

Національний університет «Чернігівська політехніка»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МОРОЧКО ВОЛОДИМИР ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.923

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ
ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ОРІЄНТОВАНИМ КРУГОМ,
ЗАПРАВЛЕНИМ З РІЗНИМИ ПОДАЧАМИ НА РОБОЧІЙ ТА
КАЛІБРУВАЛЬНІЙ ДІЛЯНКАХ

Спеціальність - 133 Галузеве машинобудування

Галузь знань - 13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ В.В. Морочко

Науковий керівник: Єрошенко Андрій Михайлович, кандидат технічних наук,
доцент _____

Чернігів – 2021

АНОТАЦІЯ

Морочко В.В. Підвищення ефективності шліфування циліндричних поверхонь орієнтованим кругом заправленим з різними подачами на робочій та калібрувальній ділянках.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. – Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, 2021.

Дисертаційна робота написана з метою підвищення ефективності абразивної обробки циліндричних поверхонь деталей периферією круга за рахунок орієнтації інструменту та правки його з різними подачами на робочій та калібрувальній ділянках.

У першому розділі проаналізовано існуючі способи абразивної обробки циліндричних поверхонь деталей при паралельних та схрещених вісях інструмента та деталі, тривимірні моделі формоутворюючих систем верстатів, зняття припуску, поверхонь інструментів та поверхонь, що оброблюються. Було встановлено, що розробка нових способів шліфування зі схрещеними вісями інструмента і деталі є потужним резервом інтенсифікації процесу шліфування, який дасть змогу суттєво підвищити точність і продуктивність обробки та забезпечити необхідну якість оброблюваних циліндричних поверхонь.

Значний внесок у розвиток абразивної обробки внесли численні наукові інститути, центри та колективи вітчизняних вчених серед яких:

Р.Р. Агасарян [2], А.К. Байкалов [4], С.М. Братан [8], Ю.М. Внуков [12], А.П. Гавриш [13], А.І. Грабченко [14], В.І. Дикушин [27], В.Л. Доброскок [28], Н.В. Зубкова [33], Л.П. Калафатова [35], В.В. Кальченко [36], В.І. Кальченко [45], В.В. Коломієць [63], С.М. Корчак [64], Д.В. Криворучко [65], В.І. Лавриненко [71], Ф.В. Новіков [86], Ю.К. Новосьолов [89], Б.А. Перепелиця [96], О.А. Пермяков [97], Ю.В. Петраков [98], М.Ф. Семко [111], Ю.А. Сизий [113], М.С. Степанов [119], М.Д. Узунян [120], В.О. Федорович [123], А.Н. Шелковой [130], А.В. Якімов [133],

П.І. Ящерицин [135], та інші.

В роботах цих та інших авторів досліджуються процеси шліфування периферією і торцем круга з паралельними і схрещеними осями інструмента та деталі, управління рельєфом круга, процеси технологічного забезпечення якості оброблюваних поверхонь, вплив режимів обробки на рівень вібрацій, просторове моделювання алмазно-абразивних інструментів, формоутворюючих систем верстатів, процесів шліфування, управління ріжучою здатністю шліфувальних кругів, вплив ріжучої здатності круга на температуру і сили при шліфуванні, способи підвищення продуктивності і точності при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента і деталі, визначення складових сил різання, товщини шару, який зрізається при шліфуванні орієнтованим інструментом, тощо.

На основі проведеного аналізу літературних джерел визначено мету та основні завдання дослідження.

У другому розділі описана методика проведення експериментальних досліджень процесу шліфування циліндричної поверхні вала периферією орієнтованого абразивного круга заправленого з різними подачами на робочій та калібрувальній ділянках. Наводиться перелік необхідного обладнання та його технічні характеристики.

Шліфування проводиться на універсально-заточувальному верстаті з ЧПК В3208-ФЗ. Необхідний профіль абразивного круга отримується там же та контролюється за допомогою прилада з оптиковолоконним датчиком.

Визначення температури по поверхні деталі під час обробки здійснюється тепловізором моделі ULIRVISION TI-384, а безпосередньо в зоні шліфування температура вимірюється за допомогою термopари.

Потужність шліфування по координаті обробки вимірюється аналізатором потужності С.А 8220.

Шорсткість обробленої поверхні вала за параметром R_a визначалася портативним профілометром Pocket Surf та профілографом-профілометром моделі 201.

У третьому розділі наведено модульне тривимірне моделювання процесу формоутворення циліндричної поверхні деталі при шліфуванні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення. Розроблені тривимірні геометричні модульні моделі поверхні абразивного круга та деталі. На базі отриманої просторової моделі проведено дослідження розподілу припуску повздовж різальної ділянки абразивного інструмента в процесі шліфування орієнтованим кругом. Проведено дослідження складових сил шліфування із врахуванням різальних та деформуючих зерен. Розроблено модульну тривимірну модель правки периферійної ділянки абразивного інструменту однокристалним алмазним інструментом в процесі шліфування зі схрещеними осями інструмента та деталі. Проведено динамічний розрахунок шпиндельного вузла.

Четвертий розділ присвячений проведенню експериментальних досліджень процесу чистової однопрохідної абразивної обробки циліндричної поверхні деталі периферійною частиною орієнтованого абразивного круга, заправленого з різними подачами на чорновій і калібрувальній ділянках, в режимі затуплення. Відповідно до запропонованої схеми обробки, максимальний припуск зрізатися частиною периферії інструменту, що врізатється в заготовку першою, рівномірно зменшуючись до калібрувальної ділянки, яка формує остаточну точність і не бере участь в чорновому зрізанні припуску та має за рахунок цього високу стійкість.

Величина температури в зоні шліфування та розподіл температури під час обробки показали, що структурні перетворення в поверхневому шарі деталі не відбуваються. Ці перетворення могли б негативно впливати на якість деталі, що обробляється.

Також було виміряно величину активної потужності та параметри точності і шорсткості обробленої поверхні деталі.

При проведенні досліджень впливу технологічних параметрів обробки на точність використовувався повний факторний експеримент типу 2^3 при обліку взаємодій між факторами. На підставі теоретичних досліджень, розроблених 3D

моделей і складених робочих програм, визначено основні фактори. Здійснено планування повного факторного експерименту з трьома факторами. Також була здійснена перевірка значимості коефіцієнтів регресії. Проаналізувавши рівняння регресії, було визначено, що найбільший вплив на точність та продуктивність обробки мають повздовжня подача, кут орієнтації абразивного інструменту, величина припуску та їх взаємодія. Було встановлено, що взаємодія кута орієнтації інструменту з величиною повздовжньої подачі - не впливають.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. В роботі вперше представлені розроблені модульні тривимірні моделі абразивного круга, процесів зняття припуску периферійною частиною інструменту за координатою обробки, формоутворення калібрувальною ділянкою, що розташована на осі повороту інструменту при фінішній обробці деталей з циліндричними поверхнями абразивним орієнтованим кругом в режимі затуплення. Проаналізувавши вищезгадані моделі, отримали залежності впливу орієнтації інструменту на процеси зняття припуску, формоутворення, якість і точність циліндричної деталі, яка оброблялась.

2. Отримано розвиток залежності визначення кутів орієнтації абразивного інструменту в процесі фінішньої обробки периферійною частиною абразивного круга циліндричних поверхонь в режимі затуплення, які створені на основі проведеного аналізу створених модульних тривимірних моделей інструмента, формоутворення та процесів зняття припуску при фінішній обробці орієнтованим кругом.

3. Створена модульна просторова модель правки абразивних кругів однокристалним правлячим інструментом із різною подачею, дослідженням якої встановлено закономірності формоутворення шліфувальних інструментів та процесів зняття припуску.

4. Уточнено залежності визначення теплонапруженості процесу фінішньої обробки циліндричних поверхонь оброблюваних деталей орієнтованим інструментом під час його роботи в режимі затуплення.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Отримані модульні тривимірні моделі деталі, інструмента, формоутворення та процесів зняття припуску, а також методики, створюють теоретичну базу нового більш ефективного способу фінішної обробки деталей з циліндричними поверхнями абразивним орієнтованим кругом під час його роботи в режимі затуплення.

2. Були визначені параметри орієнтації абразивного круга, що забезпечили зняття припуску периферійною частиною круга, розроблено спосіб фінішної обробки деталей з циліндричними поверхнями орієнтованим інструментом при його роботі в режимі затуплення. Вищезгадані результати отримані завдяки проведенню аналізу модульних тривимірних моделей формоутворення, процесів зняття припуску, інструмента та деталі, що оброблялась.

3. Запропонована методика зняття припуску, при якій припуск розподіляється вздовж чорнової, напівчистої, чистої та калібрувальної ділянок шліфувального круга.

4. Опираючись на результати аналізу модульних тривимірних моделей процесів зняття припуску, формоутворення, деталі та інструменту було розроблено модульну просторову модель правки абразивних кругів однокристалним правлячим інструментом із різною подачею.

5. Здобувач є співавтором отриманих патентів на корисну модель за темою дисертаційного дослідження: спосіб круглого чистого шліфування периферією орієнтованого круга (№134080 від 25.04.2019), спосіб шліфування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями круга і деталі (№145383 від 10.12.2020), спосіб шліфування кулачків розподільчого валу (№145532 від 28.12.2020).

6. Практичні рекомендації з використання наукових розробок впроваджені у виробництво на ТОВ «МГК-Черкаси» (м. Черкаси). Від впровадження результатів роботи очікується економічний ефект, який складає 25 тис. грн.

7. Методики та результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес Національного університету «Чернігівська політехніка».

Ключові слова: шліфування, периферія круга, круг, заправлений з різними подачами, циліндрична поверхня, орієнтований інструмент, тривимірний модель, температура, точність обробки, шорсткість, потужність шліфування.

ABSTRACT

Morochko V.V. Improving the efficiency of grinding cylindrical surfaces with an oriented circle, filled with different feeds on the working and calibration sections.

The dissertation for getting a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.01 "Processes of mechanical tooling, machines and tools". - Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, 2021.

The dissertation is devoted to increasing the efficiency of grinding of cylindrical surfaces of details by periphery of a circle due to orientation of the tool and its editing with the various supplies on working and calibration sections.

The first section analyzes the existing methods of abrasive treatment of cylindrical surfaces of parts with parallel and crossed tool axes and parts, three-dimensional models of forming systems of machines, tool and machined surfaces, removal of allowance. It has been found that the development of new methods of grinding with crossed axes of tools and parts is a powerful reserve to intensify the grinding process, which will significantly improve the accuracy and productivity of processing and ensure the required quality of cylindrical surfaces.

A lot of scientific institutes, centers and teams of domestic scientists have made a significant contribution to the development of abrasive treatment, including:

R.R. Agassaryan [2], A.K. Baikalov [4], S.M. Bratan [8], Yu. M. Vnukov [12], A.P. Gavrish [13], A.I. Grabchenko [14], V.I. Dikushin [27], V.L. Dobroskok [28], N.V. Zubkova [33], L.P. Kalafatova [35], V.V. Kalchenko [36], V.I. Kalchenko [45], V.V. Kolomiets [63], S.M. Korczak [64], D.W. Krivoruchko [65], V.I. Lavrinenko [71], F.V. Novikov [86], Y.K. Novoselov [89], B.A. Perepelytsya [96], O.A. Permyakov [97], Y.V. Petrakov [98], M.F. Semko [111], Y.A. Siziyy [113], M.S. Stepanov [119], M.D. Uzunyan [120], V.O. Fedorovich [123], A.N. Shelkovoy [130], A.V. Yakimov [133], P.I. Yascherytsyn [135] and others.

In the scientific works of these and other authors the processes of grinding the periphery and end of the circle with parallel and crossed tool axes and parts, control of the circle relief, processes of technological quality assurance of machined surfaces, influence of processing modes on vibration level, spatial modeling of diamond-

abrasive tools, forming systems, grinding processes, control of cutting ability of grinding wheels, influence of cutting ability of wheel on temperature and forces at grinding, ways of increase of productivity and accuracy at grinding with the crossed axes of the tool and details, definition of components of cutting forces, thickness of a layer which is cut at grinding, etc.

Based on the analysis of literature sources, the purpose and main objectives of the study have been determined.

The second section describes the method of conducting experimental studies of the process of grinding the cylindrical surface of the shaft by the periphery of the oriented circle, filled with different feeds on the working and calibration sections. The list of necessary equipment and its technical characteristics is given.

Grinding is carried out on a universal sharpening machine with CNC VZ208-F3. The required abrasive wheel profile is obtained there and monitored by a device with a fiber optic sensor.

Determination of the temperature on the surface of the part during processing is carried out with a thermal imager model ULIRVISION TI-384, and directly in the grinding zone, the temperature is measured using a thermocouple.

The grinding power according to the processing coordinate is measured by the power analyzer SA 8220.

The roughness of the treated shaft surface on the parameter R_a was determined by the portable profilometer Pocket Surf and profilograph-profilometer model 201.

The third section presents modular three-dimensional modeling of the process of forming the cylindrical surface of the part when grinding the periphery of the oriented circle in the blunting mode. Three-dimensional geometric modular models of the abrasive wheel surface and details have been developed. Based on the obtained spatial model, the distribution of the allowance along the cutting section of the tool during grinding with an oriented circle has been worked out. The research of the components of grinding forces taking into account the cutting and deforming grains has been conducted. A modular three-dimensional model of straightening the peripheral section of a grinding wheel with a single-crystal diamond tool for grinding

with crossed tool axes and parts has been developed. The dynamic calculation of the spindle assembly has been performed.

The fourth section is devoted to experimental studies of the process of finishing single-pass grinding of the cylindrical surface of the shaft by the periphery of the oriented circle, filled with different feeds on the roughing and calibration sections, in the blunting mode. According to the proposed treatment scheme, the maximum allowance will be removed by the part of the periphery of the circle that will first cut into the workpiece, evenly decreasing to the calibration area, which forms the final accuracy and does not participate in rough cutting allowance and therefore has high stability.

The value of the temperature in the grinding zone and the temperature distribution during processing showed that in the surface layer of the part there are no structural changes that could adversely affect the quality of the part.

The amount of active power and the parameters of accuracy and roughness of the machined surface of the part were also measured.

When conducting studies of the influence of technological parameters of processing on accuracy, a full factorial experiment of type 2^3 has been used, taking into account the interactions between factors. On the basis of theoretical researches, developed 3D models and the made working programs, the basic factors have been defined. The planning of a complete factorial experiment with three factors has been carried out and the significance of regression coefficients has been checked. Analysis of the regression equation showed that the greatest influence on productivity and accuracy of processing have longitudinal feed, grinding wheel orientation angle, allowance and their interaction, but the interaction of grinding wheel orientation angle with longitudinal feed is not affected.

Thus, increasing the efficiency of the grinding process can be achieved by increasing the longitudinal feed and the number of revolutions of the part while maintaining the quality of its surface layer.

Scientific novelty of the obtained results:

1. For the first time the modular three-dimensional models of the tool, processes

of removal of allowance by periphery of a circle on coordinate of processing, shaping by the calibration site located on an axis of rotation of a circle at grinding of cylindrical surfaces by the removal of overmeasure, shaping, accuracy and quality of the machined part have been developed.

2. The dependence of determining the orientation angles of the abrasive tool when grinding the periphery of the circle of cylindrical surfaces in the blunting mode, which are based on the analysis of the developed modular three-dimensional models of the tool, processes of allowance removal and shaping when grinding oriented circle have been received further development.

3. For the first time a modular spatial model of abrasive wheel straightening with a single-crystal control tool with different feed was developed, the study of which established the regularities of the processes of allowance removal and shaping of grinding tools has been worked out.

4. The dependences of determination of heat tension of the process of grinding of cylindrical surfaces by the oriented circle at its work in the mode of blunting have been specified.

Practical significance of the obtained results:

1. The modular three-dimensional models of the tool, details, the processes of the removal of allowance and shaping and methods, which have been received in the dissertation, are the theoretical basis of a new effective way of grinding of cylindrical surfaces by the oriented circle at its work in the blunting mode.

2. Based on the analysis of modular three-dimensional models of tools, parts, processes of allowance removal and shaping, a method of grinding cylindrical surfaces with an oriented circle during its operation in blunting mode and parameters of abrasive wheel orientation have been determined.

3. Based on the developed method of grinding cylindrical surfaces with an oriented circle during its operation in the blunting mode, a method of removing the allowance has been proposed, in which the allowance is distributed along the rough, semi-finished, finishing and calibration sections of the grinding wheel.

4. Based on the analysis of modular three-dimensional models of the tool,

parts, the processes of allowance removal and shaping, a modular spatial model of editing abrasive wheels with a single-crystal control tool with different feed has been developed.

5. The authorship of the applicant's scientific developments is confirmed by the utility model patents obtained: the method of round finishing grinding by the periphery of the oriented circle (№134080 from 25.04.2019), the method of grinding cylindrical surfaces with crossed axes and parts (№145383 from 10.12.2020), the way of grinding camshafts (№145532 from 28.12.2020).

6. Developed and implemented in practice practical recommendations for the use of scientific developments at LLC "MGK-Cherkasy" (Cherkasy). The total expected economic effect from the implementation of the results of work is 25 thousand UAH.

7. The results and methods of dissertation work are used in the educational process of the Department of Road Transport and Mechanical Engineering of the Chernihiv Polytechnic National University.

Key words: grinding, circle periphery, wheel filled with different feeds, cylindrical surface, oriented tool, three-dimensional model, temperature, machining accuracy, roughness, grinding power.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

Публікації у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Development of a model of tool surface dressing when grinding with crossed wheel and cylindrical part axes / Vitalii Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Olga Kalchenko, Natalia Sira, Dmytro Kalchenko, Volodymyr Morochko, Volodymyr Vynnyk// ENGINEERING TECHNOLOGICAL SYSTEMS .VOL 3, NO 1 (105) (2020).- P.23-29. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.15587/1729-4061.2020.202441](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.202441) (Scopus).

2. Development of the single-setup milling process model of the shaft support 2. necks and cams / Vitalii Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Natalia Sira, Olga Kalchenko, Volodymyr Vynnyk, Dmytro Kalchenko, Volodymyr Morochko, // ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ ЖУРНАЛ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. ENGINEERING TECHNOLOGICAL SYSTEMS .VOL 4, NO 1 (106) (2020).- P.48-54. (Scopus).

Публікації у фахових виданнях

1. Кальченко В.І. Визначення сил різання при чистовому шліфуванні циліндричної поверхні вала / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, Я. В. Кужельний, В.В. Морочко // Технічні науки та технології: науковий журнал / Черніг. нац. технол. ун-т. –Чернігів: ЧНТУ, – 2019. – №1 (15). – С. 41–52.

2. Морочко В.В. Підвищення точності та продуктивності шліфування циліндричних поверхонь орієнтованим кругом, заправленим з різними подачами на робочій і калібруючій ділянках. / В.В. Морочко // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія:Технічні науки. Том 32 (71). №3. 2021. Частина1. С.1-5.

3. Кальченко В.В. Дослідження динамічних характеристик процесу шліфування циліндричних поверхонь периферією орієнтованого круга в режимі затуплення на верстаті В3208 Ф4 /В.В. Кальченко, В.І. Венжега, Н.М. Сіра, В.В. Морочко // Технічні науки та технології. Науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів:– 2020. – №4 (22). – С. 9–18.

4. Кальченко В. В. Дослідження теплонапруженості процесу шліфування циліндричних поверхонь периферією орієнтованого круга в режимі затуплення / В.В. Кальченко, Н.М. Сіра, Я.В. Кужельний, В.В. Морочко В. // Технічні науки та технології. Науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів:– 2021. – № 1 (23). – С. 9–16.

5. Єрошенко А.М. Експериментальне дослідження процесу шліфування циліндричних поверхонь валів та опорних шийок розподільчого вала периферією орієнтованого круга в режимі затуплення / А.М. Єрошенко, Я.В. Кужельний, В.В. Морочко, В.О. Винник // Технічні науки та технології.

Науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів:– 2021. – №3 (25). – С. 9–18.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Кальченко В.В., Венжега В.І., Морочко В.В. Дослідження сил різання при чистовому шліфуванні циліндричного вала. Збірник наукових матеріалів ЛІУ міжнародної науково-практичної інтернет-конференції el-conf.com.ua «Інновації науки XXI». 2 листопада 2020. Київ. Україна. С.175-179.

2. Венжега В.І., Пасов Г.В., Морочко В.В. Дослідження динамічних характеристик шпиндельного вузла верстата В3208-Ф4 при шліфуванні циліндричних поверхонь периферією орієнтованого круга в режимі затуплення. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. XI Міжнародна науково-практична конференція 26-27 травня 2021. Чернігів. Україна. Том1. С.118-119.

3. Морочко В.В. Дослідження складових сил шліфування під час обробки циліндричних поверхонь периферією орієнтованого круга в режимі затуплення. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. XI Міжнародна науково-практична конференція 26-27 травня 2021. Чернігів. Україна. Том1. С.110-111.

4. 07.09.2021 р. дисертаційна робота доповідалася на розширеному засіданні кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка»), де була обговорена і схвалена до захисту.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Патент №134080 Україна на винахід (корисну модель) МПК В24В 5/04. Спосіб круглого чистового шліфування периферією орієнтованого круга / Кальченко В.І., Кальченко В.В., Сіра Н.М., Кологойда А.В., Кужельний Я.В., Кальченко Д.В., Морочко В.В., Аксьонова О.О.; заявник та патентовласник Чернігівський національний технологічний університет. – №201812754; заявл. 21.12.2018; опубл. 25.04.2019. Бюл. №8.

2. Патент 145383 Україна, МПК В24В 5/04 / Кальченко В.І., Кальченко В.В., Сіра Н.М., Кологойда А.В., Венжега В.І., Кальченко Д.В., Морочко В.В. Спосіб шліфування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями круга і деталі. Опубл. 10.12.2020. Бюл №23. 8 ст. заявка u 2020 03463.

3. Патент 145532 Україна, МПК В23С 3/08 / Кальченко В.В., Кальченко В.І., Сіра Н.М., Кологойда А.В., Следнікова О.С., Винник В.О., Кальченко Д.В., Скляр В.М., Морочко В.В. Спосіб шліфування кулачків розподільчого валу. Опубл. 28.12.2020. Бюл №24. 3 ст. заявка u 2020 03135.

ЗМІСТ

ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. МЕТА, ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ	24
1.1 Деталі з циліндричною поверхнею обертання.....	25
1.2 Аналіз відомих способів абразивної обробки деталей з циліндричною поверхнею.....	28
1.3 Аналіз тривимірного моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення циліндричної поверхні вала.....	33
1.4 Аналіз методів дослідження та моделювання процесів, які відбуваються під час абразивної обробки.....	37
1.5 Мета і завдання досліджень.....	38
Висновки до розділу 1.....	40
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ	41
2.1 Опис експериментального обладнання.....	41
2.1.1 Загальні відомості про верстат з ЧПК В3208-ФЗ.....	41
2.1.2 Прилади для вимірювання зносу шліфувального круга.....	43
2.1.3 Прилади для вимірювання температури в зоні різання.....	44
2.1.4 Прилад для вимірювання потужності.....	46
2.1.5 Прилади для вимірювання шорсткості поверхні.....	47
2.1. 6 Інструмент для правки абразивного круга.....	49
2.2. Дослідження процесу шліфування циліндричної поверхні вала периферією орієнтованого круга.....	50
Висновки до розділу 2.....	53
РОЗДІЛ 3. МОДУЛЬНЕ ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПОВЕРХНІ ВАЛА ПЕРИФЕРІЄЮ ОРІЄНТОВАНОГО КРУГА В РЕЖИМІ ЗАТУПЛЕННЯ	54
3.1 Модульне тривимірне моделювання поверхні круга при шліфуванні циліндричної поверхні вала.....	54
3.2 Тривимірне моделювання правки абразивного круга однокристальним	

алмазним інструментом.....	59
3.3 Дослідження мікрорельєфу периферійної різальної ділянки абразивного круга після правки.....	63
3.4 Спосіб правки абразивних кругів при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та циліндричної деталі.....	64
3.5 Дослідження зносу абразивного інструменту.....	65
3.6 Розрахунок сил шліфування при обробці циліндричної поверхні деталі периферією орієнтованого круга в режимі затуплення.....	66
3.7 Розрахунок контактної температури при шліфуванні периферією орієнтованого інструменту.....	70
3.8 Динамічний розрахунок шпиндельного вузла.....	72
Висновки до розділу 3.....	77
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ОРІЄНТОВАНИМ КРУГОМ, ЗАПРАВЛЕНИМ З РІЗНИМИ ПОДАЧАМИ НА РОБОЧІЙ ТА КАЛІБРУВАЛЬНІЙ ДІЛЯНКАХ.....	78
4.1 Експериментальне дослідження обробки циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга на верстаті ВЗ 208-ФЗ.....	78
4.2 Експериментальне дослідження потужності шліфування та сил різання.....	81
4.3 Експериментальне дослідження температури при шліфуванні циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга.....	84
4.4 Експериментальне визначення зносу шліфувального круга.....	87
4.5 Експериментальне визначення шорсткості циліндричної поверхні вала.....	88
4.6 Експериментальне визначення радіального биття.....	88
Висновки до розділу 4.....	89
ВИСНОВКИ.....	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93
ДОДАТКИ.....	113

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасних машинах широко використовуються деталі з поверхнями обертання: циліндричними, конічними, криволінійними, до яких висуваються високі вимоги по точності розмірів, форми, якості поверхонь. Остаточні параметри точності та якості оброблюваних поверхонь деталей формуються на фінішних операціях, найрозповсюдженішою із яких є абразивне шліфування.

Найбільш поширеною фінішною операцією обробки таких поверхонь є поздовжнє кругле шліфування периферією круга при паралельних вісях інструмента і деталі, основним недоліком якого є низька продуктивність та нерівномірний знос шліфувального круга, що негативно впливає на точність і якість обробки.

Тому останнім часом для високопродуктивної обробки все частіше використовується кругле шліфування периферією круга при схрещених під невеликим кутом вісях інструменту і деталі, яке має ще невикористані резерви підвищення точності та продуктивності.

Саме схрещення осей круга і деталі при шліфуванні циліндричних поверхонь периферією круга підвищує точність та продуктивність обробки, визначає раціональне положення формоутворюючої ділянки. Суміщення цієї ділянки з нормаллю по координаті обробки дає можливість шляхом адаптивного управління компенсувати вплив зносу профілю круга на точність формоутворення і підвищує стійкість абразивного інструменту. Найбільша величина припуску знаходиться в тому місці, де врізається абразивний круг з рівномірним зменшенням величини припуску до калібрувальної ділянки, яка забезпечує формоутворення поверхні деталі.

Згідно з вищезгаданим, виникає необхідність створити теоретичну базу для чистової абразивної обробки циліндричних деталей орієнтованим абразивним інструментом в режимі затуплення, розробки універсальних модульних тривимірних моделей процесу шліфування, та впровадження нового способу обробки циліндричних поверхонь в промисловість, що буде сприяти

підвищенню ефективності процесу фінішної обробки, а отже є важливою та актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими темами, планами та програмами. Здобувач виконував окремі розділи в рамках кафедральної науково-дослідної теми кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка», а саме: за фундаментальною темою №0117U003758 від 28.09.2017 року «Дослідження процесу обробки орієнтовани профільованими інструментами» (2017-2021 рр.), ДР № 0117U003758.

Мета і задачі дослідження. Метою написання дисертаційної роботи – є підвищення ефективності шліфування циліндричних поверхонь орієнтованим кругом в режимі затуплення за допомогою створення теоретичних основ способу фінішної обробки периферією круга зі схрещеними осями деталі та інструмента. За базу було взято модульні тривимірні моделі, визначення умов та областей раціонального застосування, а також розробки модульної просторової моделі правки абразивних кругів однокристальним правлячим інструментом із різною подачею.

Для досягнення поставленої мети в роботі були вирішені наступні задачі:

1. Проаналізувати існуючі методологічні підходи до вивчення та вдосконалення процесів абразивної обробки деталей з циліндричними поверхнями периферією круга зі схрещеними осями деталі та інструмента при роботі абразивного круга, що працює в режимі затуплення.

2. Проаналізувати методи дослідження та моделювання процесів, що відбуваються під час фінішної обробки деталі зі схрещеними осями круга та деталі під час роботи інструмента в режимі затуплення.

3. Змоделювати тривимірну модель процесу шліфування циліндричних поверхонь периферією круга зі схрещеними осями інструмента та оброблюваної деталі при його роботі в режимі затуплення і створити модульну просторову модель правки абразивних кругів однокристальним правлячим інструментом із різною подачею.

4. Дослідити точність формоутворення та розвиненість робочої поверхні круга після правки.

5. Провести дослідження у вигляді експерименту процесів зняття припуску, теплонапруженості та точності формоутворення при шліфуванні деталі з циліндричною поверхнею орієнтованим кругом при його роботі в режимі затуплення.

Об'єкт дослідження – процес шліфування циліндричних поверхонь орієнтованим кругом при його роботі в режимі затуплення.

Предметом дослідження являється модульна тривимірна модель процесу фінішної обробки циліндричних поверхонь орієнтованим кругом, заправленим з різними подачами на робочій та калібрувальній ділянках при його роботі в режимі затуплення і модульна просторова модель правки абразивних кругів однокристалним правлячим інструментом із різною подачею, на базі дослідження якої визначено залежність величини припуску від робочої ділянки периферії круга.

Методи дослідження. При проведенні теоретичних досліджень використовувались фундаментальні положення теоретичної механіки, теорії ймовірностей, технології машинобудування, теорії різання та опору матеріалів, теорії формоутворення поверхонь, математичного та комп'ютерного моделювання. Також було застосовано апарат диференціального та інтегрального числення функцій однієї та декількох перемінних для визначення сили різання та апарат векторної алгебри для створення модульних тривимірних моделей. Статистичні дані оброблялись за допомогою положень математичної статистики.

Висновки та результати даної роботи знайшли своє підтвердження за допомогою обчислювальних комп'ютерних експериментів з використанням моделей і алгоритмів, розроблених безпосередньо здобувачем.

Експерименти проводилися на універсально-заточувальному верстаті з ЧПК - В3208-Ф3, використовуючи сучасну контрольно-вимірювальну апаратуру. Достовірність створених математичних моделей підтверджено в

практиці промислового впровадження, а також в результатах проведених експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. В роботі вперше представлені розроблені модульні тривимірні моделі абразивного круга, процесів зняття припуску периферійною частиною інструменту за координатою обробки, формоутворення калібрувальною ділянкою, що розташована на осі повороту інструменту при фінішній обробці деталей з циліндричними поверхнями абразивним орієнтованим кругом в режимі затуплення. Проаналізувавши вищезгадані моделі, отримали залежності впливу орієнтації інструменту на процеси зняття припуску, формоутворення, якість і точність циліндричної деталі, яка оброблялась.

2. Отримано розвиток залежності визначення кутів орієнтації абразивного інструменту в процесі фінішньої обробки периферійною частиною абразивного круга циліндричних поверхонь в режимі затуплення, які створені на основі проведеного аналізу створених модульних тривимірних моделей інструмента, формоутворення та процесів зняття припуску при фінішній обробці орієнтованим кругом.

3. Створена модульна просторова модель правки абразивних кругів однокристалним правлячим інструментом із різною подачею, дослідженням якої встановлено закономірності формоутворення шліфувальних інструментів та процесів зняття припуску.

4. Уточнено залежності визначення теплонапруженості процесу фінішньої обробки циліндричних поверхонь оброблюваних деталей орієнтованим інструментом під час його роботи в режимі затуплення.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Отримані модульні тривимірні моделі деталі, інструмента, формоутворення та процесів зняття припуску, а також методики, створюють теоретичну базу нового більш ефективного способу фінішньої обробки деталей з циліндричними поверхнями абразивним орієнтованим кругом під час його роботи в режимі затуплення.

2. Були визначені параметри орієнтації абразивного круга, що забезпечили зняття припуску периферійною частиною круга, розроблено спосіб фінішної обробки деталей з циліндричними поверхнями орієнтованим інструментом при його роботі в режимі затуплення. Вищезгадані результати отримані завдяки проведенню аналізу модульних тривимірних моделей формоутворення, процесів зняття припуску, інструмента та деталі, що оброблялась.

3. Запропонована методика зняття припуску, при якій припуск розподіляється вздовж чорнової, напівчистої, чистої та калібрувальної ділянок шліфувального круга.

4. Опираючись на результати аналізу модульних тривимірних моделей процесів зняття припуску, формоутворення, деталі та інструменту було розроблено модульну просторову модель правки абразивних кругів однокристалним правлячим інструментом із різною подачею.

5. Здобувач є співавтором отриманих патентів на корисну модель за темою дисертаційного дослідження: спосіб круглого чистового шліфування периферією орієнтованого круга (№134080 від 25.04.2019), спосіб шліфування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями круга і деталі (№145383 від 10.12.2020), спосіб шліфування кулачків розподільчого валу (№145532 від 28.12.2020).

6. Практичні рекомендації з використання наукових розробок впроваджені у виробництво на ТОВ «МГК-Черкаси» (м. Черкаси). Від впровадження результатів роботи очікується економічний ефект, який складає 25 тис. грн.

7. Методики та результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес Національного університету «Чернігівська політехніка».

Особистим внеском здобувача є отримання модульних тривимірних моделей інструмента, формоутворення та процесів зняття припуску для циліндричних поверхонь при шліфуванні орієнтованим кругом. Розроблено модульну просторову модель правки абразивних кругів однокристалним

правлячим інструментом із різною подачею. Проведені експериментальні та теоретичні дослідження процесу абразивної обробки циліндричних поверхонь орієнтованим кругом, заправленим з різними подачами на робочій та калібрувальній ділянках. Дослідження проведені автором особисто. Аналіз результатів та постановка задач виконані разом із науковим керівником. Дослідження були проведені спільно з співробітниками кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка».

Апробація результатів дисертації.

Матеріали дисертації доповідалися на LIY міжнародній науково-практичній інтернет-конференції el-conf.com.ua «Інновації науки XXI» (Київ, Україна 2020) і отримали позитивну оцінку.

На XI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (26-27 травня 2021. Чернігів.) дисертація доповідалась у повному обсязі. Також вона обговорювалася та була схвалена на розширеному науковому семінарі кафедри «Автомобільного транспорту та галузевого машинобудування» (м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка», 05.01.2021 р.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи було опубліковано 14 наукових праць, з яких: 5 у наукових фахових виданнях України, 2 у наукових журналах, що входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, отримано 3 деклараційні патенти України на корисну модель, прийнято участь у 3 міжнародних конференціях.

РОЗДІЛ 1

МЕТА, ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ

Перший розділ присвячено аналізу існуючих способів абразивної обробки циліндричних поверхонь деталей при паралельних та схрещених осях інструмента та деталі, створеним тривимірним моделям формоутворюючих систем верстатів, інструментальних і оброблюваних поверхонь, зняття припуску. В результаті проведеного аналізу сформульовано мету і основні завдання дослідження.

Роль абразивного шліфування серед процесів механічної обробки постійно зростає у зв'язку з появою нових і вдосконаленням існуючих способів, які відрізняються від методів лезвійної обробки більш високою точністю, продуктивністю, можливістю обробки заготовок, що мають високу твердість.

Велика кількість вчених зробили значний внесок у впровадження та розвиток абразивної та алмазної обробки, наприклад:

Р.Р. Агасарян [2], А.К. Байкалов [4], С.М. Братан [8], Ю.М. Внуков [12], А.П. Гавриш [13], А.І. Грабченко [14], В.І. Дикушин [27], В.Л. Доброскок [28], Н.В. Зубкова [33], Л.П. Калафатова [35], В.В. Кальченко [36], В.І. Кальченко [45], В.В. Коломієць [63], С.М. Корчак [64], Д.В. Криворучко [65], В.І. Лавриненко [71], Ф.В. Новіков [86], Ю.К. Новосьолов [89], Б.А. Перепелиця [96], О.А. Пермьяков [97], Ю.В. Петраков [98], М.Ф. Семко [111], Ю.А. Сизий [113], М.С. Степанов [119], М.Д. Узунян [120], В.О. Федорович [123], А.Н. Шелковой [130], А.В. Якімов [133], П.І. Ящерицин [135], та інші.

В умовах ринкової економіки все більш високі вимоги пред'являються до якості виробів. Найбільш важливими і важкодосяжними параметрами є точність розмірів, форми, взаємного розташування, шорсткість поверхонь деталей, які безпосередньо впливають на надійність та довговічність виробів.

Як показують дослідження підвищення точності виготовлення деталей пов'язано зі зростанням собівартості в гіперболічній залежності, тому для досягнення високих техніко-економічних показників найбільш перспективним є

вдосконалення способів обробки і застосування нових рішень при обробці високоточних деталей.

Складним науковим та виробничим завданням, рішення якого має велике значення для народногосподарського комплексу України, є підвищення ефективності круглого шліфування поверхонь деталей. Цей метод є найрозповсюдженішим. Він забезпечує необхідні показники точності та якості деталей з циліндричними поверхнями та знаходить своє застосування у різних галузях машинобудування.

1.1 Деталі з циліндричною поверхнею обертання

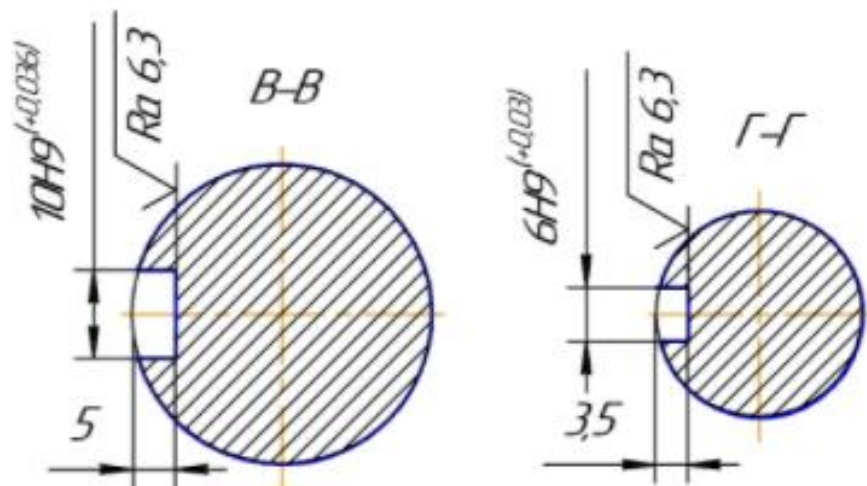
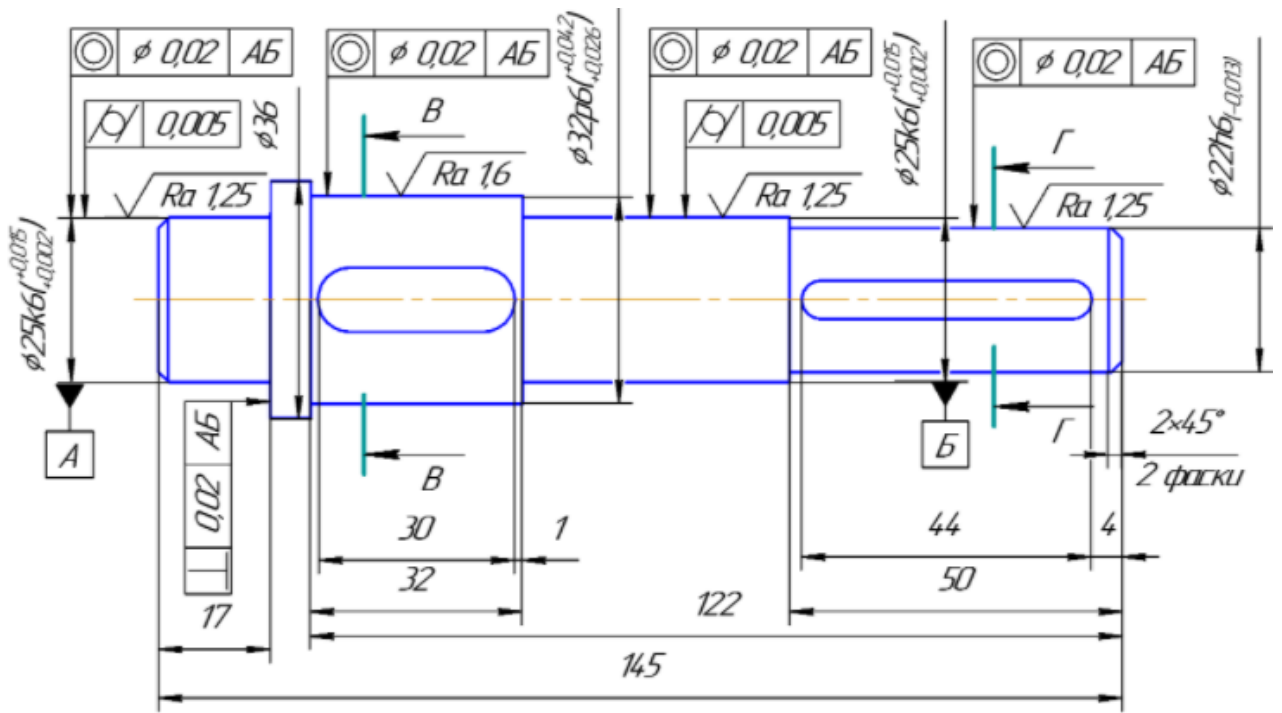
Деталі з високоточними робочими циліндричними поверхнями входять до багатьох вузлів та механізмів сучасних конструкцій машин (рис. 1.1). До таких деталей належать: різноманітні вали, вісі (рис. 1.1 а), втулки (рис. 1.1 б), пальці (рис. 1.1 в) та ін.

До них висуваються високі вимоги по точності розмірів, форми, шорсткості, фізико-механічних властивостей поверхонь, направлені на підвищення експлуатаційних характеристик деталей.

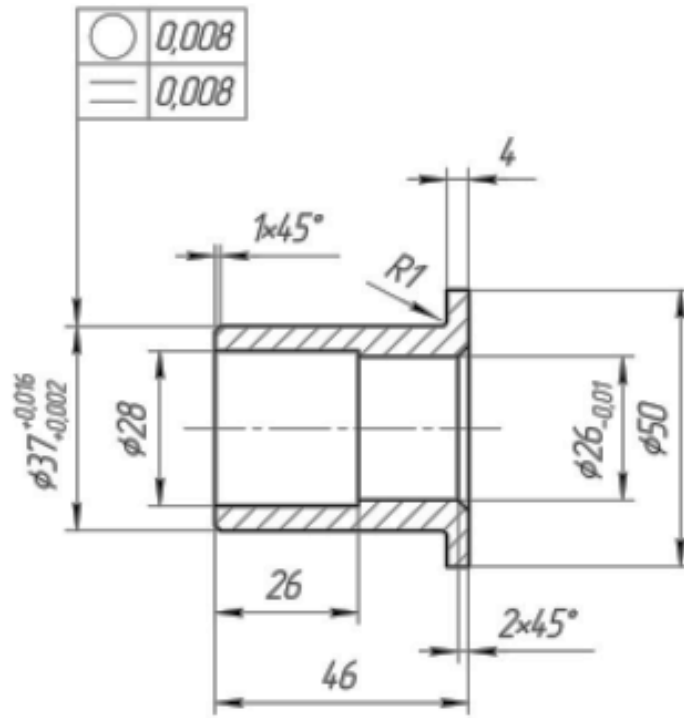
Так, наприклад, для вала редуктора, зображеного на рис. 1.1, а необхідно забезпечити точність циліндричних поверхонь по шостому квалітету точності, відхилення від співвісності 0,02 мм, відхилення від циліндричності 0,005 мм, шорсткість за параметром R_a 1,25 мкм.

Для втулки (рис. 1.1 б) точність циліндричної поверхні по шостому квалітету точності, відхилення від округлості 0,008мм.

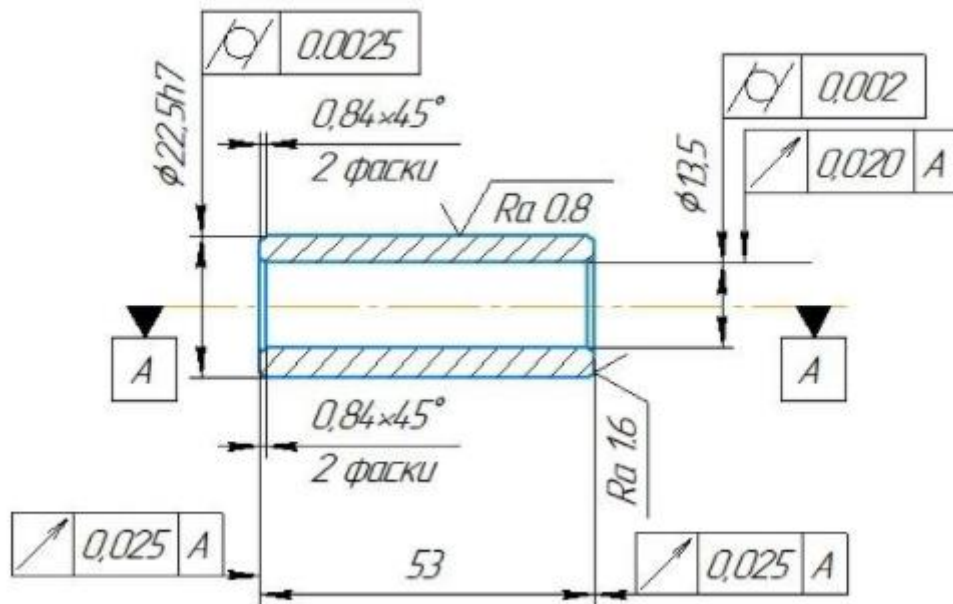
Для поршневого пальця автомобіля (рис.1.1 в) точність циліндричної поверхні по сьомому квалітету точності, відхилення від циліндричності 0,0025мм, шорсткість за параметром R_a 0,8 мкм. Для забезпечення високої стійкості до зносу він повинен мати твердість поверхні HRC 55...60, що досягається загартовуванням на глибину $h=1-1,5$ мм.



a)



б)



в)

Рисунок 1.1 – Деталі з циліндричною поверхнею обертання

1.2 Аналіз відомих способів абразивної обробки деталей з циліндричною поверхнею

Існує декілька способів круглої абразивної обробки деталей з циліндричними поверхнями. Серед яких найбільшого розповсюдження має багатопрохідна абразивна обробка периферією інструменту при паралельних осях інструмента і деталі [1, 133, 140] (рис. 1.2).

Поздовжню подачу D_s в мм на оберт деталі 1 вибирають рівною висоті H абразивного круга. Цей спосіб найбільш продуктивний. Проте він є недостатньо точним, тому що має нестабільне положення формоутворюючої ділянки абразивного інструменту, так як відбувається його нерівномірний знос. Внаслідок зменшення величини подачі підвищується точність, проте продуктивність обробки знижується. Тому застосування даного способу зустрічається переважно для обробки деталей із середніми по точності квалітетами.

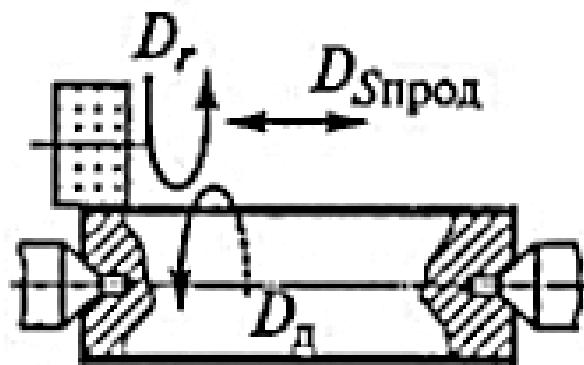


Рисунок 1.2 – Спосіб багатопрохідного шліфування периферією циліндричного круга

Для підвищення продуктивності обробки застосовується метод глибинної однопрохідної абразивної обробки інструментом (рис.1.3), що має забірний конус [79], яким і забезпечується зняття основного припуску, а розвантажена циліндрична формоутворююча ділянка поверхня формує остаточну точність обробки. Недоліком такого способу вважається обмежена можливість використання, так як забірний конус абразивного інструмента при зміні величини припуску буде задіяний не повністю, зменшуючи продуктивність

обробки.

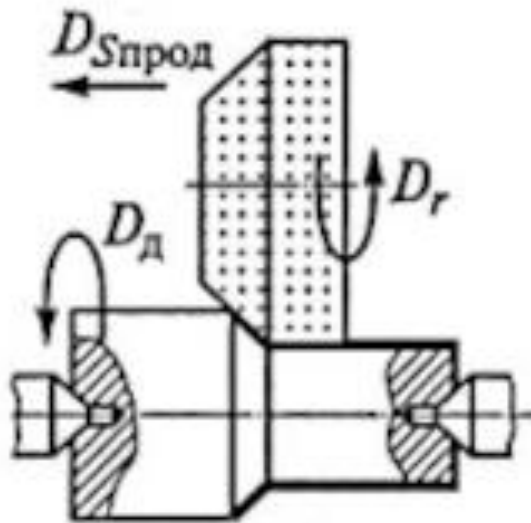


Рисунок 1.3 – Спосіб однопрохідного глибинного шліфування із забірним конусом інструмента (нема посилання по тексту)

При обробці методом поперечної подачі (рис. 1.4 а, б) шліфувальний круг рівномірно або дискретно подається в радіальному напрямку. Наприкінці обробки проводиться виходжування. Цей метод більш продуктивний, ніж шліфування з поздовжньою подачею. Точність обробки істотно залежить від геометричній точності круга. Круг необхідно частіше правити. Цим методом можна обробляти короткі фасонні поверхні. За однопрохідною схемою круга надають осцилюючі руху вздовж осі заготовки, що підвищує точність обробки. Дана схема застосовується для чорнової і чистової обробки коротких шийок заготовок великої жорсткості, конічних і фасонних поверхонь. При багатопрохідної схемі (уступами) можлива послідовна обробка декількох шийок, що забезпечує малу величину відхилення від співвісності оброблених поверхонь. Дана схема застосовується для чорнової і чистової обробки коротких: шийок заготовок великої жорсткості (ступінчасті вали, блоки шестерень, шийки колінчастого вала); конічних і фасонних поверхонь.

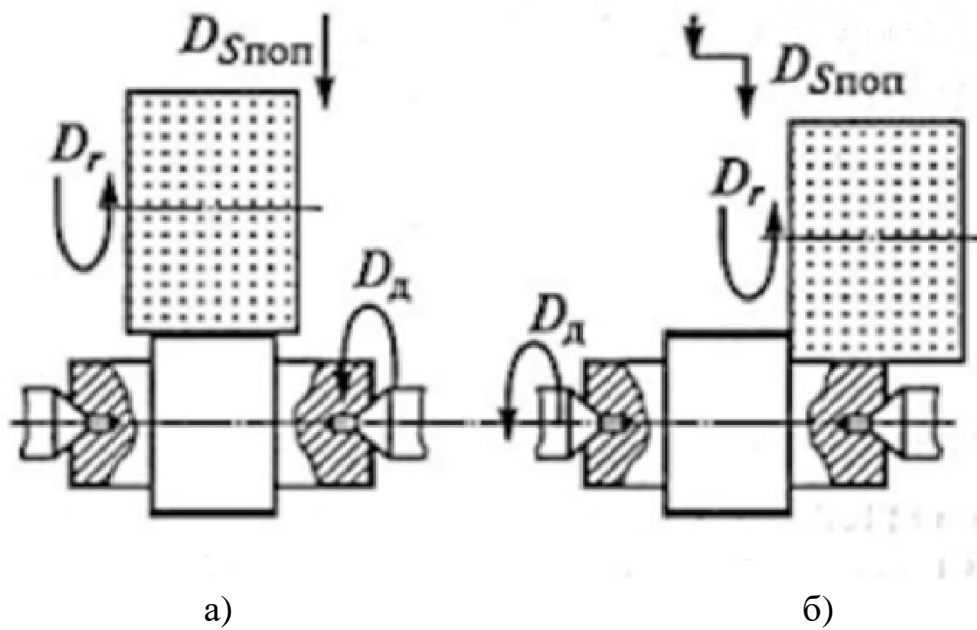
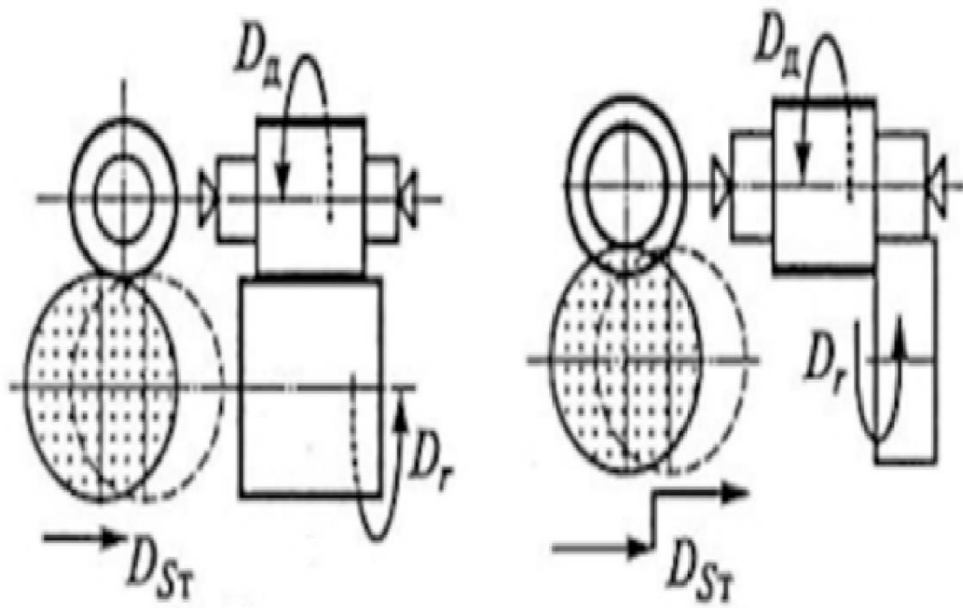


Рисунок 1.4 – Спосіб однопрохідного і багатопрохідного шліфування з поперечною подачею

При обробці з тангенціальною подачею шліфувальному кругу надається рівномірний або дискретний рух подачі в тангенціальному напрямку (рис.1.5 а, б). Перевага методу полягає в тому, що: в кінці робочого ходу об'єм знімаемого металу поступово зменшується, в момент збігу осей круга і заготовки відбувається виходжування. Шліфувальну бабку верстата можна розташувати внизу верстата; істотно підвищується точність обробки; полегшується автоматизація процесу. При однопрохідній обробці можна шліфувати фасонні поверхні. При багатопрохідній обробці можливе послідовне шліфування декількох шийок. Дані схеми застосовуються для чорнового і чистового шліфування відносно коротких циліндричних, конічних і фасонних поверхонь.



а)

б)

Рисунок 1.5 – Спосіб однопрохідного і багатопрохідного шліфування з тангенціальною подачею

При необхідності одночасної обробки шийки і прилеглого до неї торця застосовують урізне шліфування з подачею круга.

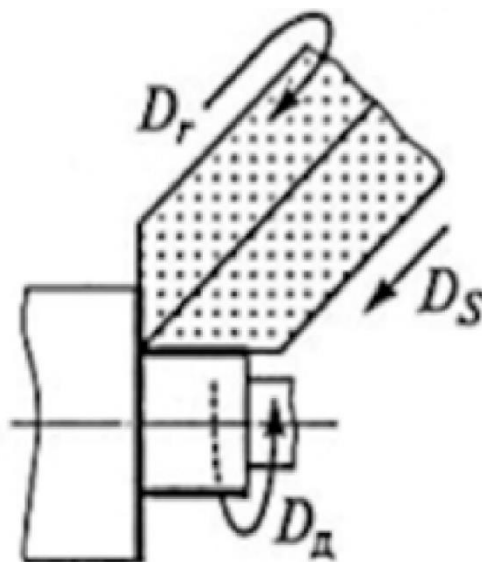


Рисунок 1.6 – Спосіб врізного шліфування

Фірма Junker розробила на верстатах Quickpoint 1000, Quickpoint 3000, Quickpoint 4000 [150] спосіб високошвидкісної абразивної обробки зі схрещеними осями деталі 1 і круга 2. При цьому були використані шліфувальні круги із алмазу або ельбору шириною h та висотою 4–6 мм при швидкостях інструменту до 140 м/с і обертанні деталей до 12000 об/хв. Фіксація формоутворюючої точки B круга 2 (рис.1.7) здійснюється за рахунок повороту інструменту на кут α відносно осі обертання оброблюваної деталі 1.

Це забезпечує рівномірний розподіл припуску вздовж профілю інструмента. Значна частина припуску припадає на торець круга. Величина матеріалу, що знімається за один прохід, розбивається на декілька частин. Це дозволяє розвантажити периферію круга та виділити деяку калібрувальну ділянку, що і забезпечить кінцеву точність обробки. Однак при однопрохідному чистовому шліфуванні валів з глибинами різання близько 0,3–0,5 мм вихідна точність обробки є недостатньою. А використання алмазних та ельборових кругів стає економічно невигідним внаслідок їх високої вартості та невеликої розвиненості рельєфу робочої поверхні.

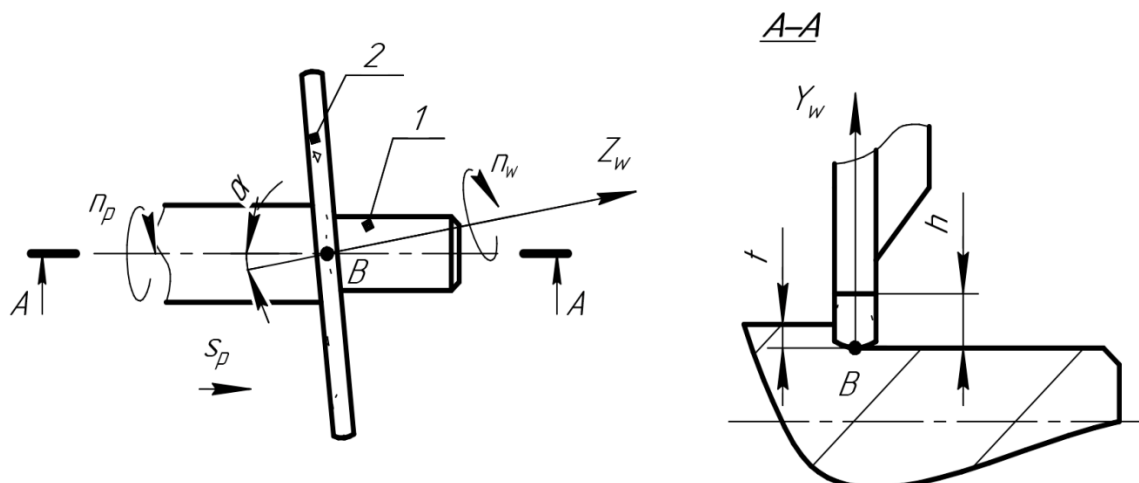


Рисунок 1.7 - Спосіб шліфування зі схрещеними осями інструмента та деталі фірми Yunker

Розроблено спосіб шліфування зі схрещеними осями абразивного круга та деталі [137, 38] (рис. 1.8), що дає змогу фіксувати формоутворюючу точку інструменту 1 за рахунок повертання осі обертання абразивного круга відносно

осі обертання оброблювальної деталі 2 на кут α . Саме схрещення осей круга і деталі при шліфуванні циліндричних поверхонь периферією круга підвищує точність та продуктивність обробки, визначає найефективніше розміщення формоутворюючої ділянки. Суміщення вищезгаданої ділянки з нормаллю по координаті обробки надає здатність шляхом адаптивного керування компенсувати вплив зносу профілю інструменту на точність формоутворення і дає можливість підвищити стійкість абразивного круга. Найбільша величина припуску на обробку буде знаходитися в місці врізання інструмента з рівномірним зменшенням величини припуску до калібрувальної ділянки, яка забезпечує формоутворення поверхні деталі.

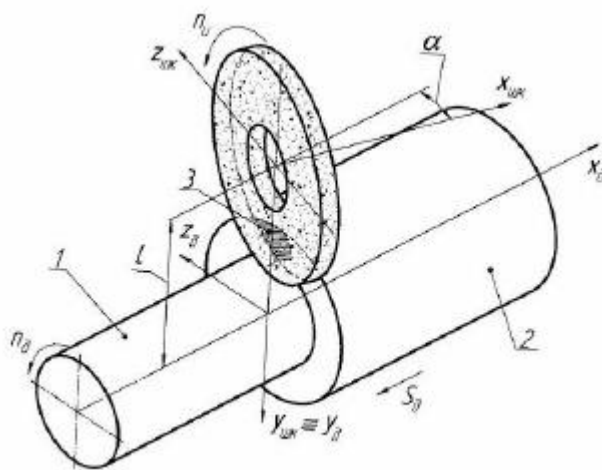


Рисунок 1.8 - Спосіб шліфування зі схрещеними осями інструмента та деталі

1.3 Аналіз тривимірного моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення циліндричної поверхні вала

Сучасне машинобудування поєднує в собі три чинники: гнучкість виробництва, високу продуктивність та високий рівень якості виробів. Забезпечується це застосуванням автоматизованих систем проектування та виробництва CAD/CAM. Геометричне основне ядро яких включає в себе компактні, ефективні та універсальні просторові моделі, що описують інструментальні поверхні, поверхні, які підлягають обробці та формоутворюючі системи верстатів.

В роботі [50] вперше наведені 3D моделі формоутворення, процесу зняття припуску, проведено аналіз впливу плями контакту та його параметрів на продуктивність фінішної обробки.

Просторове моделювання формоутворення зняття шару припуску, інструментів та поверхонь при обробці лезовими інструментами представлено в роботі [16], в якій при розрахунку повного об'єму шару, що зрізається і складання алгоритма його розрахунку використане наукове положення по ролі плями контакту і його параметрів, викладене в роботі [50] стосовно шліфування.

В роботі [89] при моделюванні процесів формоутворення використано багатопараметричне відображення тивимірного простору.

В розглянутих роботах представлені схеми формоутворення, на яких один різальний інструмент оброблює одну поверхню однієї деталі. Просторові тривимірні моделі формоутворення та зняття припуску на обробку при груповій обробці деталей, при умові, коли один інструмент одночасно обробляє декілька деталей.

В роботі [39] описані окремі просторові моделі формоутворюючих систем різноманітних верстатів, їх точності, але відсутні узагальнені просторові моделі та методики їх побудови.

Відомі просторові геометричні моделі процесів зняття припуску і формоутворення поверхонь включають в себе обробку наступних груп деталей: криволінійних, циліндричних, торцевих та інших [40, 41].

Аналіз схем формоутворюючих систем шліфувальних верстатів показав, що матриця переходу з систем координат шліфувального круга в систему координат деталі може являти собою добуток 15 однокоординатних матриць. Із дослідження даної матриці випливає, що вона є спільною і може бути використана для опису просторових моделей різних деталей, і при послідовному обнуленню аргументів ряду матриць можна отримати окремі просторові моделі формоутворюючих систем різних верстатів, а також поверхонь і ліній.

Дана загальна просторова модель робить можливими розрахунки за однією програмою окремі моделі різних поверхонь деталей, що спрощує процес просторового моделювання і вигідно відрізняється від відомих просторових моделей формоутворюючих систем верстатів і оброблюваних поверхонь.

Поширеною практикою в машинобудуванні є тривимірне моделювання різноманітних механічних процесів [15, 18, 122, 153]. При застосуванні цього методу з'являється можливість підвищення продуктивності та конкурентоздатності виробництва. Процеси зняття припуску, оброблювальна та інструментальна поверхні та формоутворення, які описуються просторовими моделями, є геометричною основою для систем автоматизованого проектування.

Однак, в існуючих 3D моделях не розглядаються особливості процесів зняття припуску, інструментальних поверхонь та точності формоутворення при однопрохідній чистовій обробці циліндричної поверхні деталі периферією орієнтованого абразивного круга.

У роботі [109] було приведено різноманітні способи визначення формоутворення за рахунок умови вихідних інструментальних поверхонь. Але, треба зазначити, що не враховувалися: шорсткість поверхні, яка оброблялася; режими абразивної обробки на периферії інструменту та величина припуску.

Проаналізувавши роботу [122] бачимо, що в ній наведені тривимірні моделі формоутворюючих систем великої кількості поверхонь деталей, які обробляються та верстатів. Проте, при відомій тривимірній моделі формоутворюючої системи верстата, наведені моделі не показують можливості створення частинних тривимірних моделей різноманітних поверхонь деталей, які обробляються.

Аналізуючи роботу [18] бачимо, що в ній розглядаються основи тривимірного моделювання алмазно-абразивних інструментів, та представлені методи моделювання напружено-деформованого стану зони абразивної обробки. Але в ній не наведено методики створення загальних моделей, що також врахували б і послідовне зняття поверхневого шару із деталі та процеси

формування.

В роботах [104, 106, 109] представлені тривимірні моделі процесів формування та вихідних поверхонь інструментів. Але відсутнє тривимірне моделювання, що враховують процеси зняття шару припуску із оброблюваної деталі.

Робота [39] наводить 3D моделі процесів зняття припуску та формування деталі з циліндричною поверхнею при круглій зовнішній абразивній обробці.

Робота [33] присвячена вихідній структурі багатопараметричних відображень, що базується на уніфікації 3D моделювання різальних інструментів та елементів припуску.

Робота [40] вперше наводить модульне 3D геометричне моделювання оброблювальних деталей, інструментальних поверхонь та формуючих систем різних шліфувальних верстатів. Робота [39] стала продовженням цього наукового дослідження.

Аналізуючи монографію [133] бачимо ієрархію загальних тривимірних моделей інструментальних поверхонь, деталей, що обробляються та формуючих систем шліфувальних верстатів. Але роботи [39, 40, 122] не висвітлюють узагальнюючі модульні 3D геометричні моделі формування циліндричної поверхні вала та зняття шару припуску на новий спосіб чистової однопрохідної абразивної обробки периферією орієнтованого круга.

Модульні тривимірні моделі формування, інструменту та процесів зняття припуску при абразивній обробці зі схрещеними осями ступінчатого вала та інструменту розроблені у роботах [50, 51]. Проте, в них не наводяться тривимірні моделі для процесу чистової однопрохідної абразивної обробки периферійною частиною орієнтованого круга.

Аналізуючи роботи [59-61] бачимо, що в них висвітлено загальне модульне тривимірне моделювання інструментальної поверхні, формування циліндричної поверхні вала та процесів зняття шару припуску базуючись на три уніфіковані модулі: формування, орієнтації та

інструментального. Представлені моделі надають можливість досліджувати та аналізувати точності формоутворення, процеси зняття припуску і надають змогу створювати нові ефективні способи чистової однопрохідної абразивної обробки валів периферійною частиною орієнтованого круга.

1.4 Аналіз методів дослідження та моделювання процесів, які відбуваються під час абразивної обробки

На процес абразивної обробки впливає велика кількість факторів: розташування зерен в абразивному крузі, радіус заокруглення вершини ріжучої кромки інструмента, глибина врізання в оброблювальну деталь, кут орієнтації абразивних зерен відносно деталі, що обробляється, та ін. Ці фактори дуже ускладнюють дослідження процесу абразивної обробки деталі. Окрім цього, сили різання також будуть мати різні напрямки та величину. Більш цього, невелика частина всієї роботи витратиться на пружне та пластичне деформування матеріалу нашої заготовки, а процес зрізання поверхневого шару оброблюваної деталі відбуватися не буде.

Теоретичні основи моделювання алмазно-абразивних інструментів, закони перерозподілу розмірів абразивних зерен, їх параметри, класифікацію методів формоутворення робочої поверхні, методологію тривимірного моделювання алмазно-абразивних інструментів наведено в роботі [13]. Також в цій роботі наведено велику кількість рекомендацій для вивчення процесу алмазної обробки.

Експериментальні результати мікрорізання одиничним абразивним зерном, механіку процесу шліфування та основні відомості про кінематику представлені в роботі [125]. Також в ній наводяться: закон розподілу різальних кромки, механізм утворення стружки та утворення шліфувальних рисок. Але, в цій роботі не досліджується процес деформування оброблюваної деталі різальними кромками круга.

У роботі [69] розглядаються: методологічні основи створення моделей різання використовуючи методи скінченних елементів; визначальні рівняння

матеріалів, що обробляються, прогнозування термомеханічної моделі процесу утворення стружки при обробці пластичних матеріалів; роз'яснені принципи застосування скінченно-елементних моделей при дослідженні та оптимізації робочих процесів обробки на практиці, та ін. Але, в даній роботі немає практичних та теоретичних рекомендацій для застосування цих моделей в створенні тривимірних моделей процесу деформування під час абразивної обробки пластичних матеріалів.

Методики визначення сил різання під час абразивної обробки зі схрещеними осями оброблюваної деталі та інструмента наведені в роботах [38, 155]. Але, не проаналізовано процес деформації деталі, що обробляється під час абразивної обробки.

1.5 Мета і завдання досліджень

Метою написання дисертаційної роботи – є підвищення ефективності шліфування циліндричних поверхонь орієнтованим кругом в режимі затуплення за допомогою створення теоретичних основ способу фінішної обробки периферією круга зі схрещеними осями деталі та інструмента. За базу було взято модульні тривимірні моделі, визначення умов та областей раціонального застосування, а також розробки модульної просторової моделі правки абразивних кругів однокристальним правлячим інструментом із різною подачею.

Для досягнення поставленої мети в роботі були вирішені наступні задачі:

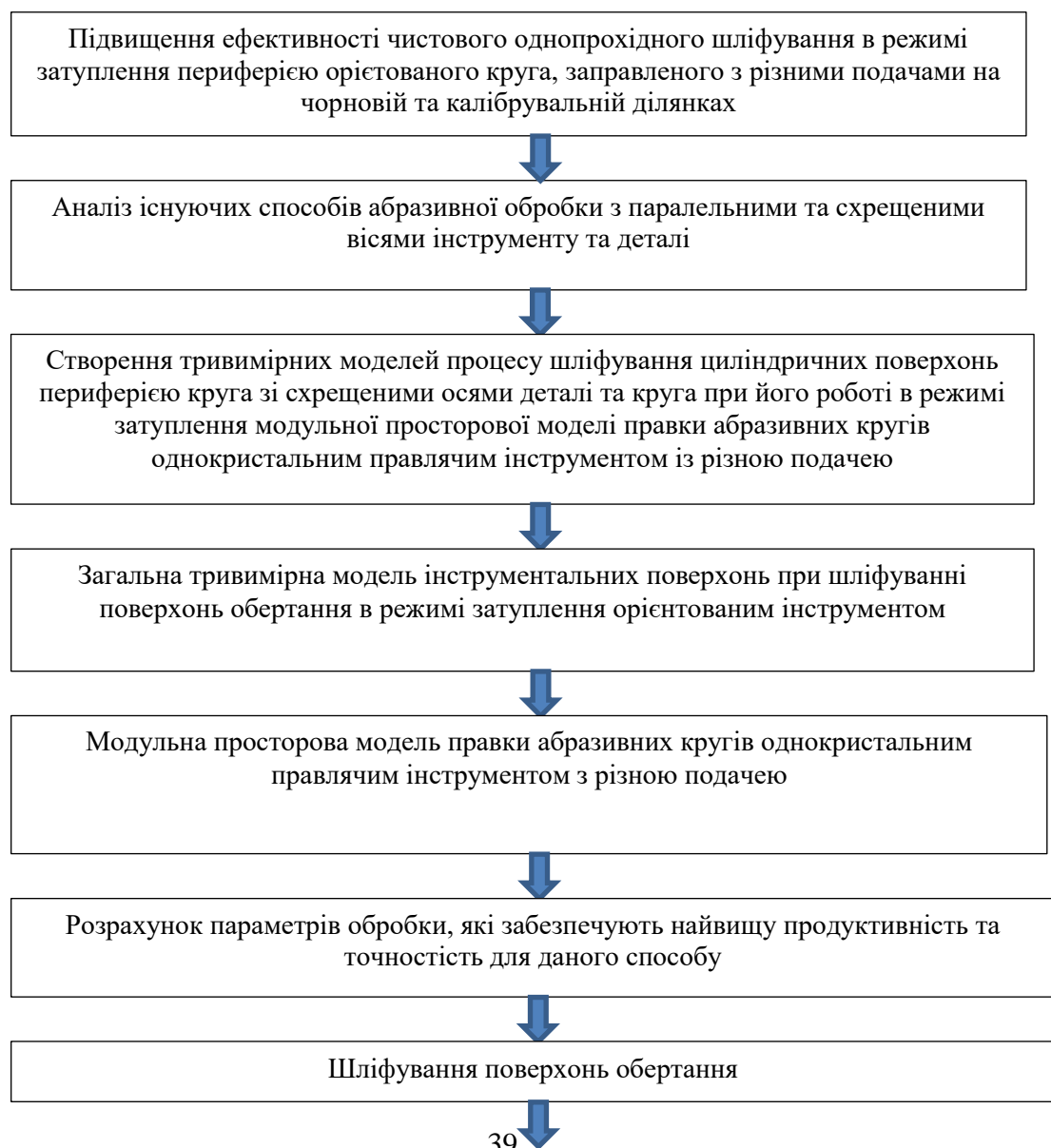
1. Проаналізувати існуючі методологічні підходи до вивчення та вдосконалення процесів абразивної обробки деталей з циліндричними поверхнями периферією круга зі схрещеними осями деталі та інструмента при роботі абразивного круга, що працює в режимі затуплення.
2. Проаналізувати методи дослідження та моделювання процесів, що відбуваються під час фінішної обробки деталі зі схрещеними осями круга та деталі під час роботи інструмента в режимі затуплення.
3. Змоделювати тривимірну модель процесу шліфування циліндричних

поверхонь периферією круга зі схрещеними осями інструмента та оброблюваної деталі при його роботі в режимі затуплення і створити модульну просторову модель правки абразивних кругів однокристалнимправлячим інструментом із різною подачею.

4. Дослідити точність формоутворення та розвиненість робочої поверхні круга після правки.

5. Провести дослідження у вигляді експерименту процесів зняття припуску, теплонапруженості та точності формоутворення при шліфуванні деталі з циліндричною поверхнею орієнтованим кругом при його роботі в режимі затуплення.

Структурно-логічна схема досліджень наведена на рис. 1.9



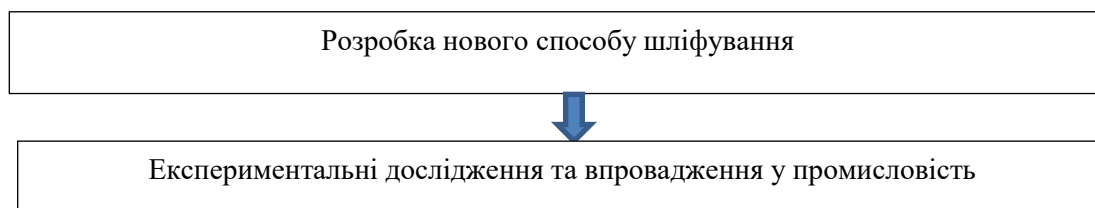


Рисунок 1.9 – Структурно-логічна схема досліджень

Висновки до розділу 1.

Проаналізувавши практичний досвід в галузі механічної обробки, наукові праці, літературні джерела та патенти можна зробити висновки:

1. Оброблюючи циліндричної поверхні способами, які зазначені в наукових роботах [1, 135, 149, 84], може відбутися нерівномірний знос абразивного інструмента, що призведе до зниження точності та якості верхнього шару оброблюваної деталі, так як положення формоутворюючої ділянки абразивного інструменту нестабільне. Різні способи абразивної обробки зі схрещеними осями деталі, що обробляється та інструмента представлені в роботах [131, 133, 137]. Вони надають можливість фіксувати формоутворюючу ділянку абразивного інструмента. Ці способи обробки мають резерви, які не використані для підвищення точності, якості та продуктивності процесу абразивної обробки. Розроблення загальних модульних 3D моделей абразивного інструмента а також процесів зняття шару припуску периферійною частиною абразивного круга за координатою обробки та формоутворення калібрувальною ділянкою, що розташовується на осі повороту абразивного круга в процесі обробки деталі з циліндричною поверхнею, дасть змогу створити новий спосіб чистової однопрохідної абразивної обробки орієнтованим кругом.

2. Аналізуючи наукові роботи [78, 79, 120, 121, 148], виявили, що підвищилася складність програмування процесу абразивної обробки на верстатах з ЧПК, так як абразивний інструмент має властивість нерівномірного зносу. При вирішенні даної проблеми виникає необхідність розроблення нового способу чистової однопрохідно абразивної обробки деталі з циліндричною поверхнею, що буде забезпечувати необхідний перерозподіл припуску повздовж периферійної частини профілю круга та буде сприяти його

рівномірному зносу.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ

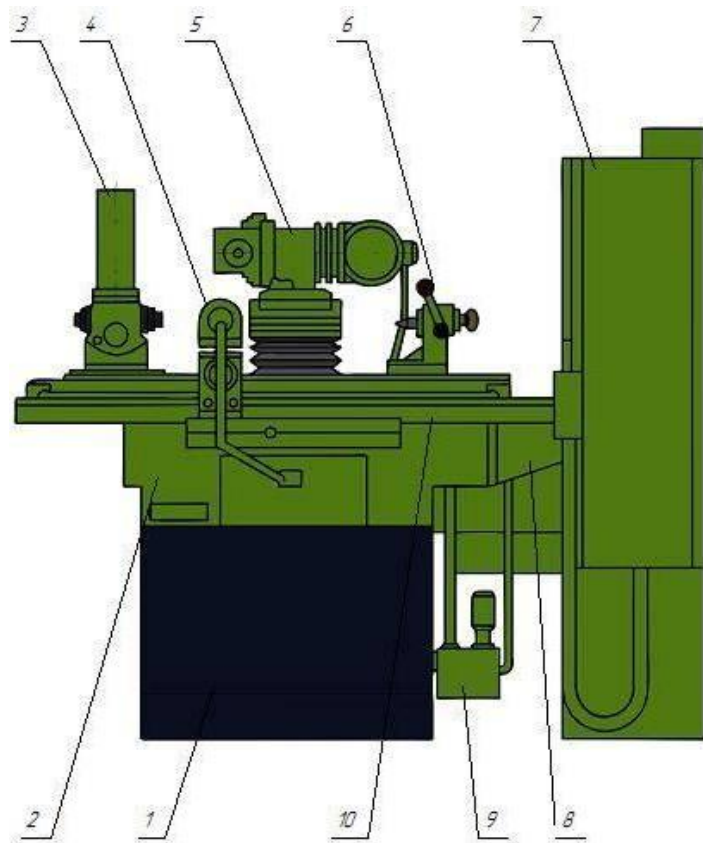
В даному розділі описуються методики проведення досліджень на базі експерименту процесу абразивної обробки деталі з циліндричною поверхнею периферійною частиною орієнтованого круга в режимі затуплення. При проведенні вищезгаданого експерименту були використані наступні обладнання: оптиволоконний датчик для заміру зносу круга, універсальний заточувальний верстат з ЧПК В3208-Ф3, тепловізор моделі ULIRVISION TI-384 та термопара типу «хромель-капель» для визначення загального розподілу тепла та температури в зоні різання, аналізатор потужності С.А 8220 для визначення потужності та сил різання, профілограф-профілометр моделі 201 та портативний профілометр RocketSurf III для визначення параметрів шорсткості, комп'ютерна техніка для фіксації та обробки отриманих даних.

2.1 Опис експериментального обладнання

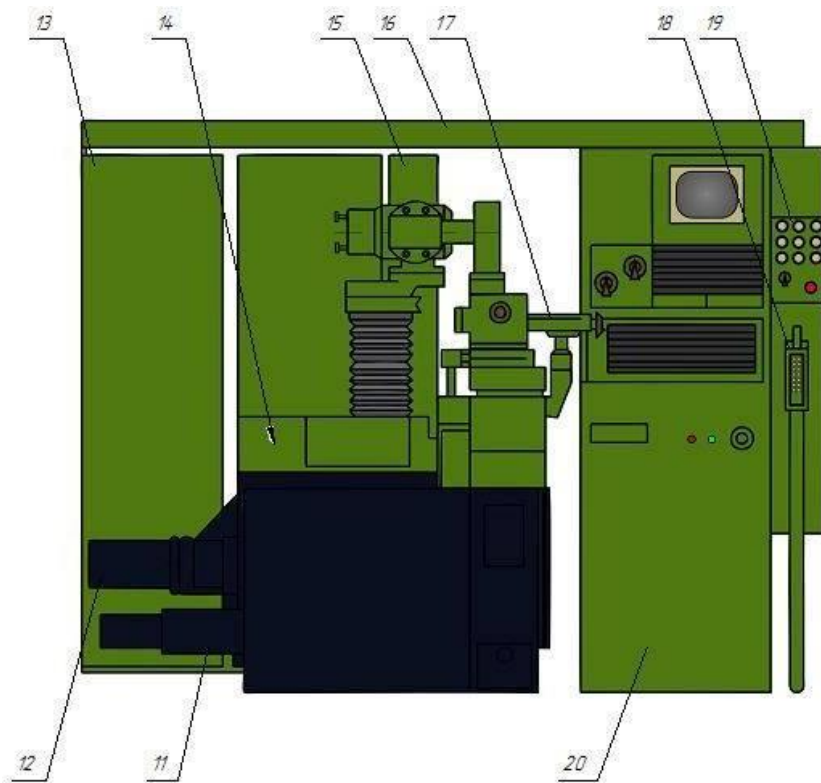
2.1.1 Загальні відомості про верстат з ЧПК В3208-Ф3

Універсально-заточувальний напівавтомат з ЧПК В3208-Ф3 призначений для заточування і доведення циліндричних інструментів по переднім і заднім поверхням, що розташовуються на периферії і торцю, абразивними кругами в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва.

Основні частини верстата (рис.2.1): 1 – станина; 2 – основа стола; 3 – бабка виробу; 4 – опора; 5 – бабка шліфувальна; 6 – задня бабка; 7 – електрошафа; 8 – механізм повздовжньої подачі; 9 – станція змащування; 10 – стіл; 11 – механізм вертикальної подачі; 12 – механізм поперечної подачі; 13 – електрообладнання електричної шафи; 14 – каретка з колоною; 15,16 – короб; 17 – кронштейн опори; 18 – пульт переносний; 19 – електрообладнання пульта керування; 20 – система ЧПК.



а



б

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд верстата з ЧПК В3208-ФЗ (а – вид з переду, б – вид з боку)

2.1.2 Прилад для вимірювання зносу шліфувального круга

Для вимірювання зносу абразивного інструменту був застосований оптиволоконний датчик (рис. 2.2), розроблений на кафедрі автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка».

Складові частини: оптичне волокно 1, зовнішній діаметр 10 мм., в якому розміщені два пучки: внутрішній, що випромінює світло, і зовнішній, що відбите світло сприймає. Якщо змінювати кут між внутрішнім пучком і відзеркалювачем, змінюється величина сили струму, що пропорційна зносу абразивного інструменту.

Величина зносу профілю круга визначалась за допомогою тарувального графіка, що пердставляє собою залежність переміщення елементів датчика (мкм) від величини сили струму (мА).



Рисунок 2.2 – Оптиволоконний датчик

2.1.3 Прилади для вимірювання температури в зоні різання

Для того щоб визначити температуру в зоні контакту оброблюваної деталі з абразивним кругом застосовувалась термопара. (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Розміщення термопари в середині вала

Спай термопари фіксувався у отворі на оброблюємій поверхні вала. Діаметр спаю складав приблизно 1,8-2 мм. За допомогою комп'ютерної техніки проводилась фіксація величини напруги. Величини температури визначалась за тарувальним графіком (рис. 2.4).

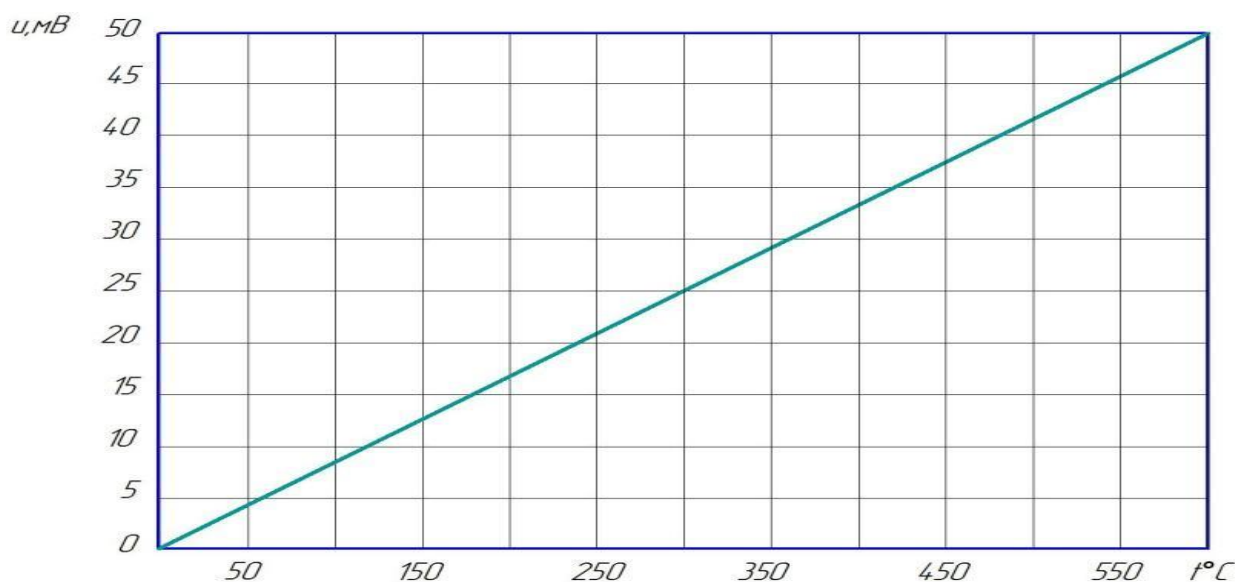


Рисунок 2.4 – Тарувальний графік ТЕДС термопари типу «хромель-капель» в залежності від температури

За допомогою тепловізора моделі ULIRVISION TI-384 (рис. 2.5) визначався розподіл температури на оброблюємій поверхні вала. Діапазон

вимірювання вимірювання приладу становить від -20°C до $+350^{\circ}\text{C}$ з похибкою вимірювання до $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Приладом автоматично захоплюється максимальна температура і на кольоровому дисплеї відображається результат.

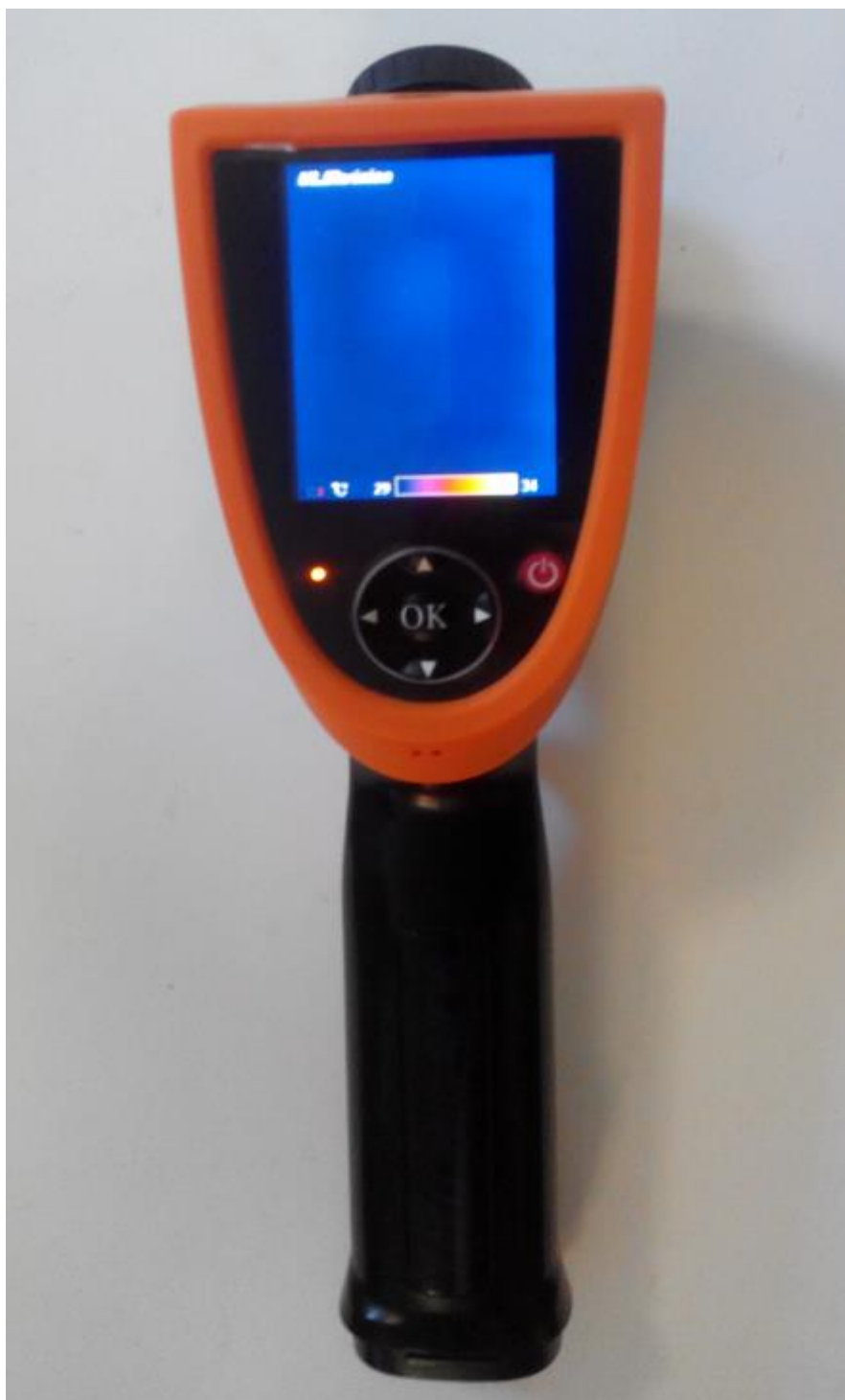


Рисунок 2.5 – Тепловізор моделі ULIRVISION TI-384

2.1.4 Прилад для вимірювання потужності

Аналізатор потужності C.A 8220 (рис. 2.6) призначається для вимірювання основних характеристик однофазної мережі таких як струм, напруга, потужність, гармоніки, та ін. Він також дозволяє робити вимірювання різноманітних характеристик, які необхідні для перевірки механізмів з обертовими елементами (час пуску, опір обмоток, струм, швидкість обертання та ін.) і забезпечує виконання точних вимірів в межах від декількох міліамперів до декількох кілоамперів з використанням відповідних датчиків при похибці вимірювання близько 0,5%.



Рисунок 2.6 – Аналізатор потужності C.A 8220

2.1.5 Прилади для вимірювання параметрів шорсткості поверхонь

Профілограф-профілометр моделі 201 (рис. 2.7) призначений для вимірювання параметрів шорсткості та хвилястості поверхонь виробів.



Рисунок 2.7 – Профілограф-профілометр моделі 201

Принцип його роботи полягає у визначенні нерівностей верхнього шару обробленої деталі за рахунок контакту алмазної голки з невеликим радіусом заокруглення з поверхнею. Коливання голки індуктивним шляхом перетворюються в напругу. Прилад дозволяє вимірювати параметр шорсткості R_a в діапазоні від 0,04 до 8 мкм з похибкою $\pm 1,5\%$.

Інший використовуваний прилад – це малогабаритний профілометра Rocket Surf (рис.2.8), призначений для вимірювання параметрів шорсткості з можливістю здійснення вимірювання в різних позиціях та під різними кутами. Принцип його роботи базується на прощупуванні нерівностей поверхні алмазною голкою щупа. Виникаючі при цьому механічні коливання щупа перетворюються у зміну величини напруги, яка пропорційна цим коливанням. Діапазон вимірювання величини шорсткості $R_a = 0,03-6,35$ мкм. Похибка

вимірювання профілометра за параметром шорсткості Ra становить 3%.
Величина мікронерівностей виводиться на екран прилада.



Рисунок 2.8 – Набір портативного малогабаритного профілометра
Pocket Surf

На рисунку 2.9 представлено сам прилад (1) та пластину із тарувальною поверхнею (2) з шорсткістю $Ra= 3,00$ мкм.

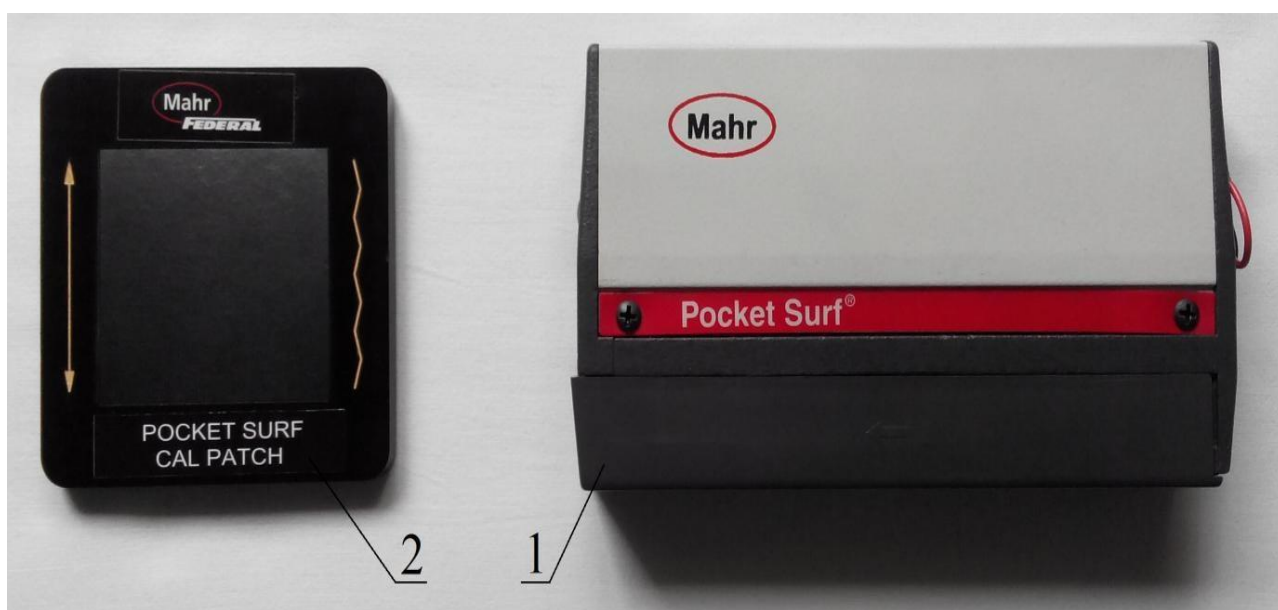


Рисунок 2.9 – Профілометр Pocket Surf та тарувальна пластина.

Прилад у вимірювальному положенні зображено на рис. 2.10.



Рисунок 2.10 – Профілометр у вимірювальному положенні

2.1.6 Інструмент для правки абразивного круга

Різна розвиненість периферійної частини шліфувального круга досягається його правкою алмазним олівцем 1 (рис. 2.11). Алмазний олівець закріплюється на стійці 3, яка розміщена на магнітній плиті 2. Магнітна плита, відповідно, розміщується на столі верстата, який здійснює зворотно-поступальний рух.

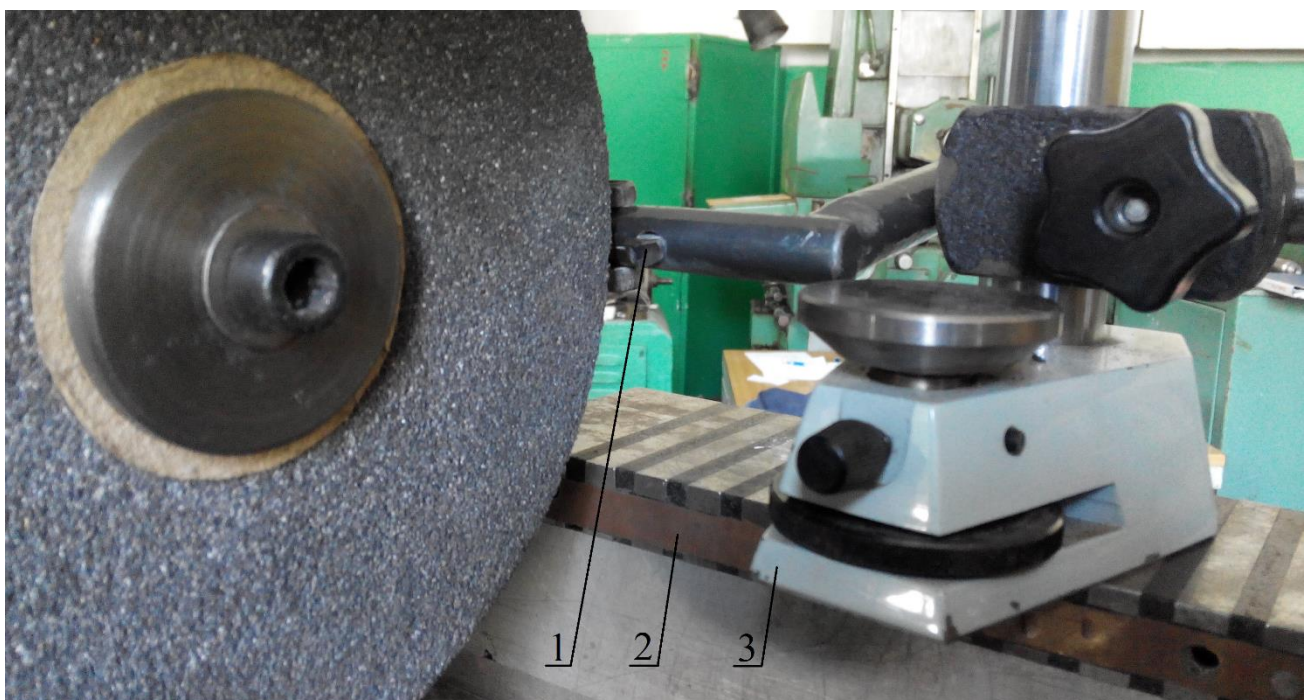


Рисунок 2.11 – Спосіб правки шліфувального круга

2.2 Дослідження процесу шліфування циліндричної поверхні вала периферією орієнтованого круга

Абразивна обробка деталі з циліндричною поверхнею проводилась на верстаті моделі В3208-Ф3. Відповідність нормам точності по ТУ2 5544518.112-86 підтвержено отриманими результатами після проведення випробування вказаного верстата:

- радіальне биття конічного отвору шліфувального шпинделя - 2 мкм при допуску 3 мкм;

- осьове биття шліфувального шпинделя 2 мкм при допуску 3 мкм;

- неперпендикулярність поперечного переміщення шліфувальної головки поздовжньому переміщенню стола 15 мкм (допуск 20 мкм);

- неперпендикулярність вертикального переміщення шліфувальної головки до робочої поверхні стола в напрямку поздовжнього переміщення стола і поперечного переміщення шліфувальної головки – 15 мкм при допуску 20 мкм;

- одновисотність розташування осі шліфувального шпинделя відносно робочої поверхні стола при повороті шліфувальної головки навколо вертикальної осі 35 мкм при допуску 45 мкм;

- дискретність переміщення за координатами X, Y, Z складає 0,001мм і кутового переміщення шпинделя виробу - 0,001 град.

Перед початком роботи необхідно виставити прийнятний кут орієнтації інструмента. Верстат В3208-Ф3 надає змогу в реалізації розробленого способу абразивної обробки деталі з циліндричною поверхнею периферійною частиною інструменту за рахунок можливості повертання шліфувальної бабки навколо горизонтальної та вертикальної осей (рис. 2.12).

Експериментальні дослідження проводилось при наступних початкових даних: зовнішній діаметр вала – 30 мм; матеріал деталі – сталь 40Х; шліфувальний круг – 200×25×32 13А 16 К3 СТ3 35 В.



Рисунок 2.12 – Конструкція шліфувальної бабки верстата В3208-ФЗ

На рисунку 2.13 зображено процес шліфування циліндричної поверхні вала периферією орієнтованого круга.

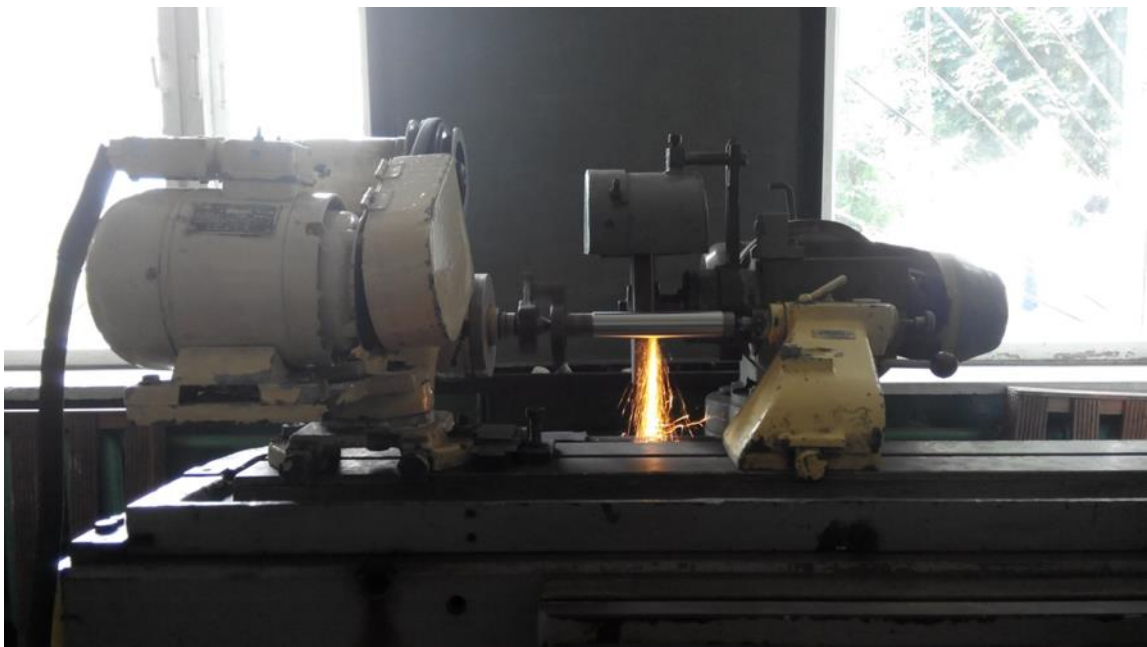


Рисунок 2.13 – Процес шліфування циліндричної поверхні вала периферією орієнтованого круга

В процесі проведення експерименту застосовувався метод математичного планування експерименту для визначення оптимальних значень повздовжньої подачі деталі, величини повороту абразивного інструменту та припуску на обробку деталі циліндричної форми. У якості параметра оптимізації Y була прийнята продуктивність шліфування Q .

При проведенні експерименту були визначені: перерозподіл температури в момент шліфування, температура в зоні обробки деталі, загальна та активна потужності та потужність холостого ходу.

У таблиці 2.1 наведені діапазони зміни кожного фактора та нульовий рівень, а також натуральні та кодовані значення факторів.

Таблиця 2.1 – Натуральні та кодовані значення факторів.

Інтервал варіювання та рівні факторів	Натуральні значення факторів			Кодовані значення факторів		
	S_d , мм/об	α , град	t , мм	X_1	X_2	X_3
Нульовий рівень	0,1	0,5	0,1	0	0	0
Інтервал варіювання	0,05	0,5	0,05			
Верхній рівень	0,15	1	0,15	+	+	+
Нижній рівень	0,05	0	0,05	-	-	-

Для розрахунку коефіцієнтів одержаної моделі, розроблено матрицю планування експерименту 2^3 з ефектом взаємодії (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Матриця планування експерименту 2^3 з ефектом взаємодії

№	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	Y
1	+	+	+	+	+	+	+	+	Експериментальні дані
2	+	-	+	+	-	-	+	-	
3	+	+	-	+	-	+	-	-	
4	+	-	-	+	+	-	-	+	
5	+	+	+	-	+	-	-	-	
6	+	-	+	-	-	+	-	+	
7	+	+	-	-	-	-	+	+	

8	+	-	-	-	+	+	+	-	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	--

Висновки до розділу 2

1. Для проведення експериментального дослідження процесу абразивної обробки деталі зциліндричною поверхнею периферійною частиною абразивного інструменту, в нашому випадку – це шліфувальний круг, в режимі затуплення використовувався верстат моделі В3208-ФЗ.

2. Визначення зносу шліфувального круга здійснювалось оптиковолоконним датчиком, розробленим на кафедрі автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка»

3. Для визначення температури в зоні шліфування було використано термопару типу «хромель-капель» а для розподілу температури під час обробки по поверхні тепловізор моделі ULIRVISION TI-384.

4. Аналізатором потужності С.А 8220 проводились вимірювання величини потужності, що витрачається в момент процесу абразивної обробки деталі з циліндричною поверхнею периферійною частиною орієнтованого абразивного круга.

5. Для визначення параметрів шорсткості поверхні вала використовувались профілограф-профілометр моделі 201 та портативний профілометром Pocket Surf.

6. Алмазний олівець використовувався для правки абразивного круга.

7. Прийнята продуктивність абразивної обробки Q виступала у якості параметра оптимізації Y . Було використано повний факторний експеримент типу 2^3 із взаємодіями. В якості факторів виступали величини повздовжньої подачі, припуску на обробку та повороту абразивного круга.

РОЗДІЛ 3

МОДУЛЬНЕ ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ ПЕРИФЕРІЄЮ ОРІЄНТОВАНОГО КРУГА В РЕЖИМІ ЗАТУПЛЕННЯ

У розділі наведено модульне тривимірне моделювання процесу формоутворення циліндричної поверхні деталі при абразивній обробці периферійною частиною орієнтованого абразивного круга в режимі затуплення. Розроблені тривимірні геометричні модульні моделі поверхні абразивного круга та деталі. На базі отриманої просторової моделі досліджено розподіл припуску вздовж різальної ділянки інструмента при шліфуванні орієнтованим кругом. Проведено дослідження складових сил шліфування із врахуванням різальних та деформуючих зерен. Розроблено модульну тривимірну модель правки периферійної ділянки шліфувального круга однокристальним алмазним інструментом при абразивній обробці зі схрещеними осями оброблювальної деталі та інструмента. Проведено динамічний розрахунок шпиндельного вузла.

3.1 Модульне тривимірне моделювання поверхні круга при шліфуванні циліндричної поверхні вала

При шліфуванні валів 1 (рис. 3.1) абразивний круг 2 подається на всю глибину різання t (рис. 3.1) і переміщується вздовж осі O_pZ_p системи координат деталі з подачею s_p . При цьому інструмент повертають навколо осі O_wY_w , яка розташована на відстані C від торця інструмента [59]. Величина кута орієнтації інструмента α залежить від висоти припуску, а торцева частина інструменту не бере участі в обробці. Схрещення осей інструмента та деталі забезпечує роботу всієї периферії круга, а зміщення осі O_wY_w забезпечує наявність калібрувальної ділянки довжиною C , що підвищує вихідну точність обробки циліндричного валика.

При постійній подачі s_p круга 2 на оберт деталі 1 величина припуску t від початкової точки i_1 на профілі круга до точки повороту A поступово зменшується: в точці i_1 величина припуску t , в точці $i_2 - t_1$, в точці $i_k - t_2$. При

цьому, формоутворююча точка A - є початком калібрувальної ділянки периферії інструмента, де припуск практично дорівнює нулю.

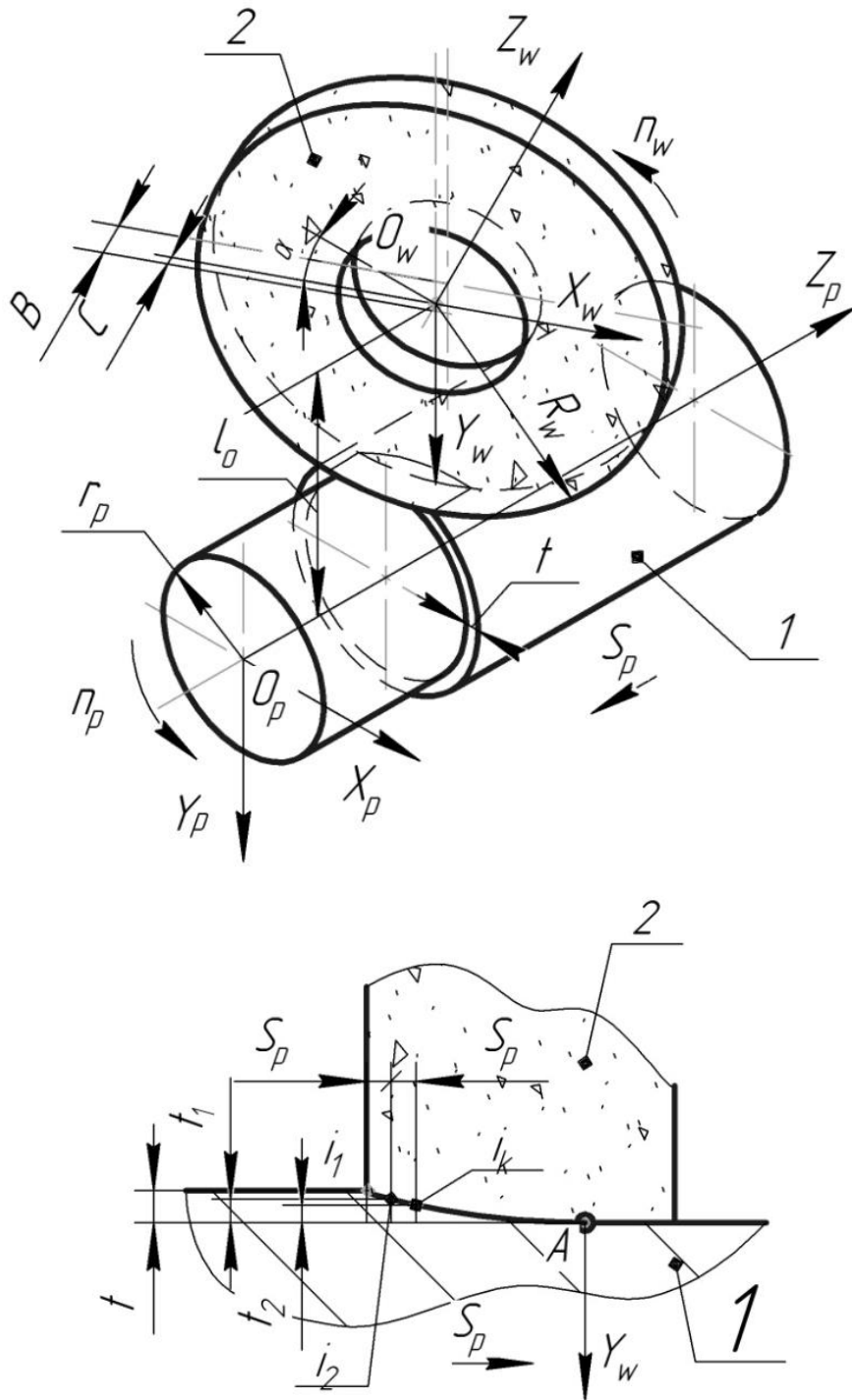


Рисунок 3.1 – Шліфування циліндричного вала периферією орієнтованого інструмента

Для створення моделі процесу абразивної обробки потрібно математично описати поверхні деталі, що оброблюється, абразивного круга та процес формоутворення при абразивній обробці зі схрещеними осями деталі та

інструмента.

Створення моделей при абразивній обробці зі схрещеними осями валика та абразивного круга була здійснена за допомогою програмного пакету MatchCAD.

Радіус вектор поверхні інструмента $\overline{GW}(z, \varphi)$ задається циліндричним модулем формоутворення:

$$\overline{GW}(z, \varphi) = MC_{z, \varphi, R_w}^w \cdot \bar{e}_4 = M3(z) \cdot M6(\varphi) \cdot M2(R_w) \cdot \bar{e}_4, \quad (3.1)$$

де MC_{z, φ, R_w}^w – циліндричний модуль формоутворення поверхні інструмента, представлений як матриця переходу радіус-вектору початкової точки \bar{e}_4 в систему координат інструмента;

$M1...M6$ – матриці переміщень та поворотів відносно координатних осей;

$R_w = 700$ мм – радіус шліфувального круга;

$z = 0...B$ – лінійна координата на периферії круга, змінюється від 0 до висоти інструмента $B = 60$ мм;

$\varphi = 0...360^\circ$ – кутова координата профілю шліфувального круга.

Поверхня \bar{P} циліндричного валу, який оброблюється, задається радіус-вектором поверхні інструменту, матрицею переходу та модулем орієнтації шліфувального круга в системі координат деталі:

$$\bar{P} = M^{tr} \cdot MC_{\gamma}^{or} \cdot \overline{GW} = M1(-l_o) \cdot M6(-\gamma) \cdot M3(-B + C) \cdot \overline{GW}, \quad (3.2)$$

де $M^{tr} = M1(-l_o)$ – матриця переходу із системи координат круга в систему координат деталі;

$l_o = R_w + r_p$ – відстань між осями інструмента та деталі;

$MC_{\gamma}^{or} = M6(-\gamma) \cdot M3(-B + C)$ – циліндричний модуль орієнтації інструмента;

γ – кут повороту шліфувального круга;

C – довжина калібрувальної ділянки круга.

Номінальний профіль обробленої поверхні циліндричного валика

описується циліндричним модулем формоутворення $C_{\gamma_p}^{sh}$:

$$MC_{\gamma_p}^{sh} = M3(\gamma_p \cdot p_z) \cdot M6(\gamma_p), \quad (3.3)$$

де γ_p – поточний кут повороту деталі навколо власної осі;

$$p_z = \frac{s_p}{2 \cdot \pi} \text{ – крок гвинтової лінії;}$$

s_p – осьова подача деталі.

Остаточно номінальна поверхня деталі з урахуванням рівнянь (3.1)-(3.3) може бути описана:

$$\begin{aligned} \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma,) = MC_{\gamma_p}^{sh} \cdot M^{tr} \cdot MC_{\gamma}^{or} \cdot MC_{z, \varphi, R_w}^w \cdot \bar{e}_4 = M3(\gamma_p \cdot p_z) \cdot M6(\gamma_p) \cdot \times \\ \times M1(-l_o) \cdot M6(-\gamma) \cdot M3(-B + C) \cdot M3(z) \cdot M6(\varphi) \cdot M2(R_w) \cdot \bar{e}_4. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Для визначення профілю оброблюваної поверхні валика скористаємось умовою контакту профілів, яка визначає лінію контакту деталі та інструментальної поверхні:

$$\bar{v} \cdot \bar{n} = \left(\frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma,)}{\partial z} \times \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma,)}{\partial \gamma} \right) \cdot \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma,)}{\partial \gamma_p} = 0, \quad (3.5)$$

де \bar{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні круга, знаходиться як диференціал радіус-вектору $\bar{P}(z, \gamma_p, \gamma,)$ за двома незалежним параметрами z та γ ; \bar{v} – вектор швидкості відносного руху круга в системі координат валика (диференціал радіус-вектору $\bar{P}(z, \gamma_p, \gamma,)$ за параметром γ_p , який моделює кут повороту оброблюваної поверхні за одиницю часу).

Знайти лінію контакту інструмента та оброблюваного валика можна за допомогою наступного розрахункового блоку:

$$\text{Line} = \begin{cases} \gamma \leftarrow 0 \\ \text{for } j \in 0..N_i \\ z \leftarrow z_{\min} + \frac{z_{\max} \cdot j}{N_i} \\ \gamma \leftarrow \text{root} \left(\left(\frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma,)}{\partial z} \times \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma,)}{\partial \gamma} \right) \cdot \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma,)}{\partial \gamma_p}, \gamma \right) \\ M^{(j+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} z \\ \gamma \end{pmatrix} \\ M^T \end{cases} \quad (3.6)$$

де $z_{\min}=0$, $z_{\max}=B$ – відповідно найменша та найбільша координати точок на профілі круга;

N_i – кількість точок на периферії інструмента;

γ – кутова координата точки контакту на поверхні інструмента;

M – матриця координат точок лінії контакту.

Отримані геометричні тривимірні моделі поверхонь валка 1 (рис. 3.2), інструмента 2 та площі їх контакту, обмежені лініями: 3 – контакту, 4 – перетину інструмента і торця заготовки; 5 – перетину зовнішнього циліндру заготовки і шліфувального круга. Як видно із отриманих моделей, у процесі зняття припуску задіяна вся периферія шліфувального круга.

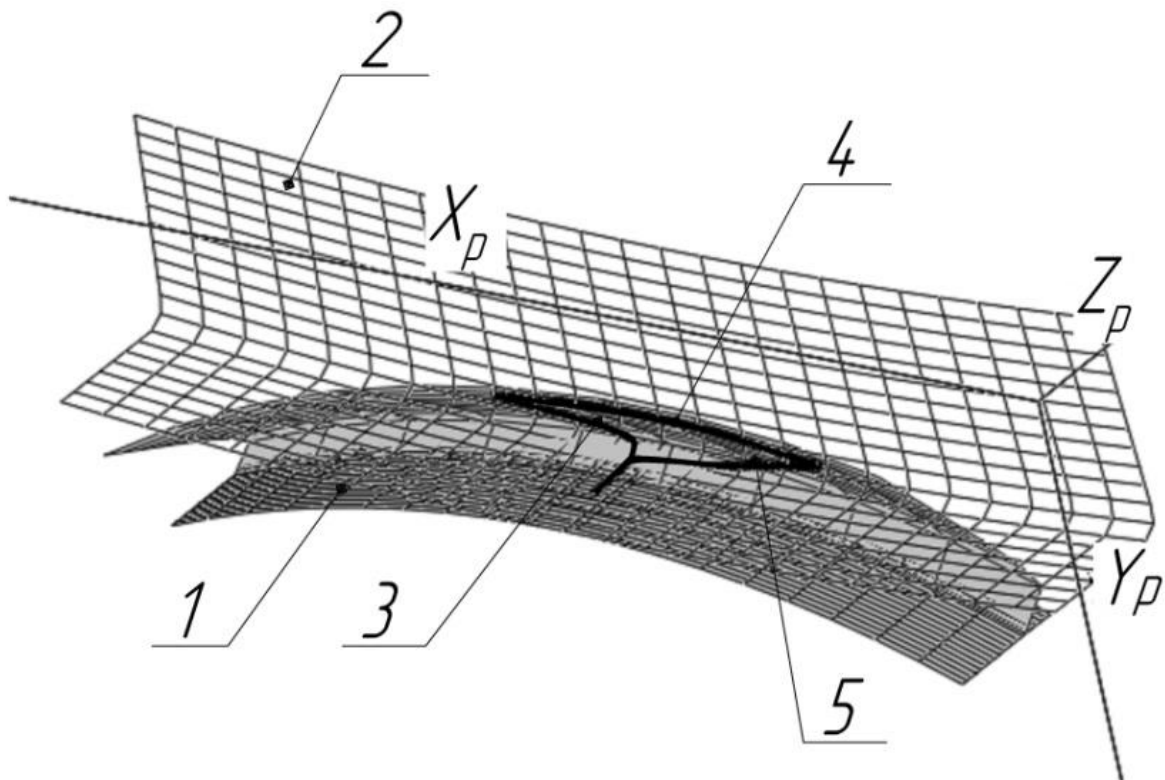


Рисунок 3.2 – Пляма контакту при шліфуванні валу 1 орієнтованим кругом 2, обмежена лініями: 3 – лінія контакту; 4 – лінія перетину інструмента і торця заготовки; 5 – лінія перетину зовнішнього циліндру заготовки і шліфувального круга

Із отриманого графіка проекції лінії контакту 3 на площину (рис. 3.3) видно, що припуск вздовж периферії круга розподілений рівномірно. Від координати z , що відповідає висоті B шліфувального круга (рис. 3.1), до координати $z=0$ (початок калібрувальної ділянки) припуск (заштрихована ділянка під лінією контакту 3) поступово зменшується і на калібрувальній ділянці практично дорівнює нулю. Отже, на периферії шліфувального круга суміщаються чорнова, напівчистова, чистова обробки та калібрування.

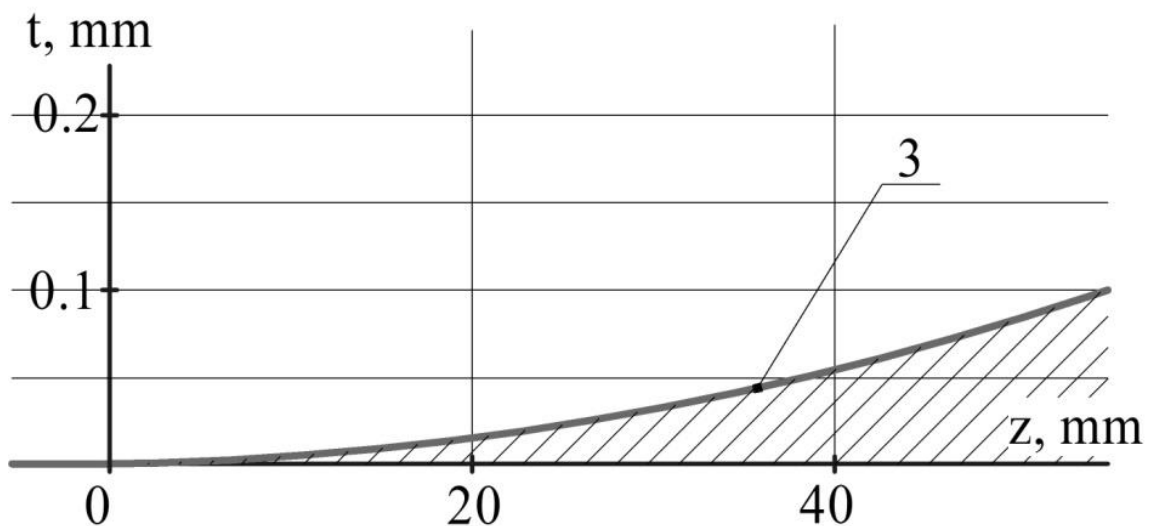


Рисунок 3.3 – Розподіл припуску t вздовж лінії контакту 3 шліфувального круга та деталі при шліфуванні орієнтованим інструментом: z – висота шліфувального круга

3.2 Тривимірне моделювання правки периферії абразивного круга однокристальним алмазним інструментом

З метою забезпечення відповідної до процесу обробки розвиненості чорнової, напівчистої, чистої та калібрувальної ділянок периферії круга необхідно змоделювати процес правки інструментальної поверхні.

Правку абразивного круга 1 (рис. 3.4) здійснюють одно кристальним

алмазним олівцем 2 із різальним зерном у формі октаедра.

Алмазний олівець необхідно подавати під кутом γ_{or} до оброблюваної поверхні шліфувального круга. Таке розташування правлячого інструмента забезпечує роботу граней алмазного зерна, які ще не зтупилися в процесі обробки.

Для розробки загальної тривимірної моделі зняття припуску та точності формоутворення периферійної ділянки абразивного круга при його правці необхідно описати інструментальну поверхню алмазного олівця 2 (рис. 3.4, А).

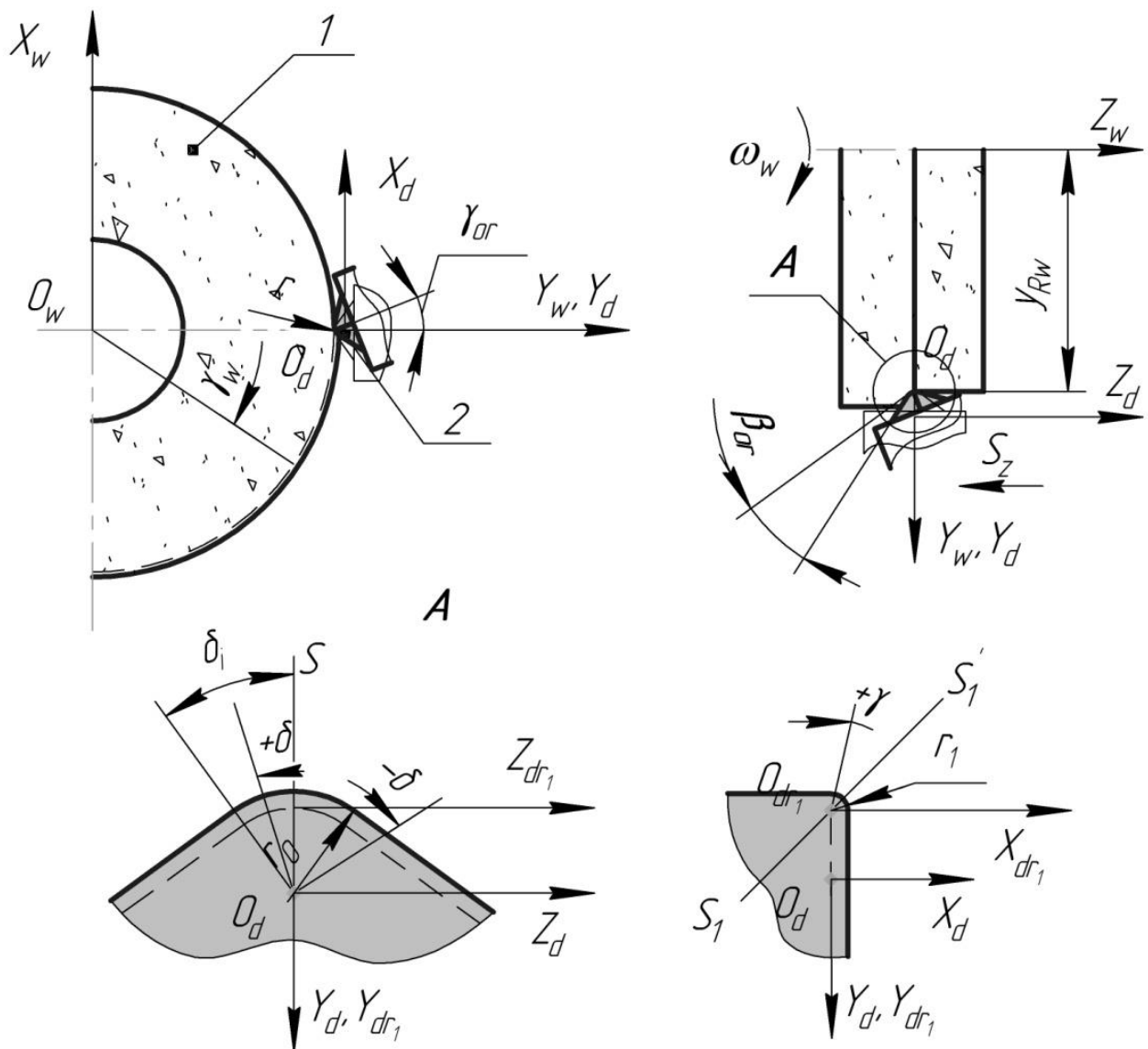


Рисунок 3.4 – Схема правки абразивного круга алмазним олівцем

Радіус-вектор \bar{r}_d точок різальної поверхні алмазного олівця задається

сферичним модулем $MS_{\delta \cdot r_0 \cdot \gamma \cdot r_1}^d$ його формоутворення:

$$\overline{RD} = MS_{\delta \cdot r_0 \cdot \gamma \cdot r_1}^d \cdot \bar{e}4 = M4(\delta) \cdot M2(r_0 - r_1) \cdot M6(\gamma) \cdot M2(r_1), \quad (3.7)$$

де r_1 – радіус, який визначає положення вершини алмазного олівця (рис. 6, А);

δ – кут повороту навколо осі O_dX_d (рис. 3.4, А), який задає радіус r_0 заокруглення різальної крайки олівця;

γ – кутова координата, яка задає радіус r_1 заокруглення різальної крайки.

Радіус-вектор $\overline{RD}(\delta, \gamma)$ різальної поверхні інструмента задається у вигляді двох прямолінійних ділянок та сферичної частини (рис. 3.4, А):

$$\begin{aligned} \overline{RD}(\delta, \gamma) = & MS_{\delta \cdot r_0 \cdot \gamma \cdot r_1}^d \cdot \bar{e}4 \cdot \Phi(|\delta|) - MS_{\delta \cdot r_0 \cdot \gamma \cdot r_1}^d \cdot \bar{e}4 \cdot \Phi(|\delta| - \delta_i) + \\ & + M2(h|\delta|) \cdot MS_{\delta \cdot r_0 \cdot \gamma \cdot r_1}^d \cdot \bar{e}4 \cdot \Phi(\delta - \delta_i) + M2(-h|\delta|) \cdot MS_{\delta \cdot r_0 \cdot \gamma \cdot r_1}^d \cdot \bar{e}4 \cdot \Phi(-\delta - \delta_i), \end{aligned} \quad (3.8)$$

де δ_i – кут, який визначає розташування радіусної кромки відносно лінії симетрії пластинки O_dS (рис. 3.4, А);

$h(\delta) = (r_0 - r_1) \cdot \text{tg}(\delta - \delta_i)$ – функція, яка визначає координату розташування точки вздовж конусних ділянок різальної поверхні олівця;

$\Phi(\delta)$ – функція Хевісайда, при додатному аргументі дорівнює одиниці, при від’ємному – нулю.

На рис. 3.5 представлена просторова модель різальної поверхні алмазного олівця з кутом при вершині $\delta_i = \pi / 4$ та радіусами округлення $r_0 = 1,5$ мм, $r_1 = 0,2$ мм.

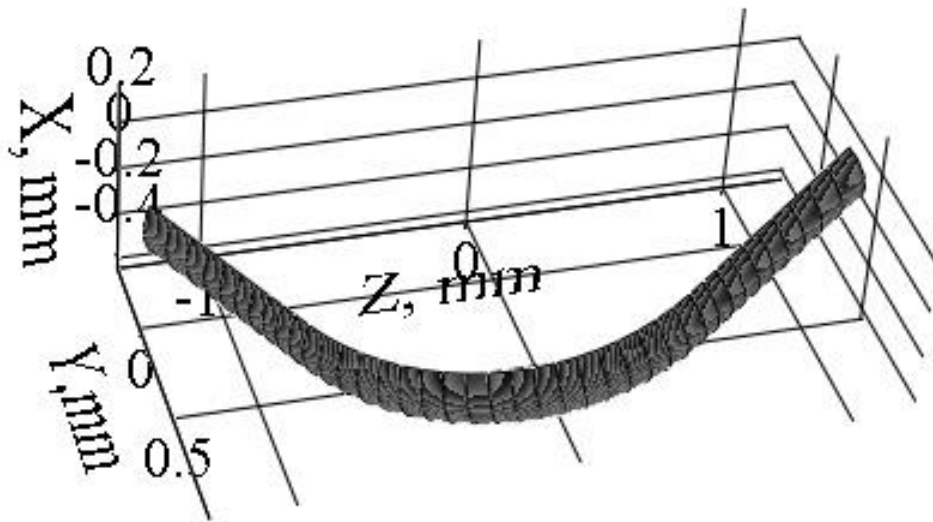


Рисунок 3.5 – Різальна грань поверхні алмазного олівця

Опишемо номінальну поверхню шліфувального круга 1 (рис. 3.4):

$$\begin{aligned} \overline{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w) &= MC_{p_z \cdot \gamma_w \cdot y_{Rw}}^{sh} \cdot MS_{\beta_{or} \cdot \gamma_{or} \cdot \chi_{or}}^{or} \cdot \overline{RD} = \\ &= M3(\gamma_w \cdot p_z) \cdot M2(-y_{Rw}) \cdot M6(\gamma_{or}) \cdot M4(\beta_{or}) \cdot M5(\chi_{or}) \cdot \overline{RD}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де $MS_{\beta_{or} \cdot \gamma_{or} \cdot \chi_{or}}^{or}$ – модуль орієнтації алмазного олівця у системі координат

круга;

$MC_{p_z \cdot \gamma_w \cdot y_{Rw}}^{sh}$ – циліндричний модуль, який задає рух алмазного олівця

відносно шліфувального круга;

R_w – радіус круга після правки; t – припуск на правку круга;

γ_{or} , β_{or} , χ_{or} – кути нахилу інструментальних поверхонь відносно осей $O_d Z_d$, $O_d X_d$, $O_d Y_d$ відповідно; y_{Rw} – переміщення системи координат інструмента в систему координат деталі, (радіус циліндричної поверхні шліфувального круга після правки);

γ_w – кут повороту оброблюваної поверхні круга навколо власної осі; p_z – параметр гвинтового руху різального леза олівця вздовж поверхні круга,

$p_z = \frac{s_z}{2 \cdot \pi}$; s_z – подача на оберт у відповідному напрямку (рис. 3.4).

Остаточне рівняння обробленої поверхні шліфувального круга із врахуванням моделей (3.8) і (3.9):

$$\overline{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w) = MC_{p_z \cdot \gamma_w \cdot y_{Rw}}^{sh} \cdot MS_{\beta_{or} \cdot \gamma_{or} \cdot \chi_{or}}^{or} \cdot MS_{\delta \cdot r_0 \cdot \gamma \cdot r_1}^d \cdot \bar{e}4. \quad (3.10)$$

Лінію контакту круга та алмазного олівця визначимо із рівності (3.11) аналогічно (3.5):

$$\bar{n} \cdot \bar{v} = \left(\frac{\partial \bar{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w)}{\partial \delta} \times \frac{\partial \bar{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w)}{\partial \gamma} \right) \cdot \frac{\partial \bar{R}_{GW}(\delta, \gamma, \gamma_w)}{\partial \gamma_w} = 0, \quad (3.11)$$

де \bar{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні алмазного олівця;

\bar{v} – вектор швидкості відносного руху олівця в системі координат круга.

Для знаходження кутів γ_{min} , γ_{max} , які визначають розташування лінії контакту на формоутворювальній грані алмазного олівця, скористуємось розрахунковим блоком, аналогічним блоку (3.6):

$$Ang = \begin{cases} \lambda \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..k \\ \delta \leftarrow \delta_{min} + \frac{\delta_{max}}{k} \cdot j \\ \gamma \leftarrow \text{root}(n(\delta, \gamma, 0) \cdot v(\delta, \gamma, 0), \gamma) \\ M^{(j+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} \gamma \\ \delta \end{pmatrix} \\ M^T \end{cases} \quad (3.12)$$

Рівняння (3.10) та (3.11) описують модульну тривимірну модель формоутворення периферійної ділянки шліфувального круга при правці.

3.3 Дослідження мікрорельєфу периферійної різальної ділянки абразивного круга після правки

На базі модульної тривимірної моделі формоутворення поверхні шліфувального круга при правці алмазним олівцем отримана периферійна поверхня шліфувального круга після його правки (рис. 3.6). Радіус шліфувального круга $R_w=600$ мм; висота $h=50$ мм, кут при вершині алмазного олівця $\gamma_i=\pi/4$, подача $s_z=0,1$ мм/об.

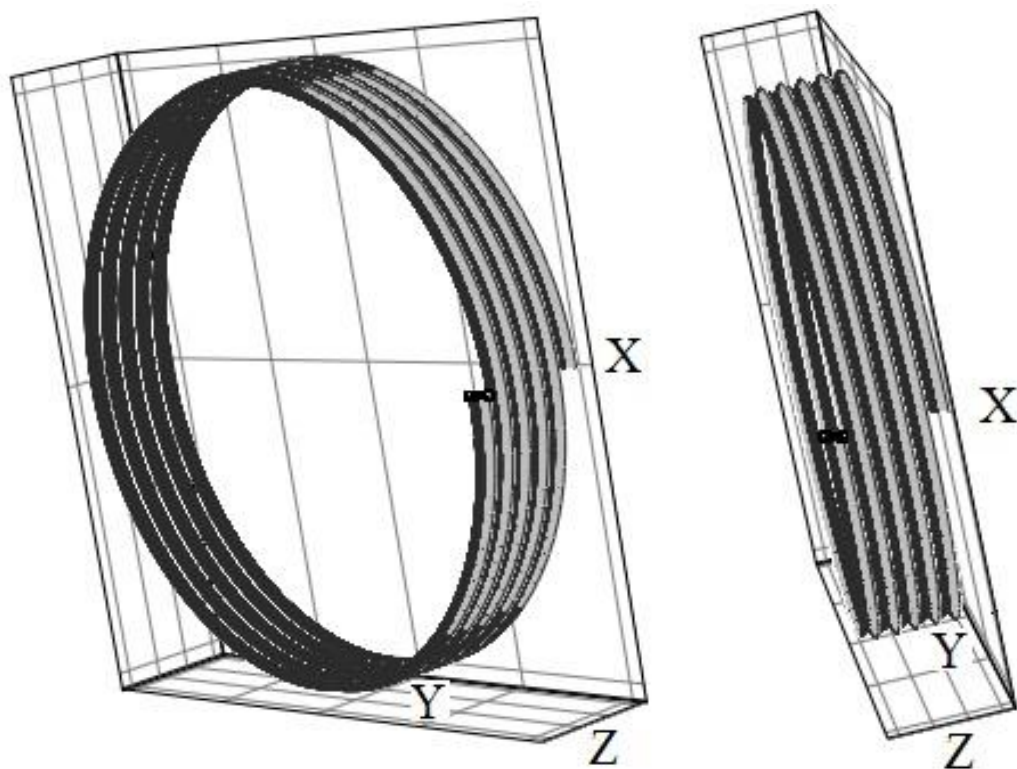


Рисунок 3.6 – Профіль периферії шліфувального круга після правки
однокристальним алмазним олівцем

Як видно із рис. 3.6, у результаті правки шліфувального круга однокристальним алмазним олівцем на периферії шліфувального круга утворюються геометрична шорсткість у формі гвинтових канавок. Висота канавок залежить від величини припуску та подачі правлячого інструменту. При постійній подачі s_z на оберт розміри канавок однакові, що забезпечує однакову розвиненість робочої поверхні шліфувального круга.

3.4 Спосіб правки абразивних кругів при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та циліндричної деталі

При шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та деталі виникає геометрична шорсткість Rz (рис. 3.7). Величина якої визначається як відстань від номінальної поверхні деталі до точки N перетину двох послідовних положень 1 та 2 проєкцій ліній контакту на площину круга.

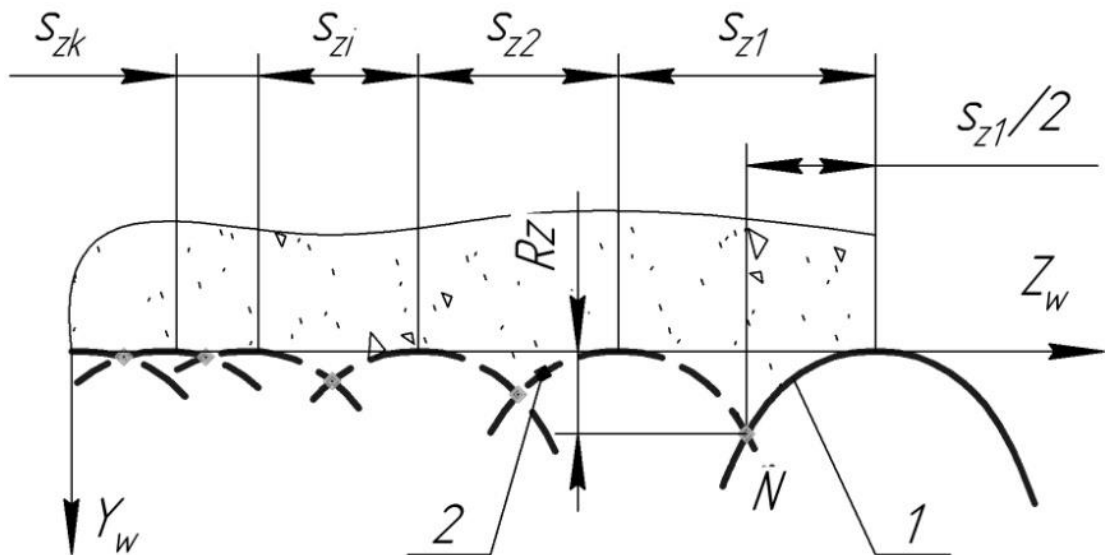


Рисунок 3.7 – Утворення геометричної шорсткості R_z на поверхні абразивного круга при правці однокристальним правлячим інструментом із різною величиною подачі s_z

Як видно із рис. 3.7, зміна величини подач від s_{z1} до s_{zi} забезпечує можливість керування розвиненістю рельєфом та різальними властивостями периферійної ділянки шліфувального круга.

Так, при шліфуванні валків стрічкопрокатних станів зі схрещеними осями інструмента та деталі величина припуску вздовж лінії контакту постійно змінюється. А на периферійній ділянці шліфувального круга суміщаються чорнова, чистова обробки та калібрування (рис. 3.3).

З метою забезпечення високої точності обробки валків при шліфуванні широким орієнтованим абразивним кругом пропонується правити його периферію з різною величиною подачі однокристального правлячого інструмента. Так, чорнові та напівчистові ділянки периферії круга правляться із більшими подачами s_{z1} , s_{z2} (рис. 3.7), чистові – з подачами s_{zi} , а калібрувальні – з подачами s_{zk} . При наближенні до чистової ділянки периферії круга подача правлячого інструмента поступово зменшується, а калібрувальну ділянку необхідно правити з однаковою подачею, щоб забезпечити високу точність поверхні валків. Величина подачі алмазного олівця залежить від величини припуску.

3.5 Дослідження зносу абразивного інструмента

Найчастіше, знос абразивного круга виражають у вигляді степеневі залежності [14]:

$$q = \frac{Q_a}{Q_{sp}}, \quad (3.13)$$

де Q_a – об’ємна кількість зношеного абразиву за одиницю часу, $\text{мм}^3 / \text{хв}$;

Q_{sp} – швидкість зняття матеріалу заготовки за той же самий час, $\text{мм}^3 / \text{хв}$.

Об’єм зношеного абразивного інструмента для ділянки профілю круга за одиницю часу визначається за допомогою рівняння [14]:

$$Q_a = k_\alpha \cdot 2\pi \cdot R_{tl} \cdot I_{tl}, \quad (3.14)$$

де R_{tl} – радіус абразивного інструмента

I_{tl} – знос інструмента при певній швидкості обробки в напрямку, нормальному до профілю круга, за одиницю часу, $\text{мм}^2 / \text{хв}$;

k_α – коефіцієнт, який враховує перекриття різальних кромки;

Величина швидкості елементарного зносу інструмента I_{tl} за час τ :

$$I_{tl} = \frac{C_{sp} \cdot Q_{sp}^{m_1} + C_{qin} \cdot Q_{qin}^{b_1}}{k_\alpha \cdot 2\pi \cdot R_{tl}}, \quad (3.15)$$

де Q_{qin} – питомий об’єм матеріалу заготовки, який деформується абразивними зернами i -ої ділянки n -го профілю круга, $\text{мм}^3 / \text{хв}$;

C_{sp}, C_{qin} – коефіцієнти питомого зносу в R_i -ій точці n -го профілю круга при $Q_{sp} = 1$ та $Q_{qin} = 1$;

m_1 – коефіцієнт, який враховує інтенсивність режиму обробки і стан різальної поверхні круга;

b_1 – коефіцієнт, який враховує інтенсивність режиму деформування матеріалу заготовки без його зняття.

Використовуючи рівняння (3.13)-(3.15), розрахована величина питомого зносу абразивного інструмента марки 200×25×32 13А 16 КЗ СТ3 35 В при

шліфуванні циліндричної поверхні із матеріалу сталь 40Х периферією орієнтованого круга в режимі затуплення, з припуском на обробку $t=0,1$ мм, яка склала $q = 0,0042$ мм³ / мм³.

3.6 Розрахунок сил шліфування при обробці циліндричної поверхні деталі периферією орієнтованого круга в режимі затуплення

При роботі круга в режимі затуплення величина сили тертя більша в порівнянні з роботою круга в режимі самозаточування, тому необхідно визначити складові сил шліфування, які виникатимуть при роботі круга в режимі затуплення. Скористаємось наступними залежностями [129]:

$$P_{yf} = P_{yrz} + P_{ydf}, \quad (3.16)$$

$$P_{zf} = P_{zrz} + P_{zdf}, \quad (3.17)$$

де P_{yrz}, P_{zrz} та P_{ydf}, P_{zdf} – складові сили від різальних зерен та пластично деформуючих зерен відповідно.

Кожна із складових сил P_{yrz}, P_{zrz} та P_{ydf}, P_{zdf} має декілька складових. Наприклад:

$$P_{yrz} = P_{yrz1} + P_{yrz2}, \quad (3.18)$$

де P_{yrz1} – радіальна складова сила від різальних абразивних зерен;

P_{yrz2} – сила тертя абразивних зерен об деталь.

$$P_{\text{yрz1}} = \frac{2 \cdot K_y \cdot B_{pa}}{A_f \cdot (1 + \varepsilon_{nv})} \cdot \left(\frac{2 \cdot \left[\left(A_f \cdot l_{kt} \cdot (1 + \varepsilon_{nv}) + a_{krz} + h_{zk} \right)^{\frac{7}{2}} - \left(a_{krz} + h_{zk} \right)^{\frac{7}{2}} \right]}{35} - \frac{2 \cdot h_{zsr} \left[\left(A_f \cdot l_{kt} \cdot (1 + \varepsilon_{nv}) + a_{krz} + h_{zk} \right)^{\frac{5}{2}} - \left(a_{krz} + h_{zk} \right)^{\frac{5}{2}} \right]}{15} \right) - 2 \cdot K_y \cdot B_{pa} \cdot \left(\frac{a_{krz}^{\frac{5}{2}}}{5} - h_{zsr} \cdot \frac{a_{krz}^{\frac{3}{2}}}{3} \right) \cdot l_{kt} \quad , \quad (3.19)$$

де $\varepsilon_{nv} = \frac{2 \cdot S_{nv}}{S_{pr}}$ – коефіцієнт навалів (відношення суми площ бокових

навалів до площі риски у поперечному перерізі):

S_{nv} – площа поперечного перерізу навала, м²;

S_{pr} – площа поперечного перерізу риски, м².

Для розрахунку позначимо:

$$A_f = \frac{V_{spd} \cdot \sin \alpha_{\max}}{\pi \cdot D_{cr} \cdot n_{cr} \cdot \sqrt{z_w \cdot F \left(h_{zk} + \frac{a_{zr\max}}{2} \right)} \cdot l_{kt}}$$

V_{spd} – швидкість повздовжньої подачі, м/хв.;

$$\alpha_{\max} = \arccos \frac{D_{cr} - 2 \cdot t_f}{D_{cr}} ;$$

t_f – глибина шліфування, м;

D_{cr} – діаметр шліфувального круга, м;

n_{cr} – частота обертання шліфувального круга, хв⁻¹;

z_w – число зерен, яке припадає на одиницю робочої поверхні шліфувального круга, 1/м²;

$a_{zr\max}$ – максимальна глибина врізання зерна в заготовку, м.

Для розрахунку позначимо:

$$B_{pa} = \tau_{mt}(T) \cdot n_{zcr1} \cdot c_{cr} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{zb}}$$

$\tau_{mt}(T)$ – напруження зсуву, величина якої залежить від температури нагріву оброблюваної деталі, Н/мм² [116];

n_{zcr1} – число зерен на поверхні шліфувального круга, в перерізі його площиною, яка паралельна вісі круга, 1/м;

c_{cr} – стала, яка залежить від характеристики круга;

ρ_{zb} – початковий радіус окружності, описаної біля граней вершини різальної кромки зерна, м.

K_y – коефіцієнт відповідно до [31];

l_{kt} – довжина контакту зерна із заготовкою, м;

a_{krz} – критична глибина мікрорізання, м;

h_{zk} – сумарна величина зкалювання зерен під час правки та розмірного зносу шліфувального круга, м;

h_{zsr} – середній знос зерен, який здійснюється мікрорізанням, м.

$$P_{yrs2} = \frac{\pi \cdot \rho_{zb} \cdot h_{zsr} \cdot n_{zcr1} \cdot c_{cr} \cdot \tau_{mt}(T)}{3 \cdot \mu_s} \cdot \left(h_{zk} \cdot l_{kt} + \frac{A_f \cdot l_{kt}^2 \cdot (1 + \varepsilon_{nv})}{2} \right), \quad (3.20)$$

де μ_s – коефіцієнт внутрішнього тертя.

Радіальна складова сили шліфування від зерен, які здійснюють пластичну деформацію:

$$P_{ydf} = P_{ydf1} + P_{ydf2}, \quad (3.21)$$

де P_{ydf1} – радіальна складова сили шліфування від пластично деформуючих зерен, яка пов'язана із відтисненням матеріалу заготовки, Н;

P_{ydf2} – сила тертя відповідних зерен об заготовку, Н.

$$P_{ydf1} = 2 \cdot \frac{c \cdot \sigma_m \cdot n_{zcr} \cdot c_{cr} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{zb}}}{2} \cdot (\sin \gamma + \mu_0 \cdot \cos \gamma) \cdot \left[\frac{\sqrt{h_{zdsr}}}{4} \cdot (a_{krz}^2 + 2 \cdot a_{krz} \cdot h_{zdsr}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{5} \cdot \left((a_{krz} + h_{zdsr})^{\frac{5}{2}} - h_{zdsr}^{\frac{5}{2}} \right) - \frac{h_{zdsr}^{\frac{3}{2}}}{2} \cdot a_{krz} - \frac{h_{zdsr}}{3} \cdot \left((a_{krz} + h_{zdsr})^{\frac{3}{2}} - h_{zdsr}^{\frac{3}{2}} \right) \right] \quad (3.22)$$

де c – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

σ_m – межа текучості матеріалу заготовки, Па;

n_{zcr} – число зерен на поверхні круга, яка обмежена розмірами контактної зони;

γ – половина кута при вершині абразивного зерна, °;

μ_0 – коефіцієнт тертя абразивного зерна об заготовку;

h_{zdsr} – середній знос зерен, які здійснюють пластичне деформування, м.

$$P_{ydf2} = \frac{\pi \cdot \rho_{zb} \cdot h_{zdsr} \cdot Hr_{mt}}{3} \cdot n_{zcr} \cdot c_{cr} \cdot a_{krz}, \quad (3.23)$$

де Hr_{mt} – твердість налиплого матеріалу, Па.

Загальна потужність тепловиділення при роботі різального та деформуючого абразивного зерна:

$$W_k = W_{df} + W_{1tr} + W_{2tr}, \quad (3.24)$$

де W_{df} , W_{1tr} та W_{2tr} – потужність тепловиділення джерел, які виникають у результаті перетворення в теплоту відповідно роботи деформування (W_{df}), роботи сили тертя стружки об зерно (W_{1tr}) та роботи сили тертя зерна об заготовку (W_{2tr}), Вт.

Потужності джерел визначаються за наступними залежностями:

$$W_{1tr} = P_{stz} \cdot V_{st}, \quad (3.25)$$

$$W_{2tr} = P_{zst} \cdot V_{cr}, \quad (3.26)$$

$$W_{df} = (P_{zf} - P_{zst}) \cdot V_{cr} - P_{stz} \cdot V_{st}, \quad (3.27)$$

де P_{zf} – дотична складова сили різання одиничним абразивним зерном, Н;

P_{stz} та P_{zst} – сили тертя відповідно між стружкою та абразивним зерном та між абразивним зерном та заготовкою, Н;

V_{st} – швидкість переміщення стружки, м/с;

V_{cr} – робоча швидкість шліфувального круга, м/с.

Використовуючи залежності (3.19), (3.20), (3.22) та (3.23) було проведено розрахунок сил шліфування та їх складових при обробці циліндричної деталі зі сталі 40Х, орієнтованим абразивним кругом зернистості 40, висотою 25 мм та зовнішнім діаметром 200 мм. Швидкість повздовжньої подачі – 0,1 мм/об, а швидкість шліфувального круга – 35 м/с. Глибина різання – 0,1 мм, кут повороту інструмента $\alpha=1^\circ$.

Згідно розрахунків складові сили шліфування від пластично деформуючих зерен мають значення: $P_{ydf1} = 0,08$ Н, $P_{ydf2} = 0,22$ Н, $P_{zdf1} = 0,06$ Н, $P_{zdf2} = 0,08$ Н, в порівнянні з різальними: $P_{yrl} = 4,07$ Н, $P_{yrl2} = 1,42$ Н, $P_{zrl} = 3,86$ Н, $P_{zrl2} = 0,71$ Н. Дотична складова сили шліфування від різальних та деформуючих зерен становить: $P_{zf} = 4,75$ Н, що практично не впливає на підвищення температури в зоні різання.

Потужність, яка витрачається на привод абразивного круга можливо визначити за наступною формулою:

$$N_{in} = \frac{P_z \cdot V_{In}}{10^3 \cdot 60} \quad (3.28)$$

де P_z – головна складова сили різання, Н.

Розрахункова величина потужності, яка витрачається на привод абразивного круга при шліфуванні периферією орієнтованого круга марки 200×25×32 13А 16 КЗ СТ3 35 В циліндричної поверхні вала діаметром 30 мм з глибиною різання $t = 0,1$ мм і повздовжньою подачею деталі $S_d = 0,1$ мм/об становить 114,4 Вт.

3.7 Розрахунок контактної температури при шліфуванні периферією орієнтованого інструмента

Оброблювальний шар заготовки під час процесу шліфування інтенсивно нагрівається. Це відбувається за рахунок швидкого процесу мікрорізання абразивними зернами, які призводять до утворення великої кількості джерел тепла.

Перетворення частини роботи в тепло під час пластичної деформації шару деталі, тертя по поверхнях абразивних зерен і між елементами зсуву, тертя зерен зі стружкою призводять до нагрівання в зоні обробки. Підвищення температури в зоні шліфування призводить до структурних перетворень у поверхневому шарі деталі. В зоні контакту деталі та абразивного круга виникають місця підвищеної температури, які можуть приводити до утворення дефектів деталі [115, 133, 141, 142].

Для забезпечення необхідної якості поверхневого шару деталі необхідно приймати відповідний режим обробки, абразивний інструмент, змащувально-охолоджуючу рідину.

У роботах [115, 35, 85, 86, 113] досліджувались температурні процеси, які відбуваються під час шліфування.

Відповідно до [133] для визначення максимального значення температури в зоні контакту абразивного інструмента та деталі використовують наступну залежність:

$$T_{\max} = \frac{q}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot a \cdot h}{V_p}}, \quad (3.29)$$

де q – густина теплового потоку, Вт/м²;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°С;

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

$2h$ – ширина теплового джерела, м;

V_p – швидкість переміщення теплового джерела, м/с.

Згідно з [7], густина теплового потоку q :

$$q = \frac{b \cdot N}{S}, \quad (3.30)$$

де b – коефіцієнт для сталі (згідно із Степановим $b = 0,3$);

N – потужність шліфування, Вт;

S – площа плями контакту, м².

$$\alpha = \frac{\lambda}{C \cdot \rho_m} \quad (3.31)$$

де C – питома теплоємність, Дж/кг·°С;

ρ_m – густина матеріалу, кг/ м³.

Для визначення максимального значення температури в зоні контакту абразивного круга марки 200×25×32 13А 16 КЗ СТ3 35 В та деталі (матеріал деталі сталь 40Х) діаметром 30 мм при шліфуванні периферією орієнтованого круга з повздовжньою подачею деталі 0,1 мм/об і глибиною різання 0,1 мм було використано залежності (3.29) – (3.31). Відповідно до розрахунків, максимальне значення температури в зоні шліфування становить $T_{\max} = 178,7$ °С.

3.8 Динамічний розрахунок шпиндельного вузла

Початкове диференціальне рівняння вимушених коливань стержня-шпинделя, запишеться у вигляді [116].

$$EJ \cdot \frac{\partial^4 g}{\partial z^4} + k g + m_0 \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial t^2} = P_i \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (3.32)$$

де EJ – жорсткість стержня при згині: E – модуль Юнга, МПа, J – момент інерції, кг·м²;

g – поперечне переміщення стержня на відстані z в момент часу t , мм;

k – коефіцієнт постелі;

m_0 – маса одиниці довжини стержня, кг;

P_n – сила збурення, Н;

ω – частота вимушених коливань системи, Гц.

З числових методів розрахунку пружних систем, які описуються лінійними диференціальними рівняннями, одним з найперспективніших, поряд з методом кінцевих елементів, є метод початкових параметрів в матричному формулюванні. Він дозволяє приводити динамічні характеристики шпиндельних вузлів і управління динамічним впливом до розрахунку складної

ланцюгової системи з багаторазово повторюваним циклом алгебраїчних операцій, що відповідають переходу від однієї ділянки системи до іншої, і успішно застосувати ЕОМ.

Розрахункова модель вузла розглядається як пружна ступінчаста балка довжиною L на пружнодемпфуючих опорах. За допомогою N радіальних перетинів, включаючи крайні, балка розділена на $(N-1)$ ділянок постійного перетину, в одному з яких діє збурювальна сила P_k . При цьому кожна i -та ділянка має розподілену масу m_{oi} та постійну жорсткість на згин EJ , а деталі, змонтовані на шпинделі, розглядаються як зосереджені маси m_i на межі ділянок з моментами інерції J_i . Розглядаема модель складається з 13 ділянок, розділених 14-ма перерізами (рис. 3.8). Для кожної ділянки задається довжина L_i , середній діаметр (зовнішній D_i та внутрішній d_i), розподілена маса m_{oi} , демпфірування в матеріалі b_i та змінна жорсткість EJ_i .

В кожному окремому перерізі враховується один або кілька факторів, а саме:

- 1) зміна зовнішнього D_i або внутрішнього d_i діаметрів валів, мм;
- 2) розміщення зосередженої опори;
- 3) зосереджена масою m (кг) та момент інерції J (Н/м);
- 4) зовнішній зосереджений момент (Н/м) або сила (Н).

У розрахунковій моделі шпинделя, підшипники розглядаються як пружно-демпфуючі основи.

Параметри в початковому Y_0 та кінцевому Y_N перерізах шпинделя можна зв'язати за допомогою перехідних матриць його ділянок з врахуванням сили, яка діє в i -му перерізі у вигляді наступного матричного рівняння:

$$[Y_N] = [A] \cdot [Y_0] + [A_{Pn}] \cdot [\psi_n], \quad (3.33)$$

де $[Y_N], [Y_0]$ – матриці-стовпці комплексних параметрів в N -му и 1 -му перерізах;

$[A]$ – матриця добутку всіх перехідних матриць для ділянок балки;

$[A_{Pn}]$ – матриця добутку всіх перехідних матриць для ділянок балки,

розташованих після n -го перерізу, в якому прикладена сила P_n .

Матриця зовнішнього навантаження $[\psi_n]$ в n -му перерізі має вигляд:

$$[\psi_n] = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{M_n L^2}{EJ} \\ \frac{P_n L^3}{EJ} \end{vmatrix}, \quad (3.34)$$

де M_n – зовнішній момент сили, Н·м.

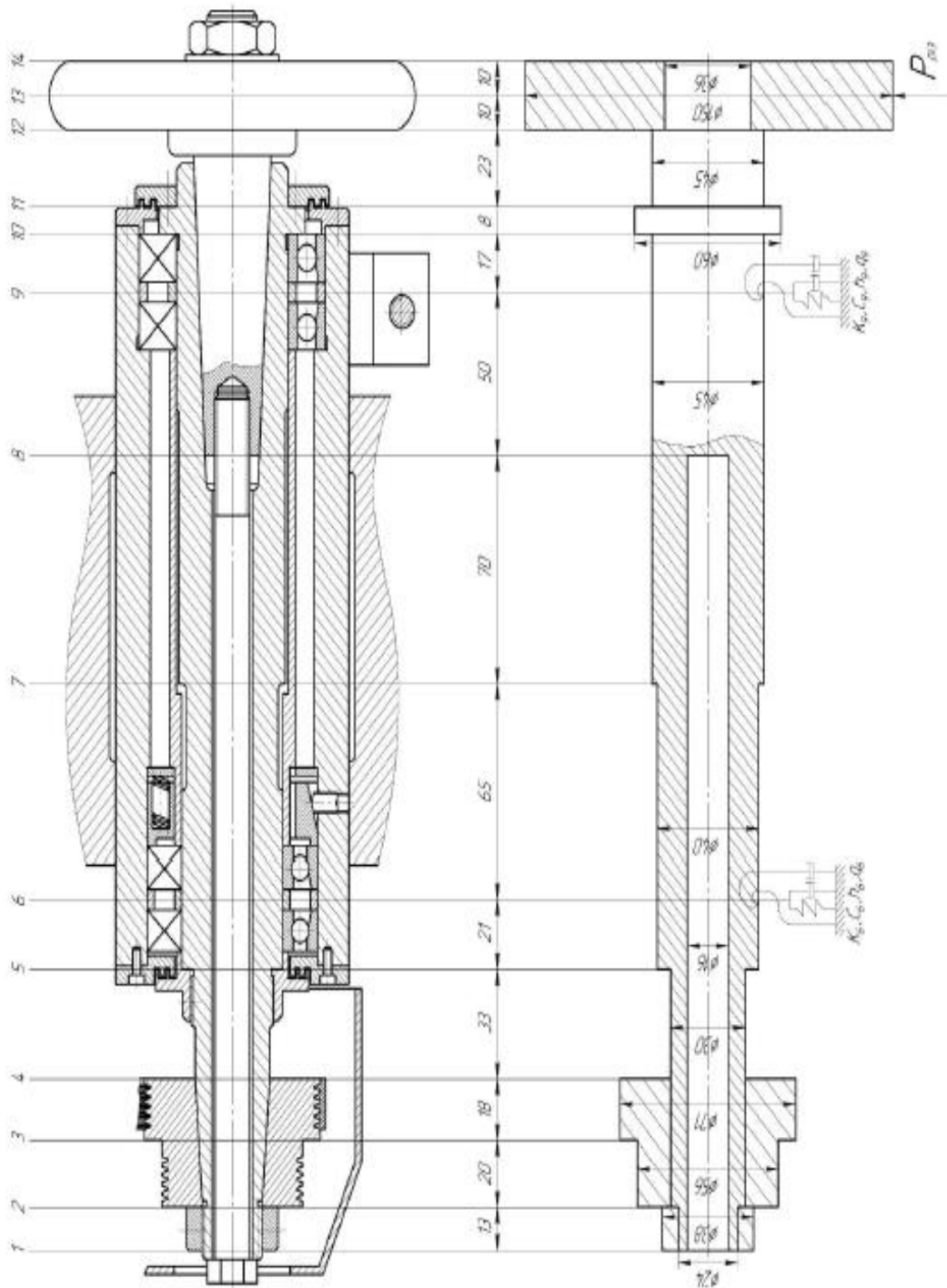


Рисунок 3.8 – Розрахункова схема шліфувальної бабки верстату В3208-ФЗ

Матриця $[Y_i]$ включає наступні комплексні величини:

$$[Y_i] = \begin{bmatrix} y_i \\ \varphi_i L \\ \frac{M_i L^2}{EJ_i} \\ \frac{Q_i L^3}{EJ_i} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

де y_i – комплексна амплітуда прогину, м;

φ_i – комплексна амплітуда кута повороту, $^{\circ}$;

M_i – комплексна амплітуда моменту сили, Н·м;

Q_i – комплексна амплітуда поперечної сили, Н;

L – довжина шпинделя, м;

EJ_i – жорсткість на згин i -го перерізу ротора, МПа·кг·м².

При відомих початкових параметрах з використанням перехідних матриць стержневих конструкцій можна знайти параметри в будь-якому перерізі. Перехідні матриці ділянок та перерізів шпинделя, їх параметри залежать від прийнятої розрахункової моделі шпинделя.

По силовому зовнішньому впливу, який діє в i -му перерізі знаходять частотні передаточні функції вказаних параметрів, наприклад, АФЧХ в i -му перерізі шпинделя буде визначатися як:

$$W_{P_n}(i\omega) = \frac{y_i(i\omega)}{P_n(i\omega)} \quad (3.36)$$

$$W_{P_n}(i\omega) = Re(\omega) + i \cdot Im(\omega) \quad (3.37)$$

Звідси можна визначити АФЧХ ротора:

$$A(\omega) = \sqrt{Re^2(\omega) + Im^2(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{Im(\omega)}{Re(\omega)} \quad (3.38)$$

По відомих параметрам y та φ в перерізах можна дослідити основні форми коливань шпинделя при різних частотах.

Для розрахунку динамічних характеристик шпиндельного вузла використовувалась програма SPIDWIN, розроблена на кафедрі автомобільного транспорту та галузевого машинобудування.

В результаті розрахунків отримані динамічні характеристики шпиндельного вузла, а саме резонансні частоти коливань шпиндельного вузла, параметри АФЧХ (значення вектора динамічної податливості в прямокутній і полярній системах координат), а також форми коливань пружної системи, на резонансних частотах обертання шпинделя. Динамічна податливість визначалася за відомою формулою

$$W_{yc} = W_1^1 = \frac{Y_1}{P_1}(i\omega), \quad (3.39)$$

де Y_1 – переміщення системи в даному перерізі 4;

P_1 – сила прикладена в цьому ж перерізі.

АФЧХ являє собою відношення переміщення системи в перерізі i -му перерізі до сили прикладеної в тому ж перерізі, і характеризується рядом показників (рис. 3.9).

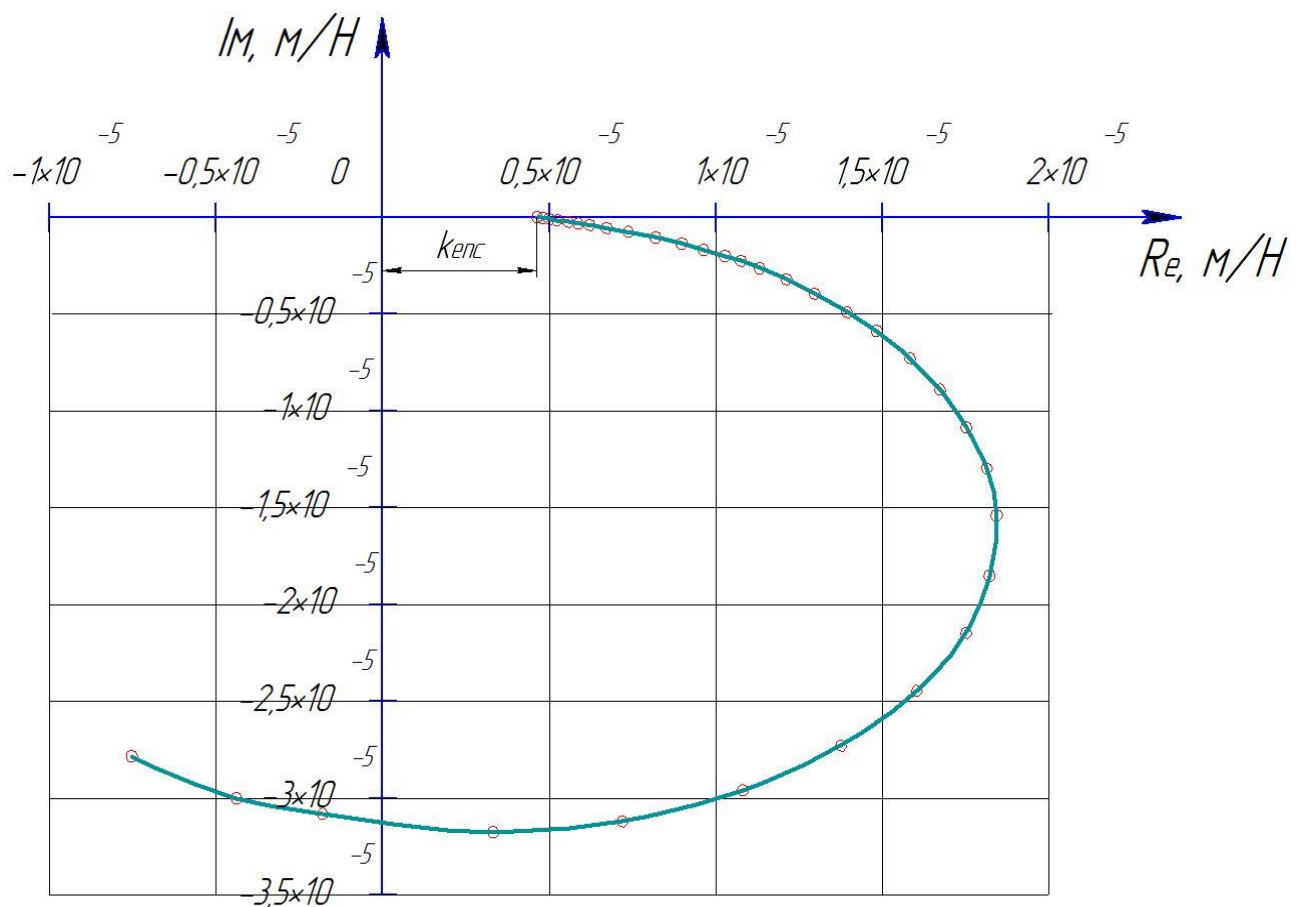


Рисунок 3.9 – АФЧХ шліфувальної бабки верстата В3208-Ф3

Згідно із побудованою АФЧХ, отримані наступні динамічні показники шпиндельного вузла шліфувальної бабки:

- 1) статична податливість $k_{enc}=0,32$ мкм/даН;
- 2) максимальна резонансна амплітуда $A_{rmax}=2,3$ мкм/даН;

3) коефіцієнт динамічності $K_d = \frac{A_p}{k_{enc}} = \frac{3,14}{0,482} = 4,8$;

4) резонансні частоти $fp_1=497,6$ Гц, $fp_2=495,3$ Гц;

5) параметр, який характеризує вібростійкість системи $Re_{enc}^m = 1,75$ мкм / даН .

Висновки до розділу 3.

1. Наведено модульні тривимірні моделі, що описують поверхню абразивного круга, процеси зняття припуску та формоутворення при шліфуванні циліндричної поверхні вала периферією орієнтованого круга в режимі затуплення.

2. Використовуючи модульні тривимірні моделі, представлено спосіб шліфування зі схрещеними осями інструмента та циліндричної поверхні деталі, який забезпечує фіксацію формоутворюючої ділянки круга та рівномірне зменшення припуску вздовж його периферії від чорнової до чистої та калібрувальної ділянок.

3. Розроблено модульну тривимірну модель правки периферійної ділянки шліфувального круга, що дає можливість враховувати особливості роботи її чорнових та чистових ділянок при шліфуванні орієнтованим інструментом.

4. Наведена методика розрахунку сил шліфування при обробці циліндричної поверхні деталі периферією орієнтованого круга в режимі затуплення.

5. Наведено динамічний розрахунок шпиндельного вузла верстата. Отримані результати розрахунку можна застосовувати при різних режимах шліфування для забезпечення необхідної точності поверхні деталі.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ОРІЄНТОВАНИМ КРУГОМ, ЗАПРАВЛЕНИМ З РІЗНИМИ ПОДАЧАМИ НА РОБОЧІЙ ТА КАЛІБРУВАЛЬНІЙ ДІЛЯНКАХ

У розділі представлені результати експериментального дослідження процесів зносу абразивного круга, зняття припуску, теплонапруженості та точності формоутворення при обробці циліндричних поверхонь орієнтованим кругом, заправленим з різними подачами на робочій та калібрувальній ділянках.

З метою визначення оптимальних, відповідно до обробки, значень кута орієнтації абразивного інструмента, величини повздовжньої подачі на оберт та величини припуску з отриманням при цьому максимальної продуктивності процесу шліфування використовувався метод математичного планування експерименту.

4.1 Експериментальне дослідження обробки циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга на універсально-заточному верстаті ВЗ208-ФЗ

Для того, щоб забезпечити високу продуктивність обробки проведено планування повного факторного експерименту з трьома факторами. Параметром оптимізації Y прийнята продуктивність шліфування Q . В якості факторів: повздовжня подача на оберт оброблюваної деталі S_{\circ} , кут схрещення α вісей шліфувального круга і деталі та величина припуску t . Було застосовано повний факторний експеримент 2^3 із взаємодіями.

Кодовані та натуральні значення факторів наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Натуральні та кодовані значення факторів

Інтервал варіювання та рівні факторів	Натуральні значення факторів			Кодовані значення факторів		
	S_{α} , мм/об	α , град	t , мм	X_1	X_2	X_3
Нульовий рівень	0,1	0,5	0,1	0	0	0
Інтервал варіювання	0,05	0,5	0,05			
Верхній рівень	0,15	1	0,15	+	+	+
Нижній рівень	0,05	0	0,05	-	-	-

Для проведення розрахунку коефіцієнтів моделі складаємо матрицю планування експерименту 2^3 з ефектом взаємодії (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Матриця планування експерименту 2^3 з ефектом взаємодії

№	X_1 (S_{α} , мм/об)	X_2 (α , град)	X_3 (t , мм)	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	Y (Q)
1	+	+	+	+	+	+	+	434,8
2	-	+	+	-	-	+	-	234,5
3	+	-	+	-	+	-	-	560,4
4	-	-	+	+	-	-	+	421,5
5	+	+	-	+	-	-	-	335,8
6	-	+	-	-	+	-	+	154,6
7	+	-	-	-	-	+	+	410,2
8	-	-	-	+	+	+	-	257,4

Обробивши отримані результати, одержуємо матрицю коефіцієнтів в рівнянні математичної моделі:

$$B := \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_{12} \\ b_{13} \\ b_{23} \\ b_{123} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 351,2 \\ 105,6 \\ 39,8 \\ 11,2 \\ 40,2 \\ 0,7 \\ -16,9 \\ -1,8 \end{pmatrix}$$

Запишемо рівняння математичної моделі в кодованих значеннях:

$$Q = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.1)$$

Після того, як перевірили значущість коефіцієнтів у рівнянні (4.1) за допомогою критерія Стьюдента коефіцієнти b_{13} та b_{123} виявилися статистично незначущим.

Гіпотезу щодо адекватності вищезгаданого рівняння можна прийняти за правильну, так як дисперсія адекватності $S_{ad} = 0$, а відповідно і розраховане значення критерію Фішера $F_p = 0$.

Якщо підставити в рівняння (4.1) значення в натуральних одиницях замість кодованих значень факторів, то отримаємо рівняння математичної моделі продуктивності процесу обробки для натуральних значень факторів:

$$Q = 12,4 + 130,8 \cdot S_d - 75,1 \cdot \alpha + 56,3 \cdot t + 89,4 \cdot S_d \cdot \alpha - 37,6 \cdot \alpha \cdot t \quad (4.2)$$

Проаналізувавши рівняння регресії (4.2) можна зробити висновок, що вплив на продуктивність шліфування здійснюють повздовжня подача деталі S_d , кут орієнтації абразивного круга α та величина припуску t , а їх взаємодія та взаємодія повздовжньої подачі деталі S_d з величиною припуску t не впливають на результати експерименту. На продуктивність найбільше впливає величина повздовжньої подачі деталі S_d .

4.2 Експериментальне дослідження потужності шліфування та сил різання

В ході проведення експериментальних досліджень було одержано графіки потужності холостого ходу (рис.4.1), загальної потужності під час шліфування (рис. 4.2), графіки активної потужності (рис. 4.3) та сили різання (рис. 4.4).

Потужності під час шліфування була виміряна, використовуючи аналізатор потужності С.А 8220. На рисунку 4.1 наведено потужність холостого ходу.

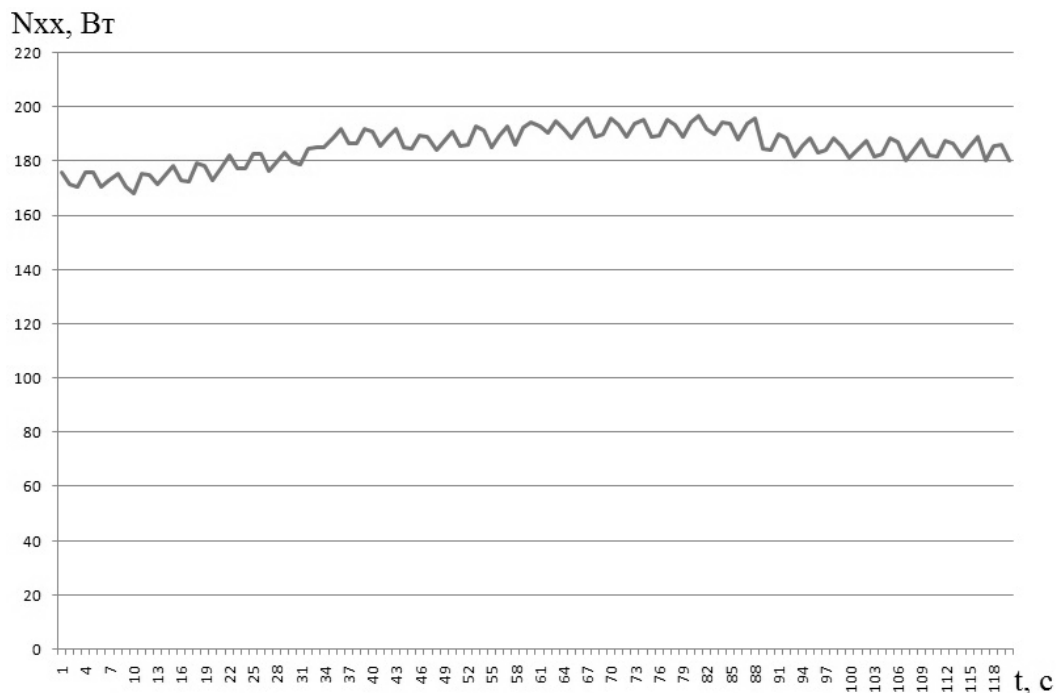


Рисунок 4.1 – Потужність холостого ходу

На рисунку 4.2 приведено графік загальної потужності під час процесу обробки циліндричної поверхні деталі периферією абразивного круга в режимі затушення з паралельними осями деталі та інструмента з глибиною різання $t = 0,1$ мм з різною повздовжньою подачею: ($S_1 = 0,05$; $S_2 = 0,1$; $S_3 = 0,15$ мм/об).

На рисунку 4.4 приведено графік сили різання при обробці циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затушення.

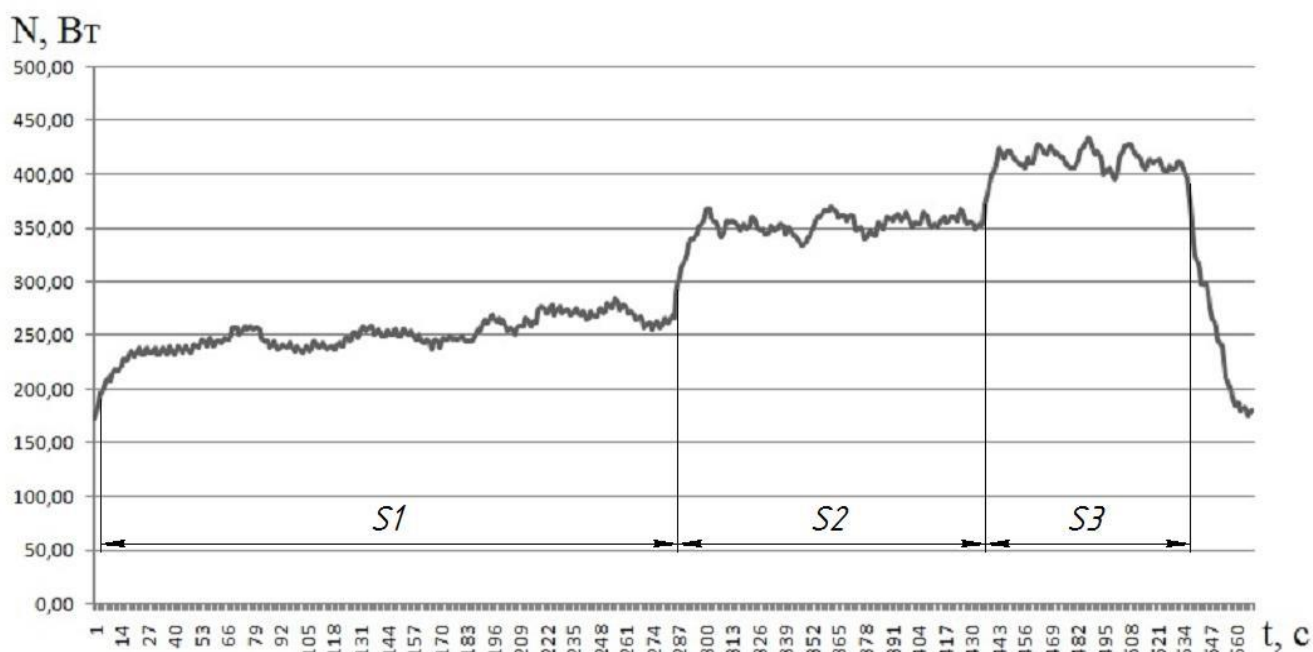


Рисунок 4.2 – Загальна потужність, що витрачається під час процесу шліфування циліндричної поверхні периферією шліфувального круга в режимі затуплення з паралельними осями деталі та інструмента.



Рисунок 4.3 – Графік активної потужності, що витрачається під час процесу шліфування з паралельними осями деталі та круга



Рисунок 4.4 – Сила різання при шліфуванні циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення

Графік загальної потужності під час шліфування циліндричної поверхні деталі периферією орієнтованого абразивного круга в режимі затуплення з глибиною обробки $t = 0,1$ мм з кутом орієнтації інструмента $\alpha = 1^\circ$ з різною величиною повздовжньої подачі зображено на рисунку 4.5, графік активної потужності зображено на рисунку 4.6, а графік сили різання на рисунку 4.7.

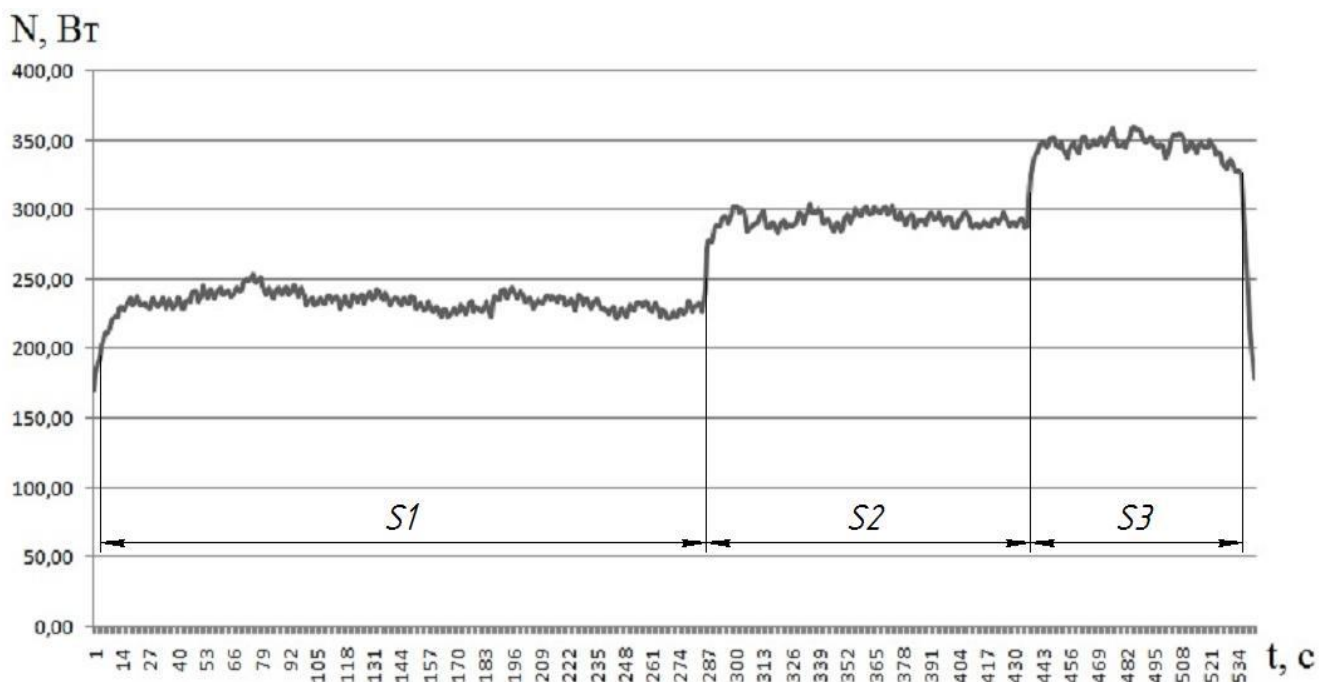


Рисунок 4.5 – Загальна потужність під час обробки циліндричної поверхні периферією орієнтованого шліфувального круга в режимі затуплення

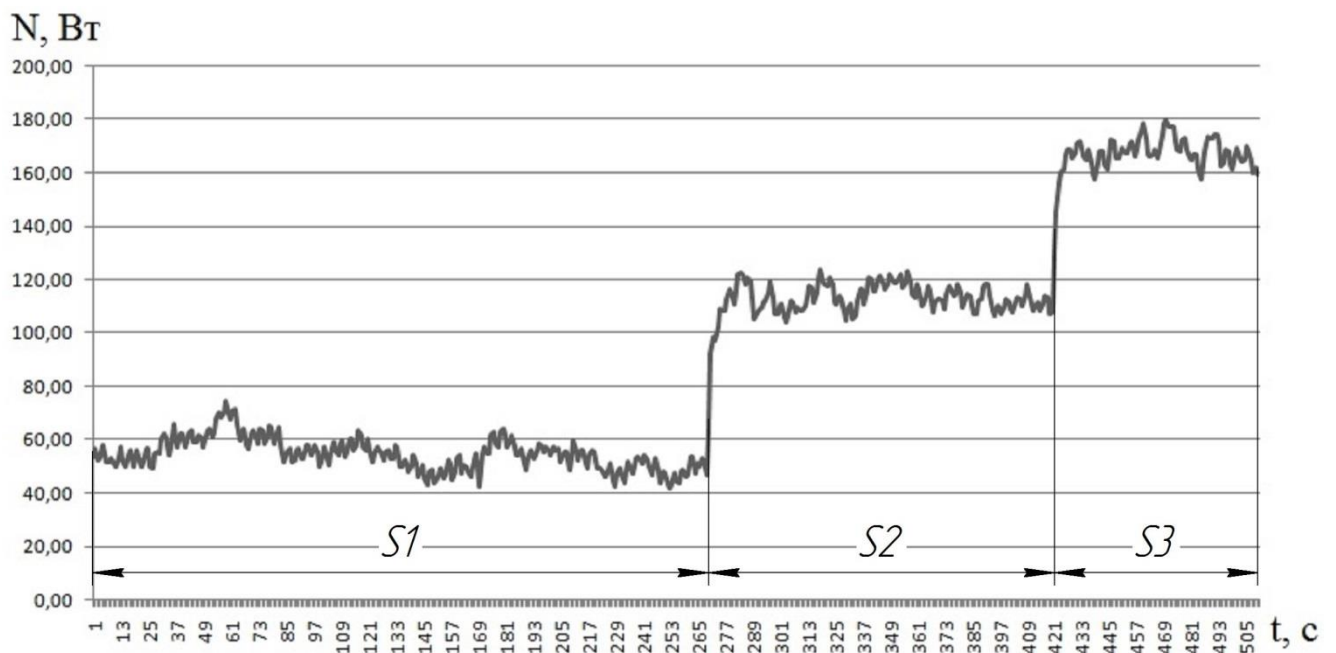


Рисунок 4.6 – Активна потужність, що витрачається на обробку циліндричної поверхні деталі периферією орієнтованого круга в режимі затуплення

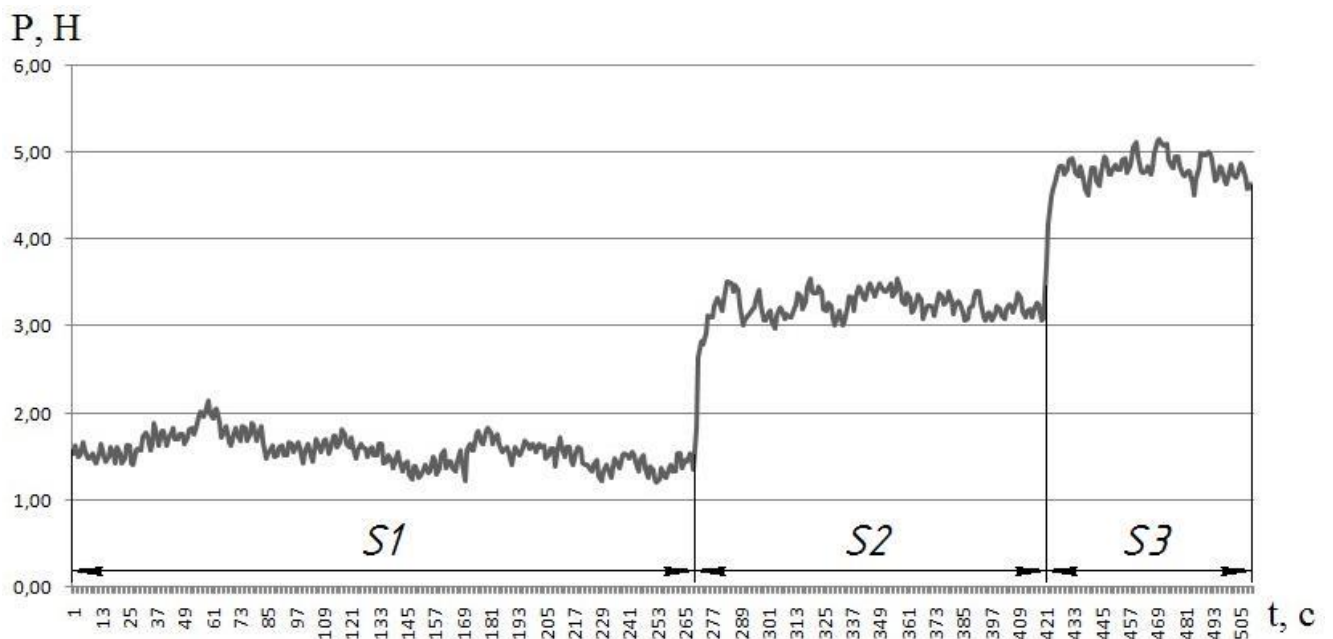


Рисунок 4.7 – Сила різання при шліфуванні циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення

4.3 Експериментальне дослідження температури при шліфуванні циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга

Значення температури під час шліфування циліндричної поверхні периферією орієнтованого абразивного круга в режимі затуплення визначалися

за допомогою тепловізора моделі ULIRVISION TI-384.

На рисунку 4.8 зображено розподіл температури при шліфуванні циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення при паралельних осях інструмента і деталі в різноманітні моменти часу.

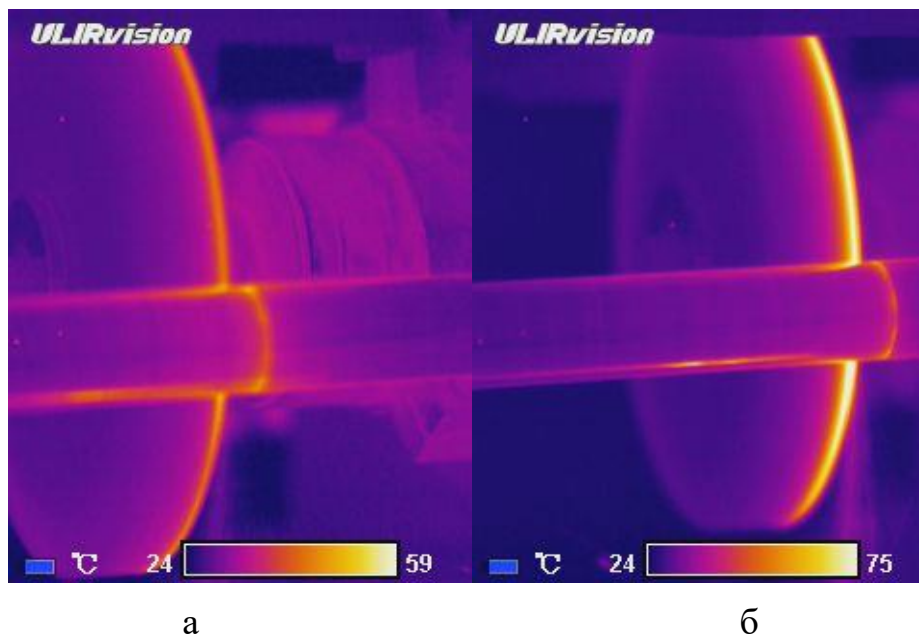


Рисунок 4.8 – Температурний розподіл при шліфуванні циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення при паралельних осях інструмента і деталі

На рисунку 4.9 наведено результат вимірювання температури в місці обробки за допомогою термопары при паралельних осях інструмента і деталі.

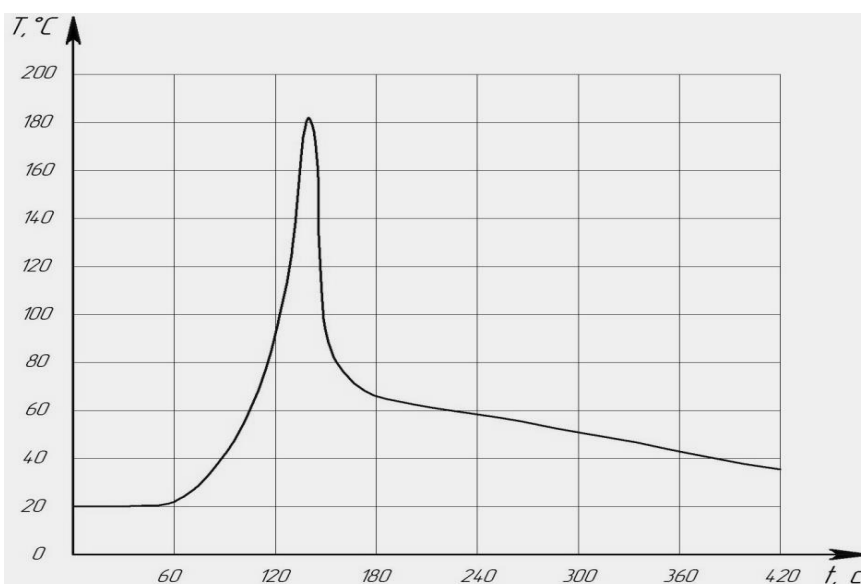


Рисунок 4.9 – Осцилограма термо-електро рушійної сили по координаті обробки при паралельних осях інструмента і деталі

На рисунку 4.10 приведено розподіл температури, який відбувається під час шліфування циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення з кутом орієнтації $\alpha = 1^{\circ}$.

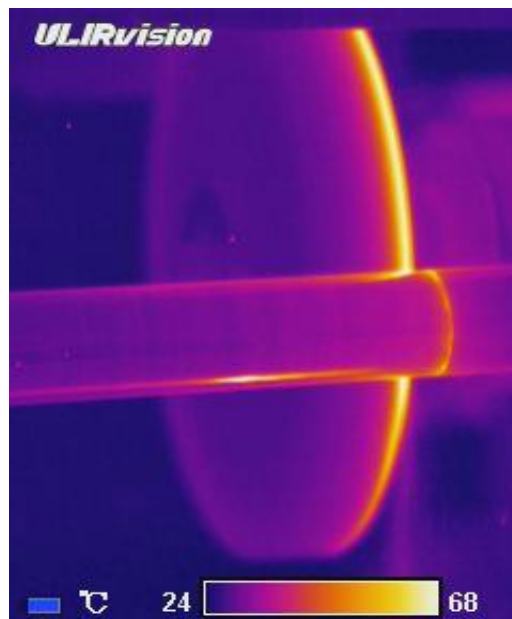


Рисунок 4.10 – Розподіл температури під час обробки циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення

Величину температури в місці шліфування з припуском на обробку $t = 0,1$ мм та кутом орієнтації інструмента $\alpha = 1^{\circ}$ було визначено, використовуючи термопару (рис. 4.11).

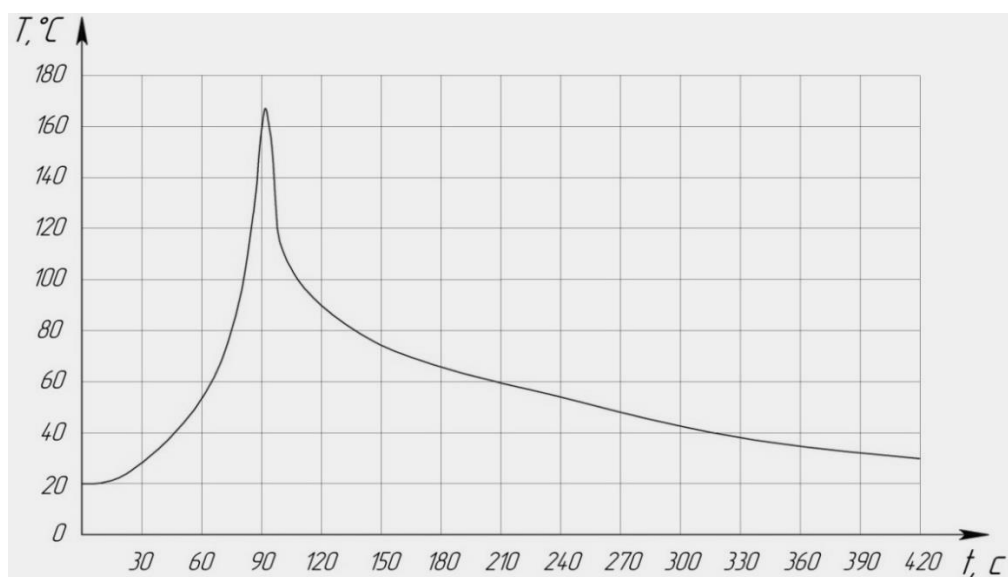


Рисунок 4.11 – Осцилограма термо-електро рушійної сили по координаті обробки периферією орієнтованого круга

4.4 Експериментальне визначення зносу абразивного круга

Знос абразивного круга визначався за допомогою оптоволоконного датчик. Конструкція та принцип роботи датчика наведені у другому розділі роботи.

Визначення профілю шліфувального круга 200×25×32 13А 16 К3 СТ3 35 В відбувалось після обробки циліндричної поверхні деталі зі сталі 40Х діаметром 30 мм, з припуском на шліфування $t = 0,1$ мм, швидкістю різання 35 м/с та повздовжньою подачею $S_d = 0,1$ мм/об,

Згідно із дослідженням, питомий знос абразивного інструменту складає $q = 0,0045$ мм³ / мм³. Розбіжність із значенням, яке отримали теоретично, знаходиться в межах 9%.

Зношений профіль абразивного інструмента наведено на рисунку 4.12. Проаналізувавши отриманий профіль інструмента можна підтвердити теоретичні дослідження шліфування циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення: на чорнову та напівчистову ділянки шліфувального круга припадає найбільша величина припуску, а чистова та калібрувальна ділянки мають найменший знос.

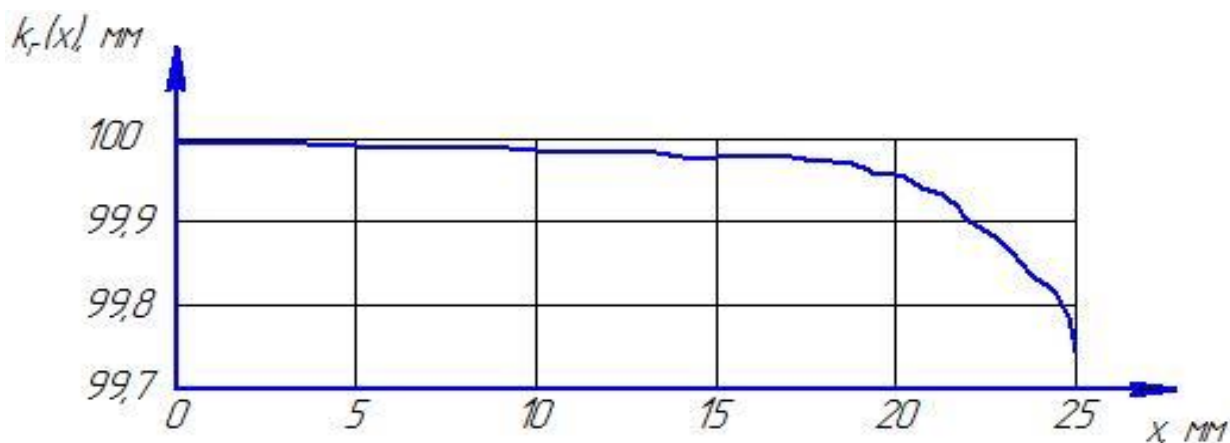


Рисунок 4.12 – Зношений профіль абразивного інструмента після шліфування циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення

4.5 Експериментальне визначення шорсткості циліндричної поверхні вала.

Для визначення параметра якості циліндричної поверхні такої як шорсткість був використаний портативний профілометр PocketSurf III. Опис приладу наведено у другому розділі дисертаційної роботи.

Процес вимірювання величини шорсткості циліндричної поверхні приладом PocketSurf III після обробки наведено на рисунку 4.13.

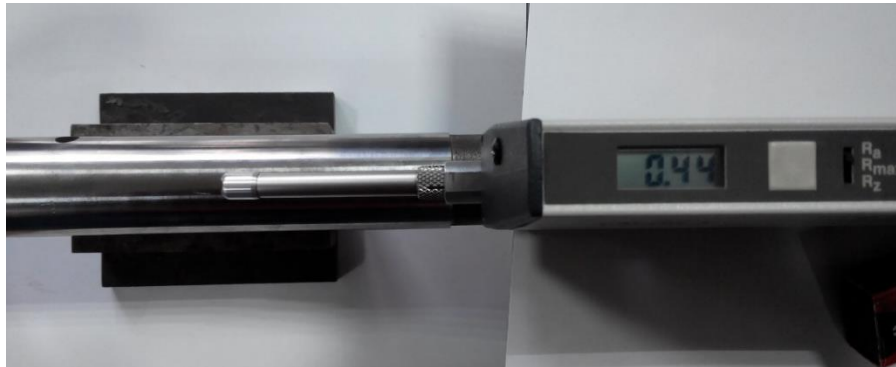


Рисунок 4.13 – Процес вимірювання величини шорсткості циліндричної поверхні приладом PocketSurf III після обробки

Результати проведених вимірювання показали, що параметр шорсткості Ra шліфованої циліндричної поверхні з кутом орієнтації круга $\alpha = 1^{\circ}$, повздовжньої подачі $S_d = 0,1$ мм/об становить в межах $Ra = 0,32 - 0,63$ мкм.

4.6 Експериментальне визначення радіального биття

Радіальне биття циліндричної поверхні вала було виміряно, використовуючи оптоволоконний датчик. Осцилограма радіального биття деталі наведено на рисунку 4.14.

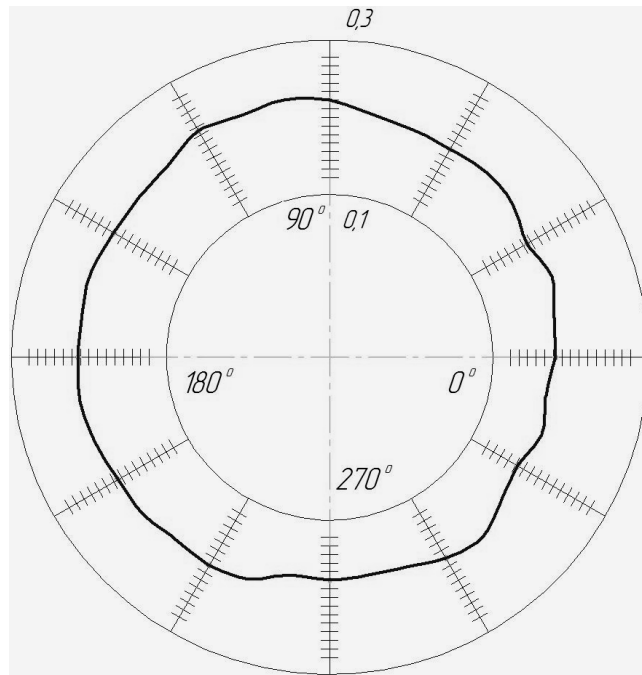


Рисунок 4.14 – Осцилограма радіального биття вала

Висновки до розділу 4.

1. На верстаті моделі В3208-ФЗ було проведено експериментальне дослідження процесу шліфування циліндричної поверхні в режимі затуплення зі сталі марки 40Х периферією орієнтованого абразивного круга марки 200×25×32 13А 16 К3 СТ3 35 В. Вимірня величина шорсткості складає $Ra = 0,32 - 0,63$ мкм.

2. Під час процесу шліфування циліндричної поверхні периферією абразивного інструмента забезпечується фіксація формоутворюючої ділянки круга та рівномірне зменшення припуску вздовж периферії інструмента від чорнової, напівчистої до чистої та калібрувальної ділянок.

3. Особливість правки абразивного круга полягає у забезпеченні різної розвиненості його периферійної поверхні за рахунок різної величини подачі правлячого інструмента. Відповідно, на чорновій та напівчистовій ділянках інструмента при правці знімається основний припуск, більші канавки забезпечують більший простір для відведення стружки та продуктів зносу круга, запобігаючи їхньому прилипанню і виникненню вібрацій. Це підвищує точність обробки деталі до ІТ 6-7. Чистова та калібрувальна ділянки периферії інструмента, на які припадають невеликі значення припуску, забезпечують низьку геометричну шорсткість поверхні деталі завдяки меншим значенням

геометричної шорсткості.

4. Експериментально було визначено величину температури в місці контакту деталі та круга, розподіл температури під час шліфування. Проаналізувавши отримані дані можна стверджувати, що під час обробки циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення структурних перетворень, які можуть негативно вплинути на точність та якість деталі, не відбувається.

5. Потужність холостого ходу, загальну та активну потужність було експериментально визначено. Під час обробки циліндричної поверхні деталі периферією орієнтованого круга в режимі затуплення з кутом орієнтації інструмента $\alpha = 1^\circ$, повздовжньою подачею $S_d = 0,1$ мм/об та припуском на обробку $t = 0,1$ мм значення активної потужності становить 124 Вт.

6. Було здійснено планування повного факторного експерименту з трьома факторами та перевірено значимість коефіцієнтів регресії. Проаналізувавши рівняння регресії можна зробити висновок, що вплив на продуктивність обробки здійснюють повздовжня подача деталі S_d , кут орієнтації абразивного круга α та величина припуску t . Їх взаємодія та взаємодія повздовжньої подачі деталі S_d з величиною припуску t не впливають на результати експерименту.

7. Розбіжності тих результатів, які були отримані під час експериментального та теоретичного дослідження процесу шліфування циліндричної поверхні периферією орієнтованого круга в режимі затуплення, становлять близько 9 %.

ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена підвищенню ефективності шліфування циліндричних поверхонь деталей периферією круга за рахунок орієнтації інструменту та правки його з різними подачами на робочій та калібрувальній ділянках.

1. Відповідно до аналізу, підвищення складності програмування процесу обробки на шліфувальних верстатах з ЧПК полягає у нерівномірному зносу абразивного інструменту. Щоб вирішити цю проблему необхідно розробити новий спосіб шліфування циліндричної поверхні вала, який зможе забезпечити умову при якій припуску розподіляється вздовж периферійної частини профілю круга та сприятиме, щоб його знос був рівномірним.

2. Розроблені модульні тривимірні моделі, що описують поверхню абразивного круга, процесів зняття припуску на обробку периферійною частиною інструменту за координатою шліфування, формоутворення калібрувальною ділянкою, яка розташовується на осі повороту абразивного круга при шліфуванні циліндричних поверхонь орієнтованим кругом в режимі затуплення.

3. Подальший розвиток отримали залежності, які визначають кути орієнтації абразивного інструменту під час шліфування периферією круга циліндричних поверхонь в режимі затуплення, які створені на основі аналізу розроблених модульних тривимірних моделей інструмента, процесів зняття припуску та формоутворення при шліфуванні орієнтованим кругом.

4. Використовуючи модульні тривимірні моделі, представлено спосіб шліфування зі схрещеними осями інструмента та циліндричної поверхні деталі, який забезпечує фіксацію формоутворюючої ділянки круга та рівномірне зменшення припуску вздовж його периферії від чорнової до чистової та калібрувальної ділянок.

5. На базі розробленого способу шліфування циліндричних поверхонь орієнтованим кругом при його роботі в режимі затуплення запропоновано методику зняття припуску, при якій припуск розподіляється вздовж чорнової,

напівчистої, чистої та калібрувальної ділянок шліфувального круга.

6. Розроблена модульна просторова модель правки периферійної ділянки абразивних кругів однокристалним правлячим інструментом із різною подачею, дослідженням якої встановлено закономірності процесів зняття припуску та формоутворення її чорнових та чистових ділянок.

7. Уточнено залежності визначення теплонапруженості процесу шліфування циліндричних поверхонь орієнтованим кругом при його роботі в режимі затуплення.

8. Здобувач є співавтором отриманих патентів на корисну модель за темою дисертаційного дослідження: спосіб круглого чистового шліфування периферією орієнтованого круга (№134080 від 25.04.2019), спосіб шліфування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями круга і деталі (№145383 від 10.12.2020), спосіб шліфування кулачків розподільчого валу (№145532 від 28.12.2020).

9. Практичні рекомендації з використання наукових розробок впроваджені у виробництво на ТОВ «МГК-Черкаси» (м. Черкаси). Від впровадження результатів роботи очікується економічний ефект, який складає 25 тис. грн.

10. Методики та результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес Національного університету «Чернігівська політехніка».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Агасарян Р.Р. Абразивная обработка закаленных сталей типа 9Х (На примере обработки рабочих валков холодной прокатки) / Р.Р. Агасарян. – Ереван. Айстан, 1971. – 127с.
3. Бабенко Е.А. 3D моделирование процесса алмазного шлифования методом конечных элементов / Бабенко Е.А., Федорович В.А. // Международный научно-технический сборник "Резание и инструмент в технологических системах". – 2010. – №78. – С. 16-23.
4. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов.– К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.
5. Байкалов А.К. Вероятностная оценка размеров среза и усилий резания на абразивных зернах при шлифовании / А.К.Байкалов // Синтет. алмазы. Научн.- произв. сб. – 1978. – № 1. – С.15–19.
6. Беззубенко Н.К. Особенности работы алмазного инструмента винтенсифицированном режиме/ Н.К. Беззубенко // Резание и инструмент, 1981. – Вып. 25. – С. 39 – 41.
7. Болобанова Л.Н. Развитие методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков листовых станов с целью совершенствования технологии прокатки широких полос: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.16.05/ Болобанова Наталия Леонидовна; [Череповецкий государственный университет]. Череповец, 2015. – 123 с.
8. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования: дис. докт. техн. наук: спец. 05.02.08/ Братан Сергей Михайлович; [Севастопольский национальный технический университет]. Севастополь, 2005. – 323 с.
9. Венжега В.И. Повышение эффективности шлифования торцов со скрещивающимися осями детали и круга с калибрующим участком. /

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки. станки и инструменты. Харьков: НТУ „ХПИ”, 2009.- 214с.

10. Венжега В.І., Пасов Г.В., Морочко В.В. Дослідження динамічних характеристик шпindelного вузла верстата В3208 Ф4 при шліфуванні циліндричних поверхонь периферією орієнтованого круга в режимі затуплення. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. XI Міжнародна науково-практична конференція 26-27 травня 2021. Чернігів. Україна. Том1. С.118-119.

11. Внуков Ю.Н. Анализ исследования систем CAD/CAM/CAE в современном машиностроении / Ю.Н. Внуков, И.Н. Павлюченко // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. – Харьков, 1998. – Вып. 6. – С. 19 – 21.

12. Внуков Ю.Н. Исследование процесса высокопроизводительного шлифования быстрорежущих сталей кругами из дробленых сверхтвердых поликристаллов : автореф. ... дис. канд. техн. наук / Ю.Н. Внуков. – Тбилиси, 1977. – 21 с.

13. Гавриш А.П. Финишная алмазно-абразивная обработка магнитных материалов / А.П. Гавриш. – К.: Изд-во при Киевск. ун-те, 1983. – 72 с.

14. Грабченко А. И. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Чернигов : ЧДТУ, 2009. – 256 с.

15. Грабченко А. И. 3D-моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования : учебное пособие / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Х. : НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с.

16. Грабченко А.И. 3D моделирование рабочей поверхности шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок // Високі технологи в машинобудуванні. Збірник наукових праць ХДПУ. – Харків, 2000. – Вип.1(3). – С. 58-71.

17. Грабченко А.И. Научные основы алмазного шлифования

сверхтвердых поликристаллических материалов: диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук. – Харьков, 1995. – 59 с.

18. Грабченко А.И., Кондусова Е.Б., Кривошея А.В., Равская Н.С., Родин П.Р. 3D-моделирование инструментов, формообразования и съема припуска при обработке резанием. Харьков, 2001, 302 с.

19. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А.И. Грабченко. – Х.: Вища школа, 1985. – 184 с.

20. Грабченко А.И. Схемы непрерывного управления рельефом кругов в процессе алмазного шлифования / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, В.Л. Доброскок // Резание и инструмент. – 1986. – Вып. 35. – С.57-63.

21. 3D моделирование процессов алмазно-абразивной обработки: Монография / А.И. Грабченко, В.А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – 376 с.

22. Гурей І. В. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей виробів параметрами імпульсної фрикційної обробки : дис. д-ра техн. наук: 05.02.08 / Гурей Ігор Володимирович ; [Тернопільський держ. технічний ун-т ім. Івана Пулюя]. - Т., 2002. – 429 с.

23. Гусев В.В. Теоретическое исследование влияния режимов обработки на уровень вибраций при алмазном шлифовании тонкостенных оболочек из хрупких неметаллических материалов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Вісник СевНТУ. Сер.: Машиноприладобудування та транспорт. – 2013. – Вип. 139. - С. 57-61.

24. Гусев В.В. Управление режущей способностью алмазных кругов как фактор повышения эффективности шлифования изделий из керамики / Калафатова Л.П., Медведев А.Л., Семенюк, Д.Ю. // Наукові праці Донецького національного технічного університету (Серія «Машинобудування і машинознавство»). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». – 2011. – вип. 8(190). – С. 35-43.

25. Данилевский В.В. Технология машиностроения. – Изд. 4-е перераб. и доп. / В.В. Данилевский – М.: Высш. школа, 1977. – 479 с.

26. Детали и механизмы металлорежущих станков / Под ред. Д.Н. Решетова – М.: Машиностроение, 1972. – Т. 2. – 519 с.
27. Дикушин В.И. Основные данные для проектирования металлорежущих станков. ЭСМ. Т. 9. / В.И. Дикушин – М.: Машгиз, 1949. – 723 с.
28. Доброскок В.Л. Исследование взаимосвязи параметров продольного профиля кругов с выходными показателями процесса шлифования / В.Л. Доброскок // Резание и инструмент в технологических системах: межд. научн.- техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 54. – С. 80-89.
29. Доброскок В.Л. Наукові основи формоутворення робочої поверхні кругів на токопровідних зв'язках у процесі шліфування: автореф. дис. докт. техн. наук / В.Л. Доброскок. – Харків, 2001. – 35 с.
30. Дубенець В. Г., Хільчевський В. В., Савченко О. В. "Основи методу скінченних елементів": Навчальний посібник.– Чернігів: ЧДТУ, 2007.–348 с.
31. Ефимов В.В. Модель процесса шлифования с применением СОЖ. – Саратов: Изд.-во Саратов. ун-та, 1992. – 132 с.
32. Єрошенко А.М. Підвищення ефективності шліфування зі схрещеними осями інструмента і деталі з профілем у вигляді дуги кола : дис. канд. техн. наук : спец. 05.03.01 / Єрошенко Андрій Михайлович; [Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»]. – Харків, 2009. – 208 с.
33. Зубкова Н.В. Удосконалювання 3D моделювання різальних інструментів і елементів припуску шляхом уніфікації структур багатопараметричних відображень простору: автореф. дис. канд. техн. наук / .В. Зубкова. – Харків, 2002. – 20 с.
34. Ивович В.А. Переходные матрицы в динамике упругих систем / В.А. Ивович. – М.: Машиностроение, 1968. – 217 с.
35. Калафатова Л.П. Влияние режущей способности круга на температуру и силы при алмазном шлифовании ситаллов [Электронный ресурс]: электрон. архив Донец. нац. техн. ун-та / Л.П. Калафатова, С.А. Поезд.

– 2008. – Режим доступа :<http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/11268>.

36. Кальченко В.В., Венжега В.І., Морочко В.В. Дослідження сил різання при чистовому шліфуванні циліндричного вала. Збірник наукових матеріалів LIY міжнародної науково-практичної інтернет-конференції eI-conf.com.ua «Інновації науки XXI». 2 листопада 2020. Київ. Україна. С.175-179.

37. Кальченко В.В. Дослідження динамічних характеристик процесу шліфування циліндричних поверхонь периферією орієнтованого круга в режимі затуплення на верстаті В3208 Ф4 /В.В. Кальченко, В.І. Венжега, Н.М. Сіра, В.В. Морочко // Технічні науки та технології. Науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». –Чернігів:– 2020. – №4 (22). – С. 9–18.

38. Кальченко В.В. Научные основы эффективного шлифования со скрещенными осями абразивного инструмента и детали: дис. д-ра техн. наук: спец. 05.03.01 / Кальченко Владимир Виталиевич; [НТУ «ХПИ»]. – Харьков, 2006. – 489 с.

39. Кальченко В.В. Общая (3D) модель формообразующих систем станков при шлифовании поверхностей со скрещивающимися осями кругов и детали// Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн - техн. Сборник.–Харьков. НТУ «ХПИ». – 2001.- Вып. 59, С.118 – 123.

40. Кальченко В. В. Общая трехмерная (3D) модель поверхностей кругов при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и детали// Вестник Национального технического университета „ХПИ”.- Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2000 №6, С. 114 – 118.

41. Кальченко В.В. Теоретичні дослідження товщини шару, який зрізається різальною кромкою, при шліфуванні орієнтованим абразивним інструментом / Кальченко В.В., Рудик А.В. // Вісн. Черніг. технол. ун-ту – Чернігів: ЧДТУ, 2005. – №21. – С. 68-74.

42. Кальченко В.В. Модульне 3D моделювання формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, інструментів та оброблюваних поверхонь / В.В. Кальченко // Вісник Тернопільського державного технологічного університету, 2005. – Том 12. – С. 68-79.

43. Кальченко В.И. Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом / В.И. Кальченко, Н.Н. Погиба, Д.В. Кальченко // Сверхтвердые материалы: научно-теоретический журнал, 2012. – №2(196). – С. 58-73

44. Кальченко В.И. Повышение производительности и точности шлифования со скрещивающимися осями эльборового круга и ступенчатого валика. / В.И. Кальченко, Н.Н. Погиба, Д.В. Кальченко // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.- техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. Вып. 80 – с. 131-140.

45. Кальченко В.И. Шлифование криволинейных поверхностей крупногабаритных деталей / В.И. Кальченко. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.

46. Кальченко В.І. Визначення складових сил різання при глибинному шліфуванні орієнтованим ельборовим кругом з врахуванням деформуючих кромок / В.І. Кальченко, Н.М. Погиба, Д.В. Кальченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – №3(51). – С. 27-34.

47. Кальченко В.І. Визначення товщини зрізаного шару при шліфуванні орієнтованим інструментом / В.І. Кальченко, А.В. Рудик, В.В. Кальченко // Машинобудування: електроніка. – Вісн. Черніг.технол.ін-ту: – Чернігів: ЧТІ, 1997. – № 3. – С. 25 – 30.

48. Кальченко В.І. Глибинне кругле шліфування зі схрещеними осями деталі та круга / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, М.А. Дмитренко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету – Чернігів: ЧДТУ, 2009.– № 37. – С. 64-72.

49. Кальченко В.І. Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станів зі схрещеними осями інструмента та деталі / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, А.М. Єрошенко, Н.М. Сіра // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки – Черкаси: ЧДТУ, 2016. – №4, 2016. – С.80-88.

50. Кальченко В.І. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями циліндричного та ступінчастого вала і ельборового круга / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, Н.М. Сіра // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб./ Харьков: НТУ «ХПИ», 2016. – Вып. 86. – С. 36-48.

51. Кальченко В.І. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями ступінчастого вала і круга / В.І. Кальченко, Д.В. Кальченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки” : науковий збірник / Черніг. держ. технол. ун-т. – Чернігів : Черніг. держ. технол. ун-т., 2013. – № 3 (67). – С. 91-99.

52. Кальченко В.І. Теоретичне та експериментальне дослідження процесів зняття припуску, зносу круга, точності формоутворення та теплонапруженості при шліфуванні циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями деталі та круга / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, А.М. Єрошенко, Н.М. Сіра // Технічні науки та технології: науковий журнал. Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2016. – №4(6). – С. 35-43.

53. Кальченко В.І. Теоретичні дослідження товщини зрізаємого шару при шліфуванні циліндричних поверхонь орієнтованим інструментом / В.І. Кальченко, А.В. Рудик, В.В. Кальченко, В.Н. Ключниченко // Вісник Черн. технолог. ін-ту – Чернігів: ЧТИ, 1999. – №9.- С. 111-119.

54. Кальченко В.І. Моделювання процесу різання одиничним абразивним зерном при круглому глибинному шліфуванні / В.І. Кальченко, О.Л. Деркач, Я.В. Кужельний // Технічні науки та технології. – 2017. – №2 (8). – С. 29–39.

55. Кальченко В.І. Визначення сумарної сили різання одиничним абразивним зерном при шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, Я.В. Кужельний, Д.В. Кальченко// Сучасні

технології в машинобудуванні. – 2017. – №12. – С. 20–30.

56. Кальченко В.І. Дослідження сил різання одиничного абразивного зерна при шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, Н.М. Сіра, Я.В. Кужельний // Технічні науки та технології. – 2018. – №2 (12). – С. 59–68.

57. Кальченко В.И. Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента //Диссертация докт. техн. наук. Харьков:ХГПУ.-1994.-491с

58. Кальченко В. І. Розрахунок сил різання одиничним абразивним зерном орієнтованого шліфувального круга / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, А. В. Кологойда, Я.В. Кужельний // Технічні науки та технології. – 2018. – №3 (13). – С. 9-17.

59. Кальченко В.І. Однопрохідне доводочне шліфування зі схрещеними осями круга та циліндричної деталі/ В.І. Кальченко, А.В. Кологойда, Я.В. Кужельний, В.В. Морочко // Технічні науки та технології. – 2018. – №4 (14). – С. 9–17.

60. Кальченко В.І. Визначення сил різання при чистовому шліфуванні циліндричної поверхні вала / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, Я.В. Кужельний, В.В. Морочко // Технічні науки та технології. – 2019. – №1 (15). – С. 41–52.

61. Кальченко В.І. Експериментальне дослідження чистового однопрохідного шліфування циліндричної поверхні вала орієнтованим інструментом / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, Я.В. Кужельний, В.В. Морочко // Технічні науки та технології. – 2019. –№ 2 (16). – С. 54–61.

62. Клименко В.Г. Теоретичні дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя / В.Г. Клименко, І.М. Пижов // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 1(26).–С. 69– 80.

63. Коломиец В.В. Алмазный инструмент фасонного профиля / В.В.Коломиец, Б.И. Полупанов, О.В. Химач. – К.: Наук. думка, 1992. – 176 с.

64. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
65. Криворучко Д. В., Залого В. А., "Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы (Монография)" - Сумы: Университетская книга, 2012. – 496с.
66. Круглое шлифование с ЧПУ/ Просп. фирмы «Junkermaschinen» на станки «Quickpoint 1001» и «Quickpoint 1002». ErwinJunker: MaschinenfabricGmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 7618. – Nordrash, Germany, 1991. – 16 с.
67. Крупицкий Э.И. Справочник молодого слесаря / Э.И. Крупицкий. - 2-е, перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1973. – 262 с.
68. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 357 с.
69. Кужельний Я.В. Аналіз методів дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування / Я.В. Кужельний // Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». – Том 30 (69) №3 2019 частина1. С. 23–27.
70. Кужельний Я.В. Моделювання процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування пластичних матеріалів. Матеріали і ІХ міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», м. Чернігів: ЧНТУ, 2019 р., том 1, С.78-79.
71. Лавриненко В.И. Изучение особенностей алмазного шлифования керамических многослойных пластин / В.И. Лавриненко, И.В. Лещук, А.М. Ващенко // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – Вып. 62. – С. 69-73.
72. Лавриненко В.И. Конкурентоспособность и технический уровень шлифовальных кругов из СТМ / В.И. Лавриненко, А.А. Шепелев, А.Е. Дуброва // Високі технології в машинобудуванні. – Харків, 2003. –Вип. 1(6). – С. 179-186.
73. Лавріненко В.І. Дослідження впливу морфометричних

характеристик зерен НТМ на різальну здатність алмазно-абразивного інструменту / В.І. Лавріненко, Г.А. Петасюк // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. научн.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып. 84. – С. 153-158.

74. Левина З.М. Контактная жесткость машин / З.М. Левина, Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.

75. Литвин О.О. Підвищення ефективності двостороннього шліфування торців деталей різних діаметрів зі схрещеними осями кругів та деталей: дис. канд. техн. наук : спец. 05.03.01 /Литвин Олександр Олександрович; [Чернігівський національний технологічний університет]. – Чернігів, 2019. – 175 с.

76. Лоскутов В.В. Шлифование металлов / В.В. Лоскутов. – Москва – Свердловск: Машгиз, 1962. – 280 с.

77. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г.Б. Лурье; под ред. Л.Н. Филимонова. - 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1984. – 103 с.

78. Лурье Г.Б. Шлифовальные станки и их наладка / Г.Б.Лурье, В.Н. Комиссаржевская. – М.: Высшая школа, 1976. – 415 с.

79. Мазур Н.П. Основы теории резания материалов: Учебник / Н.П. Мазур, Ю.Н. Внуков, А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Залогова, Ю.К. Новоселов, Ф.Я. Якубов. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013.– 534 с.

80. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

81. Морочко В.В. Дослідження складових сил шліфування під час обробки циліндричних поверхонь периферією орієнтованого круга в режимі затуплення. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. XI Міжнародна науково-практична конференція 26-27 травня 2021. Чернігів. Україна. Том1. С.110-111.

82. Морочко В.В. Підвищення точності та продуктивності шліфування

циліндричних поверхонь орієнтованим кругом, заправленим з різними подачами на робочій і калібруючій ділянках. / В.В. Морочко // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71). №3. 2021. Частина 1. С.19-24.

83. Музичка Д. Г. Підвищення ефективності шліфування твердих сплавів спрямованим обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.03.01 Музичка Діана Геннадіївна / Чернігів. нац. технол. ун-т. Чернігів. 2015. 20 с.

84. Николаев В.А. Профилирование валков с различной кривизной образующих бочек / В.А. Николаев, С.В. Жученко // Металлургия. Научные работы ЗДИА. – 2009. - №19. - С. 105-108.

85. Новиков Ф.В. Математическая модель определения температуры при шлифовании на основе учета баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь. "Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка". Випуск 61, Харків 2007, 23-33 с.

86. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Исследования теплонапряженности процессов шлифования. "Восточно-европейский журнал передовых технологий" №2/4 (32) 2008, 41-44 с.

87. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Теоретический анализ условий повышения качества обработки по температурному критерию. "Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка". – Х.: ХНТУСГ. – 2007. – Вип. 61. – С. 164-171.

88. Новоселов Ю.К. Адаптивное регулирование процессом шлифования валов / Ю.К. Новоселов, С.М. Братан, И.В. Крылов // Резание и инструмент в технологических системах: меж.науч.тех.сб.- Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып.55. –С. 173-182.

89. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с.

90. Носенко В.А. Шлифование адгезионно-активных металлов / В.А.

Носенко. – М.: Машиностроение, 2000. – 262 с.

91. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / В.В. Душинский, Е.С. Пуховский, С.Г. Радченко. Под общ. ред. Г.Э. Таурита. – Киев: Техніка, 1977. – 176 с.

92. Параметрическая вероятностная модель рабочей поверхности абразивных инструментов / Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Гаращенко Я.Н., Шпилька А.Н. // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХПИ», 2010. – Вип. 4. – С. 177-191.

93. Патент №134080 Україна на винахід (корисну модель) МПК В24В 5/04. Спосіб круглого чистового шліфування периферією орієнтованого круга / Кальченко В.І., Кальченко В.В., Сіра Н.М., Кологойда А.В., Кужельний Я.В., Кальченко Д.В., Морочко В.В., Аксьонова О.О.; заявник та патентовласник Чернігівський національний технологічний університет. – №201812754; заявл. 21.12.2018; опубл. 25.04.2019. Бюл. №8.

94. Патент 145532 Україна, МПК В23С 3/08 / Кальченко В.В., Кальченко В.І., Сіра Н.М., Кологойда А.В., Следнікова О.С., Винник В.О., Кальченко Д.В., Скляр В.М., Морочко В.В. Спосіб шліфування кулачків розподільчого валу. Опубл. 28.12.2020. Бюл №24. 3 ст. заявка u 2020 03135.

95. Патент 145383 Україна, МПК В24В 5/04 / Кальченко В.І., Кальченко В.В., Сіра Н.М., Кологойда А.В., Венжега В.І., Кальченко Д.В., Морочко В.В. Спосіб шліфування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями круга і деталі. Опубл. 10.12.2020. Бюл №23. 8 ст. заявка u 2020 03463.

96. Перепелица Б.А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием / Б.А. Перепелица. – Харьков: Вища школа, 1991. – 512 с.

97. Пермяков А.А. Повышение эффективности предварительного шлифования прокатных валков за счет восстановления режущей способности круга без правки / Пермяков А.А., Жижев А.А. // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2011. – Вип. 118/2011. – С.113-118.

98. Петраков Ю.В. Система автоматизации программирования контурной обработки на станках с ЧПУ / Ю.В. Петраков // Сборник трудов технологического университета Габрово (Болгария). – Габрово, 1977. – С. 9-17.
99. Петраков Ю.В. Структурно-параметрическая модель контурного шлифования на станках с ЧПУ / Ю.В. Петраков, Абу Эль Хусейн // Proceedings of international Scientific Conference «MECHANICS». – Rezeszov, Poland, 2000. – pp. 227 - 231.
100. Петраков Ю.В. Теорія автоматичного управління в металообробці / Ю.В. Петраков. – К.: ІЗМН, 1999. – 212 с.
101. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков / А. С. Проников. – М.: Машиностроение, 1985. – 228 с.
102. Пуш В.Э. Конструирование металлорежущих станков / В.Э. Пуш. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
103. Раб А.Ф. Выбор оптимальной функции алгоритма управления процессом автоматизированного шлифования кругами из СТМ / А.Ф. Раб, Е.Б. Кондусова, Ю.В. Дудукалов // Резание и инструмент. – Харьков, 1993. – Вып. 48. – С.71-73.
104. Равская Н.С. Основы теории формообразования поверхностей при механической обработке / Н.С. Равская, П.Р. Родин // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – Киев, 1998. – №33. – С. 74-82.
105. Равська Н.С. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н.С. Равська, П.Р. Родин, Т.П. Ніколаєнко і ін. – Житомир: ЖІТІ, 2000. – 332 с.
106. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. Монография / С.П. Радзевич – К.: Растан, 2001. – 592 с.
107. Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания / И.Я. Райков. – М.: Высшая школа, 1975. – 89 с.
108. Решетов Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.

109. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием / Родин П.Р. – Киев: Вища школа, 1977. – 192 с.
110. Рудик А.В. Повышение эффективности одновременного шлифования периферией и торцом ориентированного инструмента цилиндрических и сферических поверхностей: дисс. канд. техн. наук: спец. 05.03.01 / Рудик Андрей Васильевич; [ХГПУ]. – Харьков, 1996. – 106 с.
111. Семко М.Ф. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб и др. – Киев: Техника, 1978. – 192 с.
112. Семко М.Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. – Харьков: Вища школа, 1980. – 192 с.
113. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. О мгновенной температуре шлифования "Вестник национального технического университета ХПИ".- Харьков.-2009.- №2.-124 с,С. 97-116.
114. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. Температура самоподогрева при шлифовании. "Восточно-европейский журнал передовых технологий". – 2009. –№ 1/5 (37). – С. 24-37.
115. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. О балансе тепла от работы деформации на плоскости сдвига при резании единичным абразивным зерном. "Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету".Серія: Машинобудування машинознавство. - Випуск 7 (166). - С. 65-75.
116. Сіра Н.М. Підвищення ефективності шліфування циліндричних, ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання зі схрещеними осями кругата деталі: дис. канд. техн. наук : спец. 05.03.01 / Сіра Наталія Миколаївна; [Чернігівський національний технологічний університет]. – Чернігів, 2017. – 176 с.
117. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп./ Г.С. Писаренко и др. – К.: Наук. думка, 1988. –324 с.
118. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1/ А.Г.

Косилова, Р.К. Мещеряков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.

119. Степанов М.С. Научные основы использования смазочно-охлаждающих жидкостей для повышения эффективности технологических систем шлифования: дис. д-ра техн. наук: 05.02.08 / Степанов Михаил Сергеевич; [Национальный технический ун-т "Харьковский политехнический ин-т"]. – Х., 2005. – 439 с.

120. Узунян М.Д. Исследование корреляционной функции ординат приведенного профиля алмазного круга / М.Д. Узунян, А.Б. Глухов // Резание и инструмент в технологических системах. - Межд. научн.-техн. сборник. - Харьков: ХГПУ, 1998. – Вып. 52. – С. 243-250.

121. Узунян М.Д. Повышение эффективности алмазного шлифования твердых сплавов путем прогнозирования и стабилизации работоспособности кругов; Автореф. дис. докт. техн. наук – М., 1989. – 40 с.

122. Федоренко. Д.В. Методология 3D моделирования процессов обработки труднообрабатываемых материалов / Д.В. Федоренко, В.А. Федорович, В.А. Залого, И.Н. Пыжов, Д.В. Криворучко// Сучасні технології в машинобудуванні. – 2016. – №11. – С. 208–232.

123. Федорович В.А. Новые возможности изучения параметров режущего рельефа алмазных кругов / В.А. Федорович, В.В. Русанов, М. Ковалец, М. Янковяк // Высокие технологии: развитие и кадровое обеспечение. Материалы XI международного научно-технического семинара – 2001, Харьков - Алушта, 12-17 сент. 2001 г. – Алушта, 2001. – С. 214-222.

124. Федорович В.А. Розробка наукових основ та способів практичної реалізації управління пристосованістю при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів/ Автореф. дисс. докт. техн. наук. Харків, 2002.- 34 с.

125. Федорович В.А. Управление параметрами субмикрорельефа алмазных зерен при шлифовании сверхтвердых материалов / В.А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах: межд. научн.-техн. сборник. – Харьков, 2001. – Вып. 60. – С. 235-243.

126. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
127. Филимонов Л. Н. Плоское шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л. : Машиностроение, 1985. – 109 с.
128. Хомяков В.С. Моделирование и экспериментальное исследование динамических характеристик шпиндельных узлов / В.С. Хомяков, Н.А. Кочинев, Ф.С. Сабиров. – Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – Вып.3. – С. 251-259.
129. Худобин Л.В., Улянины А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: УлГТУ. 2007. 298 с.
130. Шелковой А.Н. Ускорение технологической подготовки сборочного производства на основе 3d-моделирования / А.Н. Шелковой, Д.В. Феденюк // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №1. – С. 11-15.
131. Шелковой, А.Н. Расчет параметров шероховатости поверхности при круглом наружном шлифовании / А.Н. Шелковой, Ю.К. Новоселов, Л.Б. Шрон, В.Б. Богуцкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 53(959). – С.98-109.
132. Шелковой А.Н. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, Ю.В. Тимофеев, А.А. Ключко // Резание и инструменты в технологических системах. – 2013. – Вып. 83. – С. 286-295.
133. Якімов О.В. Високопродуктивне шліфування / О.В. Якімов, Ф.В. Новіков, Г.В. Новіков, О.О. Якімов – К.: ІСДО, 1995. – 180 с.
134. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
135. Ящерицын П.И. Основы резания материала и режущий инструмент / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Н.И. Жигалко. – Минск: Вышейш. школа,

1975. – 528 с.

136. Авторское свидетельство СРСР № 1234163, кл. В24В 5/04, 1984, В.И. Кальченко. Способ круглого шлифования с продольной подачей.

137. Патент 113082 (Україна) Спосіб шліфування ступінчастого вала зі схрещеними осями круга та деталі / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, Н.М. Сіра, Д.В. Кальченко; заявник та патентовласник ЧДТУ. – №u201607167; заявл. 02.07.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1.

138. Патент 113084 (Україна) Спосіб однопрохідного глибинного шліфування циліндричного та ступінчастого валів / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, Н.М. Сіра, Д.В. Кальченко; заявник та патентовласник ЧНТУ. – №u201607170; заявл. 02.07.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1.

139. Патент 60090 (Україна) Пристрій для шліфування криволінійних поверхонь обертання орієнтованим кругом / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, Н.М. Погиба; заявник та патентовласник ЧДТУ. – №u201013821; заявл. 22.11.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. №11.

140. Патент 134080 (Україна) Спосіб круглого чистового шліфування периферією орієнтованого круга / Кальченко В.І., Кальченко В.В., Сіра Н.М., Кологойда А.В., Кужельний Я.В., Кальченко Д.В., Морочко В.В., Аксьонова О.О.; заявник та патентовласник ЧНТУ. – №201812754; заявл. 21.12.2018; опубл. 25.04.2019. Бюл. №8.

141. C. Guo, S. Malkin. Analytical and experimental investigation of burnout in creep-feed grinding // CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1994. – vol. 43, no. 1. – pp. 283–286.

142. C. Guo, Y. Wu, V. Varghese, and S. Malkin. Temperatures and energy partition for grinding with vitrified CBN wheels // CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1999. – vol. 48, no. 1. – pp. 247–250.

143. Chae, J., Park, S.S. and Freiheit, T. Investigation of micro-cutting operations // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2016. – Vol. 46. – pp. 313- 332.

144. Chang, Huang-Cheng and Wang, J.-J. Junz. A stochastic grinding force

model considering random grit distribution // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008. – Vol. 48. – pp. 133-134.

145. Chen X, Rowe W, McCormack D. Analysis of the transitional temperature for tensile residual stress in grinding // J Mater Proces Technol, 2000. – Vol. 107. – pp. 216-221.

146. Deniz Aslan and Erhan Budak. Semi-analytical force model for grinding operations // 12 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting. – Procedia CIRP, 2014. – Vol. 14(2014). – pp. 1-7.

147. Development of a model of tool surface dressing when grinding with crossed wheel and cylindrical part axes / Vitalii Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Olga Kalchenko, Natalia Sira, Dmytro Kalchenko, Volodymyr Morochko, Volodymyr Vynnyk// ENGINEERING TECHNOLOGICAL SYSTEMS .VOL 3, NO 1 (105) (2020).- P.23-29. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.15587/1729-4061.2020.202441](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.202441) (Scopus).

148. Development of the single-setup milling process model of the shaft support 2. necks and cams / Vitalii Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Natalia Sira, Olga Kalchenko, Volodymyr Vynnyk, Dmytro Kalchenko, Volodymyr Morochko, // ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ ЖУРНАЛ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. ENGINEERING TECHNOLOGICAL SYSTEMS .VOL 4, NO 1 (106) (2020).- P.48-54. (Scopus).

149. Gostimirovic M., Rodic D., Kovac P., Jesic D., Kulundzic N. Investigations of the cutting forces in creep-feed surface grinding process // Journal of Production Engineerin, 2015. – Vol. 18, No.2. – P. 21-24.

150. GRINDING OF TOOL STEEL / Проспект фірми «Uddeholm», 2012. – Edition 7. – 20 p.

151. Hong-Tsu Young, Der-Jen Chen. Online dressing of profile grinding wheels // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. February 2006. – Volume 27, Issue 9. – pp. 883–888.

152. Kalchenko, V., Kalchenko, V., & Yeroshenko A. (Eds.) (2014) Computer design of finish processing of non-rigid details, 16th World congress

“Aviation in the XXI-st century”, September 23-25, 2014. Kyiv, Ukraine. pp. 1.9.52-1.9.53.

153. Kalchenko V.V., Sira N.M., Kuzhelnyi Y.V., Kalchenko D.V. Modeling of the cutting process by a single abrasive grain during the grinding. International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences»: Conference proceedings, December 27 – 28, 2017. Radom: Izdevnieciba «Baltija Publishing». P. 106 – 110.

154. Look & See: [Журнал для клиентов фирмы «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: MaschinenfabricGmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2010. – Вып.: Ноябрь. – 12 с.

155. N. Kryukova. Theoretical analysis of the contact area between grinding wheel surface and workpiece in flat face grinding with spindle axis inclination / N. Kryukova, J. Kunderáka, V. Fedorovich, I. Pyzhov, A.P. Markopoulosc, V. Klimenkod // Manufacturing Technology. – 2017. – №7 (2). – P. 203–210.

156. Quickpoint. Все в одном закреплении / Просп. Фирмы «Junkermaschinen» на станки «Quickpoint 1000», «Quickpoint 3000», «Quickpoint 4000». ErwinJunker: MaschinenfabricGmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2006. – 12 с.

157. Sekhon G. S. Numerical simulation of continuous chip formation during non-steady orthogonal cutting / G. S. Sekhon, J. L. Chenot // Engngr Computations. – 1993. – Issue 10. – P. 31–48.

158. S. Wang, C. H. Li. Application and development of high-efficiency abrasive process. // International journal of advanced science and technology. – Tasmania: Science and Engineering Research Support society, 2012. – Vol. 47, October. – pp. 51-63.

159. Volodymyr Kalchenko. Determination Of Cutting Forces In Grinding With Crossed Axes Of Tool And Workpiece / Volodymyr Kalchenko, Andriy Yeroshenko, Sergiy Boyko, Nataliia Sira // Acta mechanica et automatica, 2017. – vol.11 no.1. – pp. 58-63.

160. Yali Hou , Changhe Li , Yan Zhou. Applications of High-Efficiency

Abrasive Process with CBN Grinding Wheel // Engineering, 2010. – Vol. 2, No. 3. – pp. 184-189.

161. Yan, Lan. Research on microscopic grain-workpiece interaction in grinding, Part 2 - Factorial Analysis // Advanced Materials Research, 2009. –Vol. 76-78. – pp.15-20.

ДОДАТКИ

Додаток А

У К Р А І Н А



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 134080

**СПОСІБ КРУГЛОГО ЧИСТОВОГО ШЛІФУВАННЯ
ПЕРИФЕРІЄЮ ОРІЄНТОВАНОГО КРУГА**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зарєєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.04.2019.

Заступник Міністра економічного розвитку і торгівлі України

Ю.П. Бровченко





ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 145532

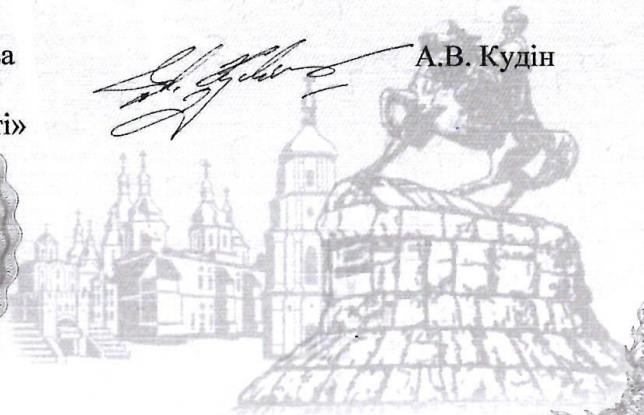
СПОСІБ ФРЕЗЕРУВАННЯ КУЛАЧКІВ РОЗПОДІЛЬНОГО ВАЛА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей
28.12.2020.

Генеральний директор
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»

 А.В. Кудін



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 145383

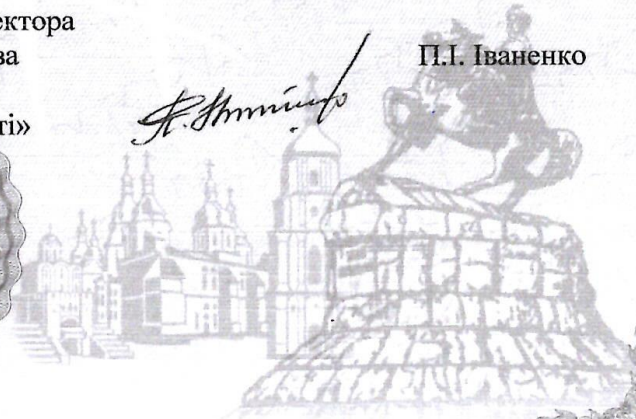
**СПОСІБ ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗІ
СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ КРУГА І ДЕТАЛІ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей
10.12.2020.

Т.в.о. Генерального директора
Державного підприємства
«Український інститут
інтелектуальної власності»

П.І. Іваненко



Додаток Б

Динамічні характеристики шліфувальної бабки

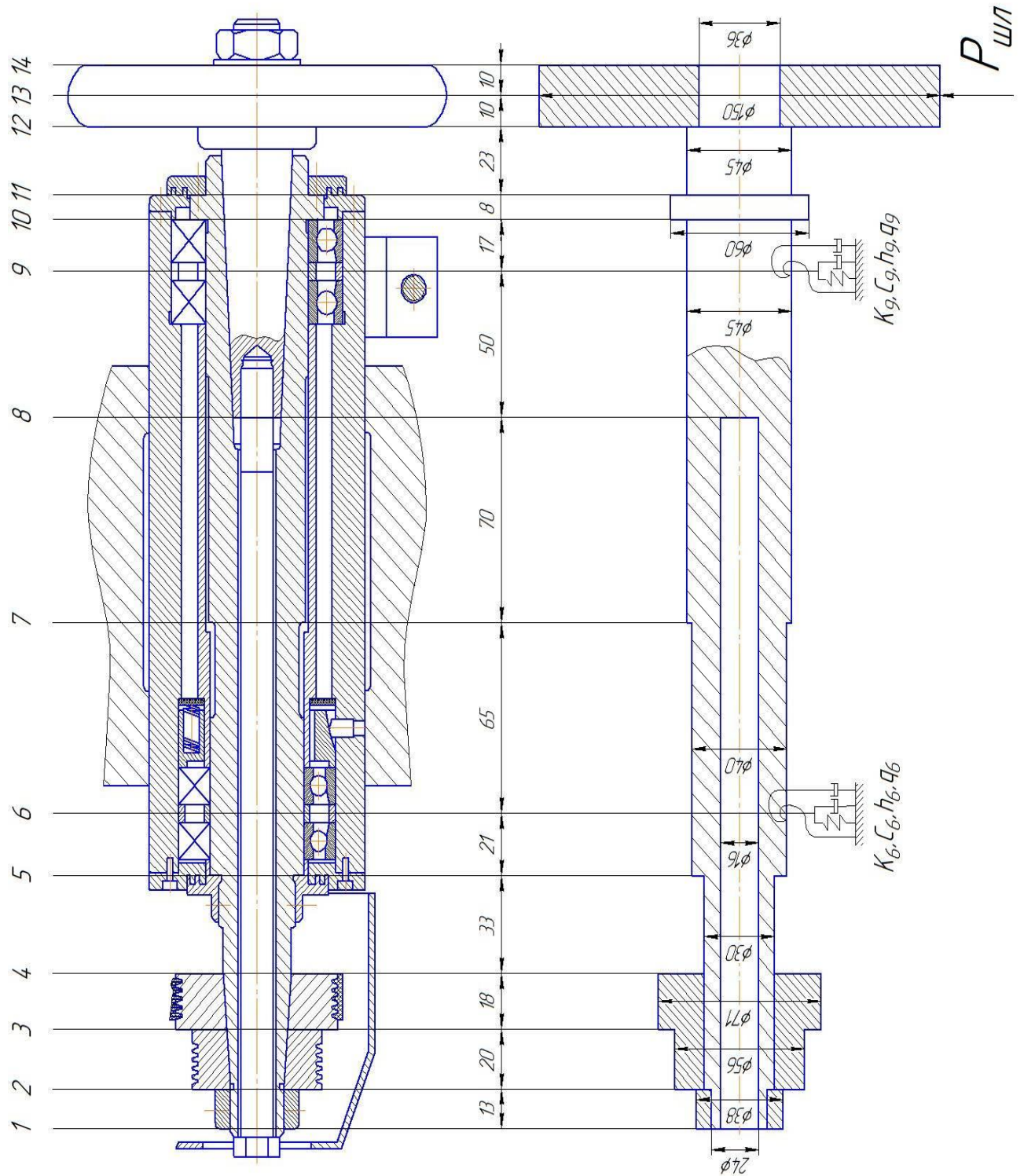


Рисунок Б.1 – Розрахункова модель шліфувальної бабки універсально-заточного верстата В3208-Ф3

Таблиця Б.1

Параметри динамічної моделі шліфувальної бабки універсально-заточного верстата ВЗ208-ФЗ

№ перерізу	Зовнішній діаметр D, см	Внутрішній діаметр d, см	Довжина ділянки l, см	Середньозважений момент інерції на ділянці J, см ⁴	Гнучка жорсткість на ділянці EJ, даН·см ²	Площа перерізу S, см ²	Об'єм ділянки V, см ³	Маса об'єму ділянки M, даН·с ² /с м	I, даН·см·с ²
1	2,4	1,6	1,3	1,31	$2,74 \cdot 10^6$	2,51	3,27	$7,04 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$
2	3	1,6	2	3,65	$7,67 \cdot 10^6$	5,06	10,11	$2,79 \cdot 10^{-4}$	$3,90 \cdot 10^{-4}$
3	3	1,6	1,8	3,65	$7,67 \cdot 10^6$	5,06	9,10	$4,65 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$
4	3	1,6	3,3	3,65	$7,67 \cdot 10^6$	5,06	16,68	0,00	0,00
5	4	1,6	2,1	12,2	$2,57 \cdot 10^7$	10,55	22,16	0,00	0,00
6	4	1,6	6,5	12,2	$2,57 \cdot 10^7$	10,55	68,58	0,00	0,00
7	4,5	1,6	7	19,8	$4,16 \cdot 10^7$	13,89	97,21	0,00	0,00
8	4,5	0	5	20,1	$4,22 \cdot 10^7$	15,90	79,48	0,00	0,00
9	4,5	0	1,7	20,1	$4,22 \cdot 10^7$	15,90	27,02	0,00	0,00
10	6	0	0,8	63,6	$1,34 \cdot 10^8$	28,26	22,61	0,00	0,00
11	4,5	0	2,3	20,1	$4,22 \cdot 10^7$	15,90	36,56	0,00	0,00
12	3,6	0	1	8,24	$1,73 \cdot 10^7$	10,17	10,17	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$
13	3,6	0	1	8,24	$1,73 \cdot 10^7$	10,17	10,17	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$
14	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

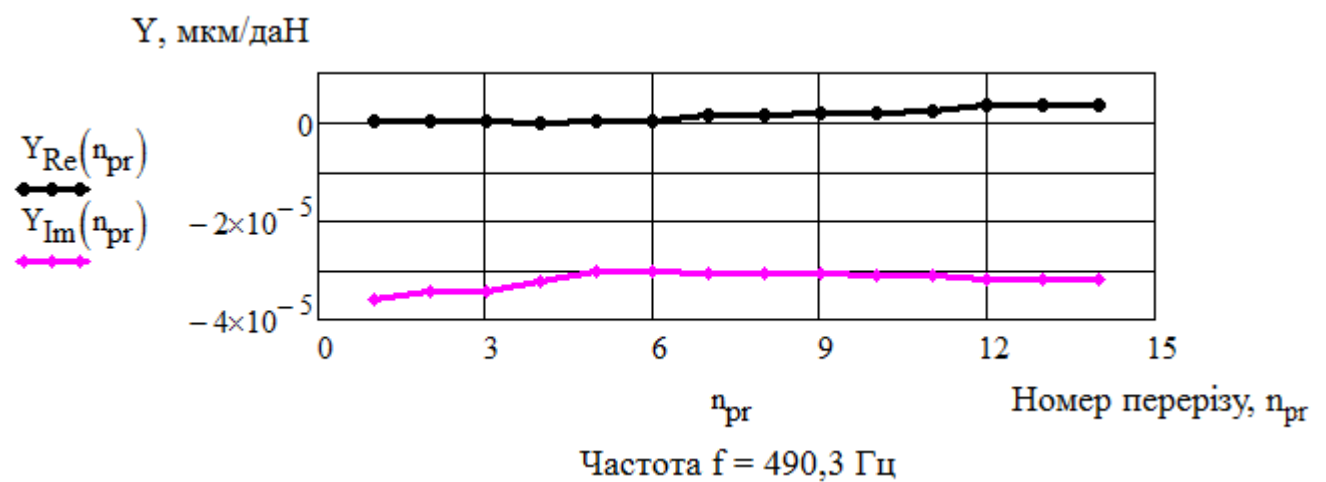
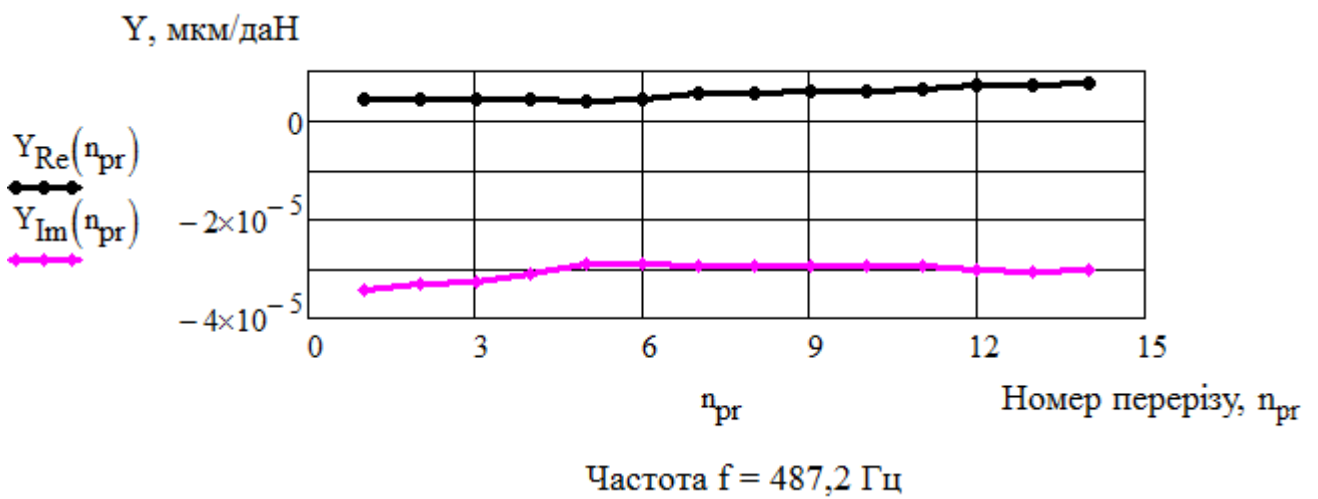
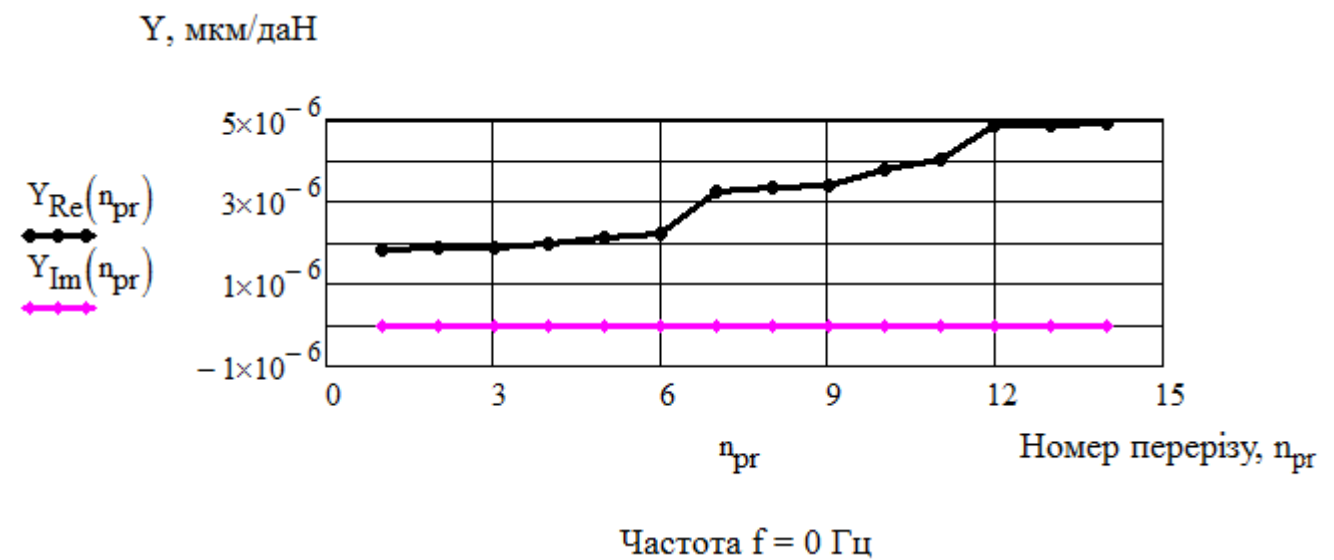


Рисунок А.2 – Форми коливань пружної системи шліфувальної бабки
універсально-заточного верстата В3208-ФЗ

Додаток В

Програми розрахунку

Матриці перетворення координат

$$\text{Радіус-вектор початку координат} \quad e_4 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Матриці перетворення координат при:

переміщенні вздовж осей

$$M1(q) := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & q \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M2(q) := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M3(q) := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

обертанні навколо осей

$$M4(q) := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q) & -\sin(q) & 0 \\ 0 & \sin(q) & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M5(q) := \begin{pmatrix} \cos(q) & 0 & \sin(q) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q) & 0 & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M6(q) := \begin{pmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Матриці, що утворені диференціюванням матриць перетворення координат:

$$DM1(q) := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad DM4(q) := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(q) & -\cos(q) & 0 \\ 0 & \cos(q) & -\sin(q) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$DM2(q) := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad DM5(q) := \begin{pmatrix} -\sin(q) & 0 & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos(q) & 0 & -\sin(q) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$DM3(q) := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad DM6(q) := \begin{pmatrix} -\sin(q) & -\cos(q) & 0 & 0 \\ \cos(q) & -\sin(q) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Побудова формоутворюючої ділянки інструменту, з врахуванням прямолінійної частини різальної кромки та радіуса заокруглення:

$$h(\phi) := (r - \rho) \cdot \tan(\phi - \phi_k) \quad Dh(\phi) := (r - \rho) \cdot \frac{1}{\cos(\phi)^2}$$

$$\begin{aligned} Rez(\phi, \theta) := & M4(\phi) \cdot M2(r - \rho) \cdot M6(\theta) \cdot M2(\rho) \cdot e^{4 \cdot \Phi(|\phi|)} \dots \\ & + -M4(\phi) \cdot M2(r - \rho) \cdot M6(\theta) \cdot M2(\rho) \cdot e^{4 \cdot \Phi(|\phi| - \phi_k)} \dots \\ & + M4(\phi_k) \cdot M3(h(\phi)) \cdot M2(r - \rho) \cdot M6(\theta) \cdot M2(\rho) \cdot e^{4 \cdot \Phi(\phi - \phi_k)} \dots \\ & + M4(-\phi_k) \cdot M3(-h(|\phi|)) \cdot M2(r - \rho) \cdot M6(\theta) \cdot M2(\rho) \cdot e^{4 \cdot \Phi(-\phi - \phi_k)} \end{aligned}$$

Параметри орієнтації інструмента:

$$\phi_{op} := -\frac{\pi}{12} \quad \text{- кут повороту відносно осі X;}$$

$$\psi_{op} := \frac{\pi}{12} \quad \text{- кут повороту відносно осі Y;}$$

$\theta_{op} := \frac{\pi}{12}$ - кут повороту відносно осі Z;

$$Rezo(\phi, \theta) := M6(\theta_{op}) \cdot M4(\phi_{op}) \cdot M5(\psi_{op}) \cdot Rez(\phi, \theta)$$

Побудова обробленої поверхні

Матричне рівняння поверхні інструмента в системі координат деталі:

$$Rp(\phi, \theta, \theta_d) := M2(\theta_d \cdot a_y) \cdot M3(\theta_d \cdot p_z) \cdot M6(\theta_d) \cdot M2(-y_c) \cdot Rezo(\phi, \theta)$$

Вектор нормалі до поверхні інструмента (векторний добуток дотичних):

$$\underline{N}(\phi, \theta, \theta_d) := a(\phi, \theta, \theta_d) \times b(\phi, \theta, \theta_d)$$

Одиничний вектор нормалі до поверхні інструмента:

$$n(\phi, \theta, \theta_d) := \frac{N(\phi, \theta, \theta_d)}{\sqrt{(N(\phi, \theta, \theta_d)_1)^2 + (N(\phi, \theta, \theta_d)_2)^2 + (N(\phi, \theta, \theta_d)_3)^2}}$$

Поверхня деталі, утворюється шляхом обертання лінії контакту навколо осі деталі:

$$Pov(\phi, \theta_d) := Rp(\phi, Kutu(\phi), \theta_d)$$

$$\underline{Pov}(\phi, \theta_d) := \text{submatrix}(Pov(\phi, \theta_d), 1, 3, 1, 1)$$

$$Det := \text{CreateMesh}(Pov, -\alpha, \alpha, 10\pi, 20 \cdot \pi, 500)$$

$$Rpd(\phi, \theta_d) := Rp(\phi, Kutu(\phi), \theta_d)$$

$$\underline{Rpd}(\phi, \theta_d) := \text{submatrix}(Rpd(\phi, \theta_d), 1, 3, 1, 1)$$

$$\underline{Rp} := \text{CreateMesh}\left(Rpd, \frac{-\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, 20 \cdot \pi, 20 \cdot \pi, 40\right)$$

Профіль поверхні утворюється, шляхом накладання послідовних ліній контакту деталі з інструментом. Згідно з цим, визначаються показники геометричної точності поверхні.

Послідовні положення різальної кромки відносно профілю поверхні, які будуть визначати шорсткість поверхні:

$$S1 := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. N_i \\ \left| \begin{array}{l} \phi \leftarrow \phi_{\min} + \frac{\phi_{\max}}{10} \cdot i \\ x \leftarrow \text{Pov}(\phi, 0)_{3,1} \\ y \leftarrow \text{Pov}(\phi, 0)_{2,1} \\ L^{(i+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \end{array} \right. \\ L^T \end{array} \right.$$

$$S2 := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0.. N_i \\ \left| \begin{array}{l} \phi \leftarrow \phi_{\min} + \frac{\phi_{\max}}{10} \cdot i \\ x \leftarrow \text{Pov}(\phi, 2 \cdot \pi)_{3,1} \\ y \leftarrow \text{Pov}(\phi, 2 \cdot \pi)_{2,1} \\ L^{(i+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \end{array} \right. \\ L^T \end{array} \right.$$

S3 := for $i \in 0..N_i$

ϕ	$\leftarrow \phi_{\min} + \frac{\phi_{\max}}{10} \cdot i$
x	$\leftarrow \text{Pov}(\phi, 4 \cdot \pi)_{3,1}$
y	$\leftarrow \text{Pov}(\phi, 4 \cdot \pi)_{2,1}$
$L^{(i+1)}$	$\leftarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

L^T

Додаток Г

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор
Національного університету
«Чернігівська політехніка»


О.О. Новомлинець
«06» 09 2021р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «МГК-Черкаси»


С.В. Лавренко
«06» 09 2021р.

АКТ

використання науково-технічної інформації
дисертаційної роботи Морочка В.В.
«Підвищення ефективності шліфування циліндричних поверхонь
орієнтованим кругом, заправленим з різними подачами
на робочій та калібрувальній ділянках»

Ми, що нижче підписалися, представник ТОВ «МГК-Черкаси», головний інженер Кондратьєв О.І., з одного боку, і представник Національного університету «Чернігівська політехніка»: завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, д.т.н., професор Кальченко В.І., з другого боку, склали цей акт у тому, що відповідно до акту прийому-передачі науково-технічної інформації, було використано методику зняття припуску, при якій припуск розподіляється вздовж чорнової, напівчистої, чистої та калібрувальної ділянок орієнтованого шліфувального круга при його роботі в режимі затуплення, яка розроблена аспірантом Морочком В.В.

Впровадження даних розробок дозволило при забезпеченні заданої якості оброблених поверхонь підвищити продуктивність обробки у 1,1-1,2 рази.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження зазначених розробок передбачається отримати у розмірі 25 000 грн.

Цей акт не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Головний інженер
ТОВ «МГК- Черкаси»



О.І. Кондратьєв

Зав. кафедри АТ та ГМ
Національного університету
«Чернігівська політехніка»
д.т.н., професор



В.І. Кальченко

Додаток Д

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Чернігівська політехніка»

д.т.н., проф. В.В. Кальченко

» 19 2021 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Морочка В.В.

в освітній процес

Члени комісії у складі Навчально-наукового інституту механічної інженерії, технологій та транспорту Національного університету «Чернігівська політехніка», д.т.н., проф. Цибулі С.Д., заступника завідувача кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, к.т.н., доц. Венжеги В.І. склали цей акт про те, що розробки дисертаційної роботи аспіранта кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Морочка В.В. на тему: «Підвищення ефективності шліфування циліндричних поверхонь орієнтованим кругом, заправленим з різними подачами на робочій та калібрувальній ділянках» використовуються в освітньому процесі Національного університету «Чернігівська політехніка» при підготовці фахівців другого «магістерського» рівня вищої освіти спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» при вивченні дисципліни циклу професійної підготовки, блоку обов'язкових компонент «Прогресивні напрямки розвитку процесів механічної обробки, верстатів та інструментів».

Директор ННІМІТТ,
д.т.н., проф.

С.Д. Цибуля

Заступник зав. каф. АТ та ГМ,
к.т.н., доц.

В.І. Венжега