного процесу.

5.4. Техніко-економічне обґрунтування вібраційно-відцентрового оброблення деталей

Розрахунок річного економічного ефекту від впровадження вібраційно-відцентрового верстата для віброобробки поверхонь деталей на операціях зачистки заусінок і заокруглення гострих кромок на механічній дільниці [110, 148].

До впровадження вібраційно-відцентрового верстата обробки поверхонь деталей проводилась вручну через складність форми поверхні (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

Розрахунок річного економічного ефекту від впровадження вібраційно-відцентрового верстата для віброобробки поверхонь

Шифр деталей	Роз-ряд слю-саря	Прог-рама річна тис. шт.	До впровадження				Після впровадження			
			Норма часу на обробку одної деталі	Розцінка на одну деталь (гр)	Трудо-ємкість річна (год.)	Собівартість річної програми (т.,гр.)	Норма часу на обробку одної деталі	Розцінка на одну деталь	Трудо-ємкість річна	Собівар-тість річної програ-ми
Пластина	2	190	0,015625	0,84375	2968,75	160,3	0,0019531	0,1054687	371	20,04
Кришка розємна	2	50		0,84375	781,25	42,2	0,0019531	0,1054687	97,6	5,3
Корпус	2	50	0,015625	2,6875	3062,5	134,4	0,0076562	0,0859375	390,6	4,3
Важіль нажимний	2	10	0,06125	0,3375	62,5	3,4	0,0007812	0,0421875	7,8	0,4
			0,00625							
Всього		300			6875	340,3			847,2	419,85

Розрахунок потрібної кількості одиниць впровадженого обладнання ведемо за формулою:

$$N = \frac{B}{П \cdot Ф_д \cdot К_з};$$

де B - річна програма випуску деталей, B=300 тис. шт.; $П$ - продуктивність (середня) верстата при обробці деталей, наведених в табл. 5.4, $П$=300; $Ф_д$ - дійсний річний фонд часу роботи обладнання при однозмінній роботі, $Ф_д$=2007,5 год.; $К_з$ - коефіцієнт завантаження обладнання, $К_з$=0,58;

$$N = \frac{300000}{300 \cdot 2007{,}5 \cdot 0{,}58} = 0{,}86 .$$

Приймаємо N=1.

Розрахунок потрібної кількості робітників проводимо за формулою:

$$N_p = \frac{T}{Ф_p};$$

де T - трудоємність робіт річна; $Ф_p$ - річний фонд робочого часу робітника; $Ф_p$=1842 год.

До впровадження

$$N_p = \frac{6875}{1842} = 3{,}73 .$$

Приймаємо N_p=4.

Після впровадження

$$N_p = \frac{867}{1842} = 0{,}47 .$$

Приймаємо N_p=1.

Таблиця 5.5. Розрахунок капітальних витрат

Обладнання (інструмент, спецодяг)	До впровадження			Після впровадження		
	Кількість одиниць	Собівартість одиниці (гр.)	Загальна вартість (гр.)	Кількість одиниць	Собівартість одиниці (гр.)	Загальна вартість (гр.)
Стіл слюсарний	4	420	1680			
Тиски	4	125	500			
Напилок	8	30	240			
Фартух	4	30	120	1	30	30
Рукавиці	12	6	72	1	6	6
Станок				1	1400	1400

Розрахунок собівартості по змінюваним статтям.

Таблиця 5.6. Розрахунок заробітної платні.

Показники	Одиниця вимірювання	До впровадження	Після впровадження
Тривалість річної програми			
Кількість робітників	нормо-год.	6875	867
Розряд робітника	чол.	4	1
Тарифна ставка 2 розряду		2	2
Основна зарплата	грн.	10,1	10,1
Премія (20% від основної)	грн.	19392	2424
Додаткова зарплата (7,8% від основної з премією)	грн.	3878,4	484,8
Відрахування на соцстрах (14% від основної і додаткової)	грн.	1815	226,9
Річний фонд	грн.	2969	371,1
	грн.	28054,4	3506,8

Таблиця 5.7. Розрахунок витрат на утримування і ремонт обладнання, утримування приміщення.

Показники	Одиниці вимірювання	Витрати до впровадження	Витрати після впровадження
1	2	3	4
Ремонтна складність обладнання: механічної частини електричної частини	одиниця ремонтної складності		5 3
Собівартість одиниці ремонтної складності: механічної частини електричної частини	грн. грн.		15,5 4,75
Площа приміщення, занятого обладнанням	$м^2$	16	4
Витрати на утримання 1 $м^2$ приміщення	грн.	13,72	13,72
Витрати на утримання всієї площі, занятої обладнанням	грн.	219,52	54,88
Загальні витрати на утримання обладнання і приміщення	грн.	219,52	146,6

Розрахунок витрат на електроенергію проводимо залежністю:

$$C_{ел} = Ц_в \cdot N_п \cdot K_п \cdot K_ч \cdot Ф_д,$$

де $C_{ел}$ - витрати на електроенергію в рік в грн.; $N_п$ - встановлена потужність приймачів електроенергії; $N_п$=0,55 кВт; $K_п$ - коефіцієнт використання приймача енергії з потужності; $K_ч$ - коефіцієнт використання приймача енергії по часу; $Ф_д$ - дійсний річний фонд часу одиниці обладнання; $Ц_в$ - ціна 1 кВт ч електроенергії, $Ц_в$ =1,68 грн.

$$C_{ел}=1{,}68\cdot 0{,}55\cdot 0{,}8\cdot 0{,}58\cdot 2007{,}5=860{,}7 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.8. Розрахунок витрат на амортизацію обладнання і приміщення.

Показники	Одиниці вимірювання	До впровадження	Після впровадження
Вартість обладнання	грн.	2180	1400
Амортизація відрахування на обладнання	%	1,2	10,44
Витрати на амортизацію	грн.	26,16	146,16
Сума вартості зносу інструменту, спецодягу, віднесеної на собівартість виробів:			
а) напилки	грн.	240	
б) фартухи	грн.	120	30
в) рукавиці	грн.	72	6
Вартість 1 м^2 приміщення	грн.	127,0	127,0
Вартість приміщення під обладнання	грн.	2032,0	508
Амортизаційні відрахування на приміщення	%	2,6	2,6
Витрати на амортизацію приміщення під обладнання	грн.	52,83	13,2
Витрати на амортизацію приміщення і обладнання	грн.	511	195,2

Розрахунок річного економічного ефекту проводимо за залежністю:

$$E = (C_1 + E_н \cdot K_1) - (C_2 + E_н \cdot K_2),$$

де C_1 – собівартість річної продукції до впровадження; K_1 – капітальні вкладення в виробничі фонди до впровадження; C_2 – собівартість річної продукції після впровадження; K_2 – капітальні вкладення в виробничі фонди після впровадження; $E_н$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень

$$E=(28784,4+2612\cdot0,15)-(4709,3+1436\cdot0,15)=24251,5\text{грн.}$$

Таблиця 5.9. Зведені результати розрахунку економічного ефекту.

Показники	Одиниці вимірювання	До впровадження	Після впровадження
Капітальні вкладення	грн.	2612	1436
Собівартість річної продуктивності по змінюваним статтям	грн.	28784,4	4709,3
В тому числі:			
Заробітна платня	грн.	28054,4	3506,8
Утримання і ремонт обладнання, утримання приміщення	грн.	219	146,6
Витрати на електроенергію	грн.		860,7
Витрати на амортизацію приміщення і обладнання	грн.	511	195,2
Нормативний коефіцієнт ефективності $E_н$=0,15			

Річний економічний ефект від впровадження одної вібраційно-відцентрового установки становить 24251,5 гривень.

5.5. Висновки

1. Проаналізовано основні закономірності та встановлено причини зміни швидкості абразивної частинки в момент відриву від поверхні робочої камери, які констатують факт, що характер зміни прискорень частинок і величини їх швидкості визначається основним, біль інтенсивним, методом вібраційної обробки.

2. Представлено основні конструктивні параметри для технологічного устаткування при вібраційно-відцентровому обробленні деталей при значеннях кругової частоти коливного руху ω =15 $с^{-1}$, кутової швидкості повороту радіус-вектора положення початку рухомої системи координат ω_1=15 $с^{-1}$, радіуса траєкторії руху відносно початку координат системи R = 0,15м, амплітуди кутових коливань A від 2 град. до 5,5 град, кутової швидкості повороту робочої камери $\omega_ц$=0,5 $с^{-1}$, кутової швидкості повороту абразивної частинки $\omega_ч$ = 1 $с^{-1}$.

3. Запропонована візуалізація процесу вібраційно-відцентрової обробки та блок-схема програми розрахунку технологічного процесу дозволить визначити продуктивності зняття металу, шорсткості і якості поверхні та досить точно прогнозувати і розраховувати даний процес та уникнути дискретного характеру технологічного процесу та знайти оптимальне співвідношення вхідних даних, використовуючи технологію LINQ.

4. Приведений річний економічний ефект технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки при заміні базового варіанту оброблення усієї партії виробів на розроблений становить 24251,5 грн. Одержані наукові і практичні результати, які частково впроваджено для використання у ТДВ «Булат» (смт Микулинці) та ТзОВ «ВМП енергоконструкція» (м. Рівне). Технічна новизна захищена 3 патентами України на корисні моделі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У дисертації виконано теоретичне та експериментальне нове вирішення науково-прикладної задачі технологічного забезпечення вібраційно-відцентрового оброблення деталей складного профілю в сипучому абразивному середовищі із розробленням теоретичних передумов, технологічних процесів, проектуванням та виготовленням технологічного устаткування, що забезпечує підвищення продуктивності із забезпеченням встановленої якості оброблених поверхонь.

2. Розроблено математичну модель дії абразивної частинки на поверхню деталі, яка враховує параметри гранули сипучого робочого середовища і кута її взаємодії з оброблюваною поверхнею, що визначається кінематикою вібраційної установки, яка встановлює вид циркуляції робочого середовища для певного технологічного процесу обробки деталей. Встановлено, що при меншому значенні коефіцієнта форми гранули k зміна значень коефіцієнта миттєвого тертя λ гранули від кута орієнтації гранули φ є значною, з синусоїдальною періодичністю, приблизно рівною 22°-25°, що відповідає переходу від режиму шліфування до режиму полірування абразивними гранулами оброблюваної поверхні.

3. Отримана математична модель руху сипкого середовища на основі закону Фохта, що дозволяє описати динамічні процеси в оброблювальному середовищі для широкого спектру типів його матеріалів. Встановлено частоти власних коливань шару оброблювального середовища, які залежать від амплітуди його коливань за різних значень його густини для м’яких та жорстких матеріалів оброблювального середовища та середовища з лінійно-пружними властивостями. Виведено аналітичні залежності, які встановлюють співвідношення параметрів процесу механічної обробки поверхонь деталей сипучим абразивним середовищем для резонансного і нерезонансного випадку.

4. Проведено експериментальні дослідження на спроектованій та виготовленій вібраційно-відцентровій установці обробленням деталей з робочим середовищем: природний байкаліт та гранульований абразивний матеріал ПТС-8. Параметри експериментальної установки: об’єм робочої

камери 14 дм^3, амплітуда коливань – 2...6 град., частота коливань - 15...25 Гц, потужність електродвигунів 0,55 кВт, коефіцієнт заповнення камери 50...80%. Встановлено, що із збільшенням коефіцієнта форми гранули k, амплітуди кутових коливань A та кута повороту робочої камери β величина питомого зняття металу під час обробки деталей зростає. Максимальна величина питомого зняття металу складає 63·10^{-3} г/см^2, а мінімальна – 46·10^{-3} г/см^2. Збільшення коефіцієнта форми гранули k від 0,1 до 0,5 призводить до підвищення питомого зняття металу на 9%. При цьому збільшення амплітуди кутових коливань A від 2 град. до 4 град. надає приросту питомого зняття металу на 15%. Збільшення кута повороту робочої камери β від 15 град. до 35 град. призводить до підвищення питомого зняття металу на 13%.

5. Експериментально досліджено шорсткість оброблених поверхонь деталей машин, виготовлених із сталі Ст 3 після вібраційно-відцентрового оброблення з виведенням рівняння регресії. Встановлено, що найінтенсивніша зміна відбувається протягом перших 15 хв. обробки. Максимальне значення шорсткості оброблених поверхонь складає Ra 4,53 мкм., а мінімальне – Ra 1,22 мкм. Збільшення частоти коливань ω від 15 Гц до 18 Гц призводить до зниження шорсткості оброблених поверхонь, при цьому подальше збільшення частоти коливань до 25 Гц призводить до зростання шорсткості оброблених поверхонь. Збільшення тривалості обробки заготовки T від 15 хв. до 35 хв. призводить до зниження шорсткості оброблених поверхонь, а подальше збільшення тривалості обробки до 55 хв. призводить до зростання шорсткості оброблених поверхонь. Тому раціональний час обробки становить 35 хв. Збільшення ступеня заповнення робочої камери K від 50 % до 80 % призводить до зростання шорсткості оброблених поверхонь на 12%.

6. Експериментально досліджено мікротвердість поверхневого шару деталей після вібраційно-відцентрового оброблення з виведенням рівняння регресії. Максимальне значення мікротвердості поверхневого шару деталей складає 259 H_v МПа, а мінімальне – 140 H_v МПа,. Збільшення тривалості обробки заготовки T від 15 хв до 55 хв. призводить до зростання мікротвердість поверхневого шару деталей на 22%. Збільшення кута повороту робочої камери

β від 15 град. до 27 град. призводить до зростання мікротвердість поверхневого шару, при цьому подальше збільшення кута повороту робочої камери до 35 град. призводить до зменшення мікротвердість поверхневого шару. Тому раціональний кут повороту робочої камери становить 27 град. При цьому збільшення амплітуди кутових коливань A від 2 град. до 5,5 град. призводить до зростання мікротвердості поверхневого шару, а подальше збільшення амплітуди кутових коливань до 6 град. призводить до зменшення мікротвердості поверхневого шару. Тому раціональна амплітуда кутових коливань становить 5,5 град.

7. Виведено аналітичні залежності для визначення кінематичних параметрів абразивної частинки процесу вібраційно-відцентрового оброблення. Запропонована візуалізація процесу вібраційно-відцентрового оброблення та блок-схема програми розрахунку технологічного процесу, що дозволяє прогнозувати продуктивність зняття металу, шорсткість та твердість одержаної поверхні, уникати дискретного характеру технологічного процесу та знаходити оптимальне співвідношення режимів обробки, використовуючи технологію LINQ. Приведений річний економічний ефект від впровадження технологічного процесу вібраційно-відцентрового оброблення при заміні базового варіанту оброблення усієї партії виробів на розроблений становить 24251,5 грн. Одержані наукові і практичні результати частково впроваджено для використання у ТДВ «Булат» (смт Микулинці) та ТзОВ «ВМП енергоконструкція» (м. Рівне). Технічна новизна захищена 3 патентами України на корисні моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

2. Анпилогов В.А. Некоторые исследования кинематики и динамики рабочей массы при объемной вибрационной обработке // Вопросы совершенствования технологических процессов машиностроения. Ижевск, 1971, - С.15-23.

3. Ахметшин Н.И. Вибрационное резание металлов / Н.И. Ахметшин [и др.] – Л.: Машиностроение, 1987. – 80 с.

4. Бабичев А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов-на-Дону, 2008. – 694 с.

5. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей / А.П. Бабичев – М.: Машиностроение, 1974. – 133 с.

6. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей в абразивной среде / А.П. Бабичев – М.: Машиностроение, 1968. – 92 с.

7. Бабичев А.П. Вибрационные станки для обработки деталей / А.П. Бабичев, В.Б. Трунин, Ю.М. Самодумский, В.П. Устинов. – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.

8. Бабичев А.П. Исследование технологических основ процесса вибрационной обработки упрочнения и влияния их на эксплуатационные свойства деталей машин: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения”/ А.П. Бабичев. – Минск, 1970. –20 с.

9. Бабичев А.П. Исследование технологических основ процессов обработки деталей в среде колеблющихся тел (вибрационной обработки) с использованием низкочастотных вибраций: автореф. дис. на соискание науч. степени док. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения”/ А.П. Бабичев – Тула. 1975. – 62 с.

10. Бабичев А.П. Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей / А.П. Бабичев, Л.К. Зеленцов, Ю.М. Самодумский. – Ростов н/Д: Издательство Ростовского университета, 1981. –

160 с.

11. Бабичев А.П. Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки / А.П. Бабичев, Т.Н. Рысева, В.А. Самодуров, М.А. Тамаркин. – М.: Машиностроение. 1988. – 64 с.

12. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев – Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.

13. Бабичев А.П. Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко [и др.] – Ростов н/Д.: Издательный центр ДГТУ, 2006. – 215 с.

14. Бабичев А.П., Зеленцов Л.К., Ю.М. Самодумский. Конструирование и эксплуатация вибрационных станков для обработки деталей. - Ростов н/Дону: Гзд-во Рост. Ун-та, 1981. – 160 с.

15. Бабичев А.П., Мельникова Е.П. Исследование возможности изготовления абразивных гранул для ВиО из отходов металлургического производства // Вінниця: Всеукраїнський наук.-техн. журнал “Вибрации в технике и технологіях”. – 2000. - №1(13). - С.18-20.

16. Бабичев А.П., Рысева Т.Н., Самадуров В.А., Тамаркин М.А. Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки. - М.: Машиностроение, 1988. – 64 с.

17. Бабичев А.П., Трунин В.Б., Самодумский В.П., Устинов В.П. Вибрационные станки для обработки деталей. – М.: Машиностроение, 1984. – 168с.

18. Бабичев А.П., Трунин В.Б., Устинов В.П. Анализ конструкций и классификация станков для вибрационной обработки деталей // Вестник машиностроения. – 1978. – №7. – С.64-66.

19. Барон Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю.М. Барон . – Л.: Машиностроение, 1975. – 127 с.

20. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанемидзе. – М.: Наука, 1964. - с.300 – 303, 379 – 382.

21. Боголюбов Н.Н. Одночастотные свободные колебания в нелинейных системах со многими степенями свободы. Сб. Трудов и-та строительной механики АН УССР. – 1949. - №10. - С. 9-21.

22. Бойков В. Г. Ударные взаимодействия .«АвтоМеханика», М., www.euler.ru,

23. Бондарь Н.И. Центробежно-вибрационные установки / Н.И. Бондарь, В.М. Мороз. – М.: Машиностроитель, 1980.

24. Боровець В.М., Коруняк П.С.. Дослідження сил між елементами вібраційних машин і деталями в обертових пристроях // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2002. – №442. – С. 12-18.

25. Бранспиз Е. В. Обработка крупногабаритных деталей в вибрационных контейнерах / Е. В. Бранспиз, Д. В. Молчанов, А. В. Романченко // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. статей. – Ростовна-Дону, 2009. – С. 81 – 84.

26. Бранспиз Е. В. Повышение эффективности виброабразивной обработки путем рационального выбора ее основных параметров: дис. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Бранспиз Елена Владимировна. – Луганск, 2002. – 265 с.

27. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатим поверхностям сельскохозяйственных машин / П.М. Василенко. – Киев: Изд-во УАСХН, 1960. – С. 196 – 208.

28. Васильев И.А. Электрохимическая виброгалтовка мелких деталей / И.А. Васильев, Л.М. Шатеро // Опыт применения электрических методов обработки в приборостроении. – Л.: ЛДНТП, 1977. – С. 60 – 80.

29. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. / Ред. совет: Челомей В.Н. (предс.) – М.: Машиностроение, 1979. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем. / Под ред. Блехмана И.И. 1979. – С. 51 – 65.

30. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. / Ред. совет: Челомей В.В. (предс.) – М.: Машиностроение, 1981. - Т. 4. Вибрационные процессы и машины. / Под ред. Лавендела Э.Э. 1981. – С. 13 – 51.

31. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. / Ред. совет: Челомей В.Н. (предс.) – М.: Машиностроение, 1981. - Т. 6. Защита от вибрации и ударов. / Под ред. Фролова К.В.. 1981. – С. 83 – 227.

32. Вибрационная обработка в установке с жесткой кинематической связью. / Б.Н. Мельников, А.В. Латушкин // Прогрессивная отделочно-уплотняющая технология. – Ростов н/Д.: РИСХМ, 1982. – С. 47 – 51.

33. Власов В.А. Исследование механики взаимодействия шлифованных тел и стальных деталей в вибрирующих резервуарах: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения”/ В.А. Власов. – Харьков, 1974.

34. Власов В.А. Исследование механики взаимодействия шлифованных тел и стальных деталей в вибрирующих резервуарах: дис. канд. технич. наук:05.02.08 / В.А. Власов. – Ворошиловоград, 1974.

35. Влияние упрочнения рабочей среды на пористость металлических покрытий наносимых при вибрационной обработке с нагревом / А.П. Бабичев, В.П. Анкудимов, В.Г. Санамян // Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология. – Ростов н/Д.: РИСХМ, 1982. – С. 29 – 32.

36. Галан Ю. Я., Устаткування для проведення експериментальних досліджень обробки деталей в абразивному середовищі. / О. М.Кондратюк, Іг.Б. Гевко, Ю. Я. Галан //XVI ММНТК “Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво”, 26-29 жовтня. – Суми, 2016. – С48-50.

37. Галан Ю.Я. Вібраційно-відцентрова установка для технологій обробки деталей машин/ О.М.Кондратюк, Іг.Б. Гевко Ю.Я. Галан // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2015 р.: тези допов. – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – С. 160-162.

38. Галан Ю.Я. Оптимізація технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей / Б.М. Гевко, О.М.Кондратюк, Ю.Я. Галан// «Перспективні технології та прилади» Луцький НТУ, – Луцьк, 2015. – С.8-13.

39. Гевко Б.М. Особливості технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей / Б.М. Гевко, О.М. Кондратюк// Вісник НУВГП: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП,2012. – Випуск №3(59). – С.69 – 76.

40. Гевко Б.М. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей/ Б.М. Гевко, О.М. Кондратюк, О.М. Шаблій, М.І. Підгурський // Науковий журнал. Вісник ТНТУ

ім. І.Пулюя. –Тернопіль, 2012. – Випуск 3(67). – С. 190–197.

41. Гевко Б.М. Розширення технологічних можливостей вібра-ційно-відцентрового оброблення деталей / Б.М. Гевко, О.М. Кондратюк, О.М. Шаблій, М.І. Підгурський // Науковий журнал. Вісник ТНТУ ім. І.Пулюя. – Тернопіль, 2012. – Випуск 3(67). – С. 210 – 217.

42. Гевко Б.М., Підвищення ефективності вібраційно-відцентрового оброблення деталей вільними абразивами./ Б.М. Гевко, О.М. Кондратюк, О.Л. Ляшук, М.М. Марчук, Л.С. Серілко, Ю.Я. Галан. Монографія. – Рівне: НУВГП, 2017. – 136 с.

43. Гродзинский Э.Я. Абразивно-электрохимическая обработка / Э.Я. Гродзинский. – М.: Машиностроение, 1976. – 51 с.

44. Душинський В. В. Основи наукових досліджень. Теорія і практикум з програмним забезпеченням / Душинський В. В. – К. : НТУУ “КПІ”, 1998. – 408 с.

45. Де Барр А.Е. Электрохимическая обработка / Де Барр А.Е., Оливер Д.А. (пер. з англ.). – М.: Машиностроение, 1973. – 183 с.

46. Денисов П.Д., Берник П.С., Солоная Е.В. Вибрационные мельницы непрерывного действия // Вінниця: Всеукраїнський наук.-техн. журнал “Вибрации в технике и технологіях”. - 2000. - №1(13). - С. 27-31

47. Джеджула О. М. Особливості конструювання вібраційних змішувачів. Вібрації в техніці і технологіях. 2019. № 4 (95). С. 24– 30.

48. Жолобов О.О. Технологія автоматизованого виробництва / О.О. Жолобов, В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, В.А. Яновський, – Житомир. 2008. – 1114с.

49. Зачистка трубных деталей металлоконструкций вибрационным способом / П. П. Королев, В. Д. Барлет, В. П. Дубовик, В. Г. Омельченко, З. В. Моклякова // Тезисы докладов Всесоюзн. научн. конф. «Вибрационная техника в машиностроении и приборостроении». – Львов, 1973. – С. 220-221.

50. Зверовщиков А. В. Совершенствование технологии шпиндельной обработки деталей при уплотнении шлифовального материала внешним давлением: дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Зверовщиков Анатолий Владимирович; Пензенский гос. ун-т. – Пенза, 2004. – 270 с.

51. Иосилевич Г.Б. Прикладная механика / Г.Б. Иосилевич, П.А. Лебедев, В.С. Стреляев. – М.: Машиностроение, 1985. – 585с.

52. Исаков Р.Б. Состояние и перспективы развития абразивной электрообработке / Р.Б. Исаков, А.С. Коньшин //Станки и инструмент. – 1977. – № 9. – С. 36 – 38.

53. Исследование процесса вибрационной обработки / В.М. Дьяченко // Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин. – Ростов-на-Дону: НИИТМ, 1968. – С. 32 – 58.

54. К вопросу о транспортировании гидроабразивной суспензии при обработке деталей уплотненным абразивом. / Е.З. Зверовщиков, В.З. Зверовщиков, О.Ф. Пшеничный // Технология и автоматизация производственных процессов в машиностроении. – Пенза: ППИ, 1979. – С. 281 – 285.

55. Калмыков М. А. Повышение эффективности процесса вибрационной обработки крупногабаритных изделий: дис. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Калмыков Михаил Александрович. – Луганск, 2005. – 223 с.

56. Карташов И.Н. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И.Н. Карташов [и др.] – Киев: Вища школа, 1975. – 188 с.

57. Карташов И.Н., Шаинский М.Е., Власов В.А. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах. К.: Вища школа , 1975.

58. Казачковський Н. Н. Программа PowerSuite для настройки преобразователей частоты и устройств плавного пуска (версия 2.3.0): методичні вказівки [для слухачів курсів підвищення кваліфікації та студентів спеціальності 7.092203 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривід»] / Н. Н. Казачковський, Д. В. Якупов. – Дніпропетровськ : НГУ, 2006. – 45 с.

59. Кидин И.Н. Электро-химико-термическая обработки металлов и сплавов / И.Н. Кидин, В.И. Андрюшечкин, В.А. Волков, А.С. Холин – М.: Металлургия, 1978. – С. 9 – 68.

60. Коган Э.А. Технологические задачи механики вибрационной обработки деталей: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук:

спец. 05.02.08 “Технология машиностроения”/ Э.А. Коган. – Рига, 1974. – 24 с.

61. Кожевников С.Н. Карданные передачи / С.Н. Кожевников, П.Д. Перфильев. – Киев: Техніка, 1978.- С. 90 – 100.

62. Козлов Ю.С. Очистка изделий в машиностроении / Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, А.Ф. Тельнов. – М.: Машиностроение, 1982. – 91 с.

63. Козловский Н.С. Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения / Н.С. Козловский, А.И. Виноградов – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.

64. Кондратюк О.М. Аналіз визначення сили різання і зняття металу при вібраційно-відцентровій обробці / О.М. Кондратюк, Л.С. Серілко // Вісник НУВГП: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2007.– Вип. 2(38). – С. 294 – 299.

65. Кондратюк О.М. Аналіз існуючих методів вібраційної обробки деталей / О.М.Кондратюк // Вісник НУВГП: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2006. – Випуск 2(34). Частина 2. – С. 271 – 277.

66. Кондратюк О.М. Аналіз циркуляції робочого середовища при вібраційно-центробіжній обробці деталей / О.М. Кондратюк, І.В. Ромейко // Вісник НУВГП: зб. наук. пр.– Рівне: НУВГП, 2008.– Вип. 2(34).– С. 253 – 271.

67. Кондратюк О.М. Визначення умовного оптимума функцій відклику вібраційно-відцентрової обробки / О.М. Кондратюк, Л.С. Серілко // Вісник НУВГП: зб. наук. пр.– Рівне: НУВГП, 2009. – Випуск 2(46). – С. 276 – 282.

68. Кондратюк О.М. Дослідження роботи вібраційно-відцентрової установки / О.М. Кондратюк, Л.С. Серілко, Ю.Я. Галан// Міжнародна науково-технічна конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам’яті Івана Пулюя 22–24 травня – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – С 112-115.

69. Кондратюк О.М. Експериментальні дослідження вібраційно-відцентрового методу, як фінішної обробки деталей при ремонті меліоративної техніки / О.М. Кондратюк // Вісник НУВГП: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2009. – Випуск 3(47). – С. 368 – 376.

70. Кондратюк О.М. Математичне моделювання процессу експерименту вібраційно-відцентрової обробки / О.М. Кондратюк // Вісник

НУВГП: зб. наук. пр. – Рівне: НУВГП, 2008. – Випуск 2(42). – С. 354 – 360.

71. Кондратюк О.М. Механізм взаємодії гранули з деталями при вібраційно-відцентровій обробці / О.М. Кондратюк // Збірник статей за матеріалами статей III науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу та студентів академії. 24 березня – 16 квітня 1997: тези докл. – Рівне: УДАВГ, 1997. – С. 101 – 102.

72. Кондратюк О.М., Регулювання тиску абразивної частинки на поверхню деталі при вібраційно- відцентровій обробці / О.М.Кондратюк, Ю.Я.Галан, П.В. Босюк // Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» – Випуск 11. – Харків, 2018. – С.105-113.

73. Коновалов Е.Г. Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко. – Минск: «Вышэйшая школа», 1968. – 364 с.

74. Конструкции устройств для вибрационной обработки в условиях повышенной температуры и давления в рабочей камере / В.П. Анкудимов, С.Д. Кононенко // Прогрессивная отделочно-уплотняющая технология. – Ростов н/Д.: РИСХМ, 1984. – С. 14 – 17.

75. Копылов Ю. Р. Виброударное упрочнение: моногр. / Ю. Р. Копылов. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 1999. – 386 с.

76. Краткий справочник металлиста. / Под общ. ред. Орлова П.Н., Скороходова Е.А. – М.: Машиностроение, 1986. – 960 с.

77. Куклін Н.Т. Деталі машин / Н.Т. Куклін, І.С. Кукліна. – К.: “Вища школа”,1987. –275с.

78. Кулаков Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.

79. Кулаков Ю.М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.

80. Лубенская Л. М. Вибрационная обработка деталей сферических форм / Л. М. Лубенская, Д. В. Молчанов, А. В. Романченко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2007. – №3(48). – С. 49 – 52.

81. Лубенская Л. М. Особенности шпиндельной обработки деталей в среде свободного абразива / Л. М. Лубенская, Е. В. Нечай, Г. Ю. Бурлакова // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 4 (56). – С. 97 – 102.

82. Лубенська Л. М. Основи вібраційної технології: навч. пос. / Л. М. Лубенська, М. О. Калмиков, С. М. Ясунік. – Луганськ: Видво СНУ ім. В. Даля, 2009. – 284 с.

83. Ляшук О.Л. Дослідження взаємодії абразивної гранули з поверхнею деталі при вібраційній обробці / О.Л. Ляшук, О.М. Кондратюк, Ю.Я. Галан // Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція " Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного фунціонування транспортних систем" Національний університет водного господарства та природокористування 21-23 травня 2019р, м. Рівне.

84. Магнитно-импульсная обработка / Новое в электрофизической и электрохимической обработке материалов. – Л.: Машиностроение, 1972. – С. 331 – 350.

85. Малкин И.Г. Некоторые задачи теории нелинейных колебаний. - М.: ГИТТЛ, 1956. – 491 с.

86. Малкин. Д.Д. Станки для объемной вибрационной обработки деталей после штамповочных и других операций // Штамповка в приборостроении. - М.: Москов. дом науч.-техн. пропаганды, - 1968. - С. 156–16.

87. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 238 с.

88. Маталин А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

89. Математическая модель управления пространственным движением рабочей камеры вибрационного станка / А.П. Бабичев, В.М. Мороз // Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология. - Ростов н/Д.: РИСХМ. 1983. – С. 44 – 51.

90. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – С. 3-128.

91. Митропольский Ю. А. Нелинейная механика. Одночастотные колебания. К. : Ин-т математики НАН Украины, 1997. 385 с.

92. Митропольский Ю.А., Мосеенков Б.И. Асимптотические решения уравнений в частичных производных. - К.: Вища школа, 1976. – 592 с.

93. Мороз В.М. Разновидности процесса вибрационно-центробежной обработки и оборудования для его осуществления: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / В.М. Мороз. – Ростов н/Д., 1987. – 256 с.

94. Мороз В.М. Разновидности процесса вибрационно-центробежной обработки и оборудования для его осуществления: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы и машины обработки материаллов резанием”/ В.М. Мороз. – Ростов н/Д.: 1987. – 20 с.

95. Муханов И.И. Эффективность упрочняющее-чистовой обработке ультразвуковым инструментом / И.И. Муханов // Электрофизические и электро-химические методы обработки материалов. – М.: МДНТП, 1975. – С. 150 – 152.

96. Назаркевич М. Дослідження залежностей Beta- та Ateb-функцій. Lviv Politechnic National Institutional Repository http:// ena. lp.edu.ua

97. Николаенко А. П. Исследование зависимости интенсивности вибрационной обработки от расположения вибровозбудителя/ А. П. Николаенко, М. А. Калмыков // ВосточноЕвропейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 2/5(38). – С. 54 – 57. № 2

98. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении / Ф.С. Новик. – М.:МИС и С, 1970.

99. Новожилов В.В. Микронапряжения в конструкционных материалах / В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашевич. – Л.: Машиностроение. Ленингр. от-ние, 1990. – 220 с.

100. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / Карташов И. Н., Шаинский М. Е., Власов В. А. и др. – К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.

101. Объемная вибрационная обработка / И. Е. Бурштейн, В. В. Балицкий, А. Ф. Духовский и др.; под ред. И. Е. Бурштейна. – М.: ЭНИМС, 1977. – 108 с. 18. Міцик А. В. Підвищення ефективності обробки великогабаритних плоскісних виробів активізацією руху робочого середовища

у коливних U-подібних контейнерах: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.03.01 / Міцик Андрій Володимирович. – Х., 2008. – 20 с.

102. Объемная отделочная центробежная обработка литых деталей. / А.П. Субач // Совершенствование и развитие отделочно-зачистной, финишной и поверхностной пластической обработки деталей. – Винница. «Вибротехнология». ВСХИ, 1992. – С. 24.

103. Объемная отделочная центробежная обработка штампованных деталей. / А.П. Субач // Совершенствование и развитие отделочно-зачистной, финишной и поверхностной пластической обработки деталей. – Винница: «Вибротехнология». ВСХИ, 1992. – С. 22.

104. Ольшанский В.П. Линеаризация в системах с квазинулевой жесткостью / В.П. Ольшанский, Е.Н. Гринченко // Динамика и прочность машин. – Х.: ХГПУ, 1998. – Вып. 56. – С. 111–117.

105. Ольшанський В.П.Аналітичний розвязок узагальненої задачі пружного удару твердих тіл. / Вісник НТУ “ХПІ” Динаміка і міцність машин №1 (2019).DOI:https//doi.org/10.209998/ 2078-9180.2019.1.187417.

106. Опір матеріалів. Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. За ред. Г.С. Писаренка. – К.: “Вища школа”,1993. – 655с.

107. Определение силы соударения абразивной частицы с деталью в условиях ВиАЭО / В.А. Григорьев // Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология. – Ростов н/Д.: РИСХМ, 1981. – С. 18 – 20.

108. Орищенко С. В., Мацюк Б. В. Дослідження динаміки вібраційного грохота та оцінка його ефективності. Вібрації в техніці і технологіях. 2013. № 3 (71). С. 120–125.

109. Отделочно-упрочняющая обработка деталей машин. – Ростов-на-Дону: РИСХМ. – 1974.

110. Павлище В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин / В.Т. Павлище. – К.: “Вища школа”,1993. – 556с.

111. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. - М.: Физматгиз, 1960. – 193 с.

112. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / [К. Хартан, Э. Лецкий, В. Шефер и др.]; [перевод с немецкого].– М. : Мир, 1977. – 552 с.

113. Пат. 2004399С1 РФ, МПК^3 В 24 В 31/06. Регулируемый вибратор / Мороз В.М., Пикула Н.В., Кондратюк А.М. (Украина) - № 4756177/08; заявл. 03.11.1989; опубл. 15.12.93. Бюл. № 45-46. 3 с.

114. Пат. 2009857С1 РФ, МПК^3 В 24 В 31/073. Регулируемый дебалансный вибратор / Кондратюк А.М., Мороз В.М., Бондарь Н.И., Пикула Н.В. (Украина) - № 4849963/08; заявл. 16.01.1990;опубл. 30.03.94.Бюл. № 6.- 3 с.

115. Пат. № 109854. Україна, МПК B24B 31/06 (2006.01), B06B 1/02(2006.01). Вібраційно-відцентрова установка / Кондратюк О. М.; Галан Ю.Я. Ляшук О. Л.; Скиба О. П.; заявники і патентоотримувачі Кондратюк О. М.; Галан Ю.Я. Ляшук О. Л.; Скиба О. П.; – №u201602643; заявл. 17.03.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. №17.

116. Пат. № 109876. Україна, МПК (2016.01) G01D 3/00. Індикатор універсальний / Ляшук О.Л.; Марчук Н.М.; Третьяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Галан Ю.Я.; заявники і патентоотримувачі Ляшук О.Л.; Марчук Н.М.; Третьяков О.Л.; Навроцька Т.Д.; Галан Ю.Я. – №u201602943; заявл. 22.03.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. №17.

117. Пат.№ 113428. Україна, МПК(2016.01) B24B 31/073 . Пристрій для вібраційної обробки/ Гевко Б. М.; Кондратюк О. М.; Ляшук О. Л.; Серілко Л. С.; Галан Ю.Я. (Україна). – №u201608015. заявл. 19.07.2016.; опубл. 25.01.2017р., Бюл.№2.

118. Патент на корисну модель №19628 Україна, МПК B24B 31/06. Пристрій для вивантаження і розділення робочого середовища після вібраційної обробки / Ю. М. Букаранов, С. В. Корнєєв, М. О. Калмиков, С. М. Ясунік. - № U2006 07897. – Заявл. 14.07.06; Опубл. 15.12.06; Бюл. № 13. – 4 с.

119. Петраков Ю.В. Теория автоматичного управління / Ю.В. Петраков. – К.:Техніка. 1999. – 212с.

120. Повидайло В.А., Кармалюк В.И. Исследование влияния режимов работы вибромашины на производительность процессов виброобработки

изделий из твердых сплавов // Материалы науч.-техн. семинара “Вибрационное шлифование, отделка, упрочнение”. - Ростов н/Дону. – 1969. - С. 27-28.

121. Полюшко О.П. Основи проектування механізмів і машин / О.П. Полюшко.– К.: КДАВТ,2006. – 64с.

122. Пшеничный И. Н. Расширение технологических возможностей обработки деталей в вибрирующих контейнерах: дис. ... канд. тех. наук: 05.03.01 / Пшеничный Игорь Николаевич. – Луганск, 2004. – 265 с.

123. Решетов Д.Н. Детали машин / Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1988. – 416с.

124. Розширення технологічних можливостей вібраційної обробки деталей / О.М.Кондратюк, Б.М.Гевко, О.Л.Ляшук, Ю.Я.Галан // ВІСНИК Національного університету водного господарства та природокористування – ВИПУСК 2(74). – Рівне, 2016. – С. 276-286.

125. Рыкалин Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н.Н. Рыкалин, И.В.Зуев, А.А.Углов. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 239.

126. Сакулевич Ф.Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка / Ф.Ю. Сакулевич, Л.М. Кожуро. – Минск: Наука и техника, 1978. – 168 с.

127. Сеник П.М. Обернення неповної Beta-функції // Укр. мат. журн. – 1969. - №3. - С. 325-333.

128. Серілко Л.С. Аналіз визначення сили різання і зняття металу при обробці деталей в абразивному середовищі вібраційно-відцентрового станка / Л.С. Серілко, О.М. Кондратюк // Ж. «Вібрації в техниці та технологіях»,– Вінниця, 2007. – Випуск 2(47). – С. 64 – 69.

129. Сокіл Б.І. Побудова одночастотних розв’язків деяких крайових задач для неавтономного хвильового рівняння // Укр.мат.журнал. – 1994. - №9. - С. 1275-1279.

130. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов А. А. - М. : Машиностроение, 1981. - 184 с.

131. Справочник по трибототехнике. / Под общ. ред. М.Хебды, Чичинадзе А.В. В 3-х т. Т.1 Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

132. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х Т. Т.2 / Под ред. Косиловой А.Г., Мещерякова Р.К. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

133. Стоцько З.А., Сокіл Б.І., Топільницький В.Г. Моделювання роботи тримасової вібраційної машини об‘ємної обробки // Машинознавство. - 1999. - №11. - С. 25-28.

134. Стоцько З.А., Сокіл Б.І., Топільницький В.Г. Резонансні режими роботи вібраційних машин об‘ємної обробки виробі // Вісник НУ ЛП “Оптимізація і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”. - 2001. - №422 - С. 86-91

135. Субач А. П. Динамика процессов и машин объемной обработки. Рига : Зинатне, 1991. 240 с.

136. Субач А.П. Виброцентробежная установка для обработки деталей / А.П. Субач, И.И. Дубравс И.И. // А.С. № 632513, Бюл. № 39, 1976.

137. Сухарев Э.А. Методы моделирования и оптимизации механических систем машин и оборудования / Э.А. Сухарев. – Ровно: НУВХП. 2008. – С. 59 – 189.

138. Тамаркин М.А. Исследование и разработка математических основ расчета оптимальных технологических параметров процесса вибрационной обработки: дис.канд.техн.наук: 05.02.08 / М.А. Тамаркин. – Ростов н/Д., 1983. – 160 с.

139. Тамаркин М.А. Исследование и разработка методических основ расчета оптимальных технологических параметров процесса вибрационной обработки: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / М.А. Тамаркин.– Ростов н/Д., 1983.

140. Тамбулатов Б.Я. Доводочные станки / Б.Я. Тамбулатов. – М.: Машиностроение, 1980. – 160 с.

141. Теоретические и экспериментальные предпосылки к исследованию основных параметров процесса вибрационной обработки с орбитальным движением массы загрузки. / А.П. Бабичев, В.Б. Трунин и др. // Отделочно-упрочняющая механическая обработка, качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. – Ростов н/Д.: РИСХМ, 1978. – С. 30 – 39.

142. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора вентилятора. Часть I / В. А. Богуслаев, Ф. И. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ООО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.

143. Топільницький В. Г., Кусий Я. М., Ребот Д. П. Дослідження динаміки вібраційних машин оброблення поверхонь виробів шляхом математичного моделювання Вібрації в техніці і технологіях. 2020. № 1 (96). С. 35–43.

144. Устюгов І.І. Деталі машин / І.І. Устюгов. – К.: “Вища школа”,1984. –306с.

145. Физико-технологические особенносты создания новых методов обработки / А.П. Бабичев, Т.Н. Рысева, С.Н. Шевцов // Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1981. – С. 3-7.

146. Ходош Б.Б. Исследование качества поверхностей деталей машин при вибрационной объемной обработке (виброгалтовке) : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / Б.Б. Ходош. – Львов, 1968. – 29 с.

147. Шаинский М. Е. Устройство для разрушения слипшихся в пакеты деталей при виброобработке / М. Е. Шаинский, Н. В. Фальченко, В. А. Власов // Труды Всесоюзного научнотехнического семинара «Виброабразивная обработка деталей». – Ворошиловград, 1978. - С. 167-170.

148. Штанько В.М. Электрохимическое полирование металлов / В.М. Штанько, П.П. Козарин. – М.: Металлургия, 1979. – 206 с.

149. . www.agattech.com

150. Interaction of abrasive working environment particles at vibrating processing with the treated surface details / Oleksandr Kondratyk, Oleg Lyashuk, Volodymyr Klendii, Yuri Galan // Вісник ТНТУ. – Т.: ТНТУ, 2017. – Том 86. – № 2. – С. 32–40.

151. Investigation of abrasive granule movement relatively to the workpiece surface during vibration treatment / Olexander Kondratiuk; Leonid Serilko; Oleg Lyashuk; Yuriy Galan. // Вісник ТНТУ. – Т.: ТНТУ, 2020. – Том 98. – № 2. – С. 59–68.

152. Investigation of the operation of vibration-centrrifugal installation for automobile parts machining / Oleg Lyashuk, Leonid Serilko, Ivan Hevko, Olexander Kondratiuk, Oleg Tsion, Yuriy Galan // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2021. – Vol 101. – №1. — P. 79–88.

153. Ivanov K., Vaisberg L. New Modelling and Calculation Methods for Vibrating Screens and Separators. Journal «Lecture Notes in Control and Information Sciences». 2015. Vol. 22. P. 55–61.

154. Lawinska K., Modrzewski R. Analysis of sieve holes blocking in a vibrating screen and a rotary and drum screen. Journal «Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii – Physicochemical Problems of Mineral Processing». 2017. Vol. 53. P. 812–828.

155. Theoretical substantiation of vibration- centrifugal finishing of parts by loose abrasive / Oleksandr Кondratiuk, Volodymyr Teslia, Ivan Кuchvara, Pavlo Bosiuk, Yuriy Galan // Motrol. Commission of motorization and energetic in agriculture. − Lublin-Rzeszow, 2018. − Vol. 20, № 1. − P. 73–79.

156. Topilnytskyy V., Rebot D., Sokil M., Velyka O., Liaskovska S., Verkhola I., Kovalchuk R., Dzyubyk L. Modeling the dynamics of vibratory separator of the drum type with concentric arrangement of sieves. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol 2, No 7(86): Applied Mechanics. P. 26–35.

157. Zhou N. Dynamic characteristics analysis and optimization for lateral plates of the vibration screen. Journal of Vibroengineering (J. VIBROENG). 2015. Vol. 17 (4). P. 1593–1604.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Розрахунок внутрішньої поверхні робочої камери (сфери) на рівні частини, для цього впишемо в сферу ікосаедр, всі вершини якого рівновіддалені одна від одного

Для цього впишемо в сферу ікосаедр (рис.А1), всі вершини якого рівновіддалені одна від одного. Сторона трикутника, з яких складається ікосаедр буде рівна:

$$a = \frac{4R}{\sqrt{2\left(5+\sqrt{5}\right)}}, \qquad \text{(A1)}$$

де R – внутрішній радіус робочої камери (радіус кулі).

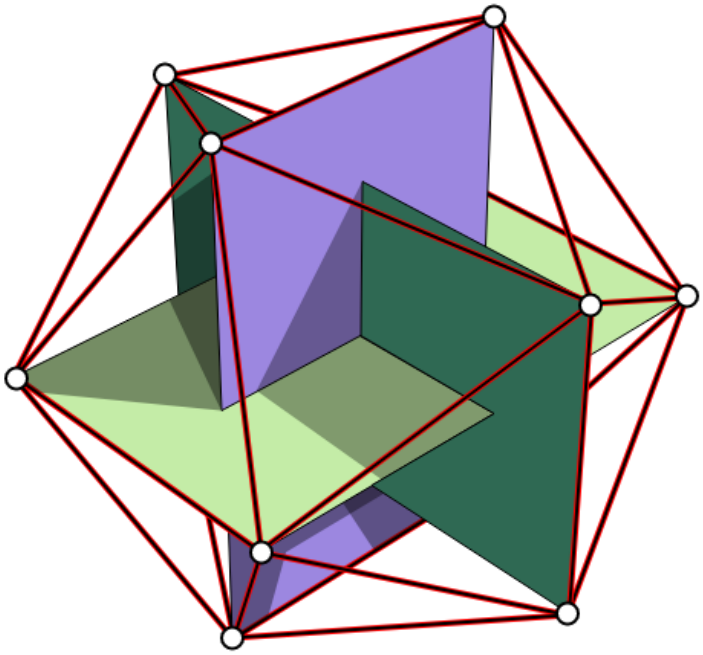


Рисунок А1 Ікосаедр

Якщо сумістити центр ікосаедра (центр кулі - робочої камери) з початком координат і прийняти довжину його ребра рівною 2 , то дванадцять вершин ікосаедра будуть знаходитися в точках з координатами

$$\left(\pm\varphi,\ \pm 1,\quad 0\right)$$
$$\left(\ 0,\ \pm\varphi, \pm 1,\right)$$
$$\left(\pm 1,\quad 0,\ \pm\varphi,\right)$$

де $\varphi = \left(1+\sqrt{5}\right)/2 = 1{,}618$ є (золотим перетином).

В нашому випадку, при $R = 0{,}13$ м, $a = 0{,}137$ м і відповідно координати будуть визначатися числами L і Φ, де $L = a/2 = 0{,}0685$ м, $\Phi = (\varphi/2)\cdot a = 0{,}11$ м.

Тоді координати вершин будуть рівні (таблиця А1).

Таблиця А1

	Вершини ікосаедра											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	Φ	Φ	$-\Phi$	$-\Phi$	0	0	0	0	L	L	$-L$	$-L$
Y	L	$-L$	$-L$	L	Φ	$-\Phi$	$-\Phi$	Φ	0	0	0	0
Z	0	0	0	0	L	L	$-L$	$-L$	Φ	$-\Phi$	$-\Phi$	Φ

В ікосаедра 20 трикутних граней, номери вершин яких наведені в таблиці А2

Таблиця А2

	Грані ікосаедра																				
Вершини		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	1	9	5	12	4	3	11	7	10	2
	2	1	5	4	11	10	9	12	3	7	2	9	5	12	4	3	11	7	10	2	1
	3	5	4	11	10	1	12	3	7	2	9	5	12	4	3	11	7	10	2	1	9

В свою чергу, розбиваємо кожний трикутник (грань ікосаедра) на 4 рівносторонні трикутника (рис. А2).

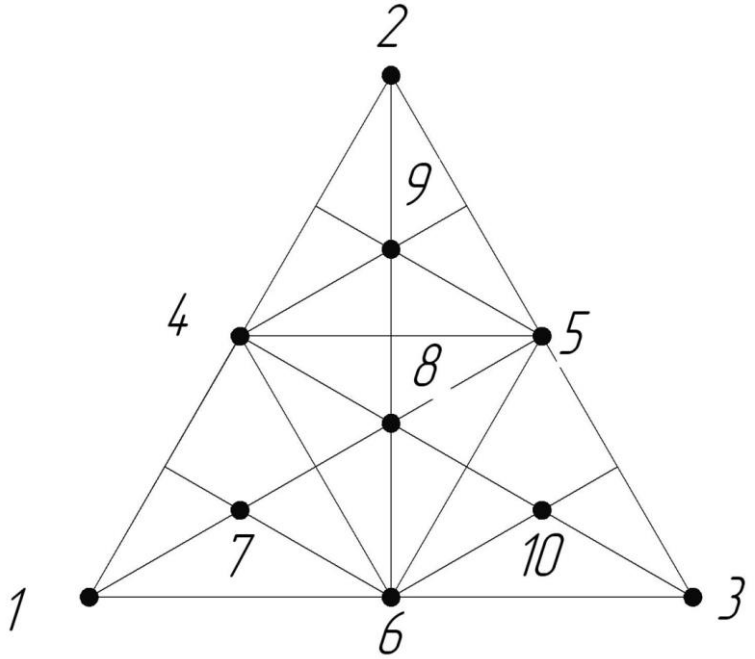


Рисунок А2. Схема розбивки граней ікосаедра на 4 рівносторонні трикутника

Координати вершин цих трикутників будуть рівні:

$$x_4 = \frac{x_1 + x_2}{2},\ y_4 = \frac{y_1 + y_2}{2},\ z_4 = \frac{z_1 + z_2}{2}.$$

$$x_5 = \frac{x_2 + x_3}{2},\ y_5 = \frac{y_2 + y_3}{2},\ z_5 = \frac{z_2 + z_3}{2}. \qquad (A2)$$

$$x_6 = \frac{x_1 + x_3}{2},\ y_6 = \frac{y_1 + y_3}{2},\ z_6 = \frac{z_1 + z_3}{2}.$$

Тоді координати точок, які лежать на поверхні кулі визначатимуться за формулами:

$$x'_4 = \frac{x_4}{\sqrt{x_4^2 + y_4^2 + z_4^2}} \cdot R,\ y'_4 = \frac{y_4}{\sqrt{x_4^2 + y_4^2 + z_4^2}} \cdot R,\ z'_4 = \frac{z_4}{\sqrt{x_4^2 + y_4^2 + z_4^2}} \cdot R.$$

$$x'_5 = \frac{x_5}{\sqrt{x_5^2 + y_5^2 + z_5^2}} \cdot R,\ y'_5 = \frac{y_5}{\sqrt{x_5^2 + y_5^2 + z_5^2}} \cdot R,\ z'_5 = \frac{z_5}{\sqrt{x_5^2 + y_5^2 + z_5^2}} \cdot R. \qquad (A3)$$

$$x'_6 = \frac{x_6}{\sqrt{x_6^2 + y_6^2 + z_6^2}} \cdot R,\ y'_6 = \frac{y_6}{\sqrt{x_6^2 + y_6^2 + z_6^2}} \cdot R,\ z'_6 = \frac{z_6}{\sqrt{x_6^2 + y_6^2 + z_6^2}} \cdot R.$$

Визначимо координати центрів ваги кожного трикутника, вершини яких лежать на поверхні сфери.

$$x_7 = \frac{x_1 + x'_4 + x'_6}{3},\ y_7 = \frac{y_1 + y'_4 + y'_6}{3},\ z_7 = \frac{z_1 + z'_4 + z'_6}{3}.$$

$$x_8 = \frac{x'_4 + x'_5 + x'_6}{3},\ y_8 = \frac{y'_4 + y'_5 + y'_6}{3},\ z_8 = \frac{z'_4 + z'_5 + z'_6}{3}. \qquad \text{(A4)}$$

$$x_9 = \frac{x'_4 + x'_5 + x_2}{3},\ y_9 = \frac{y'_4 + y'_5 + y_2}{3},\ z_9 = \frac{z'_4 + z'_5 + z_2}{3}.$$

$$x_{10} = \frac{x_3 + x'_5 + x'_6}{3},\ y_{10} = \frac{y_3 + y'_5 + y'_6}{3},\ z_{10} = \frac{z_3 + z'_5 + z'_6}{3}.$$

Координати проекцій центрів ваги трикутників на поверхню сфери будуть рівні:

$$\begin{cases} x_{ci} = \dfrac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \cdot R; \\ y_{ci} = \dfrac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \cdot R; \qquad (i = 1...80) \\ z_{ci} = \dfrac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \cdot R. \end{cases} \qquad \text{(A5)}$$

Координати вершин будуть рівні:

Таблиця А3

Координати розбивки іколаїдра

	Xc	Yc	Zc			Xc	Yc	Zc
1	0,022919	0,122038	-0,03849		41	0,084725	0,098598	0
2	-0,02292	0,122038	-0,03849		42	-0,02292	0,122038	0,038489
3	-0,03718	0,098965	-0,07565		43	-0,09897	0,075655	-0,03718
4	0	0,084725	-0,0986		44	-0,03849	0,022919	-0,12204
5	0,037179	0,098965	-0,07565		45	0,075655	0,037179	-0,09897
6	0	-0,08473	0,098598		46	0,038489	-0,02292	0,122038
7	-0,03718	-0,09897	0,075655		47	-0,07565	-0,03718	0,098965
8	-0,02292	-0,12204	0,038489		48	-0,08473	-0,0986	0
9	0,022919	-0,12204	0,038489		49	0,022919	-0,12204	-0,03849
10	0,037179	-0,09897	0,075655		50	0,098965	-0,07565	0,037179
11	0,098965	0,075655	0,037179		51	0,075655	0,037179	0,098965
12	0,038489	0,022919	0,122038		52	0	0,084725	0,098598
13	-0,03718	0,098965	0,075655		53	-0,07565	0,037179	0,098965
14	-0,0986	0	0,084725		54	-0,12204	0,038489	0,022919
15	-0,12204	0,038489	-0,02292		55	-0,12204	-0,03849	-0,02292
16	-0,09897	-0,07565	-0,03718		56	-0,07565	-0,03718	-0,09897
17	-0,03849	-0,02292	-0,12204		57	0	-0,08473	-0,0986
18	0,037179	-0,09897	-0,07565		58	0,075655	-0,03718	-0,09897
19	0,098598	0	-0,08473		59	0,122038	-0,03849	-0,02292

20	0,122038	-0,03849	0,022919		60	0,122038	0,038489	0,022919
21	0,046274	0,121485	0		61	0,022919	0,122038	0,038489
22	-0,04627	0,121485	0		62	-0,08473	0,098598	0
23	-0,07506	0,075056	-0,07506		63	-0,07565	0,037179	-0,09897
24	0	0,046274	-0,12149		64	0,038489	0,022919	-0,12204
25	0,075056	0,075056	-0,07506		65	0,098965	0,075655	-0,03718
26	0	-0,04627	0,121485		66	-0,03849	-0,02292	0,122038
27	-0,07506	-0,07506	0,075056		67	-0,09897	-0,07565	0,037179
28	-0,04627	-0,12149	0		68	-0,02292	-0,12204	-0,03849
29	0,046274	-0,12149	0		69	0,084725	-0,0986	0
30	0,075056	-0,07506	0,075056		70	0,075655	-0,03718	0,098965
31	0,075056	0,075056	0,075056		71	0,037179	0,098965	0,075655
32	0	0,046274	0,121485		72	-0,03849	0,022919	0,122038
33	-0,07506	0,075056	0,075056		73	-0,09897	0,075655	0,037179
34	-0,12149	0	0,046274		74	-0,12204	-0,03849	0,022919
35	-0,12149	0	-0,04627		75	-0,0986	0	-0,08473
36	-0,07506	-0,07506	-0,07506		76	-0,03718	-0,09897	-0,07565
37	0	-0,04627	-0,12149		77	0,038489	-0,02292	-0,12204
38	0,075056	-0,07506	-0,07506		78	0,098965	-0,07565	-0,03718
39	0,121485	0	-0,04627		79	0,122038	0,038489	-0,02292
40	0,121485	0	0,046274		80	0,098598	0	0,084725

ДОДАТОК Б

Індикатор універсальний

Індикатор універсальний зображено на (рис. Б1), який виконано у вигляді штанги з двома каретками, вимірювальних вузлів і індикатора, напрямних кріпильних елементів і упора. На штанзі нанесені розмірні мітки і корпус лівої каретки жорстко закріплений до штанги відомим способом, а ліва вимірювальна планка виконана у вигляді двоплечого шарнірного механізму, по середині довжини якого в центральному отворі жорстко встановлена нерухома вісь з можливістю коливання двоплечого механізму, в корпусі правої рухомої каретки перпендикулярно до штанги виконано центральний отвір, який є у взаємодії з упором, нижній кінець якого має форму щупа лівого двоплечого механізму, крім цього до правого торця правої каретки під'єднано ноніус, хомут зі стопорним гвинтом, механізм точної настройки.

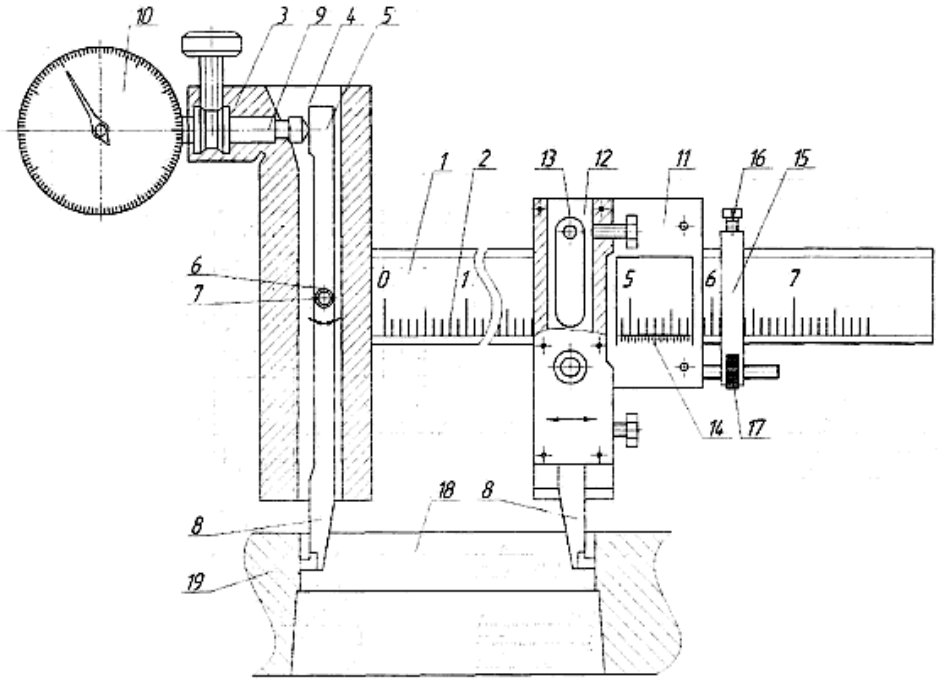


Рисунок Б1. Індикатор універсальний [116]

Робота індикатора універсального здійснюється наступним чином. Для прикладу розглянемо вимірювання довжини паза 18 оброблювальної деталі 19, яку встановлюємо на підставку, вимірювальні каретки зсувають до купи і встановлюють ніжки щупа 8 в середину паза 18, розсовують каретки до стику щупів 8 і за допомогою індикатора 10 фіксують відхилення величини паза 18 відносно норми. В разі потреби в залежності від конструктивних параметрів деталей і вимірювальних елементів щупа 8 можна змінювати. До переваг індикатора належить розширення технологічних можливостей і підвищення чутливості приладу і точності його роботи.

ДОДАТОК Б1

Будова та технічна характеристика ПМТ-3

Для вимірювання мікротвердості використовується прилад типу ПМТ-3, розроблений М.М. Хрущовим і Е.С. Берковичем. Загальний вигляд мікротвердоміра ПМТ-3. На чавунній основі 1 закріплена колона 3 з різьбою, а на ній – кронштейн з мікроскопом і навантажувальним пристроєм. Для установки кронштейна на необхідній висоті служать гайка 4 і стопорний гвинт. Мікроскоп складається з тубуса 8, окуляр-мікрометра 7, змінних об'єктивів 10 і освітлювального пристрою 9. Для грубої наводки на різкість мікроскоп можна переміщати по висоті відносно кронштейна гвинтом 6, пов'язаним з рейковим пристроєм. Перш ніж обертати гвинт 6, необхідно послабити гвинт, розташований на правій частині кронштейна. Для тонкої наводки на різкість мікроскоп переміщують у вертикальному напрямку обертанням мікрометричного гвинта 5. До нижньої частини тубуса мікроскопа прикріплений механізм навантаження 14. Важки у вигляді дисків з прорізами надягають на стрижень, в нижньому кінці якого кріпиться оправлення з алмазним індентором 16. При повороті рукоятки на себе стрижень звільняється і переміщається під дією вантажів вниз, вдавлюючи індентор в поверхню зразка. На основі приладу встановлений предметний столик 11, який може переміщатися в двох взаємно перпендикулярних напрямках за допомогою мікрометричних гвинтів 12 і 13. Крім того столик можна повертати рукояткою 2 навколо своєї осі на 180°. Для нанесення відбитка досліджуваний зразок Рис. 7. встановлюють під мікроскопом і вибирають на ньому місце, в якому необхідно виміряти мікротвердість. Потім переміщують зразок так, щоб вибране місце виявилося під вістрям алмазної піраміди (поворотом предметного столика на 180° до упору). Після вдавлювання індентора і зняття навантаження зі зразка останній знову переводять під мікроскоп і вимірюють довжину діагоналі відбитка. Для забезпечення точного виміру мікротвердості прилад повинен бути ретельно юстований (настроєний та відрегульований). Завдання юстування – точне сполучення оптичної осі з віссю навантаження при повороті предметного столика на 180°. Іншими словами, необхідно домогтися, щоб відбиток наносився саме на тому місці, яке було вибрано під мікроскопом. Центруючий пристрій, що дозволяє переміщати об'єктив в горизонтальній площині, приводиться в дію гвинтами 15

Вимірювання здійснюється за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3, що призначений для вимірювання мікротвердості матеріалів, сплавів, скла, кераміки та мінералів. Метод полягає в тому, що відбувається вдавлення у матеріал алмазного наконечника Віккерса із основою чотиригранної піраміди, яка забезпечує геометричне та механічну подобу відбитків в міру поглиблення індентора під дією навантаження навантаження.

Технічні характеристики Мікротвердоміри ПМТ-3:

Діапазон навантаження 0,0196 ... 4,9 Н.

Управління навантаженнями - ручне.

Збільшення мікроскопа Мікротвердоміри 130, 500, 800.

Габаритні розміри, не більше 270 х 290 х 470 мм.

Маса, не більше 22 кг.

ДОДАТОК В2

Методика проведення багатофакторних експериментальних досліджень технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей в сипучому абразивному середовищі

Параметр оптимізації апроксимуючої математичної моделі приймали у вигляді повного квадратичного полінома, що описує даний експериментальний процес:

$$У = \eta = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + \\ + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2, \quad (В1)$$

де η – експериментальне значення визначення продуктивності питомого зняття металу, мг/см^2; шорсткості, мкм; мікротвердості Н/мм^2.

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – коефіцієнти регресії відповідних значень вхідних факторів

x_i; x_1, x_2, x_3 – вхідні кодовані фактори.

Для оцінки достовірної експериментального масиву даних, визначали необхідну кількість вимірів, які визначають повторність дослідів, та розрахунки здійснювали за методикою, яка висвітлена у [1], та проводили досліди у трикратній повторності.

Коефіцієнти апроксимуючого полінома, представленого у вигляді повного квадратичного рівняння, за умови ортогональності та симетрії, визначали за відповідними загальними формулами [44]:

- вільний член b_0 і коефіцієнти b_i i-го фактору:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^{N} x_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^{N} x_{iu}^2} = \frac{\sum_{u=1}^{N} x_{iu} \bar{y}_u}{N}; \quad (В2)$$

- коефіцієнти взаємодії b_{ij}:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{N} x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{N}, \quad (В3)$$

де x_{iu} – значення кодованої змінної у відповідному стовпці плану експерименту;

$\bar{y}_u$ – середній результат u-го досліду;

u – порядковий номер досліду;

i – номер фактору;

j, k – номер фактору, відмінного від i-го;

N – кількість проведених експериментів.

Статистична значимість коефіцієнтів рівняння регресії b_i здійснювали за t – критерієм Ст'юдента та визначалася у послідовності [44]:

- визначалися дисперсія похибок дослідів у рядах плану ПФЕ:

$$S_u^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (B4)$$

де n – кількість паралельних дослідів (повторюваностей одного експерименту); j =1, 2,..., n;

- визначалися дисперсія відтворення досліду:

$$S_y^2 = \frac{1}{N}\sum_{u=1}^{N} S_u^2, \quad (B5)$$

- визначалися похибка відтворення:

$$S_y = \sqrt{S_y^2}, \quad (B6)$$

- визначалися умова значимості коефіцієнтів b_i рівняння регресії:

$$b_{i(jk)} > \frac{t_T S_y}{\sqrt{Nn}}, \quad (B7)$$

де t_T – табличне значення коефіцієнта Ст'юдента, яке вибирається з таблиці залежно від ступеня відповідності f та рівня значимості α [44].

Ступінь відповідності дорівнює:

$$f = (n-1)N. \quad (B8)$$

Якщо умова значимості (3.10) не виконується, то такий коефіцієнт b_i рівняння регресії приймали рівним нулю, а відповідний член x_i рівняння регресії виключали.

Для здійснення перевірки адекватності обраної математичної моделі експериментального масиву даних, тобто відповідність математичної моделі реального процесу, здійснювалися за F - критерієм Фішера таким чином [44]:

Таблиця В1

План-матриця експерименту типу ПФЕ 3^3 для $Q_{пит} = f_{пит}(k = b/a, A, \beta)$, $R_a = f_{Ra}(\omega, T, K)$ та $H_\mu = f_\mu(\beta, T, A)$

№ досл.	Рівні факторів				Взаємодія факторів				Параметр оптимізації, У повторюваність			Середні значення, У
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	1	2	3	$У_{сер}$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	У11	У12	У13	У1с
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	У21	У22	У23	У2с
3	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	У31	У32	У33	У3с
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	У41	У42	У43	У4с
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	У51	У52	У53	У5с
6	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	У61	У62	У63	У6с
7	+1	-1	0	-1	0	+1	0	0	У71	У72	У73	У7с
8	+1	+1	0	-1	0	-1	0	0	У81	У82	У83	У8с
9	+1	0	0	-1	0	0	0	0	У91	У92	У93	У9с
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	У101	У102	У103	У10с
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	У111	У112	У113	У11с
12	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	У121	У122	У123	У12с
13	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	У131	У132	У133	У13с
14	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	У141	У142	У143	У14с
15	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	У151	У152	У153	У15с
16	+1	-1	0	+1	0	-1	0	0	У161	У162	У163	У16с
17	+1	+1	0	+1	0	+1	0	0	У171	У172	У173	У17с
18	+1	0	0	+1	0	0	0	0	У181	У182	У183	У18с
19	+1	-1	-1	0	+1	0	0	0	У191	У192	У193	У19с
20	+1	+1	-1	0	-1	0	0	0	У201	У202	У203	У20с
21	+1	0	-1	0	0	0	0	0	У211	У212	У213	У21с
22	+1	-1	+1	0	-1	0	0	0	У221	У222	У123	У22с
23	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	У231	У232	У233	У23с
24	+1	0	+1	0	0	0	0	0	У241	У242	У243	У24с
25	+1	-1	0	0	0	0	0	0	У251	У252	У253	У25с
26	+1	+1	0	0	0	0	0	0	У261	У262	У263	У26с
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	У271	У272	У273	У27с

- визначалася дисперсію адекватності:

$$S_{ag}^2 = \frac{n}{N - g'} \sum_{u=1}^{N} (\bar{y}_u - \tilde{y}_u)^2 , \qquad (B9)$$

де $N - g'$ – число степені вільності дисперсії адекватності;
g' – число значимих коефіцієнтів в рівнянні регресії;
$\bar{y}_u$ – середнє значення відгуку в u-му досліді;
$\tilde{y}_u$ – значення відгуку в u-й точці плану, обчислене за рівнянням регресії;
визначали розрахунковий критерій відповідності Фішера F_p:

$$F_p = \frac{S_{ag}^2}{S_y^2}, \qquad (B10)$$

де S_y^2 – дисперсія відтворення досліду;

- визначали табличне значення критерію Фішера F_T за заданим рівнем значимості α і двома степенями відповідності [44]: $f_{ag} = N - g$ та $f_y = N(n-1)$.

Дана обрана умова адекватності математичної моделі здійснювали перевірку згідно нерівності:

$$F_p < F_T . \qquad (B11)$$

Одержане значення F_p порівнювали з табличним F_T. При виконанні умови $F_p < F_T(0{,}05, f_{ag}, f_y)$, розрахункове значення результату F_p – критерію Фішера менше табличного F_T 5 %-му рівні значимості, число степеня вільності дисперсії $f_{ag} = N - g$ та число степеня вільності дисперсії відтворюваності $f_y = N(n-1)$, то умова адекватності математичної моделі ПФЕ 3^3 є експериментальним масивом даних.

ДОДАТОК Д

Результати статистичної обробки експериментальних значень питомого зняття металу із матеріалу Ст 3

STAT

4 -кол-во переменных; полином второй степени; зависимость 6
Уровень вероятности P=0.90 t-альфа крит.= 1.705

N пе-рем.	Корре-ляции Y с X	Коэффициент регрессии линеаризов.	Статистич. ошибка коэф.регр.	t-альфа	Коэфф. эласти-чности	Значимость коэфф. регрессии
Зависимая переменная						
Y		+35.634616851807				
Независимые переменные						
1	+0.628	-7.084563255310	+9.32716	-0.76	-0.04	незначим
2	+0.540	+0.336099445820	+0.26171	+1.28	+0.16	незначим
3	+0.430	+3.826390028000	+1.11288	+3.44	+0.28	значим
1*1	+0.626	+9.723290443420	+12.26475	+0.79	+0.02	незначим
1*2	+0.823	+0.416687905788	+0.17345	+2.40	+0.06	значим
1*3	+0.757	+1.666647791862	+0.86725	+1.92	+0.04	значим
2*2	+0.537	+0.000555568608	+0.00491	+0.11	+0.01	незначим
2*3	+0.609	-0.054166607559	+0.01735	-3.12	-0.10	значим
3*3	+0.410	-0.236110046506	+0.12265	-1.93	-0.08	значим

Имя файла GALAN1 .STA
Нажмите любую клавишу

STATISTICA - питома продуктивність1

Файл Редактирование Просмотр Вставка Формат Статистика Графы Инструменты Данные Окно Справка

Add to Workbook Добавление в отчет Переменные Случаи

Данные: питома продуктивність1 (4v by 28c)

	1 Var1	2 Var2	3 Var3	4 Var4
1	0,100	15,000	2	46
2	0,500	15,000	2	50
3	0,300	15,000	2	48
4	0,100	35,000	2	53
5	0,500	35,000	2	58
6	0,300	35,000	2	55
7	0,100	20,000	2	50
8	0,500	20,000	2	53
9	0,300	20,000	2	51
10	0,100	15,000	6	52
11	0,500	15,000	6	57
12	0,300	15,000	6	55
13	0,100	35,000	6	53
14	0,500	35,000	6	63
15	0,300	35,000	6	57
16	0,100	20,000	6	53
17	0,500	20,000	6	58
18	0,300	20,000	6	55
19	0,100	15,000	4	49
20	0,500	15,000	4	54
21	0,300	15,000	4	51
22	0,100	35,000	4	53
23	0,500	35,000	4	62
24	0,300	35,000	4	57
25	0,100	20,000	4	50
26	0,500	20,000	4	61
27	0,300	20,000	4	55
28				

STAT

Таблица анализа дисперсии

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Среднее значение
Регрессия	432.4136	9	48.046
Остаток	24.5493 0	#### 17	1.444
Итого	456.9630	26	

Коэффициент множественной детерминации D= 0.946
Коэффициент множественной корреляции R= 0.973
Стандартное отклонение оценки s= 1.202
F критерий Фишера = 33.271
Коэффициент D значим с вероятностью P = 1.00000

Имя файла GALAN1 .STA
Нажмите любую клавишу

Результати статистичної обробки експериментальних значень питомого зняття металу із матеріалу Сталь 45

STAT

4 -кол-во переменных; полином второй степени; зависимость 6
Уровень вероятности P=0.90 t-альфа крит.= 1.705

N пе-рем.	Корре-ляции Y с X	Коэффициент регрессии линеаризов.	Статистич. ошибка коэф.регр.	t-альфа	Коэфф. эласти-чности	Значимость коэфф. регрессии
Зависимая переменная						
Y		+15.634153366089				
Независимые переменные						
1	+0.628	-7.082889080048	+9.32690	-0.76	-0.06	незначим
2	+0.540	+0.336110949516	+0.26170	+1.28	+0.25	незначим
3	+0.430	+3.826414108276	+1.11285	+3.44	+0.45	значим
1*1	+0.626	+9.722681045532	+12.26442	+0.79	+0.03	незначим
1*2	+0.823	+0.416651397943	+0.17345	+2.40	+0.09	значим
1*3	+0.757	+1.666583895683	+0.86723	+1.92	+0.06	значим
2*2	+0.537	+0.000555568608	+0.00491	+0.11	+0.01	незначим
2*3	+0.609	-0.054166607559	+0.01734	-3.12	-0.16	значим
3*3	+0.410	-0.236110046506	+0.12264	-1.93	-0.13	значим

Имя файла GALAN1 .STA

STAT

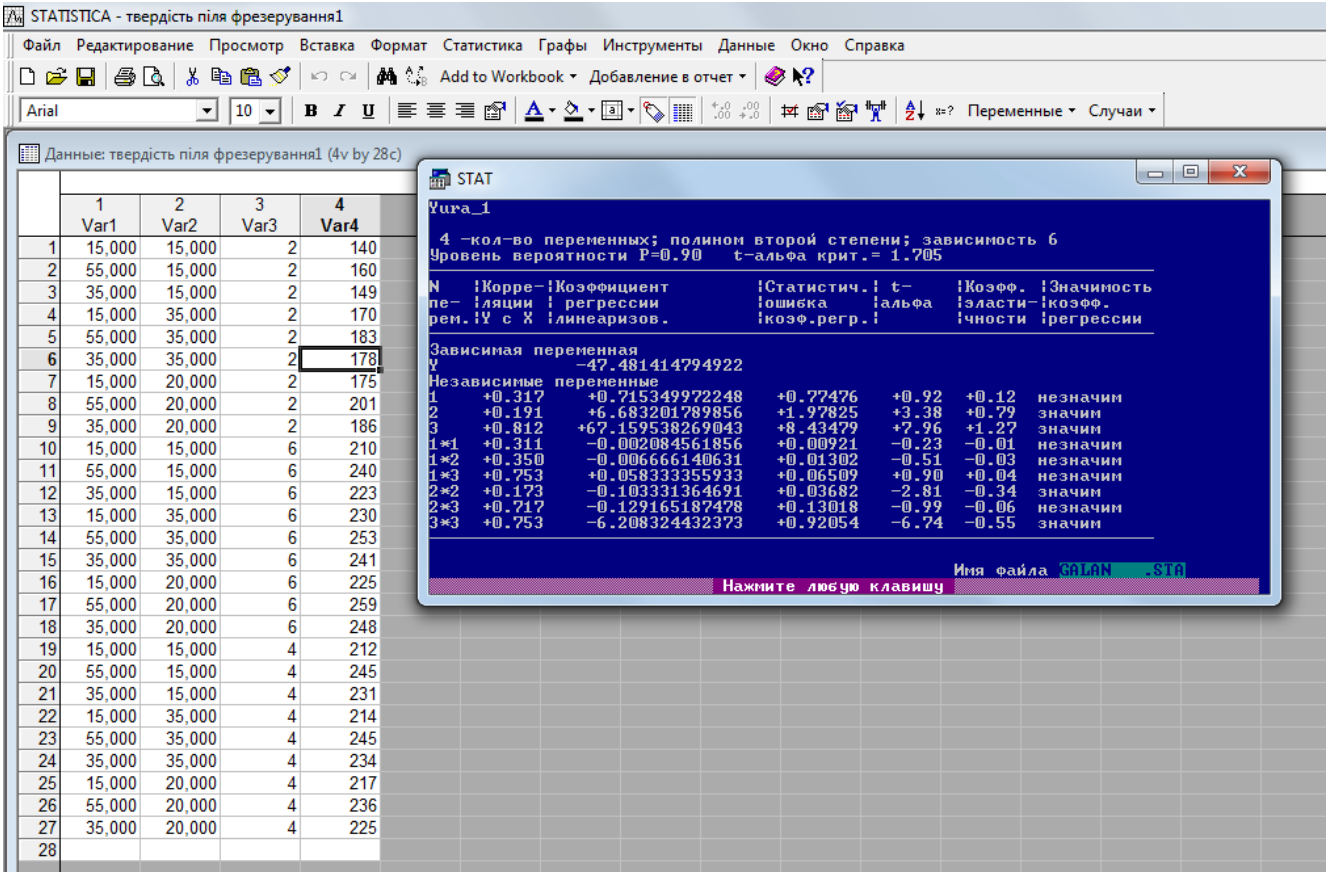
Таблица анализа дисперсии

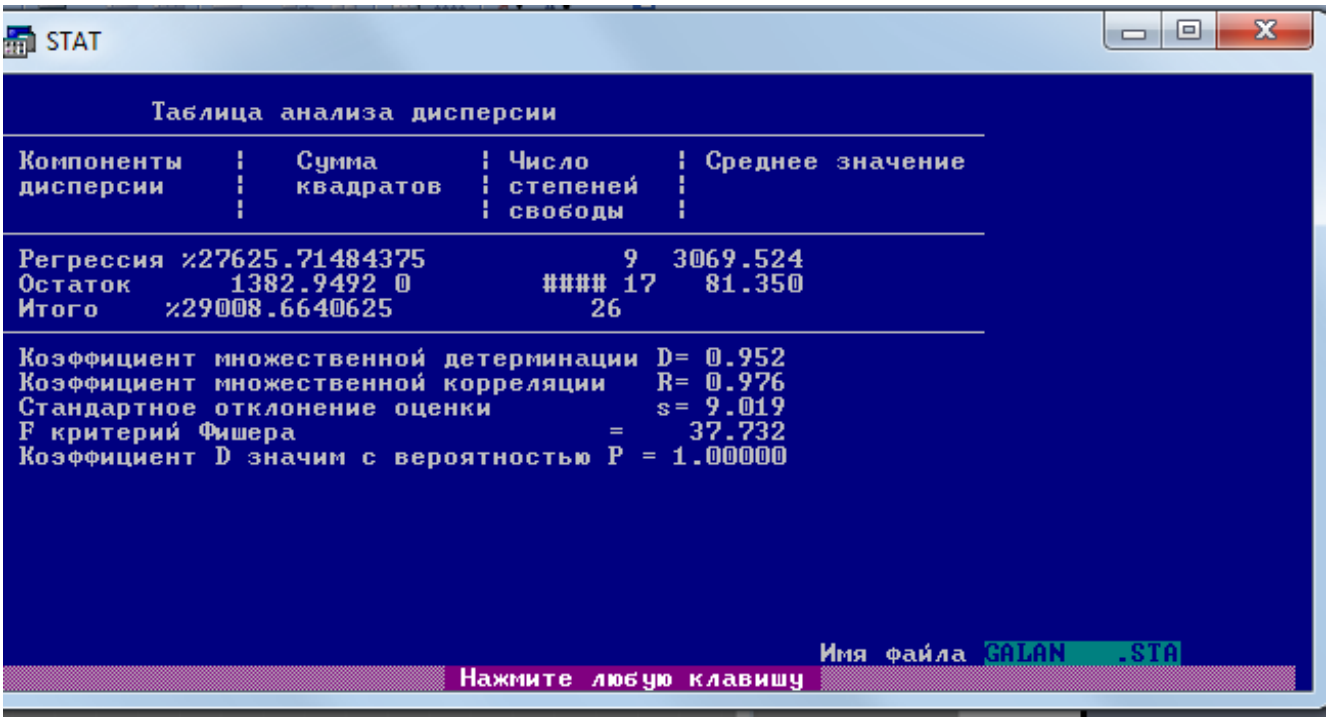
Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Среднее значение
Регрессия	432.4150	9	48.046
Остаток	24.5480 0	#### 17	1.444
Итого	456.9630	26	

Коэффициент множественной детерминации D= 0.946
Коэффициент множественной корреляции R= 0.973
Стандартное отклонение оценки s= 1.202
F критерий Фишера = 33.273
Коэффициент D значим с вероятностью P = 1.00000

Имя файла GALAN1 .STA
Нажмите любую клавишу

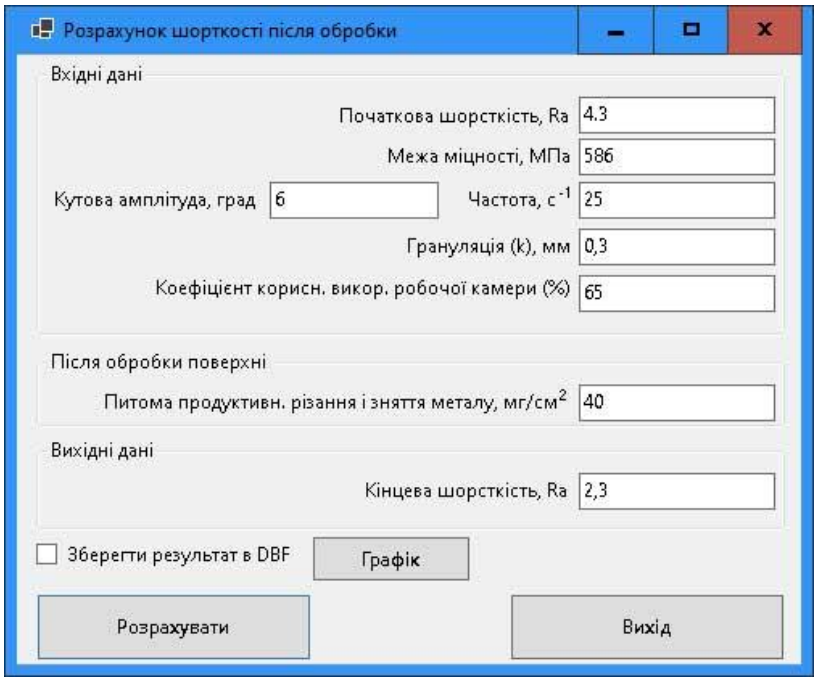
Результати статистичної обробки експериментальних значень мікротвердості при вібраційно-відцентровому обробленні





ДОДАТОК Ж

Програма для перевірки корректності математичної моделі




```
public class SimplexMetHelper
{
    private static void SearchBaseSol(object[,] matrix)
    {
        for (int i = 1; i < matrix.GetLength(0); i++)
        {
            if ((string)matrix[i, 0] == "x")
            {
                for (int j = 2; j < matrix.GetLength(1); j++)
                {
                    if ((int)matrix[i, j] == 1 && CheckNullValue(matrix, i, j))
                    {
                        matrix[i, 0] = matrix[0, j];
                        break;
                    }
                }
            }
        }
    }
    private static bool CheckNullValue(object[,] matrix, int numRow, int numCol)
    {
        if (((string)matrix[0, numCol]).Contains('x'))
            return false;
        for (int i = matrix.GetLength(0) - 1; i > 0; i--)
        {
            if (Convert.ToDouble(matrix[i, numCol]) == 0 ||
Convert.ToDouble(matrix[numRow, numCol]) == 1)
                continue;
            else
                return false;
```

```
            }
            return true;
        }
        public static void SimplexMetHelper(ref object[,] matrix)
        {
            SearchBaseSol(matrix);
            RobotaPoshukuGranichi(ref matrix);
            RabotaSZeleZ(ref matrix);
        }
        private static int CountIskustvElement(object[,] matrix)
        {
            int aounter = 0;

            for (int i = 0; i < matrix.GetLength(1); i++)
                if ((matrix[0, i] as string).Contains("art"))
                    aounter++;

            return aounter;
        }
       private static bool ProverkaStrokiTablici(object[,] matrix)
        {
            for (int j = 2; j < matrix.GetLength(1) - CountIskustvElement(matrix); j++)
            {
                if (Convert.ToDouble(matrix[matrix.GetLength(0) - 1, j]) == 0)
                    continue;
                else
                    return false;
            }
            return true;
        }
        private static object[,] PerehodArrayMatrici(ref object[,] matrixBefore)
        {
            object[,] matrixAfterTransform = new object[matrixBefore.GetLength(0) - 1,
matrixBefore.GetLength(1) - CountIskustvElement(matrixBefore)];

            for (int i = 0; i < matrixAfterTransform.GetLength(0); i++)
                for (int j = 0; j < matrixAfterTransform.GetLength(1); j++)
                    matrixAfterTransform[i, j] = matrixBefore[i, j];

            return matrixAfterTransform;
        }
        private static void RobotaPoshukuGranichi(ref object[,] matrix)
        {
            while (!ProverkaStroki(matrix))
            {
                Writing(matrix);
                int j_min = PoshukGolovnogo(matrix);
                int i_min = PoshuVeduchogo(matrix, j_min, 2);
                EditbaseElement(matrix, i_min, j_min);
                ZvedennyaDoBasisu(matrix, i_min, j_min);
```

```
            OtrimannyNullVStobchik(matrix, i_min, j_min);
        }
        Writing(matrix);
        matrix = PerehodArrayMatrici(ref matrix);
        Writing(matrix);
    }
    private static bool PerevirkaTargetFunctionEls(object[,] matrix)
    {
        for (int j = 2; j < matrix.GetLength(1); j++)
        {
            if (Convert.ToDouble(matrix[matrix.GetLength(0) - 1, j]) < 0)
                return false;
            else
                continue;
        }
        return true;
    }
    private static void RobotaZElementami(ref object[,] matrix)
    {
        while (!PerevirkaTargetFunctionEls(matrix))
        {
            Writing(matrix);
            int j_min = PoshukGolovnogo(matrix);
            int i_min = PoshuVeduchogo(matrix, j_min, 1);
            EditbaseElement(matrix, i_min, j_min);
            ZvedennyaDoBasisu(matrix, i_min, j_min);
            OtrimannyNullVStobchik(matrix, i_min, j_min);
        }
        Writing(matrix);
    }
    private static int PoshukGolovnogo(object[,] matrix)
    {
        int min_j = 2;
        for (int j = 2; j < matrix.GetLength(1) - CountIskustvElement(matrix); j++)
            if (Convert.ToDouble(matrix[matrix.GetLength(0) - 1, j]) <
Convert.ToDouble(matrix[matrix.GetLength(0) - 1, min_j]))
                min_j = j;
        return min_j;
    }
    private static int PoshiMinZnachecnnya(object[,] matrix, int min_j, int subtractValue)
    {
        for (int i = 1; i < matrix.GetLength(0) - subtractValue; i++)
        {
            if ((Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) > 0) && (Convert.ToDouble(matrix[i,
1]) / Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) > 0))
            {
                return i;
            }
        }
        return -1;
```

```
        }
        private static int PoshuVeduchogo(object[,] matrix, int min_j, int subtractValue)
        {
            var min_item = PoshiMinZnachecnnya(matrix, min_j, subtractValue);
            var minDivisionResEle = Convert.ToDouble(matrix[min_item, 1]) /
Convert.ToDouble(matrix[min_item, min_j]);
            if (subtractValue == 2)
            {
                var el_priority = false;
                if (matrix[min_item, 0].ToString().Contains("art"))
                    el_priority = true;
                for (int i = 1; i < matrix.GetLength(0) - subtractValue; i++)
                {
                    if (matrix[i, 0].ToString().Contains("art"))
                        el_priority = true;
                    else
                        el_priority = false;

                    if ((Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) > 0) && (Convert.ToDouble(matrix[i,
1]) / Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) < minDivisionResEle) &&
(Convert.ToDouble(matrix[i, 1]) / Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) > 0))
                    {
                        minDivisionResEle = (Convert.ToDouble(matrix[i, 1])) /
(Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]));
                        min_item = i;
                    }
                    else
                    {
                        if ((Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) > 0) &&
(Convert.ToDouble(matrix[i, 1]) / Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) ==
minDivisionResEle) && (Convert.ToDouble(matrix[i, 1]) / Convert.ToDouble(matrix[i,
min_j]) > 0) && el_priority)
                        {
                            minDivisionResEle = (Convert.ToDouble(matrix[i, 1])) /
(Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]));
                            min_item = i;
                        }
                    }
                }
            }
            else
            {
                for (int i = 1; i < matrix.GetLength(0) - subtractValue; i++)
                {
                    if ((Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) > 0) && (Convert.ToDouble(matrix[i,
1]) / Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) < minDivisionResEle) &&
(Convert.ToDouble(matrix[i, 1]) / Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]) > 0))
                    {
                        minDivisionResEle = (Convert.ToDouble(matrix[i, 1])) /
(Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]));
```

```
                    min_item = i;
                }
            }
        }
        return min_item;
    }
    private static void EditbaseElement(object[,] matrix, int min_i, int min_j)
    {
        matrix[min_i, 0] = matrix[0, min_j];
    }
    private static void ZvedennyaDoBasisu(object[,] matrix, int min_i, int min_j)
    {
        if (Convert.ToDouble(matrix[min_i, min_j]) != 1)
        {
            double devisor = Convert.ToDouble(matrix[min_i, min_j]);
            for (int j = 1; j < matrix.GetLength(1); j++)
                matrix[min_i, j] = Convert.ToDouble(matrix[min_i, j]) / devisor;
        }
    }
    private static void OtrimannyNullVStobchik(object[,] matrix, int min_i, int min_j)
    {
        for (int i = 1; i < matrix.GetLength(0); i++)
        {
            if (i != min_i)
            {
                double tmp = Convert.ToDouble(matrix[i, min_j]);
                if (tmp != 0)
                {
                    for (int j = 1; j < matrix.GetLength(1); j++)
                        matrix[i, j] = Convert.ToDouble(matrix[i, j]) - tmp *
Convert.ToDouble(matrix[min_i, j]);
                }
                else
                    continue;
            }
        }

    }
```

ДОДАТОК З

Реалізація досліджень по дисертаційній роботі та акти впровадження результатів дослідження

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **109854** (13) **U**

(51) МПК
B24B 31/06 (2006.01)
B06B 1/02 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2016 02643**
(22) Дата подання заявки: **17.03.2016**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.09.2016**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **12.09.2016, Бюл.№ 17**

(72) Винахідник(и):
Кондратюк Олександр Михайлович (UA),
Галан Юрій Ярославович (UA),
Ляшук Олег Леонтійович (UA),
Скиба Олена Павлівна (UA)

(73) Власник(и):
Кондратюк Олександр Михайлович,
вул. Степана Бандери, 12, м. Рівне, 33000 (UA),
Галан Юрій Ярославович,
вул. Тарнавського, 7-а, м. Тернопіль, 46000 (UA),
Ляшук Олег Леонтійович,
вул. Б. Лепкого, 6/127, м. Тернопіль, 46000 (UA),
Скиба Олена Павлівна,
вул. В. Великого, 26/128, м. Тернопіль, 46020 (UA)

(54) ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВА УСТАНОВКА

(57) Реферат:

Вібраційно-відцентрова установка виконана у вигляді рами, робочої камери з приводом, установних і кріпильних елементів. Вона виконана як закритий корпус, зрізаний зверху спереду під кутом 30° до горизонту, в зоні якого на валу встановлена робоча камера конічно-сферичної форми, яка шарнірно встановлена в рухоме кільце, яке за допомогою підшипникових вузлів зв'язано з ведучою вилкою. Камера жорстко з'єднана з пустотілим валом, який встановлено під кутом 30° до горизонту і жорстко встановлено на підставці всередині закритого корпуса і за допомогою підшипникових вузлів зв'язано з ведучою вилкою, яка жорстко з'єднана з пустотілим валом, який жорстко встановлений на опорній площині під кутом. Всередині пустотілого вала вільно встановлено другий вал з можливістю кругового провертання, який має привід від окремого електродвигуна через пасову передачу, і вал є приводом кривошипного механізму з складними кутовими коливаннями робочої камери.

UA 109854 U

УКРАЇНА

(19) UA (11) 109876 (13) U

(51) МПК (2016.01)
G01D 3/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2016 02943

(22) Дата подання заявки: 22.03.2016

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 12.09.2016

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 12.09.2016, Бюл.№ 17

(72) Винахідник(и):
Ляшук Олег Леонтійович (UA),
Марчук Назар Миколайович (UA),
Третьяков Олександр Леонідович (UA),
Навроцька Тетяна Дем'янівна (UA),
Галан Юрій Ярославович (UA)

(73) Власник(и):
Ляшук Олег Леонтійович,
вул. Б. Лепкого, 6/127, м. Тернопіль, 46000 (UA),
Марчук Назар Миколайович,
вул. Шептицького, 13, м. Тернопіль, 46008 (UA),
Третьяков Олександр Леонідович,
вул. Братів Бойчуків, 5-а/82, м. Тернопіль, 46000 (UA),
Навроцька Тетяна Дем'янівна,
вул. І. Сірка, 10/2, м. Тернопіль, 46000 (UA),
Галан Юрій Ярославович,
вул. Б. Лепкого, 6/132, м. Тернопіль, 46000 (UA)

(54) ІНДИКАТОР УНІВЕРСАЛЬНИЙ

(57) Реферат:

Індикатор універсальний виконано у вигляді штанги з двома каретками, вимірювальних вузлів і індикатора, напрямних кріпильних елементів і упора. На штанзі нанесені розмірні мітки і корпус лівої каретки жорстко закріплений до штанги відомим способом, а ліва вимірювальна планка виконана у вигляді двоплечого шарнірного механізму, по середині довжини якого в центральному отворі жорстко встановлена нерухома вісь з можливістю коливання двоплечого механізму, в корпусі правої рухомої каретки перпендикулярно до штанги виконано центральний отвір, який є у взаємодії з упором, нижній кінець якого має форму щупа лівого двоплечого механізму, крім цього до правого торця правої каретки під'єднано ноніус, хомут зі стопорним гвинтом, механізм точної настройки.

UA 109876 U

УКРАЇНА (19) UA (11) 113428 (13) U
(51) МПК
B24B 31/073 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

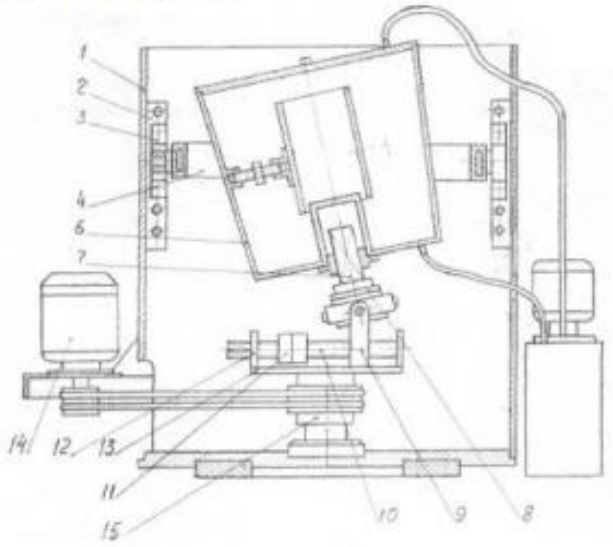
(21) Номер заявки: **u 2016 08015**
(22) Дата подання заявки: **19.07.2016**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.01.2017**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.01.2017, Бюл.№ 2**

(72) Винахідник(и):
Гевко Богдан Матвійович (UA),
Кондратюк Олександр Михайлович (UA),
Ляшук Олег Леонтійович (UA),
Серілко Леонід Степанович (UA),
Галан Юрій Ярославович (UA)
(73) Власник(и):
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000 (UA)

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ

(57) Реферат:

Пристрій для вібраційної обробки включає основу, в опорах якої встановлено за допомогою цапф поворотне кільце, шарнірно зв'язане за допомогою двох опор з вертикальною камерою, рухомо з'єднаною з віброзбуджувачем за рахунок водила. Крім цього, всередині робочої камери за допомогою спеціальних гвинтів з лівою і правою різями та захватами закріплені активатори або великогабаритні деталі для обробки.



Фіг. 1

UA 113428 U

2021/6/12 15:21

ТОВАРИСТВО З
ДОДАТКОВОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
"БУЛАТ"

БУЛАТ

PUBLIC
JOINT STOCK COMPANY
"BULAT"

Юридична адреса:
48120, Україна, Тернопільська обл., смт Микулинці,
вул.Тернопільська,35
Тел. +380-355-151-145,
Тел/факс +380-355-151-300
http://www.bulat.te.ua

Adress:
48120, 35 Ternopilska St.,Mykulyncy, Ternopil, Ukraine
Tel. +380 355 151-145
Fax. +380-355-151-300
http://www.bulat.te.ua

№ 112
04 червня 2021 р.

За місцем вимоги,

АКТ
впровадження наукових розробок Гевка Богдана Матвійовича, Кондратюка Олександра Михайловича, Ляшука Олега Леонтійовича, Серілка Леоніда Степановича, Галана Юрія Ярославовича

Результати експериментальних досліджень пристрою для вібраційної обробки, який захищений деклараційним патентом України на корисну модель: № 113428 (Пристрій для вібраційної обробки) показали досить високу ефективність при виконанні технологічного процесу.

За результатами досліджень встановлено, що ступінь збільшення площі надання вібраційного імпульсу для оброблюючого абразивного робочого середовища і зменшення його товщини, що приводить до збільшення сили взаємодії абразивної гранули з оброблюваною поверхнею деталі, розширяються можливості технологічного процесу вібраційної обробки і підвищується продуктивність вібраційного пристрою.

Експериментальні дослідження проводилися з параметрами із частотою 15-50 Гц та амплітудою 0,5-9мм для оброблення поверхонь деталей.

При лабораторних дослідженнях запропонованого пристрою для вібраційної обробки деталей встановлено, що інтенсивність технологічного процесу підвищилась в 1,2-1,3 рази.

Директор Ковальчук О.В.

Тернопільська область Теребовлянський район Товариство з додатковою відповідальністю "БУЛАТ" смт Микулинці * 00901438 * Україна

Продовження додатку З

ПОГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
технічного університету
імені Івана Пулюя
_____ Марущак П. О.
«28» _____05_____ 2021 р.

Перший проректор
Тернопільського національного
технічного університету
імені Івана Пулюя
_____ Митник М. М.
«28» _____05_____ 2021 р.

2021/6/12 15:21

АКТ

Ми, які нижче підписалися, представники Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: начальник навчального відділу Ткаченко І. Г., завідувач кафедрою інжинірингу машинобудівних технологій (МТ) доцент Окіпний І. Б. доцент кафедри МТ Дячун А. Є. склали цей акт про те, що в освітньому процесі здобувачів вищої освіти за спеціальністю 131 Прикладна механіка використовуються результати наукових досліджень Галана Юрія Ярославовича, отримані за результатами виконання дисертаційної роботи на тему «Підвищення ефективності технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей в сипучому абразивному середовищі».

Матеріали наукових досліджень Галана Ю.Я. використовуються при викладанні дисциплін «Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин», «Технологія обробки типових деталей та складання машин» «Технології та устаткування машинобудівних виробництв».

Голова комісії:

начальник навчального відділу І. Г. Ткаченко

Члени комісії:

завідувач кафедрою МТ І. Б. Окіпний

доцент кафедри МТ А. Є. Дячун

Продовження додатку З

Директор ТзОВ “ ВМП енергоконструкція “
Войт Ю.М.

АКТ

впровадження наукової розробки Ляшука Олега Леонтійовича, Галана Юрія Ярославовича, Серілка Леоніда Степановича, Кондратюка Олександра Михайловича у виробництво на ТзОВ “ ВМП енергоконструкція “

Результати експериментальних досліджень з використання вібраційно - відцентрового пристрою з використанням сипучого абразивного середовища для обробки деталей складної геометричної форми і малої жорсткості, проведених співробітниками Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя і Національного університету водного господарства та природокористування у 2020 році, реалізовані в конструкції пристрою, який захищений деклараційним патентом України № 113428, Бюл. № 2/2017 р.

Запропоновані технічні рішення забезпечують розширення технологічних можливостей, покращення технічних характеристик фінішної обробки, підвищують продуктивність роботи, зменшують час зачистної, шліфувальної і полірувальної технологічної операції. Економічний ефект від впровадження запропонованого вібраційно - відцентрового пристрою з використанням сипучого абразивного середовища для обробки деталей складної геометричної форми і малої жорсткості складе 8540 грн.

Голова комісії
головний інженер
ТзОВ “ ВМП енергоконструкція “ Л.Р. Войтович

Члени комісії:
головний механік
ТзОВ “ ВМП енергоконструкція “ О.В. Харук

доцент, к.т.н. НУВГП О.М. Кондратюк

2021/6/12 15:21