АНОТАЦІЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Встановлено частоти власних коливань шару оброблювального середовища, які залежать від амплітуди його коливань за різних значень його густини для м'яких та жорстких матеріалів оброблювального середовища та середовища з лінійно-пружними властивостями.

Виведено аналітичні залежності, які встановлюють співвідношення параметрів процесу механічної обробки поверхонь деталей сипучим абразивним середовищем для резонансного і нерезонансного випадку.

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

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

Проведено експериментальні дослідження на спроектованій та виготовленій вібраційно-відцентровій установці обробленням деталей з робочим середовищем: природний байкаліт та гранульований абразивний

матеріал ПТС-8. Параметри експериментальної установки: об'єм робочої камери 14 дм^3, амплітуда коливань – 2...6 град., частота коливань - 15...25 Гц, потужність електродвигунів 0,55 кВт, коефіцієнт заповнення камери 50...80%.

Встановлено, що із збільшенням коефіцієнта форми гранули k, амплітуди кутових коливань A та кута повороту робочої камери β величина питомого зняття металу під час обробки деталей зростає. Максимальна величина питомого зняття металу складає 63 г/см^2, а мінімальна – 46 г/см^2. Збільшення коефіцієнта форми гранули k від 0,1 до 0,5 призводить до підвищення питомого зняття металу на 9%.

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

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

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

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

Наведено результати досліджень мікротвердість поверхневого шару деталей після вібраційно-відцентрового оброблення з виведенням рівняння регресії. Максимальне значення мікротвердості поверхневого шару деталей

складає 259 H_v МПа, а мінімальне – 140 H_v МПа,. Збільшення тривалості обробки заготовки T від 15 хв до 55 хв. призводить до зростання мікротвердість поверхневого шару деталей на 22%. Збільшення кута повороту робочої камери β від 15 град. до 27 град. призводить до зростання мікротвердість поверхневого шару, при цьому подальше збільшення кута повороту робочої камери до 35 град. призводить до зменшення мікротвердість поверхневого шару. Тому раціональний кут повороту робочої камери становить 27 град.

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

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

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

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

ABSTRACT

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The frequencies of the surface under treatment layer vibrations have been found which depend on its vibrations amplitude at different values of its density for soft and rigid materials of the medium under treatment and the medium with linear-elastic properties.

Some analytical dependencies have been derived which determine the relationships of the parameters of the workpieces resurfacing process by granular abrasive medium for both a resonant and a non-resonant cases.

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

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

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

It was found, that the higher granule shape coefficient k, the angular vibrations amplitude A and the chamber turning angle β, the larger value of the of the metal specific removal rate under the workpieces machining conditions is. The maximum value of the metal specific removal rate is 63 g/cm^2, and the minimum one equals to 46 g/cm^2. An increase of the granule shape coefficient k from 0,1 to 0,5 has resulted in 9% increase of the metal specific removal rate.

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

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

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

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

The micro hardness of the workpiece surface layer has been studied by means of experiments after the vibration-centered treatment and the regression equation has

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

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

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

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

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

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

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

Публікації в наукових фахових виданнях України та закордоном

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

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

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

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

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

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

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

Матеріали і тези конференцій

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

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

11. Кондратюк О.М. Дослідження роботи вібраційно-відцентрової установки / О.М. Кондратюк, Л.С. Серілко, Ю.Я. Галан// Міжнародна науково-технічна конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя 22–24 травня – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – С 112-115. *(Автором здійснено опис вібраційно-відцентрової установки).*

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

Патенти України на корисні моделі

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

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

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