Хмельницький національний університет

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра: Технології машинобудування

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти магістра

«Обґрунтування параметрів вібраційної машини для гідродробозміцнення з розробленням програми розрахунку енергії удару кульок»

Назва теми

Рівень вищої освіти: другий (магістр)

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Шифр і назва галузі знань

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Шифр і назва спеціальності

Спеціалізація: Технології машинобудування

Назва

Освітня програма: Технології машинобудування

Назва

Шифр 18048

Виконав студент 2 курсу група ПМТм-22-1 Володимир КАМІНСЬКИЙ

Шифр Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник д.т.н., професор Анатолій ГОРДЄЄВ

Науковий ступінь, звання Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер Сергій БИСЬ

Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри технології машинобудування Віталій ТКАЧУК

Назва Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 20.12.2023

Хмельницький 2023

Завідувачу кафедри
Технології машинобудування
Віталію ТКАЧУКУ
здобувача вищої освіти
Володимира КАМІНСЬКОГО
Факультету інженерії, транспорту та
архітектури, 2 курсу гр. ПМТм-22-1

_____
здобувача вищої освіти (студента
ПІБ, факультет, «курс», «група»)

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на академічний плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та/або Anti-Plagiarism) і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

_____ _____

дата підпис

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ

Направляється студент Камінський Володимир Павлович (прізвище, ім'я, по батькові) на захист дипломного проєкту (роботи)

за спеціальністю 131 - Прикладна механіка

На тему: Обґрунтування параметрів вібраційної машини для гідродробозміцнення з розробленням програми розрахунку тиску

Дипломний проєкт (робота), рецензія і довідка про перевірку на плагіат додаються.

Декан факультету _____ (підпис) ВІКТОР ОЛЕКСАНДРЕНКО (ім'я, прізвище)

ДОВІДКА УСПІШНОСТІ

Камінський В. П. за період навчання на факультеті інженерії, транспорту та архітектури з 2022 по 2022 роки повністю виконав навчальний план спеціальності з таким розподілом оцінок за: національною шкалою: відмінно 0,00 %, добре 66,67 %, задовільно 33,33 %.
шкалою ЄКТС: A 0,00 %, B 9,09 %, C 45,45 %, D 18,18 %, E 27,27 %.

Методист факультету _____ (підпис) _____ (ім'я, прізвище)

ВИСНОВОК КЕРІВНИКА ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ (РОБОТИ) ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОЦІНКИ

Студент Камінський В.П. приступив до виконання роботи своєчасно та виконав її у повному обсязі. За період роботи з матеріалами показав добрі знання

Оцінка дипломного проєкту (роботи) добре

Керівник дипломного проєкту _____ (підпис) А. ГОРДЄЄВ (ім'я, прізвище)

"20" 12 2023 р.

ВИСНОВОК КАФЕДРИ ПРО ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ)

Дипломний проєкт (роботу) розглянуто. Студент Камінський В. П. допускається до захисту цього проєкту (роботи) в екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри _____ (назва)

_____ (підпис, ім'я, прізвище)

"____" _____ 2023 р.

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатами звіту/звітів подібності щодо роботи, продукованими програмно-технічним засобом (ами) перевірки текстів на плагіат:
Назва кваліфікаційної роботи: «Обґрунтування параметрів вібраційної машини для гідродробозміцнення з розробленням програми розрахунку енергії удару кульок»

Автор: Володимир КАМІНСЬКИЙ
Освітня програма: 131. Прикладна механіка
Спеціальність: Технології машинобудування
Науковий керівник: Анатолій ГОРДЄЄВ

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	Текст вважається оригінальним та не потребує додаткових дій щодо запобігання неправомірним запозиченням. Передається на розгляд Експертної ради кафедри

Підтвердження:
.....
.....
.....
.....

Дата

Завідувач кафедри _____ Віталій ТКАЧУК
Підпис Ім'я, прізвище

Гарант освітньої програми _____ Віталій ТКАЧУК
Підпис Ім'я, прізвище

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій ГОРДЄЄВ
Підпис Ім'я, прізвище

РЕЦЕНЗІЯ

на магістерську роботу Камінського В. П. «Удосконалення технології виготовлення деталі «Обгрунтування параметрів вібраційної машини для гідродробозміцнення з розробленням програми розрахунку енергії удару кульок»

Тема магістерської роботи Камінського В. П. є інженерно цікавою і актуальною для сучасного виробництва. Робота скерована на створення вібраційної машини для гідродробозміцнення з розробленням програми розрахунку енергії удару кульок» в залежності від параметрів приводу.

В загальному розділі виконано аналіз стану питання і постановка задачі досліджень. В другому розділі розглянуті теоретичні основи процесу та динаміка вібраційного приводу устаткування. В третьому розділі наведені дослідження впливу режимів приводу на продуктивність. В четвертому розділі приведена методика розрахунку та проектування робочого органа устаткування.

В технологічному розділі виконано розрахунки собівартості заготовки, визначено припуски, режими різання, норми часу.

В конструкторському розділі виконано розрахунки контрольно-вимірювального пристрою, опис конструкції та роботи вібраційної установки.

Графічна частина виконана на доброму рівні з використанням комп'ютерного просторового проектування і дає повне уявлення про предмет розробки. Креслення та пояснювальна записка відповідають вимогам ДСТУ.

За матеріалами досліджень опубліковані тези.

По роботі є зауваження:

1. Бажано було би проводити розрахунок собівартості заготовки по новим цінам на метал.

Виходячи з результатів, які містяться в магістерській роботі та виконанні її на високому технічному рівні, який відповідає вимогам до магістерських праць, робота рекомендується до захисту, а здобувач Камінський В. П. заслуговує присудження ступеня магістра за спеціальністю 131 - Прикладна механіка.

Доцент каф. галузевого машинобудування
та агроінженерії, к.т.н., доцент Лук'янюк М.В.

Хмельницький національний університет

факультет Інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра Технології машинобудування

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Шифр і назва
Спеціальність 131 Прикладна механіка
Шифр і назва
Освітня програма Технології машинобудування
Спеціалізація Технології машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
технології машинобудування
_____._____. 2023 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Камінському В. П.

Тема роботи: «Обґрунтування параметрів вібраційної машини для гідродробозміцнення з розробленням програми розрахунку енергії удару кульок»

керівник проєкту (роботи) Гордєєв А.І., д.т.н., професор
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання
Затверджено наказом ректора університету від _____ _____20___ р. №_____

2 Строк подання студентом проєкту (роботи) на кафедру 10.12.2023 р

3 Вихідні дані до проєкту (роботи): Обзор літературних джерел. Креслення деталі.

4 Зміст пояснювальної записки: Вступ. Загальний розділ. Технологічний розділ. Дослідницький розділ. Конструкторський розділ. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу: 1 Лист загальний – 1 лист А1; 2 Листи дослідної частини – 3 листа А1; 3 Креслення вібраційної машини – 1 лист А1; 4 Креслення деталі - лист А2; 5 Креслення заготовки - лист А2; 6 Графотехнологія – лист А1; 7 Пристрій для контролю -1 лист А1.

6 Дата видачі завдання 10.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
Розділ I	30.09.2023	
Розділ II	15.10.2023	
Розділ III	30.10.2023	
Розділ IV	15.11.2023	
Розділ V	30.11.2023	
Розділ VI	05.12.2023	

Студент _____ Володимир КАМІНСЬКИЙ
Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник проєкту (роботи) _____ Анатолій ГОРДЄЄВ
Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Анотація

Тема роботи: «Обґрунтування параметрів вібраційної машини для гідродробозміцнення з розробленням програми розрахунку енергії удару кульок».

Автор Камінський В. П. Керівник проекту: А. І. Гордєєв

Об’єм пояснювальної записки 85 стор. Графічна частина 7 листів А1.

Спеціальність: 131 Прикладна механіка.

В дипломній роботі на основі аналізу науково-технічних і патентних джерел показано перспективність застосування пульсуючого рідинного потоку для дробоструменевого зміцнення інструменту і деталей машин.

Актуальність. З метою збільшення надійності і довговічності деталей машин, шляхом надання їх поверхневому шару необхідних фізико-механічних властивостей, в наш час в машинобудуванні широко використовують різні методи поверхневого пластичного деформування (ППД), які є одним з найбільш простих і ефективних методів зміцнення. Тому розроблення технологічного устаткування для зміцнення інструментів і деталей машин є актуальною технічною задачею.

Метою магістерської роботи є дослідження динаміки віброприводу устаткування для зміцнення інструментів і деталей машин з розробкою конструкції вібраційного устаткування та програмного продукту для визначення його головних параметрів.

Об’єкт дослідження – обґрунтування технологічних параметрів приводу вібраційної машини для гідродробозміцнення, створення програмного продукту.

Предмет дослідження – технологічний процес гідродробозміцнення.

Наукова новизна. Побудована аналітична модель робочого органа устаткування для гідродробоструменевого зміцнення. По аналітичній моделі виявлено зв'язок між режимами роботи вібраційного приводу, конструктивними параметрами гідропульсатора та характеристиками пульсуючого рідинного потоку, проаналізовано вплив конструктивних параметрів на енергію удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструминній установці.

Практичне значення. Розроблено програму для розрахунку сили гідродинамічного тиску в залежності від параметрів робочого органу, запропоновано конструктивну схему будови установки для гідродробозміцнення.

В технологічному розділі розроблено технологічний процес механічної обробки інструмента – фрези циліндричної.

В конструкторському розділі було спроектовано контрольно - вимірювальний пристрій для контролю параметра фрези, надано опис конструкції та роботи вібраційної установки.

Ключеві слова: процес гідродробозміцнення, аналітична модель, вібраційна машина, техпроцес механічної обробки деталі фреза.

Автор проекту: В. П. Камінський

2023 р.

Abstract

The topic of the work: "Justification of the parameters of the vibrating machine for hydroblast strengthening with the development of a program for calculating the impact energy of the balls".

Author V.P. Kaminsky Project manager: A. I. Gordeev

The volume of the explanatory note is 85 pages. Graphic part of 7 A1 sheets.

Specialty: 131 Applied Mechanics.

In the thesis, based on the analysis of scientific and technical and patent sources, the prospects of using a pulsating liquid flow for shot-blast hardening of tools and machine parts are shown.

Topicality. In order to increase the reliability and durability of machine parts, by giving their surface layer the necessary physical and mechanical properties, various methods of surface plastic deformation (SPD), which are one of the simplest and most effective strengthening methods, are widely used in machine building nowadays. Therefore, the development of technological equipment for strengthening tools and machine parts is an urgent technical task.

The purpose of the master's work is to study the dynamics of the vibration drive of the equipment for strengthening tools and machine parts with the development of the design of the vibration equipment and the software product to determine its main parameters.

The object of the research is the substantiation of the technological parameters of the drive of the vibrating machine for hydraulic crushing, the creation of a software product.

The subject of the study is the technological process of hydraulic sandblasting.

Scientific novelty. An analytical model of the working body of the equipment for hydrojet hardening was built. According to the analytical model, the connection between the modes of operation of the vibration drive, the design parameters of the hydropulsator and the characteristics of the pulsating liquid flow was revealed, the influence of the design parameters on the impact energy of the working bodies in the vibrating hydrojet installation was analyzed.

Practical meaning. A program for calculating the force of hydrodynamic pressure depending on the parameters of the working body has been developed, and a structural diagram of the structure of the hydroblast strengthening installation has been proposed.

In the technological section, the technological process of mechanical processing of the tool - a cylindrical cutter - has been developed.

In the design section, a control-measuring device was designed to control the parameter of the milling cutter, a description of the design and operation of the vibration installation was provided.

Key words: hydroblast strengthening process, analytical model, vibration machine, technical process of mechanical processing of milling cutter parts.

Author of the project: V. P. Kaminsky

2023

№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
1			Документація загальна		
2					
3					
4	А4	ДРМ.ФІТА.23.00.00 ПЗ	Розрахунково-пояснювальна записка		
5	А2	ДРМ.ФІТА.23.02.02.00.00	Креслення заготовки	1	
6	А2	ДРМ.ФІТА.23.02.01.00.00	Креслення деталі	1	
7	А1	ДРМ. ФІТА.23.02.03.00.00	Графотехнологія	1	
8	А1	ДРМ.ФІТА.23.02.04.00.00	Дослідницький лист	1	
9	А1	ДРМ.ФІТА.23.03.05.00.00СК	Дослідницький лист	1	
9	А1	ДРМ.ФІТА.23.03.01.00.00СК	Дослідницький лист	1	
10	А1	ДРМ.ФІТА.23.06.03.02.00СК	Пристрій контрольно - вимірювальний	1	
11	А1	ДРМ.ФІТА.23.06.03.01.00СК	Вібраційна машина	1	
12					
13					

ЗМІСТ

арк.

Вступ 7

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ…… 12

1.1 Методи зміцнення деталей та інструментів поверхневим пластичним деформуванням……. 12

1.2 Сутність процесу зміцнення…… 14

1.3 Аналіз конструкцій установок для зміцнення…….. 19

1.4 Вибір технології та пристрою для зміцнення…… 23

1.5 Висновки до розділу 1……. 24

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ТА ДИНАМІКА ВІБРАЦІЙНОГО ПРИВОДУ УСТАТКУВАННЯ…… 26

2.1 Аналітична модель приводу вібраційної машини…….. 26

2.2 Аналітична модель визначення енергії удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструменевой установці…… 34

2.3 Аналіз впливу різних параметрів на енергію удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструминній установці…… 39

2.4 Висновки до розділу 2……. 42

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ПРИВОДУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ…… 44

3.1 Методика досліджень……. 44

3.2 Опис дослідної установки……. 44

3.3 Визначення сили гідродинамічного тиску пульсуючого рідинного потоку……. 46

3.4 Визначення сили удару кульок від параметрів приводу…… 47

3.5 Висновки по розділу …… 51

РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ РОБОЧОГО ОРГАНА УСТАТКУВАННЯ……53

4.1 Загальна методика розрахунку……53

4.2 Розроблення програми розрахунку тиску з насадку……55
4.3 Розрахунок конструктивних елементів проводу…… 58
4.4 Висновки до розділу 4…… 60
РОЗДІЛ 5 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ …… 61
5.1 Аналіз креслення і технічних умов на виготовлення деталі…… 61
5.2 Вибір заготовки і обґрунтування методів її отримання…… 62
5.3 Вибір технологічних баз…… .63
5.4 Проектування технологічних операцій механічної обробки……64
5.5 Розрахунок припусків……65
5.6 Розрахунок режимів різання……69
5.7 Технічне нормування операцій технологічного процесу…… 73
5.8 Висновки до розділу 5…….. 75
РОЗДІЛ 6. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ…… 76
6.1 Проектування контрольно - вимірювального пристрою…… 76
6.1.1 Технічні умови та вимоги креслення, що підлягають контролю… 76
6.1.2 Вибір схеми вимірювання…… 76
6.1.3 Розрахунок пристрою на точність……76
6.2 Опис конструкції та роботи вібраційної установки…… 78
6.3 Висновки до розділу 6……79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ…… 80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……81
ДОДАТКИ……...85

ВСТУП

«Важливою проблемою машинобудування на сучасному етапі є підвищення якості, надійності і довговічності продукції, що випускається, а також і окремих вузлів та деталей. Основі покажчики машин і пристроїв - їх надійність і ККД, які в значній мірі визначаються експлуатаційними властивостями деталей та інструментів, а також з'єднань (границею витривалості, корозійною зносостійкістю, коефіцієнтом тертя, контактною жорсткістю, міцністю посадок, герметичністю з'єднань). Експлуатаційні властивості характеризуються станом поверхневого шару деталей та інструментів, що визначається технологією їх виготовлення» [1].

В умовах високих швидкостей відносного переміщення і навантажень поверхонь, що контактують все більше зростають вимоги до зносостійкості, антифрикційним властивостям, опору ударним навантаженням і втомній міцності деталей, що в більшості випадків забезпечується наданню їх поверхневому шару необхідних фізико-механічних властивостей. Роботами таких вчених, як Кудрявцев И. В., Серенсен С. В., Папшев Д. Д., Степнов М. Н., Дрозд М. С., Петросов В. В. та ін. доведено, що в зв'язку з нерівномірним розподіленням напружень по перерізу деталей, а також в силу того, що зовнішній шар є ослаблений, через те, що несе велику кількість різних дефектів механічного і металургійного походження, втомне руйнування деталей в більшості випадків починається з поверхневого шару [2]. Поверхневий шар деталі або інструменту в умовах експлуатації сприймає найбільш сильну механічну, теплову, магнітно-електричну, світлову та ін. дії. Втрата деталлю або інструментом свого службового призначення та їх руйнування в більшості випадків починається з поверхневого шару, наприклад, виникнення і розвиток тріщини від втоми, корозії, ерозії, зносу і т. ін.

«Забезпечення заданого ресурсу виробів і його подальше збільшення - основна задача конструкторів, технологів, металознавців та метрологів на

підприємстві. Технологічні методи є найбільш ефективні в розв'язанні даної проблеми. Вони дозволяють підвищити точність виготовлення деталей і складання вузлів машин, а також забезпечити оптимальний (для даних умов експлуатації) стан поверхневого шару» [1].

«В результаті зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням в поверхневому шарі деталей, що обробляються, відбуваються структурні зміни, підвищуються його твердість і міцність, утворюються сприятливі залишкові напруження стиску, які зсувають критичні напруження в область більш високих значень, а також сповільнюють процес зародження і розвиток мікротріщин, понижується шорсткість оброблених поверхонь. Крім того залишкові напруження стиску понижують чутливість поверхні деталі до локалізації напружень від зовнішніх зусиль поблизу конструктивних і технологічних концентраторів. Все це сприяє підвищенню надійності і довговічності деталей, що особливо підвладні в процесі експлуатації циклічним навантаженням» [2].

Застосування ППД з низькочастотною вібрацією забезпечує на поверхні деталі регулярний мікрорельєф, підвищує несучу і опорну здатність поверхневого шару. Важливе значення в практиці машинобудування мають різноманітні покриття, підвищення якості яких також є актуальною задачею. Досвід свідчить, що і тут можна ефективно застосовувати ППД. Метою ППД є утворення визначеної макро- і (або) мікрогеометричної форми (поверхневе пластичне формоутворення), зменшення параметра шорсткості поверхні (згладжування), зміна розмірів до допустимих (калібруюче ППД), зміна структури матеріалу без його повної рекристалізації (поверхневий наклеп), створення визначеного напруженого стану (напружений поверхневий наклеп) і зміцнення поверхневим наклепом, що є необхідним для виготовлення деталей та різального інструменту [1].

«Не дивлячись на велику кількість в машинобудуванні методів ППД, які використовуються (їх налічується більше тридцяти), універсального, ефективного для всієї розмаїтої гами деталей, що застосовуються, не існує. В

зв'язку з цим, в кожному окремому випадку під конкретну деталь підбирають той або інший метод ППД, здебільшого задовольняючий підвищенню її експлуатаційних характеристик, будучи при цьому економічно доцільним.

Не припиняються роботи і по створенню нових методів ППД, що забезпечують в порівнянні з існуючими більшу ефективність зміцнюючої обробки. Так, наприклад, в останній час з'явилися лазерне і ультразвукове зміцнення, ударно-імпульсна оздоблююче-зміцнююча обробка, іонна імплантація, нанесення покриттів вакуум-плазмовим і електронно-променевим методами які при високій продуктивності забезпечують високу ступінь зміцнення матеріалу поверхневого шару деталей та інструментів, що обробляються» [2].

Актуальність теми дослідження

З метою збільшення надійності і довговічності деталей машин, шляхом надання їх поверхневому шару необхідних фізико-механічних властивостей, в наш час в машинобудуванні широко використовують різні методи поверхневого пластичного деформування (ППД), які є одним з найбільш простих і ефективних методів зміцнення. Тому розроблення технологічного устаткування для зміцнення інструментів і деталей машин є актуальною технічною задачею.

Мета роботи. Метою магістерської роботи є дослідження динаміки вібропривоу устаткування для зміцнення інструментів і деталей машин з розробкою конструкції вібраційного устаткування та програмного продукту для визначення його головних параметрів.

Предмет дослідження – технологічний процес гідродробозміцнення.

Об’єкт дослідження – обґрунтування технологічних параметрів приводу вібраційної машини для гідродробозміцнення, створення програмного продукту.

Методи дослідження. Використано аналітичні та експериментальні методи дослідження з розробленням програми розрахунку енергії удару кульок.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Побудована аналітична модель робочого органа устаткування для гідродробоструменевого зміцнення. З аналізу моделі виявлено зв'язок між режимами роботи вібраційного приводу, конструктивними параметрами гідропульсатора та характеристиками пульсуючого рідинного потоку.

2. Побудована аналітична модель визначення енергії удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструменевой установці.

3. Проаналізовано вплив конструктивних параметрів на енергію удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструминній установці;

4. Розроблено програму на ЕОМ, яка розраховує енергію удару кульок.

Практичне значення одержаних результатів полягає в створенні вібраційної машини для гідродробозміцнення при цьому запропоновані такі нові рішення:

- розроблено загальну методику проектування приводу машини;

- розроблено програмний продукт для визначення тиску у соплі робочого органу машини, що дозволить конструктору знаходити параметри роботи приводу машини при зміні конструктивних параметрів.

Публікації. Опубліковано тези.

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Методи зміцнення деталей та інструментів поверхневим пластичним деформуванням

Накопичений в наш час великий експериментальний матеріал доводить, що довговічність деталей визначається не тільки раціональною їх конструкцією і якістю матеріалу, але й в значній мірі залежить від технологічних процесів, які визначають собою якість поверхневого шару деталей [2]. Незначні механічні пошкодження поверхні або її дефекти слугують осередками зародження втомної тріщини і передбачають несвоєчасне руйнування деталей при циклічному її навантаженні. Поліпшення шорсткості поверхні звичайно досягається шліфуванням або поліруванням, але навіть при цьому поверхня деталі зберігає риски і надрізи. Від'ємний вплив чинять і шкідливі розтягуючи залишкові напруження, що виникають в поверхневому шарі матеріалу деталей в результаті багатьох технологічних процесів їх обробки. Так, при шліфуванні наведені в матеріалі деталей несприятливі залишкові напруження розтягу можуть сягати досить суттєвих величин [3]. В той самий час встановлено, що наявність залишкових напружень стиску в поверхневому шарі деталей, які підкоряються в процесі експлуатації циклічним навантаженням, підвищує, а наявність залишкових напружень розтягу понижує їх втомну міцність [4]. В зв'язку з цім одною із головних задач при розв'язанні питання підвищення надійності, довговічності і втомної міцності деталей машин слід рахувати вибір таких операцій і режимів обробки, які забезпечували би в поверхневому шарі матеріалу деталей наявність залишкових напружень стиску.

Не дивлячись на розмаїття існуючих методів ППД, всі вони можуть бути класифіковані на п'ять основних груп у відповідності із схемою деформування поверхні металу в зоні контакту з інструментом [5]. Класифікація різних методів ППД наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Способи поверхневого пластичного деформування

Група	Метод	Способи зміцнення
I	Накатування	1. Накатування роликом. 2. Накатування кулькою. 3. Вібраційне накатування з поперечною вібрацією. 4. Вібраційне накатування з поздовжньою вібрацією.
II	Зміцнення зв'язаним ударним інструментом	1. Зміцнююча чеканка з гідроприводом. 2. Зміцнююча чеканка з пневмоприводом. 3. Зміцнююча чеканка з механічним приводом. 4. Відцентрова обробка роликами. 5. Відцентрова обробка кульками. 6. Обробка механічною щіткою (з пружних ниток). 7. Обробка механічною щіткою (з проволоки).
III	Вигладжування	1. Вигладжування сферичним наконечником. 2. Вигладжування конічним наконечником.
IV	Дорнування	1. Дорнування проштовхуванням дорну. 2. Дорнування протягуванням дорну.
V	Динамічне зміцнення	1. Вібраційна ударна обробка. 2. Вібраційна ударно-імпульсна обробка. 3. Вібраційно-відцентрова зміцнююча обробка. 4. Гідрогалтування дробом. 5. Гравітаційна обробка дробом. 6. Гідродробоструменева ежекторна обробка. 7. Гідродробометна обробка. 8. Пневмогідродробоструменева обробка. 9. Пневмодинамічна обробка. 10. Дробоструменева обробка. 11. Дробометна обробка. 12. Ультразвукова обробка дробом.

Найбільш ефективним і перспективним, з точки зору подальшого розвитку, є методи ППД, які належать до п'ятої групи, так звані методи динамічного зміцнення, засновані на динамічній дії (ударі) інструмента або

інструментів на оброблювану поверхню деталі. Основними представниками цієї групи методів ППД є дробоструменева (гідродробоструменева, пневмодинамічне зміцнення, гідрогалтування) і вібраційна зміцнюючи обробки [2].

Сутність дробоструменевої зміцнюючої обробки полягає в тім, що на поверхню деталі, яка підлягає обробці, напрямляється потік дробу, що рухається з великою швидкістю і яка при співударянні пластично деформує поверхню деталі. Основні переваги дробоструменевої обробки - висока продуктивність процесу, забезпечення високого ступеня наклепу (до 35...40%), утворення залишкових напружень стиску в поверхневому шарі матеріалу деталей [1].

Основою віброзміцнення є динамічний характер протікання процесу, який супроводжується множиною мікроударів частинок обробляючої середи по поверхні оброблюваних деталей і забезпечує пластичне деформування поверхневого шару [6, 7, 8, 9]. Найбільш наочні переваги методів віброзміцнення (вібраційного зміцнення, вібраційно-відцентрової зміцнюючої обробки, віброударного метода С. В. Очагова) при обробці деталей складної конфігурації, зміцненні внутрішніх поверхонь деталей, обробці великих партій мілких деталей.

1.2 Сутність процесу зміцнення

«Обробка дробом - ефективний і розповсюджений технологічний метод підвищення витривалості і зносостійкості поверхневим пластичним деформуванням (ППД) деталей, що визначають надійність роботи виробів. Головною особливістю цього методу являється його універсальність. ППД можна обробляти будь-які складні поверхні, наприклад такі, як зубці шестерень, навиті пружини, ресори, перо лопаток компресорів і таке. інш. Після обробки дробом підвищується термін служби деталі та створюється можливість підвищення ресурсу всього виробу, або при тому самому ресурсі

можна в 1,5 і більше разів підвищити несучу можливість (витривалість), що забезпечує конструктору право або підвищити потужність виробу, або понизити металоємність даної деталі» [1].

«Обробку дробом широко застосовують і для зміцнення ріжучого інструменту із швидкоріжучих сталей і твердих сплавів, що значно підвищує його зносостійкість, тим самим забезпечує економію цінного металу або зріст продуктивності праці за рахунок підвищення режимів різання.

Слід відмітити, що проведені дослідження традиційних методів обробки дробом на відомих дробоструменевих і дробометних установках показали, що в силу теплофізичних процесів в зоні жорсткого (сухого) удару дробинок, що летять з великою швидкістю, значної шорсткості поверхні інструмента, що застосовується (литого або рубленого з дроту дробу) і їх низької стійкості ці способи не можуть забезпечити високих параметрів шорсткості, оптимальних фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталей та інструментів і в результаті максимально можливого підвищення вихідних параметрів» [1].

Був створений метод зміцнення металевих виробів дробом з змащуюче-охолоджуючою рідиною. Для впровадження способу були розроблені спочатку пневмогідродробоструменеві, а потім гідродробоструменеві ежекторні установки. Позитивні особливості метода, які виключили якісні недоліки процесу зміцнення сухим дробом, а також деякі переваги конструкції гідродробоструменевих ежекторних установок перед дробоструменевими забезпечують не тільки подальше підвищення і стабілізацію вихідних параметрів деталей, таких, як витривалість, надійність, довговічність, але й значне розширення області застосування метода зміцнення обробкою дробом, наприклад для підвищення зносостійкості точних деталей, інструмента, в тому числі модульного. Все це ставить нові методи і пристрої в ряд найбільш перспективних видів зміцнюючої технології ППД для всіх галузей машинобудування [1].

Суть способу гідродробоструменевого зміцнення (ГДЗ) полягає в обробці матеріалу кульками, які ежектуються змащуюче-охолоджуючою рідиною, що значно усуває недоліки зміцнення сухим дробом:

- наявність жорсткого удару, який підвищує температуру в точці контакту і рясне іскроутворення;
- значне підвищення шорсткості поверхні;
- "залізнення" при ударах дробинками, тобто активний переніс частинок дробу на поверхню деталі, що знижує корозійну стійкість матеріалу.
- значна нестабільність режиму зміцнення через великий допуск на розмір дробу і прискорений знос при сухому терті, що призводить до значного зменшення діаметру дробу, а також через значний допуск на величину тиску повітря в пневмодробоструменевих установках.
- експлуатаційні недоліки (прискорений знос дробометних пристроїв, необхідність застосування спеціальних пристроїв: елеватора для під'йому дробу із нижнього дробозбірника в верхній бункер; сепаратора дробу; повітряосушувачів; низька продуктивність односоплових дробоструменевих установок).

Гідродробоструменевий спосіб зміцнення - якісно новий процес, який відрізняється від дробоструменевого наступними основними перевагами.

В поверхневому шарі деталі:

а) залишкові напруження тільки стискуючи і, як правило, не мають практично підшарового максимуму;

б) порівняно низька шорсткість (Ra = 1,25 ÷ 0,16 мм) поверхні зберігається, висока (Ra = 10 ÷ 2,5 мкм) підвищується до Ra = 2,5 ÷ 1,25 мкм;

в) мікрогеометрія покращується, через те, що радіуси заокруглень западин (ополонок від кульок) і виступів, що визначають опорну поверхню, збільшуються;

г) виключений процес газонасичення в зв'язку із зниженням температури в зоні контакту і наявністю ізоляції поверхневого шару деталі від атмосфери безперервною рідкою плівкою;

д) із кольорових металів практично відсутнє вкраплення частинок заліза, що визначається високою міцністю і низькою шорсткістю поверхні інструмента-кульок при наявності розділяючого прошарку ЗОР [1].

В результаті очевидно, що якість поверхневого шару деталей, які пройшли гідродробоструменеве зміцнення, вища, ніж після зміцнення сухим дробом. Це підтверджується тим, що границя витривалості деталей, які пройшли ГДЗ, вище, ніж після ДЗ.

Якість деталей більш стабільна, через те, що:

а) поле розсіювання показників якості деталей після процесу ГДЗ менше, ніж після ДЗ;

б) розміри і мікрогеометрія у точних інструментів практично не змінюються (наприклад, у модульних, затилованих фрез), що забезпечується відсутністю сухого тертя, адгезійного ефекту, підсиленого відшаровування та інших причин можливого з'йому металу з поверхні деталі, які мають місце при ДЗ.

ГДЕУ мають наступні суттєві переваги перед звичайними дробоструменевими елеваторними установками.

По стабільності якості зміцнення: застосовують найбільш якісний вид інструменту - кульки від підшипників зі змащуючо-охолоджуючою рідиною. Висока стабільність режиму зміцнення забезпечується за рахунок витримки з малими відхиленнями ($\pm 0{,}05$ кгс/см^2) постійного тиску рідини, розмірів кульок (до 5%) і заданого часу зміцнення при допомозі реле часу, яке відключає насос [1].

Стійкість кульок від підшипників при роботі з трансформаторним маслом в тисячі разів вище, ніж у дробу при ДЗ. В результаті, не дивлячись на високу вартість кульок в порівнянні з литим дробом, використання їх обходиться в декілька разів дешевше. Стійкість сопел ГДЕУ відраховується роками при

двох- трьохзмінній роботі. Підвищення стійкості пояснюється виключенням сухого тертя дробинок як між собою, так і об поверхню деталі, сопла і стінки камери [1].

За конструкцією установки: принципіальна схема ежекторних гідродробоструменевих установок дозволяє виготовляти нескладні багатосоплові і багатошпиндельні установки, які мають порівняно невелику металоємність. Наприклад, конструкція ГДЕУ-П майже в 2 рази, за попередніми розрахунками, буде менше важити, ніж установка фірми Carlo Banfi, маса якої за паспортом дорівнює 18000 кг. Це пояснюється тим, що на ГДЕУ елеватор і сепаратор дробу виключені, через те, що функцію елеватора виконують сопла-ежектори, а сепарація, тобто, видалення частинок металу, які утворюються при відшаровуванні поверхні деталі, і зношеної дробу (якщо застосовують не кульки) із робочої порожнини камери установки, відбувається крізь розділяючу сітку за рахунок рясного зливу (більше 3000 л/хв) крізь неї робочої рідини. В установці ГДЕУ немає з'ємних відбиваючих плит, товщина стінок камери менше і т. інш. [1].

За умовами техніки безпеки: відсутність металевого пилу, введення кінцевих вимикачів, які зв'язані безпосередньо з насосом робочої рідини, і застосування загальної витяжної вентиляції характеризують процес як більш прийнятний.

Недоліками процесу зміцнення на ГДЕУ являються наступні.

1. Після зміцнення необхідна промивка деталей від масла. В тих випадках, коли можливо пролежування деталей між операціями, змащення може бути навіть корисним, наприклад для алюмінієвих деталей, які після зміцнення перед анодуванням за технологією однаково промивають.

2. Порівняно підвищена ступінь пожежонебезпеки на робочих місцях через утворення парів під час роботи ГДЕУ при застосуванні в якості робочої рідини масла. Через те, що температура спалаху для трансформаторного масла досить висока (135 - 145⊕ С), протипожежні вимоги обмежуються загально-

прийнятими для цих умов, наприклад палити на робочому місці забороняється, обов'язкова наявність протипожежних засобів.

Область застосування ГДЕУ важко обмежити, через те, що вже в наш час на них зміцнюються в серійному виробництві такі різноманітні деталі, як лопатки компресорів із титанових і алюмінієвих сплавів, сталеві шестерні, трубопроводи, пружини. Отримані додаткові результати при проведенні експериментальних досліджень і розпочаті роботи щодо впровадження в промисловість ГДЕУ для зміцнення шатунів, крупномодульних крупногабаритних шестерень (модуль до 50 і діаметр до 5000 мм), довгомірних деталей довжиною до 12 м і т.д., а також ріжучого інструменту із швидкоріжучих сталей, в тому числі мірного модульного інструменту, свердел і т.д. [1].

1.3 Аналіз конструкцій установок для зміцнення

Установка ГДЕУ (рис. 1.1). Деталь, що обробляється 1 встановлюють на шпинделі в камері 2, яка розділена сіткою 3 на дві порожнини А і Б. В сітці 3 розміщена дріб (кульки), в порожнині Б - змащуючо-охолоджуюча рідина. В порожнині А встановлено сопло-ежектор 4 (від одного до декількох десятків). В нього насосом 5 подається струмінь змащуючо-охолоджуючої рідини, яка підхоплює дріб і напрямляє її на деталь, що обробляється, створюючи при цьому обробку поверхні деталі. Відокремлена від дробу сіткою 3 рідина зливається по патрубку 6 в бак 7. Фільтр 8, розташований в баці, відокремлює дрібні частинки матеріалу деталі, які утворюються при відшаровуванні поверхневого шару, і зношені дробинки, які пройшли крізь сітку 3. Потім насос 5 знов засмоктує рідину, і процес повторюється.

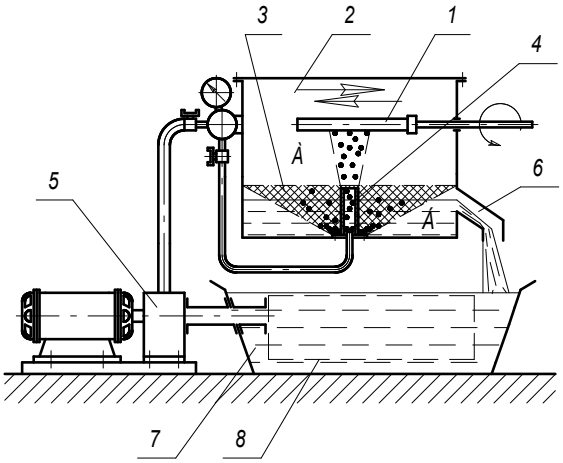

Рисунок 1.1 - Принципова схема ГДЕУ

Установка ГДЕУ-ІМ (рис. 1.2) є універсальною і призначена для зміцнення мілкомодульного інструменту (m = 2 ÷ 5 мм), включаючи прямозубі і спіральні довбачі і черв'ячні фрези.

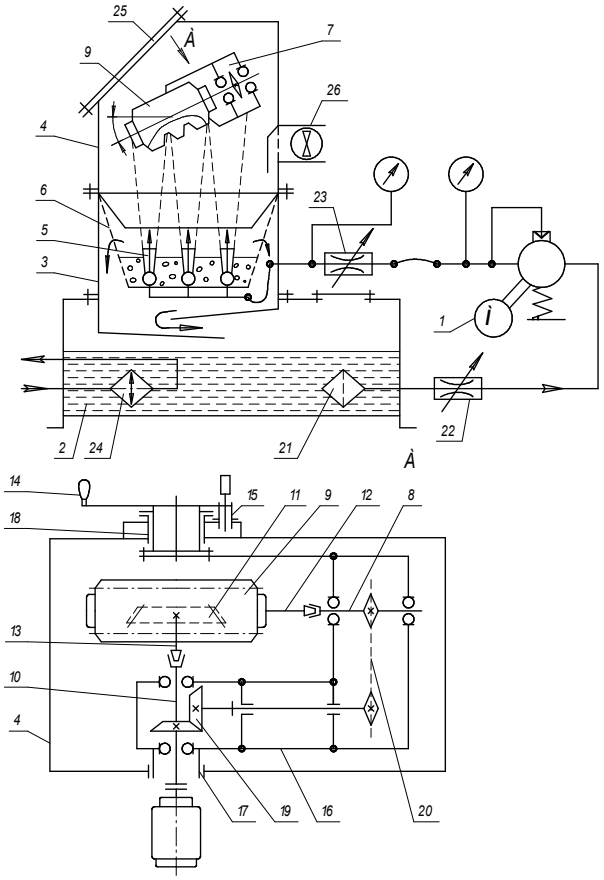

Рисунок 1.2 - Схема установки ГДЕУ-ІМ

На загальній рамі установки змонтовані насосна станція 1, в якості якої застосовано електронасос РЗ-ЗО і масляна ванна 2, на якій встановлені нижня 3 і верхня 4 камери. В нижній камері 3 змонтований блок із трьох сопел-ежекторів 5, охоплений розділяючою сіткою 6. В верхній камері 4 змонтований поворотний привод 7 обертання деталей, що оброблюються. Поворотний привод має два шпинделя, які розташовані в однієї площині перпендикулярно один до одного. Один шпиндель 8 призначений для привода черв'ячних модульних фрез 9, другий 10 для довбачів 11. Фрези і довбачі встановлюють на шпинделі при допомозі спеціальних оправок 12 і 13. Приводом для обертання служить мотор-редуктор виконавчого механізму ПР-1М. Для зміцнення бічних граней черв'ячної фрези привод повертається в один і другий бік на кут α (будь-який за величиною). Поворот здійснюється ручкою 14 з фіксатором 15 у вигляді підпружиненого пальця, якій входить в одне із отворів на фланці корпуса.

Поворотний привод складається із коробчастого корпусу 16, двох підшипників ковзання 17 і 18, пари конічних коліс 19 і ланцюгової передачі 20. Масло насосом 1 засмоктується із ванни 2 крізь фільтр 21 і при відкритих дроселях 22 і 23 подається в колектор сопел-ежекторів 5, звідки робоча рідина подається до форсунок. Для підтримки постійної температури масла (30 - 40⊕С) встановлений маслоохолоджувач 24. В якості охолоджуючої рідини використовують проточну воду. Для видалення парів робочої рідини із порожнини камери 4 перед відкриттям кришки 25 вмикається витяжний вентиляційний пристрій 26.

Установка ГДЕУ-К-ІМ (рис. 1.3) призначена для зміцнення велико-габаритного модульного інструмента, включаючи пальцеві і червячні фрези з модулем до m = 45 мм. До неї входять два шпинделі 1 і 2 з індивідуальними приводами, станина 3, яка є маслозбиральником, робоча камера з трьома соплами-ежекторами і розділяючої сіткою 5, верхня кришка 6, яка для зручності установки інструмента в камеру 4 підйомним краном виконана з'ємною (з горизонтальним роз'ємом). Шпиндель 1 призначений для

встановлення і обертання пальцевих фрез над соплами, які забезпечують суцільність зміцнення дільниці інструмента по довжині 150 мм. Шпиндель 2 забезпечує зміцнення бічних і зовнішніх поверхонь черв'ячних модульних фрез за два переустановлення, тобто з одного боку, потім з другого, розвернувши фрезу на оправці. При цьому рукоятка 7 повинна бути повернута вправо, щоби штифт вийшов із зачеплення з диском, якій починає обертатися разом з гайкою 8, забезпечуючи тільки обертання шпинделя, це застосовують при зміцненні фрез з довжиною робочої частини до 150 мм.

Для зміцнення кожного боку черв'ячних фрез довжиною більше 150 мм за одне встановлення існує спеціальний пристрій для перемикання руху шпинделя 2. Через те, що при повороті рукоятки 7 вліво (за схемою) штифт входить в з'єднання з диском, якій зв'язаний з гайкою 8, і стопорить його відносно корпуса привода. В результаті різьбова частина шпинделя 2, загвинчується в гайку 8 за рахунок обертання від конічної шестерні, яка зв'язана із шпинделем через ковзаючу шпонку, і здійснює обертальний зворотно-поступальний рух між двома кінцевими перемикачами 9, що зв'язані з реверсивним двигуном привода.

Автоматизація багатосоплових ГДЕУ. Одним з основних напрямків при створенні автоматизованих конструкцій багатосоплових ГДЕУ, що забезпечують підвищення надійності і продуктивності процесу ГДЕУ при зменшенні металоємності установок і спрощенні їх конструкції, є застосування багатосоплових ГДЕУ з багатоканальними форсунками (рис. 1.4). В установку входять робоча камера 1 з двома порожнинами Б і В, які розділені сіткою 2, сопла-ежектори 3, що мають багатоканальні форсунки 4. Змащуючо-охолоджуюча рідина із порожнини В крізь фільтр 8 подається насосом 5 до кожної багатоканальної форсунки крізь загальний колектор 6. Задача даних форсунок - виключити при спрощенні деталей 7 потрапляння крізь сопло дробу в порожнину загального колектора 6, що може призвести до засмічення його перерізу і, в кінці кінців, до порушення роботи ГДЕУ, що неприпустимо при

автоматизації процесу. Для цих цілей можуть бути застосовані щілинні і гілчасті форсунки [1].

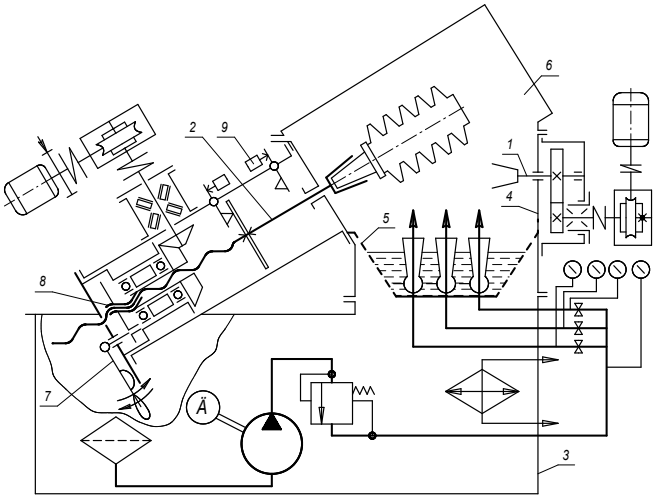

Рисунок 1.3 - Схема установки ГДЕУ-К-ІМ

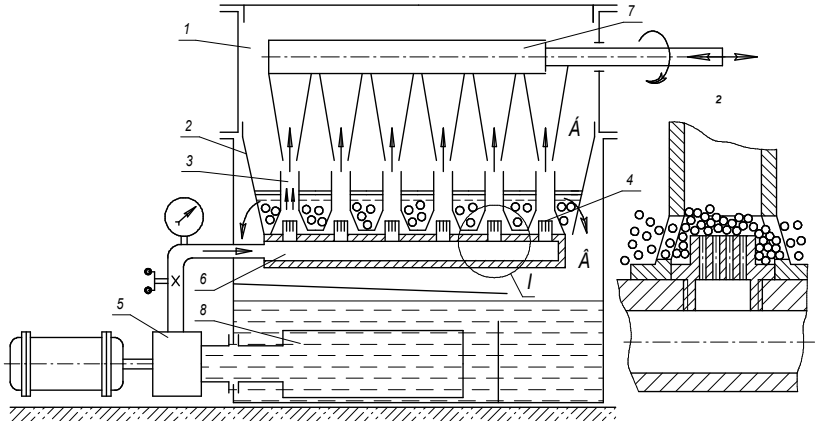

Рисунок 1.4 - Схема багатосоплової ГДЕУ з багатоканальними форсунками

1.4 Вибір технології та пристрою для зміцнення

Проведені дослідження і експерименти на вже відомому устаткуванні для гідродробоструменевого зміцнення деталей та інструментів показали, що даний метод являється досить ефективним і має достатньо високі показники якості. Але серед недоліків відомого устаткування можна витягти ще низку недоліків які випливають з конструктивного рішення устаткування та технології обробки - складність приводу устаткування (наявність насосної гідростанції),

необхідність фільтрів для збирання шлаку, який утворюється в процесі обробки. Крім того, завдяки постійності напору струменю рідини, кульки взаємодіють між собою в результаті чого частково втрачають енергію удару, що значно впливає на продуктивність обробки.

Приймаючи до уваги вищезазначене, а також у зв'язку з переходом виробництва на дрібносерійний тип виникає потреба в проектуванні ефективного обладнання із зниженими енерговитратами і низькою металоємністю, тому пропонується пристрій для гідродробоструменевого зміцнення деталей та інструментів в основу якого покладений вібраційний гідропульсатор для отримання пульсуючого струменю рідини з високим динамічним напором без циркуляції крізь насосну станцію. Завдяки пульсуючому струменю рідини дріб подається порційно, що зменшує втрати енергії удару в результаті уникнення взаємодії кульок між собою, і продуктивність обробки значно підвищується.

1.5 Висновки до розділу 1

Для зміцнення поверхневого шару деталей машин та інструментів винайдено багато способів ППД. Як показав огляд науково-технічних і патентних джерел, кожен спосіб має свої переваги і недоліки як при обробці виробів, так і при конструктивній реалізації. Найбільш ефективним та порівняно нескладним по реалізації при обробці, а завдяки цьому і поширеним, є гідродробоструменевий спосіб зміцнення, який входить до методу динамічного зміцнення. Крім відомого устаткування для гідродробоструменевого зміцнення деталей машин та інструментів розробленого В. В. Петросовим, даний спосіб можна реалізувати на установці в основу якої покладено гідравлічний пульсатор. При зворотно-поступальному русі рідини крізь насадок створюється струмінь який періодично виштовхує дріб на оброблювану поверхню виробу, забезпечуючи певну величину наклепаного шару. Для здійснення зворотно-поступального руху потоку

потрібно підводити періодичні коливання. З аналізу різних типів вібраційних приводів виявлено, що найбільш підходить для даних вимог ексцентриковий привід, який забезпечує простоту регулювання частоти та сталість амплітуди коливань при навантаженні на низьких частотах роботи приводу.

Тому є необхідність в розробці теоретичних основ процесу зміцнення та дослідження динаміки приводу устаткування, а також дослідження впливу режимів приводу на продуктивність. Завершальним етапом є розробка конструкції устаткування та технології зміцнення.

Задачі досліджень

- побудувати аналітичну модель приводу вібраційної машини;
- побудувати аналітичну модель визначення енергії удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструменевой установці;
- проаналізувати вплив конструктивних параметрів на енергію удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструминній установці;
- розробити програму для розрахунку сили гідродинамічного тиску в залежності від параметрів робочого органу;
- запропонувати конструктивну схему будови установки для гідродробозміцнення.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ТА ДИНАМІКА ВБРАЦІЙНОГО ПРИВОДУ УСТАТКУВАННЯ

2.1 Аналітична модель приводу вібраційної машини

При проектуванні устаткування для гідродробоструменевого зміцнення інструменту та деталей машин важливо знати параметри робочого органа, які забезпечують максимальні значення вихідних характеристик устаткування - сили гідродинамічного тиску і швидкості руху потоку після його виходу з насадка. До числа цих параметрів входять конструктивні параметри: діаметр та довжина камери пульсації, діаметр та форма внутрішньої поверхні насадка, гідравлічні характеристики насадка і параметри приводу, що забезпечують коливальний процес - амплітуда та частота коливань.

Диференційне рівняння коливального руху рідини в устаткуванні для утворення пульсуючого рідинного потоку (рис. 2.1) можна скласти виходячи з енергетичного балансу руху рідини [10]. На поверхню рідини в камері пульсації діє змінне зусилля, що відноситься до площини камери пульсації та змінюється по періодичному закону $\Delta p \cdot \sin\omega \cdot t$. Під дією збуджуючого зусилля рідина переміщується на деяку величину x. Робота, що утворюється збуджуючим зусиллям, йде на зміну кінетичної та потенціальної енергії рідини і на подолання гідравлічних опорів. Тоді отримаємо рівняння, що описує переміщення рідини в робочому органі під дією зовнішнього зусилля [11, 12]:

$$\frac{F_H}{g}\gamma\frac{L}{F_k}\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{F_H\,\omega x^{max}}{2g}\frac{\gamma}{F_k}\psi\frac{dx}{dt}+\gamma\frac{F_H}{F_k}x=\Delta p\sin\omega t, \qquad (2.1)$$

де $F_н$ - площина перерізу насадка;

g - прискорення вільного падіння;

γ - питома вага рідини;

L - довжина камери пульсації;

F_k - площина перерізу камери пульсації;

ω - кутова частота пульсацій;

x^{max} - максимальна амплітуда пульсацій;

$\psi = \zeta + \lambda \frac{l_н}{d_н}$ - гідравлічні характеристики насадка;

λ - коефіцієнт гідравлічного опору насадка;

Δp - перепад тиску в камері пульсації.

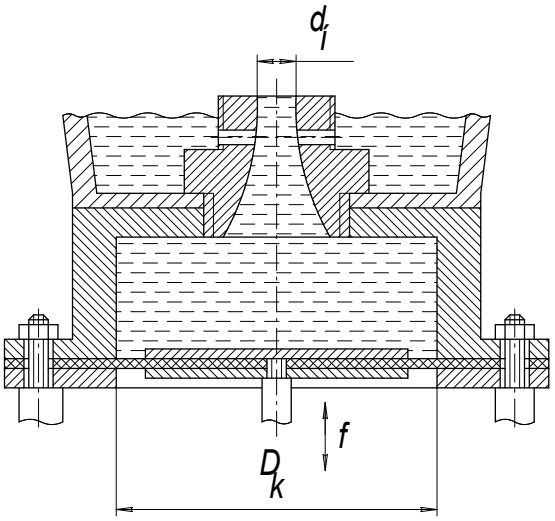

Рисунок 2.1 - Схема пристрою для утворення пульсуючого рідинного потоку

Максимальна амплітуда пульсацій визначається за формулою [13]:

$$x^{max} = \frac{2\mu A D_k^2}{d_н^2}, \qquad (2.2)$$

де μ = ϕ‡ε - коефіцієнт витрати [14];

ε - коефіцієнт стискання потоку (для круглого отвору ε = 0,64);

$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}$ - коефіцієнт швидкості [14];

$D_к$ - діаметр камери;

$d_н$ - діаметр насадка.

Коефіцієнт місцевого опору насадка розраховується по формулі І.Є. Ідельчика [15]:

$$\zeta = 0,5\left(1 - \frac{d_н^2}{D_k^2}\right). \quad (2.3)$$

Коефіцієнт гідравлічного опору визначається з формули Б. Шифринсона [14]:

$$\lambda = 0,11\left(\frac{0,3}{d_н}\right)^{0,25}. \quad (2.4)$$

Перепад тиску виводиться з формули М. Є. Жуковського для визначення величини гідравлічного удару [16]:

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{\nu c}{g}, \quad (2.5)$$

де v - швидкість руху рідини;

c - швидкість розповсюдження ударної хвилі.

Швидкість с залежить від пружних властивостей рідини та від пружних властивостей камери і визначається за формулою [17]:

$$c = \sqrt{\frac{K_0}{\rho}}, \quad (2.6)$$

де K_0 - уявний модуль пружності рідини;

ρ - густина рідини.

Уявний модуль пружності рідини визначається за формулою Кортевича [17]:

$$\frac{1}{K_0} = \frac{1}{E_{сум}} + \frac{D_k}{E\delta_k} + \frac{1}{E_м}, \quad (2.7)$$

де $E_{сум}$ - модуль об'ємної пружності рідини;

E - модуль пружності матеріалу стінок камери;

δ_k - товщина стінок камери;

$E_м$ - характеристика жорсткості мембранного вузла.

Враховуючи, що швидкість руху рідини дорівнює максимальній віброшвидкості, яка визначається за формулою:

$$\nu = 2 \cdot A \cdot f, \tag{2.8}$$

де A - амплітуда пульсацій;

f - частота пульсацій;

в розгорнутому вигляді формула Жуковського має вигляд:

$$\Delta p = \gamma \frac{2Af}{g} \frac{1}{\sqrt{\rho\left(\frac{1}{E_{сум}} + \frac{D_k}{E\delta_k} + \frac{1}{E_м}\right)}}. \tag{2.9}$$

Диференційне рівняння (2.1) являє собою рівняння вимушених коливань [18], яке має вигляд:

$$a_1 x'' + a_2 x' + a_3 x = \Delta p \sin\omega t, \tag{2.10}$$

де

$$a_1 = \frac{d_н^2 L\rho}{D_k^2}, \quad a_2 = A\mu\rho\psi\omega, \quad a_3 = \frac{\gamma d_н}{D_k}. \tag{2.11}$$

Рівняння (2.10) являє собою неоднорідне лінійне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами. Розв'язком (2.10) є сума розв'язків двох рівнянь - однорідного та неоднорідного:

$$x = \bar{x} + x^*, \tag{2.12}$$

де $\bar{x}$ - розв'язок однорідного рівняння;

x^* - розв'язок неоднорідного рівняння.

Характеристичне рівняння по відношенню до рівняння (2.10) має вигляд:

$$a_1 k^2 + a_2 k + a_3 = 0, \tag{2.13}$$

Розв'язком характеристичного рівняння (2.1.13) є квадратне рівняння, що має два корені:

$$k_{1,2} = \frac{- a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1a_2}}{2a_1}, \qquad (2.14)$$

Можливі наступні випадки розв'язку:

1. Корені характеристичного рівняння дійсні та різні: $k_1 \neq k_2$. В цьому випадку частковим розв'язком буде функція:

$$\bar{x} = C_1e^{k_1t} + C_2e^{k_2t}, \qquad (2.15)$$

де C_1 та C_2 - довільні постійні, що залежать від початкових умов.

2. Корені характеристичного рівняння дійсні та рівні. В цьому випадку $k_1 = k_2$ та частковим розв'язком буде функція:

$$\bar{x} = (C_1 + C_2t)e^{kt}. \qquad (2.16)$$

3. Корені характеристичного рівняння комплексні. Так як комплексні корені входять попарно спряженими, то зазначимо:

$$k_1 = \alpha + i\beta; \quad k_2 = \alpha - i\beta, \qquad (2.17)$$

де $\alpha = -\frac{a_2}{2a_1}$; $\beta = \frac{\sqrt{a_2^2 - 4a_1a_3}}{2a_1}$. (2.18)

Частковий розв'язок можна записати у формі:

$$\bar{x} = (C_1\cos\beta t + C_2\sin\omega t)e^{\alpha t}. \qquad (2.19)$$

При початкових умовах:

$$x(0) = \Theta \; i \; x'(0) = \eta,$$

часткові розв'язки приймуть вигляд:

1. $k_1 \neq k_2$,

$$\bar{x} = \frac{\eta - \Theta k_2}{k_1 - k_2} e^{k_1 t} + \frac{\eta - \Theta k_1}{k_2 - k_1} e^{k_2 t}. \quad (2.20)$$

2. $k_1 = k_2$,

$$\bar{x} = \left[\Theta + (\eta - \Theta k_1)t\right] e^{kt}. \quad (2.21)$$

3. $\alpha = -\frac{a_2}{2a_1}$; $\beta = \frac{\sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1}$,

$$\bar{x} = \left[\Theta \cos\beta t + \frac{1}{\beta}(\eta - \Theta\alpha)\sin\beta t\right] e^{\alpha t}. \quad (2.22)$$

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння знайдемо в формі [18]:

$$x^* = M\cos\omega t + N\sin\omega t. \quad (2.23)$$

Підставляючи ці вирази в вихідне диференційне рівняння (10), знайдемо значення M та N:

$$M = \frac{-\Delta p a_2 \omega}{\left(a_3 - a_1\omega^2\right)^2 + a_2^2\omega^2}; \quad N = \frac{\Delta p\left(a_3 - a_1\omega^2\right)}{\left(a_3 - a_1\omega^2\right)^2 + a_2^2\omega^2}. \quad (2.24)$$

Перш ніж підставити знайдені значення M та N в рівняння (10), введемо нові постійні A^* та ϕ^*, прийнявши:

$$M = A^*\sin\phi^*; \quad N = A^*\cos\phi^*. \quad (2.25)$$

Тоді частковий розв'язок неоднорідного рівняння можна записати у формі:

$$x^* = A^* \sin\phi^* \cos\omega t + A^* \cos\phi^* \sin\omega t = A^* \sin(\omega t + \phi^*), \quad (2.26)$$

або в кінцевому вигляді:

$$x^* = \frac{\Delta p}{\sqrt{\left(a_3 - a_1\omega^2\right)^2 + a_2^2\omega^2}} \sin\left(\omega t + arctg\left(-\left(\frac{a_2\omega}{a_3 - a_1\omega^2}\right)\right)\right). \quad (2.27)$$

В результаті розв'язку диференційного рівняння (2.1) отримуємо значення змінної x , що за своїм фізичним змістом відповідають геометричному напору на виході з насадку. Швидкість руху рідини на виході з насадка розраховується за формулою [14]:

$$\nu = \varphi\sqrt{2gx}. \quad (2.28)$$

Сила гідродинамічного тиску розраховується за формулою Д.Бернулі [19]:

$$P = \frac{\gamma}{g} S\nu^2 \sin\beta, \quad (2.29)$$

де γ - питома вага рідини;

g - прискорення вільного падіння;

S - площина перерізу потоку;

ν - швидкість потоку біля насадка;

β - кут нахилу площини перешкоди до лінії дії потоку.

Дійсне значення P дещо менше за розрахункове [20]:

$$P = (0,92...0,98)\frac{\gamma}{g} S\nu^2 \sin\beta, \quad (2.30)$$

$$P = 0,95\frac{\gamma}{g} S\nu^2 \sin\beta. \quad (2.31)$$

Турбулентний потік, що виходить з насадка в простір тієї ж рідини, поступово розширюється в масі оточуючої рідини [17,21]. Розширення потоку пояснюється дією сил внутрішнього тертя, що виникають на межі потоку та оточуючої рідини. При цьому утворюються вихори та зв'язане з ними інтенсивне поперечне перемішування часток (турбулентне перемішування) призводить до того, що периферійні шари потоку пригальмовуються, а шари оточуючої рідини приходять в рух (або прискорюють свій рух) [22,23]. В результаті обміну імпульсів між потоком та оточуючою рідиною швидкість потоку зменшується, а маса потоку та його ширина збільшуються (через те, що до руху в осьовому напрямку залучаються додаткові маси рідини).

На рис. 2.2 наведено залежність сили гідродинамічного тиску рідинного потоку від частоти пульсацій на відстані l = 20 мм від зрізу насадка.

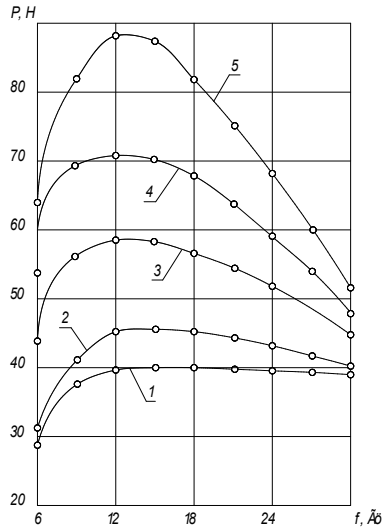

Рисунок 2.2 - Залежність сили тиску від частоти пульсацій при $d_н$ = 12 мм, A = 1,5 мм. (1 - D = 80 мм, 2 - D = 100 мм, 3 - D = 150 мм, 4 - D = 200 мм, 5 - D = 250 мм.)

З графіка видно, що збільшення діаметра камери пульсації призводить до більшого зростання сили гідродинамічного тиску і швидкості руху потоку. Розрахунки показали, що залежності сили гідродинамічного тиску і швидкості руху потоку від частоти пульсацій мають нелінійний екстремальний характер, максимальні значення досягаються при частотах f = 9...15 Гц, ці значення

частоти пульсацій слід використовувати при проектуванні даних установок. Збільшення амплітуди пульсацій призводить до лінійного зростання сили гідродинамічного тиску, але при збільшенні амплітуди пульсацій різко зростають динамічні навантаження, тому для даних установок амплітуда пульсацій не повинна перевищувати A < 3 мм.

2.2 Аналітична модель визначення енергії удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструменевой установці

З метою розробки методики проектування конструкцій таких установок необхідно провести аналітичне та експериментальне дослідження енергетичних характеристик устаткування, а саме визначити зв'язок енергії удару робочих тіл із параметрами режимів роботи обладнання та різними конструктивними параметрами.

При складанні моделі введемо наступні припущення:

1) розглядається рух системи, тобто металевих кульок і рідини, в якій вони знаходяться, як єдиного цілого;

2) опором руху системи з боку стінок сопла нехтуємо;

3) кут розсіювання потоку $\alpha = 0$.

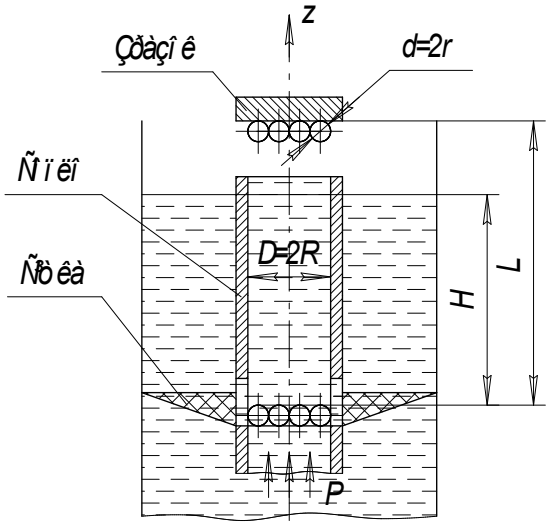

Рисунок 2.3 – Схема до аналітичної моделі

Для визначення початкової швидкості V_1 застосуємо теорему про кількість руху системи:

$$\frac{d}{dt}\sum m_i \mathbf{v}_i = \sum F_{ei}, \tag{2.32}$$

де F_{ei} – головний вектор зовнішніх сил, що діють на кульку.

Інакше вираз (2.32) можемо записати як

$$d\sum m_i v_i = \sum F_{ei} dt. \tag{2.33}$$

Інтегруємо вираз (2.33):

$$\sum m_i v_i \Big|_{v_0}^{v_1} = \sum \int_0^{\Delta t} F_{ei} dt. \tag{2.34}$$

Вважаючи, що початкові швидкості кульок $V_0 = 0$, а маси та взаємодія кульок із середовищем будуть однаковими, отримаємо:

$$m_к n_к v_i \Big|_0^{v_1} = \sum F_{ei} \int_0^{\Delta t} dt, \tag{2.35}$$

тут: $m_ê$ та $n_ê$ – маса кульки та їх число в масиві відповідно.

Після інтегрування маємо

$$m_к n_к V_1 = \sum F_{ei} \Delta t, \tag{2.36}$$

де Δt – тривалість гідродинамічного імпульсу.

Величину Δt визначимо із характеристики приводу установки, прийнявши до уваги, що розгін кульок до початкової швидкості триває менше півперіоду T. Для розрахунків приймемо $\Delta t = \frac{1}{2f}$ (рис. 2.4), де: f – частота.

Тоді початкова швидкість робочих тіл (кульок) визначиться як

$$V_1 = \frac{\Delta t \sum F_{ei}}{m_к n_к}. \tag{2.37}$$

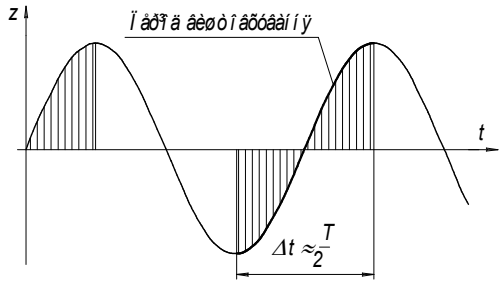

Рисунок 2.4 – Графік зміни швидкості руху кульок за цикл коливання

Якщо припустити, що кульки при укладці в "соплі" орієнтуються в один шар, то число кульок в цьому шарі визначиться як $n_к = \frac{S_і K}{\pi \cdot r^2}$, або, прийнявши до уваги, що $S_n = \pi R^2$,

$$n_к = K\frac{R^2}{r^2}, \tag{2.38}$$

де K – коефіцієнт заповнення шару;

$S_і$ – площа перерізу сопла;

R – радіус сопла.

Коефіцієнт заповнення шару визначимо як

$$K = \frac{S_к}{S_n}, \tag{2.39}$$

де $S_к$ – сумарна площа шару кульок,

$S_і$ – площа перерізу сопла.

Отже, початкова швидкість

$$V_1 = \frac{\sum F_{e\,i} r^2}{2 f m_к K R^2}. \tag{2.40}$$

З іншого боку силу взаємодії потоку рідини із шаром кульок можна виразити через середній тиск та геометричні параметри:

$$\sum F_{e\,i} = P_{\max}\pi R^2 K\,, \tag{2.41}$$

де P_{max} – максимальний тиск в соплі гідропульсатора за період.

Тоді

$$V_1 = \frac{P_{\max}\pi R^2 Kr^2}{2fm_к KR^2} = \frac{\pi P_{\max} r^2}{2fm_к}\,. \tag{2.42}$$

Якщо виразити масу кульки через густину та об'єм, отримаємо

$$m_к = \frac{3}{4}\pi r^3 \rho_к\,, \tag{2.43}$$

і, відповідно, початкова швидкість

$$V_1 = \frac{3\pi P_{\max} r^2}{2f\,4\rho_к \pi r^3} = \frac{3P_{\max}}{f\rho_к r}\,. \tag{2.44}$$

Для визначення кінетичної енергії кульок при їх зіткненні із перешкодою (поверхнею інструменту) потрібно врахувати початковий імпульс, отриманий від приводу установки, силу лобового опору руху системі кульок та силу в'язкого тертя. Для цього можна використати диференційне рівняння руху системи кульок в рідині:

$$mg\ddot{x} - CS_n\rho_p(\dot{x})^2 - B\eta\dot{x} - mg = 0\,, \tag{2.45}$$

де ρ_p – густина рідини,

η – в'язкість рідини,

C, B – коефіцієнти пропорційності.

Однак складність застосування виразу (2.45) для визначення швидкості кульок при їх зіткненні з перешкодою полягає в тому, що для визначення коефіцієнтів пропорційності С і В необхідно провести великого обсягу експериментальні дослідження. Тому опір середовища рухові системи кульок наближено замінимо роботою, що потрібна для виштовхування водяного стовпа над масивом кульок, вважаючи, що металеві кульки і рідина, в якій вони знаходяться при русі, – єдине ціле.

Виходячи із закону збереження енергії кінетична енергія масиву кульок при досягненні перешкоди визначиться як

$$E_{кін}^{\Sigma} = n\sum m_i (V_1)^2 - n\sum m_i gL - A_{в.с.}, \qquad (2.46)$$

де $A_{в.с.}$ – робота, витрачена на виштовхування стовпа рідини над масивом кульок,

L – відстань від масиву кульок до перешкоди,

g – прискорення сили тяжіння.

В іншому вигляді

$$E_{кін}^{\Sigma} = \frac{m_к R^2 K\left(\frac{3P_{\max}}{8f\rho_к r}\right)^2}{r^2} - \frac{m_к R^2 KgL}{r^2} - A_{в.с.}. \qquad (2.47)$$

Елементарну роботу $dA_{а.п.}$ по підйому стовпа рідини на величину dz можна, згідно (рис. 2.10), виразити як

$$dA_{в.с.} = \rho_p g S_n (H - z)dz. \qquad (2.48)$$

Тоді повна робота

$$A_{в.с.} = \int_0^H \rho_p g S_n (H - z)dz = \rho_p g S_n \left(Hz\Big|_0^H - \frac{z^2}{2}\Big|_0^H \right) = \frac{1}{2}\rho_p g S_n H^2. \qquad (2.49)$$

Якщо взяти до уваги, що $S_i = \pi R^2$, то

$$A_{в.с.} = \frac{\pi}{2}\rho_p g R^2 H^2, \qquad (2.50)$$

тоді

$$E_{кін}^{\Sigma} = \frac{m_к R^2 K}{r^2}\left(\frac{3P_{\max}}{8f\rho_к r}\right)^2 - \frac{m_к R^2 K}{r^2} gL - \frac{\pi}{2}\rho_p g R^2 H^2. \qquad (2.51)$$

Тепер легко перейти до кінетичної енергії однієї кульки в момент контакту із перешкодою: $E_{кін}^{к} = \frac{E_{кін}^{\Sigma}}{n_к} = \frac{E_{кін}^{\Sigma} r^2}{KR^2}$, або

$$E_{кін}^{к} = \frac{9}{64}\frac{m_к {P_{\max}}^2}{f^2 {\rho_к}^2 r^2} - m_к g L - \frac{\pi r^2}{2K}\rho_p g H^2 . \qquad (2.52)$$

Підставивши в рівняння (2.52) вираз $m_к = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_к$, отримаємо:

$$E_{кін}^{к} = \frac{3}{16}\frac{\pi {P_{\max}}^2 r}{f^2 \rho_к} - \frac{3}{4}\pi \rho_к r^3 g L - \frac{\pi r^2}{2K}\rho_p g H^2 . \qquad (2.53)$$

Отримані формули (2.51 та 2.53) дають нам зв'язок кінетичної енергії удару кульок від багатьох параметрів процесу, а що особливо із режимами роботи обладнання (P_{max}, f), та конструктивними параметрами обладнання (радіуса сопла – R, та розмірів кульки – r, відстані від зрізу сопла до оброблюваного виробу).

В подальших дослідженнях визначаємо коефіцієнта заповнення шару – K, що важливо для визначення можливої максимальної енергії удару кульок.

2.3 Аналіз впливу різних параметрів на енергію удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструминній установці

Щоби визначити максимальну енергію удару, при якій досягається найбільша продуктивність процесу, необхідно враховувати різні варіанти заповнення сопла кульками, що у формулі (2.51 та 2.53) враховано коефіцієнтом K.

Щоб знайти коефіцієнт заповнення K, розглянемо варіант коли виконується щільна укладка кульок. Це забезпечується, коли центри кульок, що доторкаються, створюють рівнобічний трикутник з кутом $\Theta = 60^\circ$, що відповідає укладці кульок без центральної кульки (концентричні трикутники) (рис. 2.5), та укладці з центральною кулькою (концентричні шестикутники) (рис. 2.6).

Коефіцієнт заповнення шару сопла визначимо як

$$K = \frac{S_к}{S_п}, \tag{2.54}$$

де $S_ê$ – сумарна площа шару кульок;

$S_п$ – площа перерізу сопла.

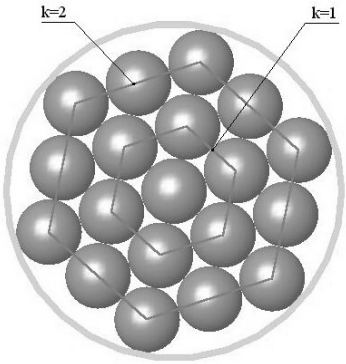

Рисунок 2.5 - Укладка з центральною кулькою

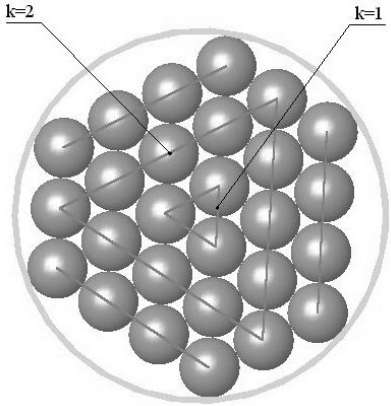

Рисунок 2.6 - Укладка без центральної кульки

Для варіанта (рис. 2.5), коли конфігурація заповнення шару сопла може бути з центральною кулькою та розташуванням кульок у шестикутники, кількість кульок шару можна знайти в залежності від номера k –го шестикутника.

$$n_k = 3k^2 + 3k + 5. \tag{2.55}$$

Тоді діаметр сопла має вираз

$$D_c = d\left(2\sqrt{k^2 - k + 1} + 1\right). \tag{2.56}$$

Звідси коефіцієнт заповнення

$$K = \frac{3k^2 + 3k + 5}{\left(2\sqrt{k^2 - k + 1} + 1\right)^2}. \quad (2.57)$$

Для схеми (рис. 2.6) з відсутньою центральною кулькою, укладкою є концентричні трикутники.

Кількість кульок в шарі сопла

$$n_k = 3k^2. \quad (2.58)$$

Діаметр сопла має вираз

$$D_c = d\left(2\sqrt{k^2 - k + \frac{1}{3}} + 1\right). \quad (2.59)$$

Звідси коефіцієнт заповнення

$$K = \frac{3k^2}{\left(2\sqrt{k^2 - k + \frac{1}{3}} + 1\right)^2}. \quad (2.60)$$

Розрахунки діаметра сопла та коефіцієнта заповнення шару, проведені за формулами (2.56), (2.57), (2.58), (2.59) занесені у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 - Визначення коефіцієнта заповнення шару

Укладка з центральною кулькою (шестикутники)				Укладка без центральної кульки (трикутники)			
k	d, мм	D, мм	K	k	d, мм	D, мм	K
1	2	6	0,778	1	2	4,309	0,646
1	4	12	0,778	1	4	8,619	0,646
2	2	10	0,76	2	2	8,11	0,73
2	4	20	0,76	2	4	16,22	0,73

Провівши розрахунки кінетичної енергії масиву кульок енергії за формулою (2.53) було побудовано графіки для різних видів укладки кульок від частоти та розміру кульки (рис. 2.6).

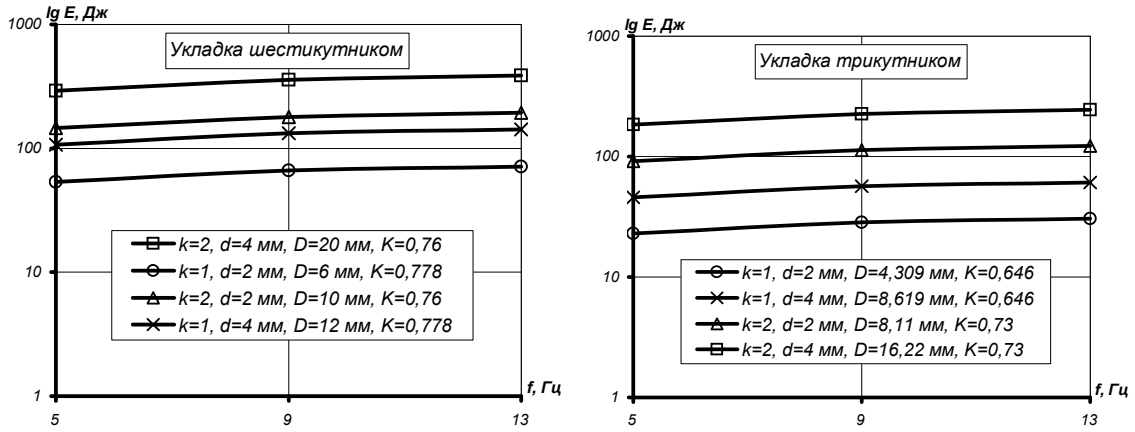

Рисунок 2.7 - Залежність енергії удару кулькових тіл E
від частоти коливань приводу f при різних видах укладки

Проаналізувавши отримані залежності, було визначено, що вплив на отримання максимальної енергії удару дає зміна частоти коливань приводу f при укладці шару з центральною кулькою. На отримання максимальної енергії удару вплив зміни відстані до площини удару H , та висоти стовпа рідини L не значний. Це говорить про то, що при обробці інструментів із значними перепадами розмірів, наприклад, модульні черв'ячні фрези, кожна поверхня буде оброблена практично рівномірно. З таблиці 2.1 робимо висновок, що найбільший коефіцієнт заповнення кульками одного шару сопла досягається при укладці кульок з центральною кулькою, тому рекомендовано вибирати діаметр сопла 6,1…6,2 мм, 10,1…10,2 мм, для кульок діаметром 2 мм, а діаметр сопла 12,1…12,2 мм, 20,1…20,2 мм, для кульок діаметром 4 мм. Такі розміри сопла при втягуванні рідини з кульками дадуть необхідну конфігурацію шару та найбільший коефіцієнт укладки шару.

2.4 Висновки до розділу 2

Проведені розрахунки визначили залежність сили гідродинамічного тиску від параметрів приводу та режимів роботи установки, що дає можливість вибирати оптимальні параметри та ефективні режими роботи устаткування.

Виявлено, що амплітудно-частотна характеристика системи має нелінійний екстремальний характер.

В результаті аналізу аналітичної моделі встановлено, що максимальні значення вихідних параметрів досягаються при частоті пульсацій f = 9...15 Гц, яка трохи менша за частоту власних коливань системи.

Аналіз впливу параметрів устаткування на процес зміцнення показав залежність режимів роботи приводу на параметри поверхневого шару інструментів та деталей машин які підлягали обробці на гідродробоструменевій установці.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ПРИВОДУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ

3.1 Методика досліджень

Огляд технічної літератури та аналітичні дослідження дозволили встановити, що основними характеристиками пульсуючого струменя рідини є швидкість руху та тиск струменя який забезпечує виштовхування дробу з визначеним зусиллям, а останній в свою чергу забезпечує удар певної сили по поверхні, що обробляється. Дані характеристики залежать в свою чергу від конструктивних параметрів устаткування - діаметру камери пульсації, діаметру каналу насадка та його конфігурації, об’єму камери пульсації; параметрів приводу - частоти та амплітуди коливань, а також відстані від насадку до оброблюваної поверхні.

3.2 Опис дослідної установки

Дослідна установка, загальний вигляд якої показаний на рис. 3.1, створена на основі кулачкового віброприводу і має можливість переналагоджуватись для проведення різноманітних експериментальних досліджень. Кулачковий вібропривід вибраний через встановлення постійної амплітуди коливань, яка не залежить від частоти.

Установка складається з рами 1, на якій змонтовано кулачковий вібропривід 2, що приводиться до руху від двигуна 14 постійного струму. Зміна амплітуди коливань здійснюється зміною кулачків з ексцентриситетом 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 мм. Зміна частоти від 0 до 24 Гц здійснюється збільшенням напруги при допомозі лабораторного трансформатора. Вібропривід з’єднаний з камерою формування пульсуючого рідинного струменю 4. На стійках встановлена ванна 10.

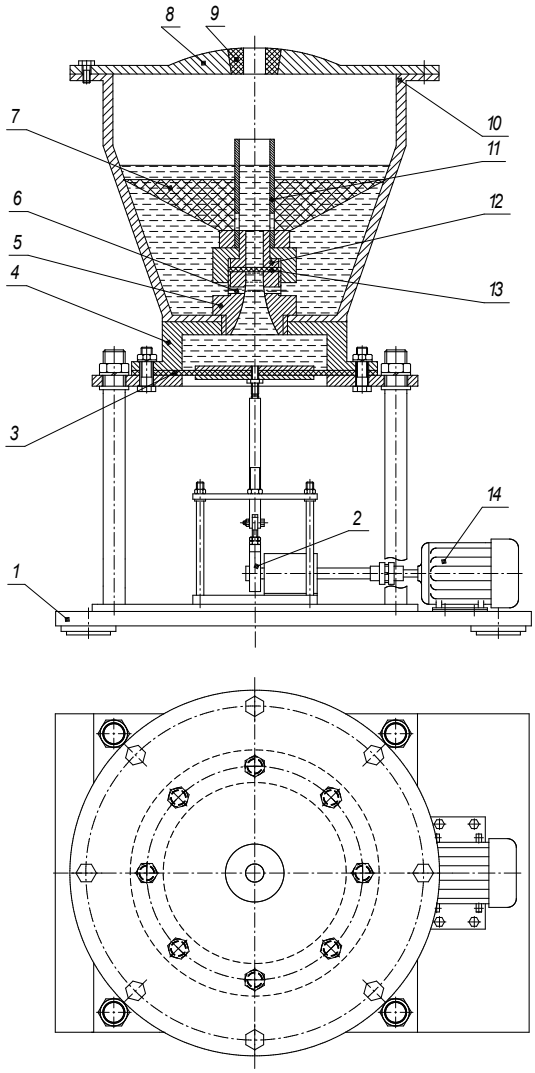

Рисунок 3.1 - Дослідна установка

Принцип дії установки: в ванну 10 на розділюючу сітку 7 засипається дріб та заливається робоча рідина - вода. У гумову втулку 9, що розташована у кришці 8, встановлюється оброблюваний виріб. Вмикання електродвигуна 14 призводить до обертального руху кулачка і викликає зворотно-поступальний рух мембрани 3. При ході мембрани 3 вниз рідина засмоктується крізь перегороджуючу сітку 13 та отвори 6 у насадку 5 до камери 4. Дріб потрапляє у сопло 12. При ході мембрани уверх виникає надлишковий тиск рідини, який утворює струмінь завдяки чому дріб виштовхується крізь трубку 11. При

подальшій роботі кулачкового віброприводу 2 цикл повторюється і таким чином здійснюється поверхневе зміцнення виробу.

Контроль частоти здійснюється по міліамперметру М903 1,0 кл, ГОСТ 8711-60, протарованому в Герцах. Міліамперметр знімає струм з електродвигуна постійного струму типу ДИ1-3, вал якого з'єднано відкритою зубчастою передачею з валом віброприводу.

3.3 Визначення сили гідродинамічного тиску пульсуючого рідинного потоку

Дослідження миттєвого значення сили гідродинамічного тиску пульсуючого рідинного потоку відбувалось на експериментальній установці за допомогою мембранного датчика тиску, принцип дії якого наведено в роботах [27,28].

Датчик для вимірювання миттєвого значення сили гідродинамічного тиску повинний бути мало-інерційним, мати велику частоту власних коливань, що запобігає появі частотних похибок, мати малі габарити та давати стабільні результати в часі.

Відповідно з завданням експерименту для вимірювання миттєвих тисків вибраний спосіб з застосуванням тензометричних датчиків 2ФКПА [27,29] (рис. 3.2). В якості приймального елементу використовувалась мембрана із сталі 45. Власна частота коливань мембрани рівна приблизно 1500 - 2000 Гц.

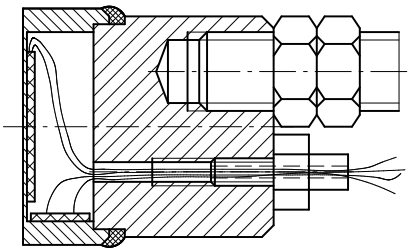

Рисунок 3.2 - Датчик для вимірювання сили гідродинамічного тиску

Тарування датчика відбувалось спільно з вимірювальною апаратурою наступним чином. Датчик для вимірювання миттєвого значення сили тиску вмикався в ланцюг підсилювача та осцилографа. На стальну мембрану через циліндр ∩10 мм та висотою 5 мм навантажувались поступово гирі та проводився запис відхилення світлового «зайчика».

Результатом проведення досліджень сили гідродинамічного тиску є графік залежності сили гідродинамічного тиску від частоти пульсацій (рис. 3.3) при амплітуді коливань A = 0,002 м і діаметрі насадка d = 0,01 м. Заміри проводились на відстані від зрізу насадка H = 0,02 м. З даного графіка видно, що подальше збільшення частоти пульсацій мембрани не призводить до збільшення тиску, а навпаки веде до його пониження. Користуючись даним графіком залежності гідродинамічного тиску від частоти пульсацій можна підібрати оптимальну частоту при максимальному тискові струменя рідини.

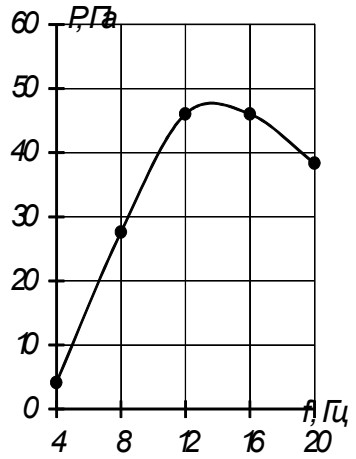

Рисунок 3.3 - Залежність сили тиску рідинного струменя від частоти пульсацій. H = 0,02 м; A = 0,002 м; d = 0,01 м

3.4 Визначення сили удару кульок від параметрів приводу

Сила удару дробу по поверхні, що обробляється є одним із головних параметрів, який характеризує зміцнюючу здатність устаткування. При ударі

кульки по поверхні виробу в його поверхневому шарі утворюються залишкові напруження які характеризують ступінь наклепу.

Величину сили удару можна знайти скориставшись другим законом Ньютона [30] з якого випливає стосовно нашого випадку:

$$F = m \cdot a = \frac{m\left(V_p - V_{кр}\right)}{t}, \tag{3.1}$$

де m - маса кульки, кг;

$$m = V_к \otimes \rho_к, \tag{3.2}$$

де $V_к$ - об'єм кульки, $м^3$;

$$V_к = \frac{4}{3}\pi R_к^3, \tag{3.3}$$

де $R_к$ - радіус кульки, м;

$\rho_к$ - густина матеріалу кульки, $кг/м^3$; для сталі $\rho_к = 7800$ $кг/м^3$;

$V_р$ - середня швидкість струменя рідини в перерізі;

Середню швидкість струменя рідини в перерізі можна знайти із виразу для сили тиску струменя рідини [31]:

$$P = \rho_p V_p^2 f_н \Rightarrow V_p = \sqrt{\frac{P}{\rho_p f_н}}, \tag{3.4}$$

де P - значення сили гідродинамічного тиску струменя рідини при різних частотах пульсацій f, Па; (див. п.3.3, рис. 3.3);

$\rho_р$ - густина робочої рідини, $кг/м^3$; для води $\rho_р = 1000$ $кг/м^3$, для масла $\rho_р = 900$ $кг/м^3$;

$f_н$ - площа перерізу струменя рідини або площа перерізу насадка,$м^2$;

$$f_н = \pi R_н^2, \tag{3.5}$$

де $R_н$ - радіус перерізу насадка, м;

Отримавши значення середньої швидкості струменя рідини V_p в перерізі при різних значеннях частоти пульсацій f, побудуємо графіки залежності для робочих рідин вода і масло (рис. 3.4);

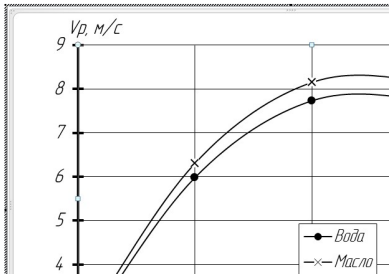

Рисунок 3.4 - Залежність середньої швидкості струменя рідини в перерізі від частоти пульсацій

$V_{кр}$ - критична швидкість обтікання кульки, м/с;

Критична швидкість обтікання кульки може бути представлена формулою [31]:

$$V_{êð} = \sqrt{\frac{4g}{3}} \sqrt{\frac{d(\rho - \rho_ð)}{„_x \rho_ð}}, \qquad (3.6)$$

де g - прискорення вільного падіння, м/с^2; g = 9,81 м/с^2;

d - діаметр кульки, м;

C_x - коефіцієнт лобового опору при обтіканні; для кульки C_x = 0,09;

Отримавши значення критичної швидкості обтікання кульки $V_{кр}$ при різних значеннях діаметра кульки d, побудуємо графіки залежності для робочих рідин вода і масло (рис. 3.5);

вода і масло (рис. 3.5);

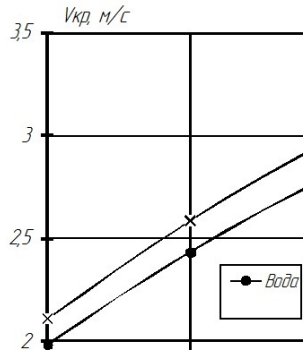

Рисунок 3.5 - Залежність критичної швидкості обтікання кульки від діаметру кульки

$$t = \frac{1}{f}, \tag{3.7}$$

де f - частота пульсацій, Гц; t - час, с;

Після визначення всіх величин формула (3.1) набуває вигляду:

$$F = \frac{4}{3}\pi R_к^3 \rho_к f\left(\sqrt{\frac{P}{\rho_р \pi R_н^2}} - \sqrt{\frac{4g}{3}}\sqrt{\frac{d(\rho_к - \rho_р)}{C_x \rho_р}}\right), \tag{3.8}$$

Отримавши значення сили удару F сталевої кульки по горизонтально розташованій пластині при різних значеннях частоти пульсацій f, побудуємо графіки залежності для робочих рідин вода і масло (рис. 3.6, 3.7).

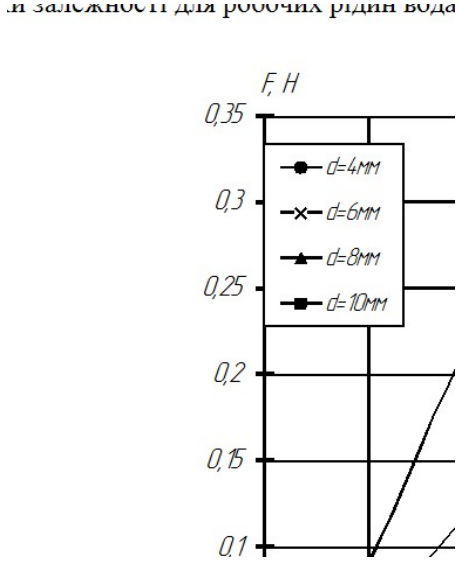

Рисунок 3.6 - Залежність сили удару сталевої кульки від частоти пульсацій. Робоча рідина – вода

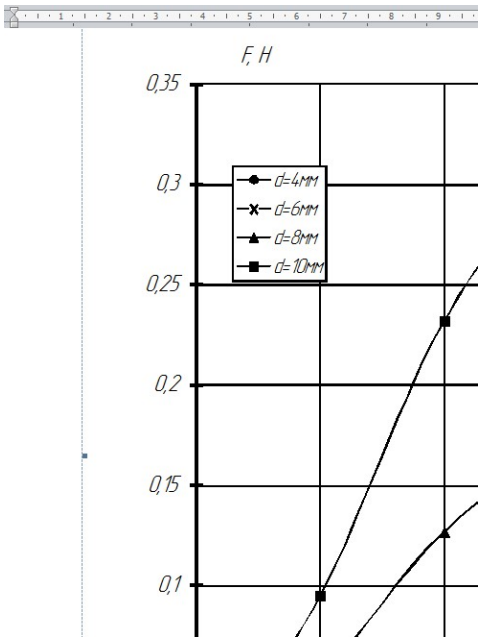

Рисунок 3.7 - Залежність сили удару сталевої кульки
від частоти пульсацій. Робоча рідина - масло

3.5 Висновки по розділу 3

Проведені експериментальні дослідження виявили вплив параметрів вібраційного приводу на вихідні характеристики устаткування для гідродробоструменевого зміцнення - силу гідродинамічного тиску, швидкість руху пульсуючого рідинного струменя та силу удару дробу по поверхні, що зміцнюється. Найбільший вплив мають параметри вібраційного приводу - частота пульсацій *f*. Залежність сили тиску від частоти пульсацій має екстремальний характер. Зростання сили тиску при збільшенні частоти пояснюється збільшенням швидкості протікання рідини крізь насадок. Зменшення сили тиску після досягнення максимального значення пояснюється тим, що за певних умов в камері гідропульсатора досягається така концентрація газових пухирців, в наслідок чого в камеру крізь насадок втягується та виштовхується менша маса рідини.

Досліджено залежність сили удару від параметрів приводу та режимів роботи приводу. Встановлено залежність критичної швидкості рідини від

розмірів дробу. Збільшення діаметру кульки, а внаслідок чого і її маси призводить до збільшення критичної швидкості рідини, що в свою чергу залежить від густини рідини та від розміру поперечного перерізу сопла. Дана залежність дає можливість вибору оптимальних параметрів розміру дробу та поперечного перерізу насадка.

На основі отриманих даних проведені розрахунки сили удару дробу по поверхні дослідного зразка в залежності від параметрів приводу. Встановлено, що сила удару залежить від розмірів дробу, характеристик робочої рідини та частоти пульсацій. Збільшення частоти пульсацій призводить до збільшення сили удару, але дана залежність має нелінійний характер.

Експериментально досліджено вплив режимів приводу на якість оброблюваної поверхні. Виявлено лінійну залежність висоти мікронерівностей від сили гідродинамічного тиску. Збільшення тиску понижує шорсткість дослідного зразка в порівнянні з вихідною, а також призводить до збільшення мікротвердості поверхневого шару після обробки, що дає можливість визначення оптимального значення сили гідродинамічного тиску для запобігання явища перенаклепу.

РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ РОБОЧОГО ОРГАНА УСТАТКУВАННЯ

4.1 Загальна методика розрахунку

Устаткування для гідродробоструменевого зміцнення інструменту та деталей машин з застосуванням пульсуючого рідинного потоку має широкі потенційні можливості використання в технологічних процесах підвищення зносостійкості (зміцнення). Якщо вироби, що підлягають зміцненню мають значні габаритні розміри, доцільно використовувати багатосоплові установки для гідродробоструменевого зміцнення. Кількість пульсаційних приводів в такому випадку також може бути різною. Прикладами виробів для зміцнення можуть бути велике розмаїття різального інструменту (наприклад спіральні свердла), деталі машин, такі як черв'яки редукторів, зубчасті колеса і т. інш.

Продуктивність процесу зміцнення залежить від матеріалу виробів, їх форми, конфігурації поверхонь, часу проведення обробки. Час, необхідний для створення мінімального наклепаного шару на поверхні виробу не перевищує 3 - 6 хв.

Для проектування установок для гідродробоструменевого зміцнення необхідно мати креслення деталі, програму її випуску, знати поверхні, що підлягають обробці та твердість матеріалу.

Діаметр насадків та сопел, їх кількість та розташування вибирається в залежності від розмірів, кількості та розташування оброблюваних поверхонь. Проведені дослідження показали, що діаметр насадків та сопел знаходиться в межах:

$$d_н = 12...15 \text{ мм},$$

Форму внутрішньої поверхні осьосиметричного насадка (рис. 4.1) розраховуємо за умови експонентності [25].

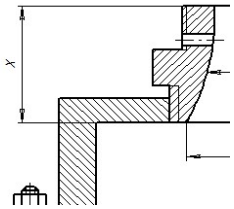

Рисунок 4.1 - Схема розрахунку внутрішньої поверхні насадка

Зміна площі насадка по довжині [25]:

$$S(x)=S_1 \cdot e^{-\frac{\rho \cdot S_0^2 \cdot x}{m \cdot S_1}}, \tag{4.1}$$

де S_1 - площа на вході в насадок;

S_0 - площа мембрани гідропульсатора;

ρ - густина рідини;

m - маса мембрани та рідини у гідропульсаторі;

x - довжина експонентного насадку.

Зміна діаметру насадка по довжині:

$$d_x=\sqrt{D_1^2 e^{-\frac{\rho\frac{\pi^2 D_0^4}{16}x}{m\frac{\pi D_1^2}{4}}}}, \tag{4.2}$$

де D_0, D_1, d_x - відповідно діаметри камери, входу в насадок, виходу з насадка;

x - зміна площі по довжині від 0 до $x_{max}=\frac{D_0}{20}$.

При необхідності можна конструювати блоки насадків, але загальна кількість насадків не повинна перевищувати 5...6 шт. В випадку, коли кількість

насадків більша одного, діаметри насадків сумуються і в подальших розрахунках використовується значення сумарного діаметра насадків. Відстань між зрізом сопла та оброблюваною поверхнею залежить від розміру дробу, розміру оброблюваної поверхні та діаметра сопла.

Встановивши діаметр насадка, підбираємо декілька значень діаметра камери пульсації в межах:

$$D_к = (8...12) \otimes d_н. \quad (4.3)$$

4.2 Розроблення програми розрахунку тиску з насадку

4.2.1 Опис програми розробленої в Delphi для розрахунку параметрів гідродробоструменевого обладнання

Складена програма призначена для проведення розрахунків сили гідродинамічного тиску від зміни параметрів приводу гідродробоструменевого обладнання. Також вона дає можливість відслідковувати як змінюється амплітуда коливань мембрани ГДС установки в залежності від зміни режимів роботи установки. Основною метою складення даної програми була - автоматизація проведення розрахунків з допомогою ЕОМ, що значно полегшує і прискорює сам процес розрахунків, і дає можливість більш докладно дослідити від яких параметрів залежить сили гідродинамічного тиску.

Перевагою даної програми є також те, що вона розроблена в середовищі програмування Delphi і має досить простий, і зручний для користувачів інтерфейс. Програма складається з трьох закладок (вікон). Перше вікно програми призначено для введення даних, потрібних для проведення розрахунку, вікно показано на рис**.** 4.2.

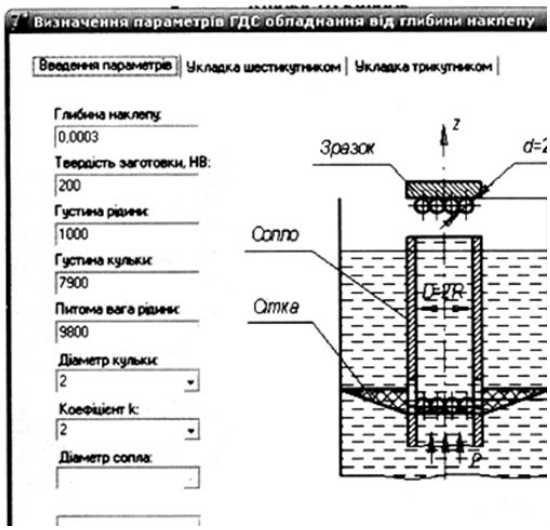

Рисунок 4.2 - Вікно програми для введення даних

Це вікно складається з заголовку, тобто назви програми, також має область де вводяться вихідні даних, малюнок - схематичне зображення ГДС установки і кнопка керування. Всі поля потрібно заповнити у відповідності з позначеннями на схемі. При введенні параметрів потрібно керуватись наступними факторами: зазвичай, використовуються кульки з діаметром 2 або 4 мм. (це власне і передбачено в програмі), тому користувачеві потрібно лише вибрати з випадаючого списку відповідне значення діаметру кулі та значення коефіцієнта К (рис. 4.3, 4.4); діаметр сопла підбирається програмою автоматично і відповідає значенню діаметра кульки; при введенні висоти стовбця рідини в установці або відстані від мембрани до заготовки слід керуватись тим, що різниця (L-H) повинна знаходитись в діапазоні 15-20 міліметрів. Після того як всі вихідні дані введені, для проведення розрахунку необхідно натиснути кнопку “Розрахувати параметри”, далі проходить розрахунок і на екрані з’являється наступне вікно програми, яке приводимо на рис.4.3.

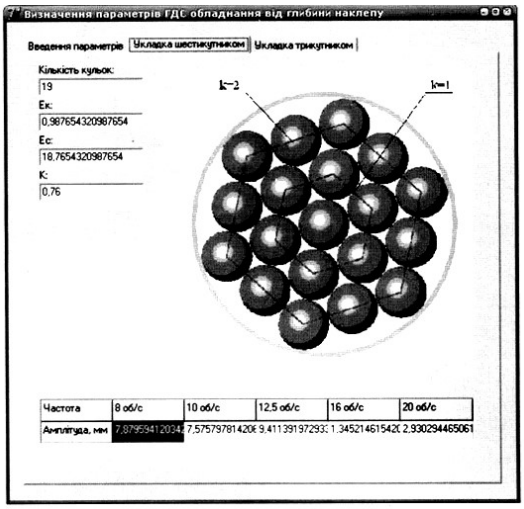

Рисунок 4.3 - Вікно параметрів з укладкою кульок по центру

Дане вікно виводить результати розрахунку при укладці кульок у соплі установки у вигляді шестикутника, тобто з центральною кулькою. Для переходу з цього вікна в наступне (рис. 4.4) служить кнопка “Укладка трикутником”.

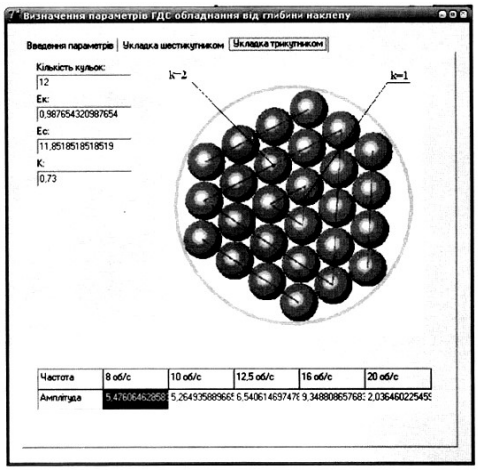

Рисунок 4.4 - Вікно параметрів з укладкою кульок «трикутником»

Дане вікно виводить результати розрахунку при укладці кульок у соплі установки у вигляді трикутника, тобто без центральної кульки. В цьому вікні, як і у попередньому відображаються результати розрахунків кінетичної енергії удару однієї кульки, слою кульок, а також коефіцієнта К. Внизу відображаються значення амплітуди коливання мембрани ГДС установки при

відповідних значеннях стандартних частот, отриманих при розрахунково-ітераційному процесі.

Якщо з'являється необхідність повернутись в попереднє вікно для того щоб змінити або продивитись вхідні дані, необхідно натиснути кнопку "Укладка шестикутником" або кнопку "Введення параметрів".

Програма дає можливість відслідковувати як змінюється амплітуда коливань мембрани ГДС установки в залежності від зміни режимів роботи установки. Тому вона дає можливість дослідити чуттєвість результатів програми до зміни параметрів установки та об'єктів гідродробозміцнюючого процесу. Для отримання результатів, які б не виходили за рамки «допустимого», потрібно вводити адекватні дані. Числа з десятковою частиною потрібно вводити з використанням коми в якості розділювача цілої та дробової частини. При введенні параметрів, які визначають розміри діаметрів кульок та коефіцієнта К, рекомендовано використовувати значення, які прописані у випадаючому списку відповідного поля (рис 4.2). Ці значення є найбільш розповсюдженими та найбільш використовуваними при ГДС процесах.

Програма для проведення розрахунків сили гідродинамічного тиску наведена в додатках.

4.3 Розрахунок конструктивних елементів проводу

Після вибору сили гідродинамічного тиску на виході з насадка, амплітуди та частоти коливань, при яких отримується дана сила тиску, розраховується діаметр шийки вала під кулачок (див. вид кулачкового приводу в розрізі на рис. 4.5). В місці посадки кулачка на вал діють дві сили з боку гідропульта-тора [32]:

$$F = F_{ін} + F_{д}, \tag{4.4}$$

де $F_{ін} = ma$ - сила інерції, утворювана коливальним рухом;

$a = Af^2$ - прискорення при коливальному русі;

m - маса рухомих частин устаткування;

$F_д = pS$ - динамічна сила, що виникає внаслідок виникнення надлишкового тиску p в камері гідропульсатора на площину мембранного вузла S.

Потужність електродвигуна вибирається не меншою 0,4 кВт.

Розрахунок вала на міцність проводиться по стандартним формулам. Після розрахунку вала підбираються конструктивні параметри кулачка, вибирається кульковий радіальний підшипник та перевіряється по динамічній вантажопід'ємності за формулою [33]:

$$C_p = Q\left(\frac{60nL_h}{10^6}\right)^{1/\alpha} \le C, \qquad (4.5)$$

де $C_{тр}$ - розрахункова величина динамічної вантажопід'ємності підшипника;

C - табличне значення динамічної вантажопід'ємності вибраного підшипника;

Q - приведене навантаження підшипника;

n - число обертів за хвилину;

L_h - розрахункова довговічність;

α - коефіцієнт, що залежить від форми кривої контактної втоми, ($\alpha = 3$ - для кулькових підшипників).

вих підшипників).

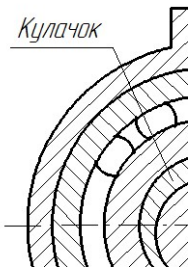

Рисунок 4.5 - Вид кулачкового приводу в перерізі

Вибір основних параметрів на цьому закінчується. Для гасіння коливань на установці слід встановити віброізолятори. Привод гідропульсатора закривається кожухом. Для запобігання корозії камеру пульсації і насадок з соплом необхідно виготовляти з корозійно-стійких матеріалів.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено граничні гідродинамічні умови існування пульсуючого рідинного потоку.

2. Розроблена аналітична модель робочого органа устаткування для гідродробоструменевого зміцнення. По аналітичній моделі виявлено зв'язок між режимами роботи вібраційного приводу, конструктивними параметрами гідропульсатора та характеристиками пульсуючого рідинного потоку.

3. Проведені експериментальні дослідження енерговитрат робочого органа на процес зміцнення показали, що установка на основі робочого органа устаткування для гідродробоструменевого зміцнення споживає на виконання тієї ж самої роботи значно менше електроенергії порівняно з насосними установками.

4. Запропонована методика розрахунку ефективної форми внутрішньої поверхні експонентного насадка та робочого органа для гідродробоструменевого зміцнення, яка розроблена на основі аналітичної моделі і експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 5 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Аналіз креслення і технічних умов на виготовлення деталі циліндричної фрези

Провівши аналіз креслення, можна з впевненістю сказати, що:

- креслення містить усі відомості про інструмент - необхідні перерізи, види, проекції, що дають повну уяву про конструкцію інструменту;

- на кресленні проставлено усі необхідні розміри, існує взаємозв'язок між обробленими та необробленими поверхнями;

- вказано базову поверхню і вимоги по точності форми та взаємного розташування поверхонь відносно бази;

- проставлено усі необхідні параметри шорсткості на поверхнях, що обробляються;

- технічні вимоги містять необхідну для виготовлення інструменту інформацію.

Для виготовлення циліндричної суцільної фрези використовуємо швидкорізальну сталь Р6М5, що обумовлено середовищем роботи та вимогами до точності інструмента. Матеріал інструмента - швидкорізальна сталь Р6М5, забезпечує можливість отримати інструмент більш простим та недорогим методом, застосувавши при обробці високопродуктивні методи, устаткування та технологічне оснащення.

Таблиця 5.1 - Хімічний склад сталі Р6М5

C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P
0,7	0,17-0,33	0,17-0,33	0,25	0,20	Не більше	
					0,028	0,03

Таблиця 5.2 - Механічні властивості сталі Р6М5

$\sigma_{вр}$ МПа	ψ, %	δ, %	$a_н$, Дж/см^2	δ, %
Не менше			50	16
620	30	1		

5.2 Вибір заготовки і обґрунтування методів її отримання

Метод отримання заготовок визначається призначенням і конструкцією деталі, технічними вимогами, матеріалом, масштабом і серійністю випуску, економічністю виготовлення. На підставі таких факторів, вибираємо для порівняння таких два методи отримання заготовки:

1) прокат;

2) штампування на горизонтально – ковочній машині (ГКМ).

1) Розрахунок затрат матеріалу на заготовку проводимо за формулою:

$$M=Q\cdot S\cdot(Q - q)\cdot S_{відх}/1000, \quad (5.1)$$

де Q - маса заготовки, Q = 9,8 кг;

$S_{баз}$ - базова вартість 1 кг матеріалу, $S_{баз}$ = 20 грн.,

q - маса готової деталі, q = 6,5 кг;

$S_{відх}$ - вартість 1 т відходів, $S_{відх}$ = 1800 грн.;

$$M= 9,8\cdot 20 - (9,8 – 6,5)\cdot 1800/1000 = 190 \text{ грн.}$$

Розрахунок вартості заготовок отриманих з металопрокату:

$$S_{заг} = M + \sum C_{оз}, \quad (5.2)$$

де $\sum C_{оз}$ - технологічна собівартість заготівельних операцій.

$$C_{О.З.} = \frac{C_{П.З} \cdot T_{ШТ(Ш.-К)}}{60 \cdot 100}, \quad (5.3)$$

де $C_{П.З}$ - приведені затрати на заготівельні операції, $C_{П.З}$=5361 коп./год.;

$T_{ШТ(Ш.-К)}$ - штучний або штучно-калькуляційний час виконання заготівельної операції, $T_{ШТ(Ш.-К)}$ = 1,54 хв.

$$C_{О.З,} = \frac{5361 \cdot 1,54}{60 \cdot 100} = 1,4 \text{грн.}$$

$$S_{заг1} = 190 + 1,4 = 191, \cdot \text{грн.}$$

2) Розрахунок вартості отримання заготовки отриманої методом штамповки проводимо за формулою:

$$S_{заг2} = ((S_{баз}/1000) \cdot Q \cdot k_т \cdot k_с \cdot k_в \cdot k_м \cdot k_п) - (Q - q) \cdot S_{відх}/1000 \quad (5.4)$$

де $S_{баз}$–базова вартість 1 т штампованих заготовок,

$S_{баз}$ = 10000 грн, [37], с. 66;

$S_{відх}$ – вартість 1 т відходів, $S_{відх}$ = 1800 грн, [37];

Q – маса заготовки, Q = 9,0 кг;

$k_т$ – коефіцієнт класу точності, $k_т$ = 1,05, [37];

$k_с$ – коефіцієнт групи складності, $k_с$ = 0,75, [37];

$k_в$ – коефіцієнт маси, $k_в$ = 1,14, [37];

$k_м$ – коефіцієнт марки матеріалу, $k_м$ = 1;

$k_п$ – коефіцієнт об’єму виробництва, $k_п$ = 1, [37].

$$S_{заг2} = ((10000/1000) \cdot 9 \cdot 1,05 \cdot 0,75 \cdot 1,14 \cdot 1 \cdot 1) - (9 - 6,5) \cdot 1800/1000 = 78 \text{ грн.}$$

Отже остаточно приймаємо штампування на ГКМ, як метод отримання заготовки завдяки більшій його точності та економії металу і грошей.

5.3 Вибір технологічних баз

Проаналізувавши конструктивні властивості заготовки можна назначити такі бази:

На першій центрувальній операції за базу приймаємо зовнішню циліндричну поверхню.

Для операцій точіння і шліфування як базові поверхні використовуємо центральний отвір і торці. Вибрані поверхні забезпечують вимоги, що пред'являються до проміжних і чистових баз. Після термічної обробки ці поверхні слід прошліфувати.

5.4 Проектування технологічних операцій та маршруту механічної обробки

5.4.2 Вибір обладнання

Враховуючи тип виробництва та конструктивні особливості виготовлення даного інструменту приймаємо наступне обладнання:

На токарній операції приймаємо верстат 1К62.

На вертикально-свердлувальній операції використовуємо верстат 2Н150.

Для протягування використовуємо верстат 7Б56.

На фрезерній операції використовуємо фрезерний верстат мод. 6М82Г. Даний верстат забезпечує можливість обробки даного типу інструмента.

Шліфування будемо проводити на внутрішліфувальному верстаті 3А227 та на плоскошліфувальному верстаті мод. 3Е711В.

Для заточки фрези у серійному виробництві приймаємо універсально-заточувальний верстат мод. 3Б642.

5.4.3 Вибір різального інструменту

На операції 010 використовуємо:

а) свердло центровочне Р6М5;

б) різець токарний прохідний з пластинкою з твердого сплаву Т15К6 ГОСТ 22085-76.

в) свердло спіральне Р6М5;

г, е) різець розточувальний з пластиною твердого сплаву Т15К6.

д, є) різець прохідний з пластиною твердого сплаву Т15К6.

На операції 015 – зенківка конічна Р6М5.

На операції 020 – шпонкова протяжка.

На операції 025 – двокутова фреза.

На операціях 040 і 055 – шліфувальний круг ПП 125х200х50 26С90СМ25Б.

На операції 045 – шліфувальний круг ПП 25х80х25 53С80СМ27Б.

На операціях 050 і 060 - використовуємо круг тип А8.

5.4.4 Технологічний маршруту механічної обробки

Табл.5.3 – Маршрут оброблення

№ Опер.	Назва	Верстат
005	Токарна	1К62
010	Вертикально-свердлильна	2Н150
015	Горизонтально-протяжна	7Б56
020	Горизонтально-фрезерна	6М82Г
025	Плоскошліфувальна	3Е711В
030	Круглошліфувальна	3А22
035	Заточувальна	3Б642
040	Круглошліфувальна	3А227
045	Заточувальна	3Б642

5.5 Розрахунок припусків

5.5.1 Розрахунково-аналітичний метод

Розрахуємо припуски на обробку і проміжні граничні розміри для обробки отвору ∅40Н7 фрези. Заготовка отримана штампуванням на ГКМ.

План обробки отвору ∅40Н7 відповідно до вимог креслення та з врахуванням економічної точності обробки [38]:

- свердлування;

- розсвердлювання;

- розточування чорнове;

- розточування чистове;

- шліфування.

Значення параметрів R_z і h для заготовки вибираємо із [38], с.186, табл.12; значення R_z і h після механічної обробки - із [38], с.188, табл.25; значення технологічних допусків Т із [38], с.192, табл. 32.

Значення просторових відхилень оброблюваної поверхні відносно базової визначається за формулою:

$$\rho_з = \sqrt{C_o^2 + (\Delta_y \cdot l)^2}\ , \qquad (5.10)$$

де C_o – зміщення отвору, C_o = 30 мкм, [38], с.71, табл.4.9;

Δ_y – викривлення свердла, Δ_y = 0,7 мкм/мм;

l – довжина отвору, l = 100 мм.

$$\rho_{кор} = 0{,}7 \cdot 100 = 70 \text{ мкм}\ .$$

$$\rho_з = \sqrt{30^2 + 70^2} = 76 \text{ мкм.}$$

Залишкова похибка після обробки, мкм:

$$\rho_{ост} = \rho \cdot К_у, \qquad (5.11)$$

де $К_у$ – коефіцієнт уточнення,

після розточування $К_у$ = 0,005, [38], с.190, табл.29.

$$\rho_{ост} = 76 \cdot 0{,}005 = 0{,}4 \text{ мкм.}$$

Значення мінімального припуску:

$$2z_{imin} = 2 \cdot (R_{zi-1} + h_{i-1} + \rho_{i-1})$$

Колонка ″Розрахунковий розмір″ заповнюється, починаючи з найбільшого кінцевого розміру (40,025 мм) шляхом послідовного віднімання розрахункового мінімального припуску для кожного технологічного переходу від відповідного розрахункового розміру.

Результати розрахунку заносимо в таблицю 5.4.

Найменші граничні розміри розраховуються шляхом віднімання технологічного допуску за переходами від округленого найбільшого граничного розміру.

Таблиця 5.4 – Результати розрахунку припусків і граничних розмірів за переходами на обробку поверхні ∅40Н7 мм.

План обробки	Елементи припуску, мкм				Розрахунковий припуск , $2z_{imin}$, мкм	Розрахунковий розмір , d_p , мм	Допуск Т, мкм	Граничні розміри, мм		Граничні значення припусків, мкм	
	R_{zi-}	h_{i-1}	ρ_{i-1}	ε_{yi}				d_{max}	d_{min}	$2z^{ep}_{i\,max}$	$2z^{ep}_{i\,min}$
Розсвердлюв.	40	60	76	-	2·176	39,795	250	39,79	39,54	-	-
Розточування чорнове	30	40	-	-	2·70	39,935	100	39,9	39,8	260	110
Розточування чистове	10	25	-	-	2·35	40,005	39	40,005	39,966	166	105
Шліфування	5	5	-	-	2·10	40,025	25	40,025	40	34	20

Граничні значення припусків $2z^{ep}_{imax}$ визначаються як різниця найменших граничних розмірів, а $2z^{ep}_{imin}$- як різниця найбільших граничних розмірів попереднього і виконуваного переходів.

Загальні припуски знаходяться як сума проміжних припусків:

$$2z_{omax} = \sum 2z^{ep}_{imax};\ 2z_{omin} = \sum 2z^{ep}_{imin};$$

$2z_{omax} = 260 + 166 + 34 = 460$ мкм.;

$2z_{omin} = 110 + 105 + 20 = 235$ мкм.;

Перевірка правильності розрахунків:

$2z_{omax} - 2z_{omin} = Td_{заг} - Td_{дет}$

$460 – 235 = 250 – 25 = 225$ мкм.

Після розрахунку будуємо схему розташування припусків, допусків та граничних розмірів отвору в мм (див. рис. 5.1).

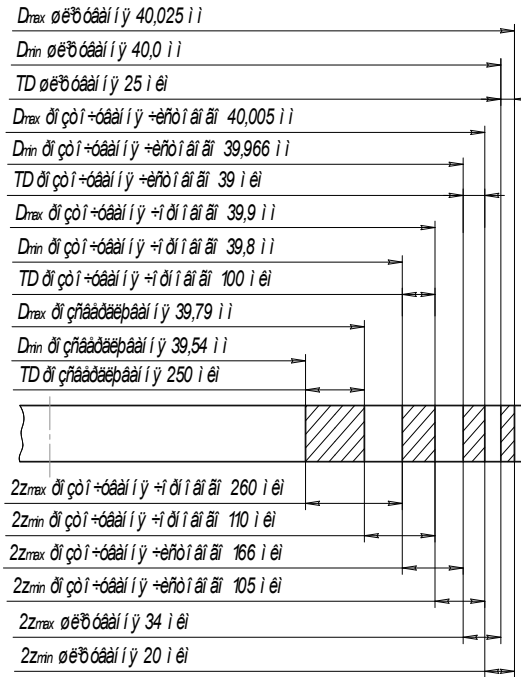

Рисунок 5.1 – Схема розташування полів припусків і допусків на обробку поверхні ∅40H7

5.5.2 Табличний метод визначення припусків заготовки

Припуски та параметри штамповки:

1) Клас точності штамповки – Т1;
2) Група сталі – М4;
3) Ступінь складності – С2 ;

4) Розрахункова маса штамповки – 9,0 кг;

5) Вихідний індекс – 12;

6) Припуски на механічну обробку (див. табл. 1.7);

7) Допуски розмірів штамповки – (див. табл. 1.7);

8) Мінімальна величина радіусів округлень штамповки – 2,0 мм;

9) Штамповочні нахили – 3^0.

Таблиця 5.5 – Припуски і допуски на оброблювані поверхні деталі

Поверхня	Розмір деталі (заготовки), мм	Припуск, мм		Допуск, мм
		табличний	розрахунковий	
Довжина фрези	125 (133)	4×2	-	+2,0/-1,6
Поверхня ∅100	100 (∅106,2)	3,1×2	-	+1,7/-1,4

5.6 Розрахунок режимів різання

5.6.1 Аналітичний метод

Чорнове точіння поверхні ∅100 мм.

1) Вибір різального інструменту:

Різальний інструмент – різець прохідний із пластиною твердого сплаву Т15К6. Геометричні параметри: $\gamma = 12^{\circ}; \gamma_{\psi} = -3^{\circ}; \alpha = 10^{\circ}; \lambda = 0^{\circ}; \varphi_1 = 45°$.

2) Глибина різання: t = 2,5 мм.

3) Призначаємо подачу: S = 1,0 мм/об.

4) Швидкість головного руху різання V, м/хв., визначаємо за формулою:

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot s^y} \cdot K_{v,} \qquad (5.12)$$

де C_v – поправочний коефіцієнт, C_v = 340, [38], с.270, табл.17;

m, x, y – показники степені, m =0,2, x = 0,15, y = 0,45, [38], с.269, табл.17;

T – стійкість інструменту, T = 60 хв., [38], с.268;

K_v – додатковий коефіцієнт на швидкість різання

$$К_v = К_{мv} \cdot К_{пv} \cdot К_{iv}, \quad (5.13)$$

де $К_{пv}$ – коефіцієнт, що враховує поверхню деталі, $К_{пv} = 0,8$, [38], с.263, табл.5;

$К_{iv}$ - коефіцієнт, що враховує вплив інструмента, $К_{iv} = 1,2$, [38], с.263, табл.6;

$К_{мv}$ – коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу заготовки

$$K_{mv} = K_{Г}\left(\frac{750}{\sigma_в}\right)^{nv}, \quad (5.14)$$

де n_v - показник степені, $n_v = 1,25$, [38], с.262, табл.2;

$К_Г$ - поправочний коефіцієнт, $К_Г = 0,6$, [38], с.262, табл.2].

$$K_{mv} = 0,6 \cdot \left(\frac{750}{850}\right)^{1,25} = 0,51;$$

$$V = \frac{340}{60^{0,2} \cdot 2,5^{0,15} \cdot 1^{0,45}} \cdot 0,49 = 64 \text{ м/хв.}$$

5) Число обертів шпинделя верстата визначаємо за формулою:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 64}{3,14 \cdot 100} = 203,7 \text{ об/хв.} \quad (5.15)$$

6) Приймаємо n = 180 об/хв., [37], с.18, табл.10;

7) Дійсну швидкість головного руху визначаємо за формулою:

$$V_д = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 100 \cdot 180}{1000} = 62,8 \text{ м/хв.} \quad (5.16)$$

8) Визначення сили різання:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p, \quad (5.17)$$

де $С_р$, x, y, n - зміні параметри, $С_р = 204$, x=1, y=0,75, n= 0, [38], с.24, табл.22;

$К_р$ - поправочний коефіцієнт

$$К_р = К_{мр} \cdot К_{φр} \cdot К_{γр} \cdot К_{λр} \quad (5.18)$$

де $К_{φр}$,$К_{γр}$, $К_{λр}$ - поправочні коефіцієнти, $К_{φр} = 1$, $К_{γр} = 1,25$, $К_{λр} = 1$, [38], с.275, табл.23;

$К_{мр}$ - поправочний коефіцієнт

$$K_{тр} = \left(\frac{\sigma_в}{750}\right)^n, \quad (5.19)$$

де n - показник степені, n = 0,75, [38], с.264, табл. 9

$$K_{тр} = \left(\frac{850}{750}\right)^{0,75} = 1,1;$$

$$P_Z = 10 \cdot 204 \cdot 2,5^1 \cdot 1^{0,75} \cdot 64^0 \cdot 1,375 = 7010 \text{ Н}.$$

9) Потужність різання визначаємо за формулою:

$$N_e = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{7010 \cdot 62,8}{1020 \cdot 60} = 7,2 \text{ кВт}. \quad (5.20)$$

Потужність верстата N визначаємо за формулою:

$$N = N_д \cdot \eta \cdot K_п \quad (5.21)$$

де $N_д$ - потужність двигуна верстата, $N_д$ = 10 кВт;

η - коефіцієнт корисної дії верстата. η ≈ 0,75;

$K_п$ – коефіцієнт перевантаження, $K_п$ = 1,6, [43], с.46.

$$N = 10 \cdot 0,75 \cdot 1,6 = 12 \text{ кВт}.$$

Різання можливе, так як виконується умова N = 12 кВт > N_e = 7,2 кВт.

10) Визначення основного часу на перехід

$$t_o = l_{р.х.} / S \cdot n_д, \quad (5.22)$$

де $l_{р.х.}$ - довжина робочого ходу інструменту;

$$l_{р.х.} = l_{різ} + y, \quad (5.23)$$

де y – підвід, врізання та перебіг інструмента, y = 6 мм, [43], с.300.

$$l_{р.х.} = 125 + 6 = 131 \text{ мм};$$

$$t_o = 131 / 1,0 \cdot 200 = 0,655 \text{ хв}.$$

5.6.2 Табличний метод

Визначення режимів різання табличним методом проводимо по [41], результати заносимо в таблицю 5.6.

Таблиця 5.6 - Зведені дані по режимам різання

Назва опер., зміст перех.	t, мм	λ	$T_м/T_р$,, хв	$s_р/s_{пр}$, мм/об	$n_р/n_{пр}$, об/хв.	$V_р/V_п$, м/хв.	$s_{хв}$, мм/хв.	$t_о$, хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9
010 Токарна 1) Центрування.	2,5	0,77	60/60	0,39/0,4	1900/1800	74/67,8	210	0,08
2) Підрізка правого торця.	2,0	0,83	80/80	0,1/0,1	3903/2100	152/81,7	130	0,16
3) Розсвердлюв. центрального отвору.	7	0,94	60/60	0,39/0,4	1900/1800	74/76,8	210	0,048
4) Розточ.чорн. центрального отвору.	0,4	0,94	60/60	1,5/1,5	2532/2100	98,6/81,7	210	0,01
5) Розточ. чист. центрального отвору.	0,1	0,94	60/60	1,5/1,5	2532/2100	98,6/81,7	210	0,01
6) Точіння зовн. поверхні.	2,5	0,96	80/80	1,5/1,5	2532/2100	98,6/81,7	130	0,01
7) Підрізка лівого торця.	2,0	0,83	80/80	0,1/0,1	3903/2100	152/81,7	130	0,16
015 Вертикал.-свердлильна 1)Зняття фасок.	0,75	0,25	60/60	0,39/0,4	1900/1800	74/67,8	210	0,08
020 Горизонт.-протяжна 1) Протягування шпоноч. пазу.	-	0,5	120/120	0,5/0,5	-	35	0,5	0,8
025 Горизонт.-фрезерна 1)Фрезерування стружкових канавок.	7,5	0,92	90/90	0,3/0,3	207/200	41/39,5	-	0,01
040 Плоскошліф. 1)Шліфування обох торців.	0,25	0,22	120/120	0,0035/ 0,0035	4210/1200	35/10,8	4528	0,04
045 Круглошліф. 1)Шліфування центрального отвору.	0,1	0,22	120/120	0,0035/ 0,0035	4210/1200	35/10,8	4528	0,04
050 Заточна. 1)Заточування передньої поверхні.	0,05	0,92	180/180	0,003/ 0,003	5300/1200	35/10,8	5000	0,02
055 Круглошліф. 1)Шліфування зовнішньої поверхні	0,25	0,22	120/120	0,0035/ 0,0035	4210/1200	35/10,8	4528	0,04
060 Заточна. 1)Заточування задньої поверхні.	0,05	0,92	180/180	0,003/ 0,003	5300/1200	35/10,8	5000	0,02

5.7 Технічне нормування операцій технологічного процесу

Розрахунки проводимо на операцію 010 – токарну, тобто ту, на яку розраховано режими різання, а інщі заносимо у табл. 5.7.

В серійному виробництві норма штучно-калькуляційного часу визначається за формулою:

$$T_{шт-к} = \frac{T_{П.З}}{n} + T_{ШТ.}, \quad (5.24)$$

$$T_{шт.} = T_о + T_д + T_{об} + T_{від},, \quad (5.25)$$

де $T_{шт.}$ - штучний час обробки деталі, хв.;

$T_{п.з.}$ - підготовчо-заключний час на обробку, хв.;

n - кількість деталей в налагоджуємій партії;

$T_о$ - основний час обробки, хв.;

$T_в$ - допоміжний час обробки, хв.;

$T_{об}$ - час на обслуговування робочого місця, хв.;

$T_{від}$ - час відпочинку, хв.;

$T_о = 0,655$ хв.

$$T_в = T_{вст} + T_{з.о} + T_{кер} + T_{вим}, \quad (5.26)$$

де $T_{вст}$ - час встановлення та зняття деталі, хв.;

$T_{з.о}$ - час на закріплення та відкріплення деталі, хв.;

$T_{кер}$ - час на керування верстатом, хв.;

$T_{вим}$ - час на вимірювання деталі, хв.;

$T_{вст} = 0,07 \cdot 1,5 = 0,105$ хв., [42], с.199;

$T_{кер} = (0,1 + 0,04) \cdot 1,5 = 0,21$ хв., [42], с.202...203;

$T_{з.о.} = 0,024$ хв., [42], с.202;

$T_{вим} = 0,11 \cdot 1,5 = 0,165$ хв.;

$T_в = 0,105 + 0,024 + 0,21 + 0,165 = 0,504$ хв.;

де 1,5 - поправочний коефіцієнт , що враховує тип виробництва – серійне.

$$T_{ОБ} + T_{ВІД.} = П_{ОБ.ВІД} \cdot \left(\frac{T_О + T_В}{100} \right), \quad (5.27)$$

де $П_{об.від}$ - норматив часу на обслуговування робочого місця, відпочинок та природні потреби, $П_{об.від}$ = 8%, [42], с.215

$$T_{ОБ} + T_{ВІД.} = 8 \cdot \left(\frac{2,4 + 0,504}{100} \right) = 0,09 \text{хв.};$$

$T_{шт.}$ = 0,655 + 0,504 + 0,09 = 1,25 хв.

$T_{п.з.}$ =16 хв., [42], с.220

Такт випуску:

$$n = \frac{N \cdot a}{254}, \quad (5.28)$$

де а - періодичність запуску деталей, а = 12 днів.

$$n = \frac{1000 \cdot 12}{254} = 472 \text{ шт.}$$

Виконуємо корегування , яке полягає в визначенні числа змін та партій деталей за зміну.

$$C = \frac{T_{ШТ} \cdot n_P}{476 \cdot 0,8} = \frac{1,25 \cdot 472}{476 \cdot 0,8} = 1,55.$$

Приймаємо $C_{пр}$ = 2 зміни.

$$n_{ПР.} = \frac{476 \cdot 0,8 \cdot C_{ПР.}}{T_{ШТ.}} = \frac{476 \cdot 0,8 \cdot 2}{1,25} = 610.$$

Тоді $T_{ШТ.К.} = \frac{16}{610} + 1,25 = 1,28$ хв..

На інші операції норми часу знаходимо за типовими нормативами часу на виготовлення ріжучого інструменту і заносимо у таблицю 5.7.

Таблиця 5.7 – Норми часу по операціям

Операція	Штучний час
005 Токарна операція.	8,25
010 Вертикально-свердлильна операція.	1,75
015 Горизонтально-протяжна операція.	4,9
020 Горизонтально - фрезерна операція.	12,3
025Плоскошліфувальна операція.	2,1
030 Круглошліфувальна операція.	3,0
035 Заточувальна операція.	1,5
040 Круглошліфувальна операція.	4,2
045 Заточувальна операція.	1,5

5.8 Висновки до розділу 5

Вибрано метод отримання заготовки, розроблено технологічний процес оброблення, призначені припуски, розраховано норми часу на операції.

РОЗДІЛ 6. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ

6.1 Проектування контрольно-вимірювального пристрою

6.1.1 Технічні умови та вимоги креслення, що підлягають контролю

Для даної деталі контролю підлягає перпендикулярність торців відносно осі фрези.

6.1.2 Вибір схеми вимірювання

Вибираємо схему контролю по [43], що зображена на рис. 6.1

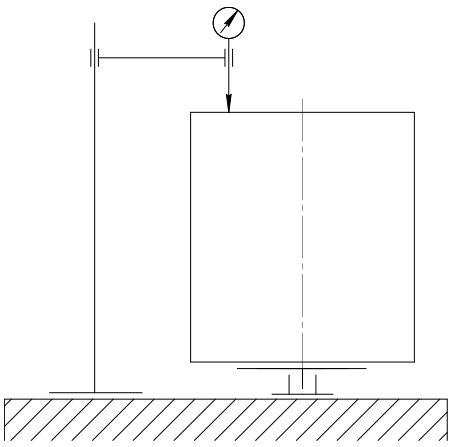

Рисунок 6.1 - Схема контролю заданого параметра

6.1.3 Розрахунок пристрою на точність

Визначаємо допустиму похибку обробки:

$$\varepsilon_{доп} = 0{,}3T \qquad (6.1)$$

де Т-допуск на контролюємий параметр, Т = 0,02 мм;

$$\varepsilon_{доп} = 0{,}3T = 0{,}3 \cdot 0{,}02 = 0{,}006 \text{ мм}.$$

Визначаємо фактичну похибку обробки:

$$\varepsilon_{ф} = \sqrt{\varepsilon_{б}^{2} + \varepsilon_{пр}^{2} + \varepsilon_{прил}^{2} + \varepsilon_{зн}^{2}}, \qquad (6.2)$$

де $\varepsilon_б$ – похибка базування деталі, $\varepsilon_б = 0$ (технологічна база співпадає з конструкторською);

$\varepsilon_{пр}$ – похибка виготовлення пристрою, $\varepsilon_{пр} = 0{,}005$ мм;

$\varepsilon_{зн}$ – похибка зношення пристрою, $\varepsilon_{зн} = 0{,}005$ мм;

$\varepsilon_{пр}$ – похибка контрольно-вимірювального приладу:

$$\varepsilon_{прил} \approx \frac{Ц}{2}, \qquad (6.3)$$

де Ц – ціна поділки контрольно - вимірювального приладу.

Для контролю параметра перпендикулярності вибираємо індикаторну головку важільно-зубчастого типу 2ИГ ГОСТ 18833 – 73, ціна поділки якої

Ц = 0,002 мм.

$$\varepsilon_{прил} \approx \frac{0{,}002}{2} = 0{,}001 \text{ мм},$$

$$\varepsilon_{ф} = \sqrt{0^2 + 0{,}005^2 + 0{,}005^2 + 0{,}001^2} = 0{,}0057 \text{ мм}.$$

Отже фактична похибка обробки не перевищує допустиму:

$$\varepsilon_{ф} < \varepsilon_{доп} \quad (0{,}0057 < 0{,}006).$$

Опис конструкції і роботи пристрою.

Фреза встановлюється на оправку центральним отвором і базується торцем на установочному диску пристрою. До верхнього торця фрези підводимо індикатор і налагоджуємо індикатор на поверхню (створюємо попередній

натяг). Далі, обертаючи установочний диск за допомогою рукояток поступово фіксуємо покази індикатора.

6.2 Опис конструкції та роботи вібраційної установки

Конструкція установки (рис. 6.2) складається з рами 1, на якій закріплено вібратор 2, з'єднаний з мембраною 3. Камера 4 утворює з мембраною 3 гідропульсатор з насадком 5, в якому існують отвори 6 для засмоктування рідини. На насадку 5 встановлена сітка 7 за допомогою гайки 8, та сопло 9, на якому розташована трубка 10 з отворами. На трубці 10 встановлено кільце 11 з розділяючою сіткою 12. На корпусі 4, при допомозі насадка 5, закріплена ванна 13 і закрита кришкою 14. Оброблюваний виріб 15 встановлений у шпиндель 16, який зв'язаний з двигуном-редуктором 17, який закріплено на кришці 14. Кульки 18 знаходяться на розділяючий сітці 12.

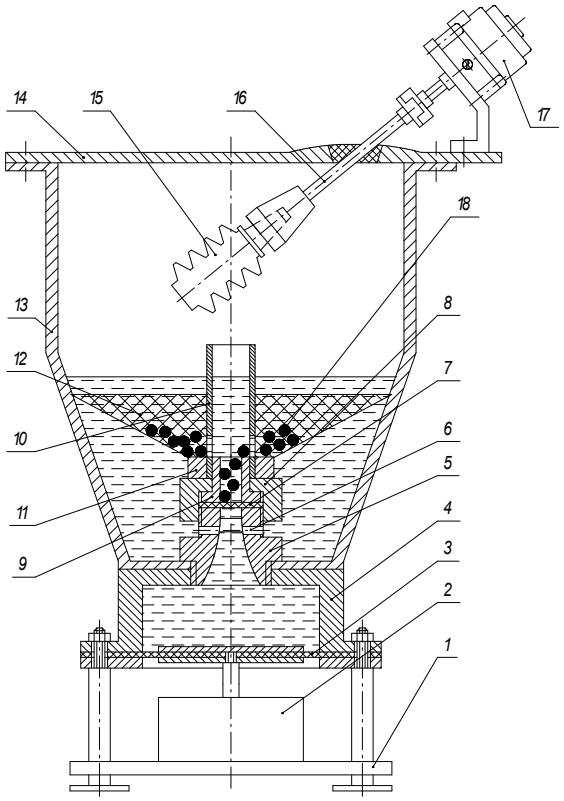

Рисунок 6.2 - Установка для гідродробоструменевого зміцнення інструментів та деталей машин

Робота установки відбувається наступним чином: На розподільчу сітку 12 засипається дріб 18. В ванну 13 заливається робоча рідина. У шпиндель 16 встановлюється оброблюваний виріб 15. Вмикання вібратора 2 викликає зворотно-поступальний рух мембрани 3. При ході мембрани 3 вниз рідина засмоктується крізь сітку 7 та отвори 6 у камеру 4. Дріб 18 потрапляє у сопло 9. При ході мембрани уверх виникає надлишковий тиск рідини, що утворює струмінь завдяки якому дріб виштовхується крізь трубку 10 на виріб 15.

При подальшій роботі вібратора 2 цикл повторюється і таким чином здійснюється поверхневе зміцнення виробу 15. Завдяки періодичності викиду порцій дробу зменшується розсіювання енергії при співударі дробинок між собою. Завдяки повільному обертанню шпинделя відбувається рівномірна обробка всієї поверхні виробу.

Рекомендовані режими роботи установки: частота коливань приводу 12-14 Гц, амплітуда коливань 2 мм.

Для зменшення втрат енергії рідини в насадку його внутрішня поверхня може бути виконана осьосиметрично за умовою експонентності.

6.3 Висновки до розділу 6

1. Проведено проектування контрольно-вимірювального пристрою.
2. Надано опис конструкції та роботи вібраційної установки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу науково-технічних і патентних джерел показана перспективність застосування пульсуючого рідинного потоку для дробоструменевого зміцнення інструменту і деталей машин.

2. Побудована аналітична модель робочого органа устаткування для гідродробоструменевого зміцнення. З аналізу моделі виявлено зв'язок між режимами роботи вібраційного приводу, конструктивними параметрами гідропульсатора та характеристиками пульсуючого рідинного потоку.

3. Побудована аналітична модель визначення енергії удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструменевой установці.

4. Проаналізовано вплив конструктивних параметрів на енергію удару робочих тіл у вібраційній гідродробоструминній установці;

5. Розроблено програму на ЕОМ, яка розраховує значення сили гідродинамічного тиску на виході з насадка.

6. У технологічному розділі вибрано метод отримання заготовки, розроблено технологічний процес оброблення, призначені припуски, розраховано норми часу на операції.

7. Запропонована методика розрахунку ефективної форми внутрішньої поверхні експонентного насадка та робочого органа для гідродробоструменевого зміцнення, розроблено конструктивну схему будови установки для гідродробозміцнення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петросов В. В. Гидродробеструйное упрочнение деталей машин и инструмента. .: Машиностроение, 1977. 166 с.

2. Афтаназив И. С. Разработка и внедрение технологического процесса поверхностного упрочнения деталей вращения вибрационно-центробежным методом: Дис. ... канд. техн. наук. Львов, 1984. 239с.

3. Саверин М. И. Дробеструйный наклёп. : Машиностроение, 1955. 346 с.

4. Каледин Б. А., Чепа П. А. Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием. Минск: Изд-во Наука и техника, 1974. 230 с.

5. Торбило В. М. Методы обработки поверхностным пластическим деформированием. Пермь, 1975. 78 с.

6. Бабичев А. П. Вибрационная обработка дталей. Изд. 2-е перераб. и доп. : Машиностроение, 1974. 136 с.

7. Бабичев А. П. Состояние и перспективное развитие вибрационной обработки. В кн.: Вибрационная обработка деталей машин и приборов. Ростов-на-Дону, 1972. 108 с.

8. Карташов И. Н. Обработка деталей свободным абразивом в вибрирующих резервуарах. .: Машиностроение, 1973. 212 с.

9. Гончаревич И. Ф., Сергеев П. А. Вибрационные машины в строительстве. Машгшиз, 1963. 305 с.

10. Кафаров В. В. Основы массопередачи: Учебник для студентов вузов. 3-е изд., переработанное и дополненное. .: Высшая школа, 1979. 439с.

11. Силин Р. И., Гордеев А. И., Савицкий Ю. В. Аналитическое исследование гидропульсационного устройства для мойки // Тези конференції «ТУП в системі реформування освітньої та наукової діяльності подільського регіону». Хмельницький, 1995. С. 311.

12. Силин Р. И., Гордеев А. И., Савицкий Ю. В. Определение скорости струи при изменении различных параметров гидропульсатора. Збірник статей

викладачів та наукових співробітників ТУП «Актуальні проблеми техніки та суспільства», 1996, випуск 2, С. 58-65.

13. Гордеев А. И. Интенсификация очистки фурнитуры и деталей машин лёгкой промышленности в газожидкостной среде: Дис...канд. техн. наук: 05.02.13. Киев, 1985. 159 с.

14. Справочник по гидравлике. / Под ред. В. А. Большакова. -2-е изд., перераб. и доп. К.: Вища школа, Головное издательство, 1984. 343с.

15. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям - М.: Машиностроение, 1975. 559 с.

16. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.: 1969. 103 с.

17. Альтшуль А. Д., Киселев П. Г. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости), .: Издательство литературы по строительству. 1965. 274 с.

18. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. Для вузов, Т. 2 Наука, 1970. 576 с.

19. Бернулли Д. Гидравлика или записки о силах движения жидкости., .: 1959.

20. Садовский В. И. Очистка деталей гидравлическими струями при ремонте тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин: Дис...канд. техн. наук: 1972. 146 с.

21. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. Недра,1982, 224 с.

22. Теория турбулентных струй / Под редакцией Абрамовича Г. Н./1984. 742 с.

23. Вулис Л. А., Кашкаров В. П. Теория струй вязкой жидкости. М.: Наука, 1965. 379 с.

24. Войцеховский Б .В., Дудин Ю. А. и др. Кавитационный эффект в экспотенциальном струйном насадке. Динамика смешаной среды. 1971, вып. IX с.7-11.

25. Сиов Б. Н. Истечение жидкости через насадки. .: Машиностроение, 1968. 139 с.

26. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. Энергия, 1978. 304 с.

27. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие / Под. ред. к.т.н. Макарова Н. А. Машиностроение, 1975. 282 с.

28. Сілін Р. І., Гордєєв А. І., Савицький Ю. В. Датчик для вимірювання миттєвих тисків // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 1997. №2. С. 57-59.

29. Бойков Н. А., Звездник П. С., Резник Л. Б. Измерение давлений при быстропротекающих процесах. Энергия, 1970. 189 с.

30. Кабардин О. Ф. Физика: Справ. материалы: Учеб. пособие для учащихся.-3-е изд., Просвещение, 1991. 367 с.

31. Рабинович Е. З. Гидравлика: Учебное пособие для вузов. Недра, 1980. 278 с.

32. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. М.: Машиностроение, 1972. 328 с.

33. Чернин В.П. и др. Расчёты деталей машин. Вышейш. Школа. 1974 592 с.

35. Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении / Под ред. В .В. Бабука Вышейш. школа, 1987. 256 с.

37. Справочник технолога-машиностроителя.Т.1. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К.Мещерякова.-М.:Машиностроение , 1985. 656 с.

38. Справочник технолога-машиностроителя. Т.2. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К.Мещерякова. Машиностроение , 1985. 496 с.

39. Обработка металлов резанием. Справочник технолога /под. ред. А.А.Панова. Машиностроение, 1988. 736 с.

40. Барановский Ю. В. Режимы резания металлов. Машиностроение, 1972. 407 с.

41. Общемашиностроительные нормативы вспомогательного времени, на обслуживание рабочего места и подготовительно - заключительного для

технического нормирования станочных работ. Серийное производство. Машиностроение.1974. 136 с.

42. Горбацевич А. Ф., Шкред В. А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения. Вышейш. шк., 1983. 256 с.