МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Гринюк Сергій Васильович

УДК 621.822.681.2:369.64

ДИСЕРТАЦІЯ

Підвищення ефективності операцій безцентрового шліфування кілець роликопідшипників в умовах серійного виробництва

05.02.08 – технологія машинобудування
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____С.В. Гринюк

Науковий керівник: Марчук Віктор Іванович, доктор технічних наук, професор

Луцьк – 2021

АНОТАЦІЯ

Гринюк С.В. Підвищення ефективності операцій безцентрового шліфування кілець роликопідшипників в умовах серійного виробництва.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – «Технологія машинобудування» – Луцький національний технічний університет, Луцьк 2021.

Робота присвячена вдосконаленню операцій безцентрового шліфування функціональних поверхонь зовнішніх кілець роликопідшипників за рахунок створення науково-практичних підходів до моделювання технологічних операцій та запровадження прогресивних методів безцентрового шліфування переривчастими абразивними інструментами.

Розроблені загальні принципи формування якості шліфованих поверхонь та математична модель теплових процесів в технологічній системі безцентрового шліфування деталей роликопідшипників, що стало передумовою створення механізму запобігання температурних дефектів на операціях шліфування.

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень виявлені закономірності розповсюдження тепла в зоні шліфування поверхонь кілець, отримані залежності для визначення глибини нагрівання поверхневого шару шліфованої поверхні в залежності від режимів формоутворення і конструктивних особливостей шліфувального інструменту. Математичним моделюванням визначені умови зменшення температури під час переривчастого шліфування, умови підвищення продуктивності при обмеженнях за температурою шліфування. Теоретично та експериментально обгрунтована умова впливу температурного фактору на фізико-механічні параметри якості шліфованих поверхонь кілець зі сталей ШХ15 та 12Х1.

У першому розділі на підставі аналізу літературних джерел та виробничого досвіду встановлено особливості технології підшипникового виробництва, проведено аналіз конструктивних особливостей кілець роликових підшипників, а

також проведено аналіз причин і джерел походження дефектів шліфованих поверхонь.

У другому розділі наведені принципи визначення кількісних та фізичних показників для визначення температури шліфування та її вплив на якість поверхонь після шліфувальних операцій . Розроблено математичну модель теплового балансу і встановлено , що під час безцентрового шліфування частина тепла , що переходить в стружку значно менше частини тепла, яка переходить в оброблювану деталь. Визначено умову зменшення температури при обмеженнях за продуктивністю обробки.

У третьому розділі проведені дослідження теплових процесів, що виникають під час шліфування переривчастими абразивними кругами. Обґрунтовані основні умови зменшення температури під час переривчастого шліфування, які полягають в зменшенні умовного напруження різання і часу дії теплового джерела в зоні шліфування. В першому випадку – це досягається підвищенням ріжучої здатності шліфувального круга, та зниженням тертя в зоні шліфування . В другому випадку забезпеченням переривчастості оброблення та регулюванням режимів шліфування.

У четвертому розділі на основі теоретичних і експериментальних досліджень експериментальних досліджень розглянуто зв’язки конструкторсько-технологічних чинників та показників безцентрово- шліфувальних операцій з параметрами якості шліфованих поверхонь, температурою шліфування, силовими параметрами процесу шліфування суцільними та переривчастими шліфувальними кругами та конструктивними параметрами переривчастих шліфувальних кругів.

Експериментально та теоретично досліджено вплив глибини різання, числа канавок шліфувального круга, швидкості різання та величини повздовжньої подачі на температуру шліфування. Встановлено співвідношення температури, що передається в стружки та температури, що передається в тіло заготовки, як 60% і 30 % відповідно.

На підставі проведених експериментальних досліджень побудовані поверхні відгуку залежності температури від глибини різання , швидкості обертання

заготовки та числа канавок шліфувального круга, які покладені в основу розробленого алгоритму прогнозування температури шліфування. Розбіжність теоретичного розрахунку та експериментальних досліджень не перевищила 10%.

У п'ятому розділі розроблено алгоритм оперативного проектування технологічної операції безцентрового шліфування кілець та прогнозування допустимої температури шліфування на шліфувальному автоматі SASL5AD, використання якого створило можливості для підвищення технологічної гнучкості шліфувальних операцій в умовах переналагоджувального виробництва, пришвидшення виконання переналагоджувальних операцій та впровадження бездефектного високопродуктивного шліфування . Виробничими дослідженнями встановлено, що час проектування операцій шліфування скоротився в 2 рази.

Ключові слова : функціональна поверхня, температурні дефекти, параметри якості, безцентрове шліфування, переривчастий круг, математичне моделювання.

ABSTRACT

Hryniuk S.V. Improving the efficiency of operations of centerless grinding of roller bearing rings in the conditions of serial production.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.02.08 – «Technology of mechanical engineering» Lutsk National Technical University, Lutsk 2021.

The work is devoted to the improvement of operations of centerless grinding of the functional surfaces of the outer rings of roller bearings by creating scientific and practical approaches to modeling technological operations and the introduction of advanced methods of centerless grinding with intermittent abrasive tools.

The general principles of formation of quality of the ground surfaces and mathematical model of thermal processes in technological system of centerless grinding of details of roller bearings are developed, which became a prerequisite for the creation of a mechanism to prevent temperature defects in grinding operations.

On the basis of theoretical and experimental studies revealed patterns of heat distribution in the area of grinding the surfaces of the rings, obtained dependences to determine the depth of heating of the surface layer of the ground surface depending on the modes of formation and design features of the grinding tool. Mathematical modeling determines the conditions for reducing the temperature during intermittent grinding, the conditions for increasing productivity with restrictions on the grinding temperature. The condition of influence of a temperature factor on physical and mechanical parameters of quality of the polished surfaces of rings from steels ShKh15 and 12Kh1 is theoretically and experimentally substantiated.

In the first section on the basis of the analysis of literature sources and production experience features of technology of bearing production are established, the analysis of constructive features of rings of roller bearings is carried out, and also the analysis of the reasons and sources of origin of defects of polished surfaces is carried out.

The second section presents the principles of determining quantitative and physical indicators for determining the grinding temperature and its impact on the quality of surfaces after grinding operations. A mathematical model of heat balance has been developed and it has been established that during centerless grinding the part of heat that passes into the chips is much smaller than the part of heat that passes into the workpiece. The condition of temperature decrease at restrictions on processing productivity is defined.

In the third section the researches of the thermal processes arising during grinding by intermittent abrasive wheels are carried out. The basic conditions of temperature reduction during intermittent grinding are substantiated, which consist in reduction of conditional cutting stress and action time.

heat source in the grinding zone. In the first case - this is achieved by increasing the cutting ability of the grinding wheel, and reducing friction in the area grinding. In the second case, ensuring the intermittency of processing and adjustment of grinding modes.

In the fourth section, based on theoretical and experimental studies, the relationship of design and technological factors and indicators of centerless grinding operations with the parameters of the quality of ground surfaces, grinding temperature,

power parameters of the grinding process with continuous and intermittent grinding wheels and constructors.

The influence of the cutting depth, the number of grooves of the grinding wheel, the cutting speed and the value of the longitudinal feed on the grinding temperature was investigated experimentally and theoretically. The ratio of the temperature transmitted to the chips and the temperature transmitted to the body of the workpiece is set as 60% and 30%, respectively.

On the basis of the conducted experimental researches the response surfaces of dependence of temperature on depth of cutting, speed of rotation of preparation and number of grooves of a grinding wheel which are the basis of the developed algorithm of forecasting of grinding temperature are constructed. The discrepancy between theoretical calculation and experimental research did not exceed 10%.

In the fifth section the algorithm of operative designing of technological operation of centerless grinding of rings and forecasting of admissible temperature of grinding on the SASL5AD grinding machine which use has created possibilities for increase of technological flexibility of grinding operations in the conditions of readjustment of production, acceleration of performance of adjustment and adjustment is developed. Production research has shown that the design time of grinding operations has been reduced by 2 times.

Keywords: functional surface, temperature defects, quality parameters, centerless grinding, discontinuous circle, mathematical modeling.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Марчук В.І., Равенець Л.М., Гринюк С.В. Технологічне керування теплонапруженістю процесу безцентрового шліфування кілець роликопідшипників// Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» - Луцьк: Видавництво ЛНТУ. - Вип. 7. - 2015. - С. 87-90. *Здобувачем*

проаналізовані технологічні чинники та показники операцій безцетрового шліфування кілець роликопідшипників.

2. Ravenets L., Marchuk I., Grunyuk S., Eshteivi A. Technological processing system superfinishing raceways rings roller bearings // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» - Луцьк: Видавництво ЛНТУ. - Вип. 9. - 2016. - С. 121-125. *Здобувачем досліджено вплив режимів оброблення на якість шліфованих поверхонь обертання кілець роликопідшипників.*

3. Marchuk V., Hrynjuk S., Hrysjuk I. An analysis of intercommunications of technological factors is with indexes of quality of polishing operations // Technological Complexes. - Lutsk, 2017 - №1(14) -P. 36-43. *Здобувачем проаналізовано фактори, які впливають на якість шліфування деталей та розроблено структурну схему взаємозв'язків між технологічними чинниками та фізико-механічними властивостями.*

4. Гринюк С.В., Міскевич 0.1. Технологічне керування точністю обробки поверхонь роликопідшипників в автоматизованих системах // Науковий журнал «Комп'терно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво» - Луцьк: Видавництво ЛНТУ. - Вип. 33. - 2018. - С. 56-60. *Здобувачем дослідження точності при обробці поверхонь роликопідшипників з використання автоматизованих систем та оцінка статичної похибки оброблювальної деталі.*

5. Марчук В.І., Марчук І.В, Гринюк С.В., Сачковська Л.О. Моделювання процесу безцентрового шліфування робочих поверхонь кілець роликопідшипників в умовах серійного виробництва // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки») - Луцьк: Луцький НТУ , 2019. Вип. 66. - С. 234-239. *Здобувачем розроблена адаптивна система керування процесом бкзцентрового шліфування.*

6. Marchuk V., Hryniuk S, Dzhuhuryan T. Simulation of dimensional accuracy in an automated grinding system of surfaces of rotation // "Перспективні технології та прилади". Збірник статей. Випуск 14. м. Луцьк, червень 2019 р. - Луцьк: Луцький НТУ, 2019. -С. 82-87. *Здобувачем розроблені умови моделювання розмірної точності при шліфуванні рликопідшипників.*

7. Марчук В.І., Гринюк С.В., Сачковська Л.О. Динамічна модель процесу шліфування переривчастими кругами // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». - Луцьк: Луцький НТУ, 2020. - №16. - С.33-37. *Здобувачем розробленя динамічна модель процесу шліфування перевчастим інструментом.*

8. Marchuk V.I., Marchuk I.V., Dzhuguryan T.G., Grinyuk S.V., Karpyuk V.O. On the influence of operating characteristics of grinded wheels on the quality indicators of grinded parts // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». - Луцьк: Луцький НТУ, 2020. - №17. - С.86-92. *Здобувачем досліджено вплив експлуатаційних характеристик кругів на показники якості шліфованих деталей.*

Публікації у матеріалах міжнародних наукових конференцій:

9. Марчук В.І, Сачковська Л.О., Гринюк С.В. Про вплив температури шліфування на показники якості поверхонь кілець роликопідшипників // Збірник наукових праць IX-тої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» 3-7 лютого 2020 Львів-Плай 120-121с. *Здобувачем проведені дослідження температури шліфування на показники якості.*

10. Гринюк С.В., Поліщук М.М. Дослідження впливу режимів різання переривчистими кругами на температуру шліфування кілець роликопідшипників // The 3 th International scientific and practical conference «MAN AND ENVIRONMENT, TRENDS AND PROSPECTS”! (February 10-11, 2020) SH SCW "NEW ROUTE» Tokyo, Japan 2020. 321-327 p. *Здобувачем досліджено режими різання переривчастими кругами на температуру шліфування.*

Статті у зарубіжних наукових фахових виданнях:

11. Hryniuk S. Investigation of the influence of cutting modes and intermittent grinding wheel parameters on the grinding temperature of the roller bearings // «Modern engineering and innovative technologies» - Karlsruhe, Germany, March 2020. Issue №11 Partl.-C. 17-21.

Отримані патенти:

12. Гринюк С.В. Патент № 142710 B24B 5/00 Спосіб виготовлення шліфувального круга / МарчукВ.І., МарчукІ.В., ГринюкС.В., Сачковська Л.О. (Україна). -№ u 2019 11730; Заявл. 09.12.2019; Опубл. 25.06.2020р. Бюл. №12.

ЗМІСТ

ВСТУП 11

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ НА ОПЕРАЦІЯХ ШЛІФУВАННЯ 19

1.1. Аналіз взаємозв'язків параметрів процесу безцентрового шліфування з показниками шліфувальних операцій 20

1.2. Вплив конструкторсько-технологічних та фізико-механічних чинників на показники шліфувальних операцій 26

1.3. Аналіз температурних дефектів на шліфувальних операціях поверхонь обертання кілець роликопідшипників 32

1.4. Висновки до розділу 38

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ 40

2.1. Кількісні параметри та фізичні показники для визначення температури шліфування поверхонь обертання 40

2.2. Теоретичний аналіз приведеної температури поверхневого шару шліфованої деталі 48

2.3. Кількісна оцінка балансу тепла в технологічній системі шліфування 51

2.4. Визначення умов зменшення температури під час процесу безцентрового шліфування поверхонь обертання 57

2.5. Висновки до розділу 61

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, ЩО УТВОРЮЄТЬСЯ В ЗОНІ ШЛІФУВАННЯ ПЕРЕРИВЧИСТИМИ КРУГАМИ 64

3.1. Режими шліфування переривчастими кругами та їх зв'язок з геометричними параметрами ріжучого інструменту 64

3.2. Розрахунок температури безцентрового шліфування переривчастими шліфувальними кругами 75

3.3. Умови зниження температури під час переривчастого шліфування поверхонь обертання кілець 79
3.4. Висновки до розділу 82
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ З ПОКАЗНИКАМИ ОПЕРАЦІЙ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ 84
4.1. Програма та методика експерементальних досліджень 84
4.2. Планування та проведення експерементальних досліджень 87
4.3. Дослідження зв'язків параметрів режимів безцентрового шліфування з температурою та показниками якості шліфувальних операцій 93
4.4. Дослідження шорсткості поверхні шліфованої деталі 103
4.5 Дослідження силовивих параметрів при шліфуванні 109
4.6. Конструювання переривчастого інструменту для безцентрового шліфування поверхонь обертання 120
4.7. Висновки до розділу 125
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ 128
5.1. Визначення максимально можливої продуктивності оброблення з урахуванням температури шліфування 128
5.2. Методика розрахунку параметрів режиму переривчастого шліфування, що забезпечують умови бездефектної роботи 134
5.3. Адаптивна система бездефектного шліфування на базі шліфувального автомата SASL5AD 137
5.4. Алгоритм визначення параметрів переривчастого абразивного інструменту для контролю температури шліфування 139
5.5. Висновки до розділу 142
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ 144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 148
ДОДАТКИ 163

ВСТУП

Актуальність теми. У практиці світового машинобудування відбувається постійне підвищення вимог до якості та конкурентоспроможності виробів. Оскільки, надійність та довговічність машин і механізмів багато в чому визначається надійністю опор кочення, то проблема підвищення експлуатаційних характеристик підшипників кочення, які вирішальним чином залежать від точності форми і якості робочих поверхонь їх деталей є актуальною і надзвичайно важливою.

Розвиток машинобудування на сучасному етапі вимагає прискорення темпів науково-технічного прогресу, підвищення продуктивності праці на основі ефективного використання трудових і матеріальних ресурсів, швидкого оновлення засобів виробництва, широкого впровадження прогресивних технологій на базі автоматизованих гнучких виробництв.

Успішний розвиток багатьох галузей промисловості, зокрема, машинобудування, сільгосптехніки, авіаційної техніки, верстатобудування та багатьох інших пов’язаний з використанням підшипників кочення. Часто показники якості багатьох з цих машин і механізмів прямо залежать від експлуатаційних характеристик підшипників. Через це вимоги до якості виготовлення підшипників і до їх експлуатаційних показників постійно зростають, а технологічне забезпечення цих вимог стає все більш проблемнтм.

Характерною особливістю сучасного машинобудування є широке застосування серійних і дрібносерійних виробництв; 80 – 85% виробів від загального об’єму продукції, що випускається, виготовляються в умовах серійного та дрібносерійного виробництва, які поступаються масовому і великосерійному виробництву за технологічною продуктивністю та техніко-економічними показниками. У цих умовах актуальною є проблема виявлення резервів підвищення ефективності фінішних операцій та якості оброблюваних поверхонь на основі використання технологічних принципів масового та великосерійного виробництва.

В дисертаційній роботі запропоновано використання прогресивного, переривчастого, шліфувального інструмента (кругів) на операціях чорнового та напівчистового шліфування базових поверхонь зовнішніх кілець після термічного оброблення, внаслідок чого покращились умови тепло- та стружко відведення від зони різання, що, в свою чергу , дозволило підвищити точність і якість шліфованих поверхонь , знизити температуру різання, запобігти виникненню температурних дефектів , збільшити технологічну продуктивність шліфувальних операцій.

Враховуючи вищесказане , дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково -практичної проблеми, а саме підвищення ефективності операцій безцентрового шліфування деталей роликопідшипників під час їх виготовлення в умовах серійного переналагоджувального виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі приладобудування Луцького національного технічного університету відповідно до плану держбюджетної теми : «Підвищення технологічної гнучкості та ефективності багатоінструментальних операцій механічного оброблення деталей роликопідшипників в умовах переналагоджувального виробництва» (№ держреєстрації 0112U000285, наказ МОН молоді та спорту України № 1241 від 28.10.2012 р.); згідно з координаційним планом Комітету з питань науки і техніки України, розділу «Машинобудування » (позиція 43) «Високоефективні технологічні процеси в машинобудуванні » на 2010–2015 роки. та держбюджетної теми : «Технологічне забезпечення й стабілізація якості поверхневого шару деталей підшипників на операціях шліфування переривчастими кругами » (№ державної реєстрації 0115U002202).

Мета і задачі дослідження . Метою дисертаційної роботи є технологічне забезпечення й стабілізація умов високопродуктивного бездефектного шліфування поверхонь обертання кілець роликопідшипників для підвищенння якості та експлуатаційних характеристик шліфованих поверхонь в умовах серійного переналагоджувального підшипникового виробництва.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. На підставі аналізу літературних джерел за напрямом досліджень та вивчення виробничого досвіду з проблеми технологічного забезпечення якості шліфованих деталей й підвищення ефективності технології підшипникового виробництва дослідити джерела походження та причини виникнення розмірно-геометричних, фізико-механічних дефектів під час виконання фінішних шліфувальних операцій.

2. Дослідити механізм походження температурних дефектів на операціях безцентрового шліфування базових поверхонь обертання зовнішніх кілець роликопідшипників переривчастими шліфувальними кругами.

3. Розробити методику моделювання теплових процесів на операціях чорнового та напівчистового шліфування кілець, а також математичну модель оперативного розрахунку температури та визначення умов бездефектного високопродуктивного шліфування циліндричних поверхонь переривчистими шліфувальними кругами для функціонування системи адаптивного керування шліфуванням.

4. Визначити умови зменшення температури поверхневого шару під час безцентрового шліфування поверхонь зовнішніх кілець підшипників для бездефектного високоефективного шліфування переривчастим абразивним інструментом.

5. Провести комплекс експериментальних досліджень зв’язків конструкторсько-технологічних чинників безцентрово-шліфувальних операцій з фізико-механічними показниками якості шліфованих поверхонь, силовими параметрами процесу шліфування, які безпосередньо впливають на показники шліфування та на параметри якості шліфованих поверхонь. Дослідити вплив конструктивних параметрів переривчастого збірного круга та умов охолодження ЗОР на показники процесу безцентрового шліфування деталей.

6. Визначити геометричні параметри та конструктивні особливості переривчастого абразивного інструменту для високоефективного безцентрового

шліфування базових поверхонь кілець та розробити методику прогнозування температури в зоні шліфування і параметрів якості шліфованих поверхонь.

7. На підставі проведених теоретичних та експерементальних досліджень розробити схему адаптивного керування температурою шліфування та інженерну методику оперативного визначення параметрів налагодження шліфувального верстата SASL5AD на етапі технологічної підготовки безцентрово-шліфувальних операцій.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси шліфування поверхонь обертання кілець роликопідшипників в умовах автоматизованого переналагоджувального підшипникового виробництва.

Предмет дослідження – взаємозв'язки конструкторсько-технологічних чинників шліфувальних операцій з показниками якості та експлуатаційними характеристиками поверхонь кілець роликопідшипників.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є системний підхід до визначення досліджуваного об'єкту – технологічних процесів формоутворення поверхонь обертання з врахуванням зв'язків технологічних факторів із розмірними та фізико-механічними параметрами якості шліфованої поверхні. В основу дисертаційних досліджень було покладено загальні положення технології машинобудування, теорії різання металів, а також математичний апарат аналізу та синтезу для моделювання розмірних параметрів поверхонь обертання в процесі їх формоутворення на операціях безцентрового шліфування, теорії гармонічного аналізу для дослідження механізму виникнення похибок розмірного контролю та причин, що їх викликають, математичної статистики під час аналізу причин виникнення дефектів оброблення в технологічних системах механічного оброблення, теорії автоматичного керування процесом шліфування; методів планування експерименту для проведення експериментальних досліджень, аналізу та оброблення результатів.

Для дослідження й аналізу геометричної структури поверхонь, шорсткості та фізико-механічних параметрів якості, а також для визначення параметрів мікрогеометрії був використаний такі прилад, як MWA100C та SURTRONIC-3

для вимірювання шорсткості доріжок поверхонь обертання. Температурні показники досліджувались за допомогою пірометра пістолетного типу, який вимірює температуру в діапазоні від 50-1000°С, марки НТ-822. Результати теоретичних досліджень підтверджені аналітичними розрахунками, моделюванням на ЕОМ і експерементальними дослідженнями, та опробовані у виробничих умовах.

Наукова новизна одержаних результатів.

На підставі проведених теоретичних та екперементальних досліджень встановлено взаємозв'язки конструктрсько -технологічних чинників безцентрово-шліфувальних операцій з показниками ефективності процесу шліфування та параметрами якості шліфованих деталей. Встановлені важливі функціональні залежності між режимами шліфувальних операцій, конструктивними особливостями та структурою ріжучого інструменту (шліфувальних кругів), температурою в зоні шліфування та показниками якості кілець роликових підшипників.

Для цього вперше:

– розроблено математичну модель визначення та прогнозування температури в зоні шліфування поверхонь кілець, яка грунтується на врахуванні балансу тепла, що передається в стружку і в оброблювану деталь, що дозволило визначити умови зменшення температури шліфування, а отже умови запобігання температурних дефектів та стабілізації параметрів якості і точності шліфованих поверхонь кілець роликових підшипників;

– виявлено закономірності розповсюдження тепла в зоні шліфування кілець роликових підшипників, отримані залежності для визначення глибини прогрівання шліфованої поверхні для заданої швидкості переміщення теплового джерела вздовж шліфованої поверхні під час переривчастого шліфування, аналітично визначені умови зменшення температури та швидкості її проникнення в тіло заготовки;

– отримано аналітичні залежності, що описують функціональні зв'язки між режимами шліфування, конструктивними особливостями шліфувального

інструмента (число ріжучих виступів круга) при зміні типорозмірів кілець, які запускаються у виробництво, та температурою в зоні шліфування поверхонь кілець роликових підшипників;

– встановлено залежність між швидкістю різання, температурою шліфування та кількістю тепла, що переходить в стружку , в тіло заготовки та в різальний інструмент під час шліфування циліндричних поверхонь кілець роликопідшипників переривчастими кругами;

– отримані аналітичні залежності для визначення приведеного показника температури, який характеризує теплонапруженість процесу шліфування. На цій основі отримані залежності для оперативного визначення умов зменшення температури в ході безцентрового шліфування поверхонь обертання переривчастими і суцільними кругами.

Практичне значення одержаних результатів.

Вдосконалено технологію безцентрового шліфування поверхонь зовнішніх кілець роликових підшипників за рахунок використання високоефективного шліфувального інструмента з переривчастою робочою поверхнею, що покращило умови стружко - та тепловідведення з зони шліфування:

– запропоновано конструкцію збірного шліфувального круга зі змінною зернистістю окремих секцій, що дозволило стабілізувати параметри якості шліфованих поверхонь та зменшити теплонапруженість процесу шліфування;

– розроблено інженерну методику розрахунку і встановлення раціональних режимів оброблення та визначення параметрів інструментального налагодження верстата SASL5AD на шліфувальну операцію для стабілізації параметрів якості та підвищення ефективності бездефектного оброблення деталей;

– запропоновано алгоритм оперативного визначення параметрів технологічної операції абразивного оброблення кілець на безцентрово-шліфувальному верстаті. З технологічного маршруту вилучена одна шліфувальна операція, що дало змогу отримати економічний ефект. Технологія

переривчастого шліфування впроваджена в діюче підшипникове виробництво ПАТ «SKF Україна » (публічне), що дозволило отримати економічний ефект.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок дисертанта в роботах , які виконані спільно з авторами публікацій та патенту на корисну модель [22, 80] розроблення технологічного обґрунтування та розроблення методики експериментальних досліджень [23, 64, 66], постановка й проведення експериментальних досліджень [145, 148], розроблення математичних моделей [65, 67], дослідження фізико-механічних параметрів поверхонь обертання та експлуатаційних властивостей зовнішніх кілець роликопідшипників [145, 147].

Постановка задач, аналіз і трактування результатів виконано спільно з науковим керівником та, частково, з співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались й обговорювались на : науково-практичних конференціях Луцького національного університету у 2015-2020 рр.; IV Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м.Тернопіль, 25-26 листопада 2015 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні і експеременральні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування» (м. Луцьк, 20-23 травна 2019 р.); IX Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м.Львів-Плай , 3 – 7 лютого 2020 р.); IV Всеукраїнській науково-технічній конференції «Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції» (м.Луцьк, 29 жовтня 2020 р.) Робота доповідалась й отримала позитивний відгук на розширених засіданнях науково-технічних семінарів Луцького національного технічного університету.

Публікації. Основний зміст і результати роботи опубліковані в 11 друкованих працях , серед яких 3 статті (1 одноосібно) в наукових журналах, збірниках, тезах доповідей, з них 8 у фахових виданнях, отримано один патент на корисну модель.

Структура та обсяг роботи . Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, висновків , списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг

дисертації – 173 сторінок, в тому числі – 58 ілюстрацій, 15 таблиць, список використаних джерел з 149 найменувань та 4 додатки на 11 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації – 162 сторінках .

РОЗДІЛ 1
СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ НА ОПЕРАЦІЯХ ШЛІФУВАННЯ

Однією з основних завдань технології машинобудування є забезпечення заданої якості деталей при певному виробництві з найменшими витратами. Головним показником якості кілець роликопідшипників є точність поверхонь кочення, визначається значеннями макро - і мікрогеометрична похибка обробки. До інших показників якості, як відомо, відносять стан поверхневого шару доріжки кочення. Одним з основних показників продукції машинобудування, що гарантує її конкурентоспроможність на світових ринках є її якість – здатність виробу задовольняти потреби споживачів на всіх етапах його життєвого циклу, аж до утилізації.

Для забезпечення якості кілець, від якого в значній мірі залежить експлуатаційна надійність роликопідшипників , при обробці на сучасних шліфувальних автоматах необхідно враховувати не тільки досить відомі методи технології машинобудування, але і методи теорії автоматичного управління . Останні дозволяють ефективно реалізувати управління точністю за принципом зворотного зв'язку на основі приладів активного контролю, в тому числі з кількома інформаційними параметрами, а також врахувати не стаціонарність параметрів процесу шліфування.

Вироби машинобудівної галузі можуть характеризуватися різними експлуатаційними властивостями: зносостійкістю, контактною жорсткістю, стійкістю втоми, міцністю посадок, оптичними властивостями поверхонь. Експлуатаційні характеристики виробів закладаються на етапі проектування, забезпечуються в процесі виготовлення деталей та монтажу вузлів , реалізуються під час експлуатації.

При аналізі літературних джерел багатьох відомих учених, до яких слід віднести: П.І. Ящеріцина, Є.Н. Маслова, Ларшина В.П., О.В. Якімова, В.М.

Верезуба, В.А..Сипайлова, Л.М. Філімонова, Ю.Н. Полянчикова, Ю.В. Петракова, В.Г..Лєбедєва, В.І. Марчука, С.С..Шахновського, П.Р. Родіна, В.М. Сухарєва, А.В..Корольова, А.М. Баландіна, було розглянуто наукові основи процесу шліфування та розроблені технологічні методи абразивного оброблення, що широко й успішно застосовуються в різних галузях машинобудування. Цими роботами і досвідом підприємств наведено широкі можливості процесів шліфування щодо забезпечення високої якості деталей машин при обробленні. Разом з тим, недостатньо досліджень спрямовано на вивчення потенційних можливостей процесу переривчастого шліфування, який дозволяє значно підвищити продуктивність, стабілізувати якість внаслідок зменшення теплонапруженості процесу, що особливо актуально при обробленні поверхонь деталей підшипників та інтенсифікації режимних параметрів.

1.1. Аналіз взаємозв'язків параметрів процесу безцентрового шліфування з показниками шліфувальних операцій

Підшипники кочення є важливими елементами механізмів , які суттєво впливають, а часто і визначають якісні характеристики вузлів, а також довговічність і надійність машин в цілому. Вдосконалення існуючих зразків та розроблення нової сучасної техніки висувають до підшипників кочення підвищені вимоги щодо експлуатаційних параметрів . Ці вимоги диктуються необхідністю створення вузлів з мінімальною масою, з пониженим рівнем шумів та вібрацій, плавністю передачі крутних моментів, швидкохідності, підвищеної вантажопіднімальності. Важливою експлуатаційною властивістю підшипників кочення є їх клас точності [83]. За класифікацією [80], в порядку зростання, прийнято наступні класи точності : 8, 7, 0, 6, 5, 4, 2 . Клас точності підшипника залежить від точності виготовлення комплектуючих деталей.

Роликопідшипники складаються з зовнішнього та внутрішнього кілець, роликів і сепаратора. Точність підшипника визначається точністю оброблення робочих поверхонь та їх взаємного розташування у комплектуючих деталях [47], а також розмірами посадочних поверхонь підшипника: діаметром отвору

внутрішнього кільця, діаметром твірної зовнішнього кільця та висотою підшипника в зборі.

Слід відмітити, що проблему якості комплектуючих деталей можна успішно вирішити лише за умови, якщо якість виробів буде забезпечуватись технологічним процесом [107]. Ніякої альтернативи в області забезпечення якості продукції не існує. Отже , необхідно підвищувати рівень технологічної точності [94].

Якість продукції може забезпечуватись двома методами, які по суті характеризують дві різні технічні політики: розбракуванням або сортуванням вже виготовлених деталей або виробів і шляхом підвищення технологічної точності, коли якість продукції забезпечується безпосередньо технологічним процесом [53]. Другий метод, безумовно, є прогресивнішим.

Реалізація другого метод – дотримання необхідної точності безпосередньо в технологічному процесі , базується на використанні додаткового оснащення – автоматизованих засобів «управління розміром» та дотриманням основних принципів забезпечення точності. Один з цих принципів – принцип інверсії , оснований на тому, що будь-яка деталь від моменту її виготовлення до моменту експлуатації проходить ряд перетворень і різних станів – інверсій . Спочатку деталь є об’єктом оброблення, потім – об’єктом вимірювання, далі стає елементом механізму. Отже, параметри деталі, як елементу механізму, відповідатимуть необхідним значенням лише у тому випадку, коли всі фази її проходження будуть досліджуватись і враховуватись сумісно [21].

Із принципу інверсії випливає, що точність необхідно обмежувати, виходячи з функціонального призначення деталі , схема технологічного формоутворення повинна відповідати схемі її функціонування, а схема контролю – враховувати обопільно дві названі схеми. Відповідно, вимоги принципу інверсії конструктор повинен враховувати на стадії проектування виробу, метролог – під час контролю, а технолог – під час виготовлення.

Технологія виготовлення підшипника – складний виробничий процес (рис.1.1), який включає ряд основних та допоміжних операцій [99]. Для

автоматизованого переналагоджувального виробництва типова структура технології виготовлення залишається практично незмінною, але технологічні режими, оснащення, інструментальне забезпечення постійно змінюються [135], це вимагає й оперативної конструкторсько-технологічної підготовки.

На схемі рис.1.1 не показані контрольні та випробувальні операції , що супроводжують виготовлення, частка яких може складати до 15% від основного часу технологічних операцій [87].

Типовий технологічний маршрут шліфування кілець підшипників подано на рис.1.2. Практично на всіх операціях застосовуються системи активного контролю розмірів . Такі системи дозволяють в процесі оброблення компенсувати як функціональні, так і власне випадкові похибки [86]. Таким чином, ці системи мають найбільші компенсаційні властивості і, відповідно, відповідають найбільш простим математичним моделям [18].

Високочастотна складова технологічних похибок відноситься до найбільш складних для компенсації, так як виникає в результаті коливань величин припусків на оброблення. Для її зменшення необхідно підвищувати точність попередніх операцій [25]. Тому системи активного контролю використовуються на всіх шліфувальних операціях.

В загальному, до активного контролю відноситься будь-який метод контролю, за результатами якого вручну або автоматично здійснюється вплив на технологічний процес [27]. Активний контроль можна розглядати як систему «регулювання розмірів». Це дозволяє стабілізувати величину припуску на викінчувальних операціях шліфування, тобто зменшити високочастотну складову технологічних похибок.

Технологічний маршрут шліфування кілець роликопідшипників подано на рис.1.2. Практично на всіх операціях застосовуються системи активного контролю розмірів. Такі системи дозволяють в процесі оброблення компенсувати як функціональні, так і власне випадкові похибки [20, 92].

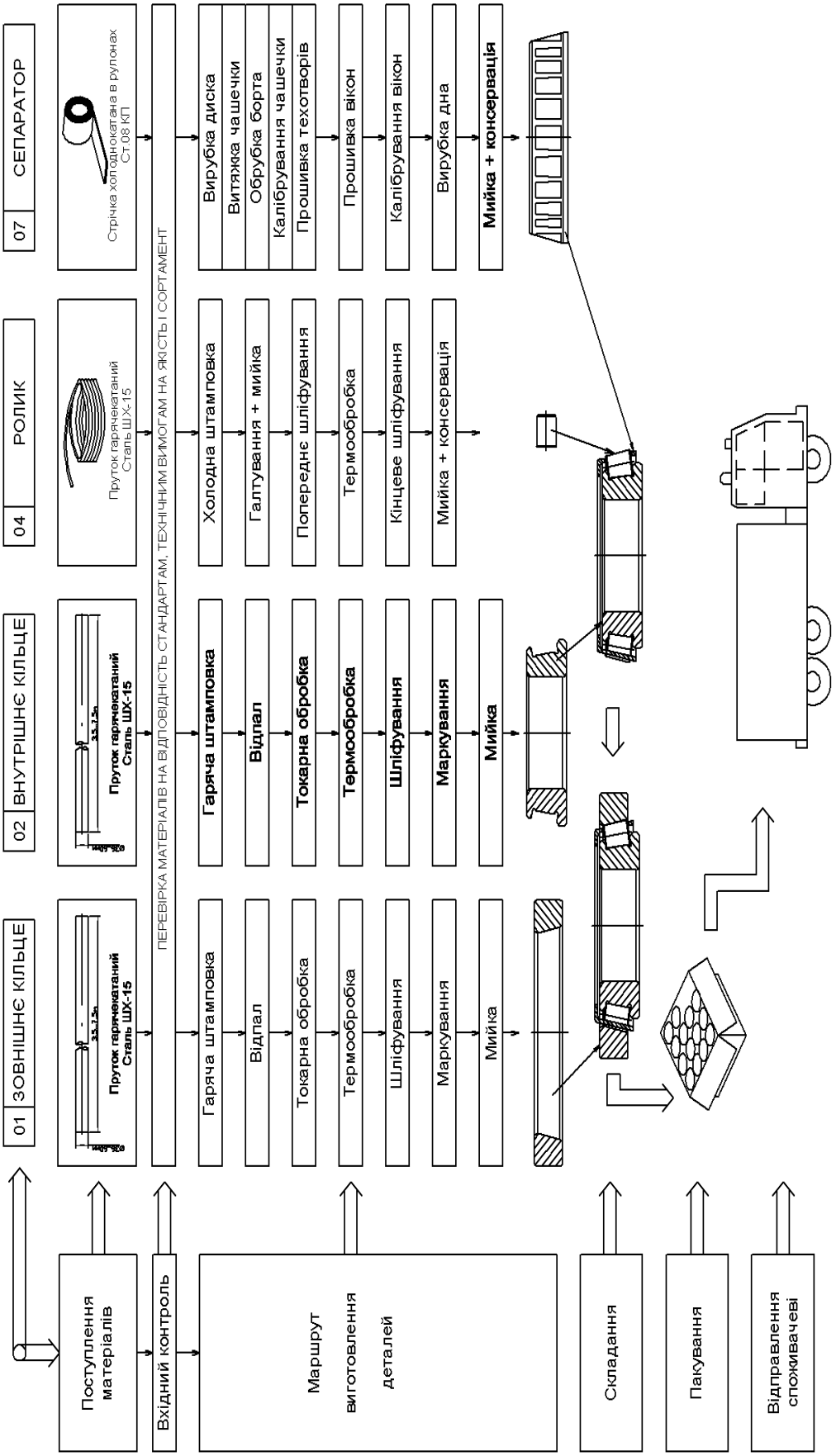


Рис. 1.1. Технологія виготовлення підшипника

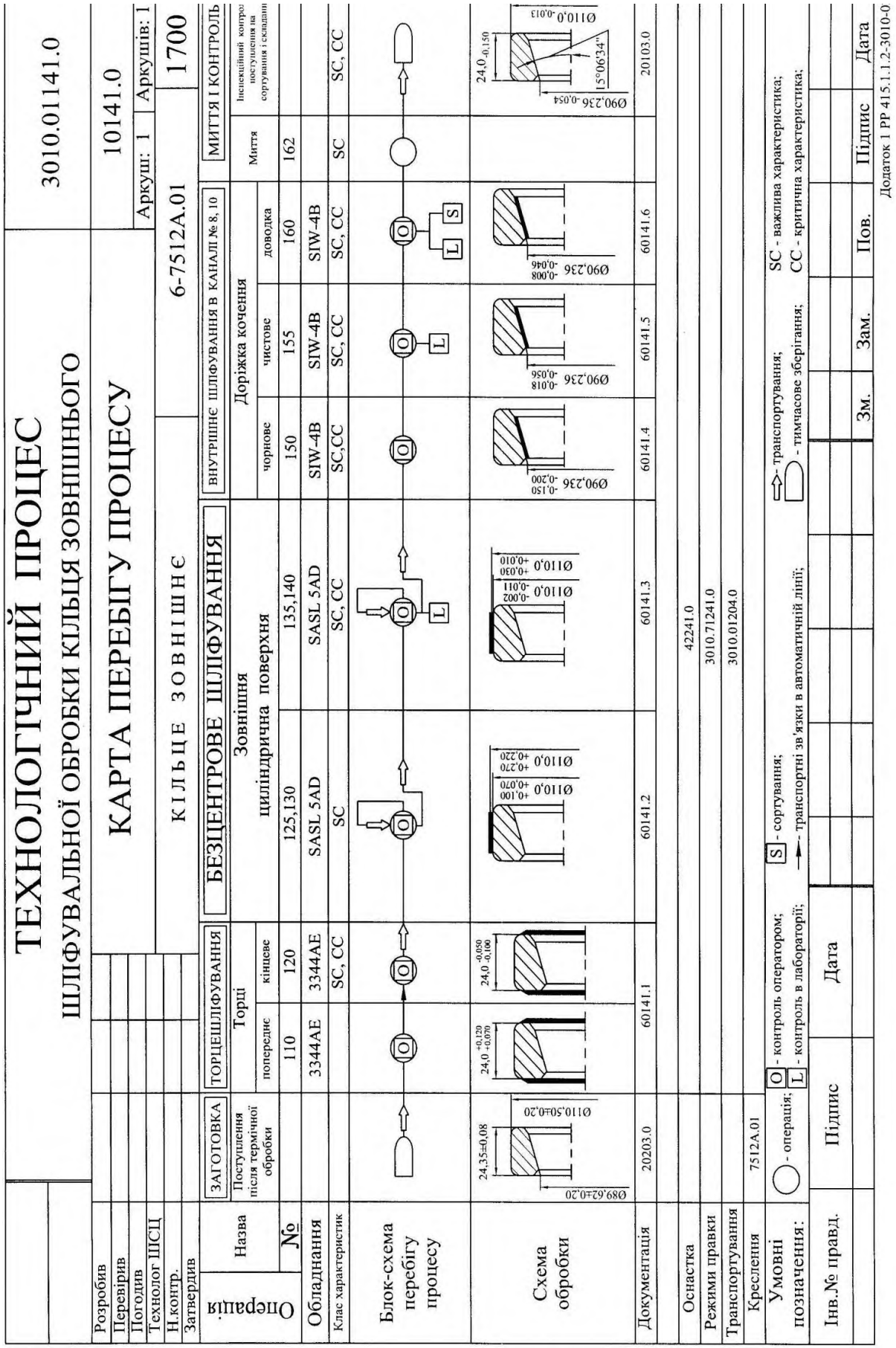


Рис. 1.2. Технологічний процес шліфування кільця

Як раніше встановлено, основним критерієм оцінки похибок оброблення є величина поля сумарного розсіювання розмірів партії деталей, оброблених на металорізальному верстаті. Головними чинниками, що зумовлюють розсіювання розмірів деталей, є розмірне зношування різального інструменту, теплові та силові деформації технологічної системи [96, 98].

Геометрична або статична точність верстату в основному визначає похибки форми оброблюваних деталей і на розсіювання розмірів суттєвого впливу не виявляє [15]. Основний сенс використання методу активного контролю розмірів заключається саме в усуненні впливу на точність оброблення зношування різального інструменту, теплових і силових деформацій технологічних систем.

Похибки вимірювальних приладів входять до складу сумарної похибки активного контролю [60]. Але частка статичної похибки приладів у загальному об'ємі сумарної похибки оброблення досить незначна. У деяких випадках частка похибки приладів складає всього 2 – 4% від величини сумарної похибки управляючого контролю. Інша частина похибки визначається в основному впливом технологічних чинників.

Характеристики безцентрового шліфування наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Режими шліфування і час на операцію

№ п/п	Режим шліфування	Умовне познач.	Один.вимір.
1	швидкість обертання деталі	$V_{дет}$	м/хв
2	частота обертання деталі	$n_{дет}$	об/хв
3	швидкість обертання круга	$V_{ш.кр.}$	м/с
4	частота обертання круга	$n_{ш.кр.}$	об/хв
5	кількість подвійних ходів	$n_{дв.х.}$	дв.х./хв
6	величина осциляції	$L_{осц}$	Мм
7	форсована подача	$S_{форс}$	мм/хв
8	чорнова подача	$S_{чорн.}$	мм/хв

продовження таб. 1.1

9	чистова подача	$S_{чист.}$	мм /хв
10	час на операцію	$T_{оп}$	с
11	загальний час циклу	$T_{ц}$	с

Шліфування отворів та доріжок кочення кілець роликових підшипників у переважній більшості виконується за схемою безцентрового шліфування.

1.2. Вплив конструкторсько-технологічних та фізико-механічних чинників на показники шліфувальних операцій

Скорочення тривалості виробничого циклу, зменшення фондів, запасів в поєднанні з виготовленням продукції за принципом «точно – вчасно » відкриває виробництву певні резерви. А отже, виникає необхідність виробничий процес та засоби виробництва об’єднувати в складні високопродуктивні системи, в яких технологічні та організаційні ланцюги стають дедалі взаємозалежними.

Поєднання таких складних виробничих умов із стрімко зростаючими вимогами до якості виробів вимагає невідкладного розроблення та реалізації стратегії та тактики, забезпечення та стабілізації параметрів якості виробів в умовах гнучкого переналагоджувального інтегрованого виробництва. Успішна реалізація такого підходу , на нашу думку, можлива на основі глибокого вивчення та аналізу взаємозв’язків між чинниками, що супроводжують виробничий процес, параметрами якості виробів, деталей , а також експлуатаційними характеристиками. Кінцевою метою дослідження природи цих взаємозв’язків є створення науково обґрунтованих і реалізованих на практиці методів керування параметрами якості під час проходження всіх стадій інтегрованого автоматизованого виробничого процесу. Показники технологічної ефективності, якими характеризуються окремі деталі та підшипник в цілому доцільно розділити на такі групи [3, 12]:

1. Показники якості матеріалу (фізико-хімічні показники);

2. Показники , що характеризують точність геометричних розмірів;

3. Геометричні параметри поверхневого шару деталі (відхилення форми, хвилястість, шорсткість , мікротопографія);

4. Експлуатаційні показники;

5. Показники надійності;

6. Показники технологічності ;

7. Техніко-економічні показники.

Очевидно, що кожна група вище перерахованих показників ефективності містить ряд окремих параметрів та характеристик за допомогою яких, проводиться кількісна оцінка якості та ефективності об'єкту виробництва . Оскільки, характеристика якості підшипника як складової одиниці чи виробу залежить від показників якості окремих складових деталей та їх поверхонь, то якість робочих поверхонь деталей підшипника є першоджерелом забезпечення якості виробу в цілому та окремих його складових деталей зокрема. Отже загальна задача дослідження взаємозв'язків показників якості роликопідшипників з технологічними чинниками та експлуатаційними характеристиками зводиться до аналізу зв'язків параметрів якості робочих поверхонь деталей з технологічними чинниками.

Наука про якість поверхневого шару за свою історію розвивалась від невизначеного врахування нерівностей поверхонь до комплексної оцінки їх стану з врахуванням як всіх видів нерівностей (макровідхилення, хвилястість , шорсткість, субшорсткість), так і фізико-хімічних властивостей (структура, фазовий склад, хімічний склад, поверхневе зміцнення , залишкові напруження). Вона в теперішній час викликає інтерес вчених різних напрямків: механіків, фізиків, хіміків, метрологів та технологів [3].

Значний вклад в розвиток науки про якість поверхневого шару деталей внесли вчені: П.Г. Алексєєв, А.В . Аверченков, А.С. Ахматов, Н.М. Бєляєв , В.Ф. Без'язичний, Н.І. Буше, Ю .Г. Вітенберг, В.К. Валетов, Ю.М . Голуб, І.С. Горячова, Б.Г. Гуревич , Б.В. Дерягін, М.М. Давиденков, Л .М. Дальский, Ю.М. Дроздов, Н.І . Зорев, М.Л. Єлізаветін, Ю.К. Новосьолов , Е.М. Маслов, В.А. Кудінов, Б .І. Костецький, Е.І. Меламед, А.С . Лесохін, І.В. Кудрявцев, А.І.

Карташова , Г.С. Лоповок, П.А. Лінчевський, І .М. Міхін, І.А. Одінг, П.А . Ребіндер, А.Г. Суслов, А.П. Соколовський , В.А. Тараненко, В.Є. Любімов, О .В. Якімов, П.І. Ящеріцин, В.С . Марченко, В.М. Смелянський, В.П. Федоров .

Особливо слід відмітити роботи П.Н. Дьяченко , А.І. Каширіна, А.І. Ісаєва, А .А. Маталіна, А.Г. Суслова, А.М . Суліми, І.В. Крагельського, І.В. Рижова , В.А. Прилуцького, М.Б. Дьомкіна, В .С. Мухіна, В.К. Старкова, В.Ф . Без'язичного, Ю.Р. Вітенберга, Х. Шмальца, Г . Шлезінга, Ф. Боудена, Д. Тейбора, Т. Хисакадо , А. Адамсона, Я.І. Рудзіта.

Встановлено [7 , 11, 16], що поверхневий шар деталі в залежності від вибраного методу під час оброблення за своїми фізико-хімічними властивостями різко відрізняється від властивостей основного матеріалу.

Нерівності на поверхні деталі, структура, фазовий та хімічний склад поверхневого шару впливають на її фізико-хімічні та експлуатаційні властивості.

Поверхневий шар найбільше впливає на надійність та зносостійкість під час роботи деталі та виробу в цілому. В умовах експлуатації поверхневий шар деталі піддається найбільшому фізико-хімічному впливу. Руйнування деталі (наприклад розвиток тріщин втомленості , ерозія, зношування, корозія), в більшості випадків починаються з поверхні.

Геометричні відхилення поверхонь розрізняють також в залежності від відношення довжини кроку L до висоти нерівності H [11]: при L:H>1000 мають місце макроскопічні відхилення від правильної геометричної форми (конусність, овальність, вгнутість і ін.), при L:H=50...1000 – хвилястість поверхні; L:H<50 – шорсткість поверхні.

Субшорсткість – це субмікронерівності висотою приблизно 10^{-3}…10^{-2} мкм, що накладаються на шорсткість поверхні [3].

Макровідхилення поверхні – це нерівності висотою 10^{-2} – 10^{3} мкм на всій її довжині або ширині.

Хвилястість поверхні – сукупність нерівностей висотою приблизно 10^{-2} – 10^{3} мкм з кроком більшим за базову довжину, яка використовується для визначення параметрів шорсткості поверхні.

Шорсткість – це сукупність нерівностей висотою 10^{-3} – 10^{-2} мкм з кроком меншим за базову довжину.

Висота нерівностей хвилястості та висота шорсткості практично однакові , але відношення довжин кроків до висоти нерівностей , як бачимо, різні. Хвилястість займає проміжне положення між відхиленням від правильної геометричної форми та шорсткістю поверхні.

Хвилястість визначається в перпендикулярному перерізі поверхонь за виключенням шорсткості та відхилення геометричної форми. Хвилястість може утворюватись на поверхні деталі під час виготовлення (технологічна хвилястість) в наслідок вібрації елементів технологічної системи під час механічного оброблення через недостатню жорсткість, геометричні, кінематичні та динамічні похибки процесу механічного оброблення, а також в процесі експлуатації машини чи її складової одиниці (експлуатаційна хвилястість).

Технологічну хвилястість поділяють на поперечну (розміщення хвиль перпендикулярно переміщенню ріжучого інструменту) і повздовжню (хвилястість співпадає з напрямом руху інструменту).

Шорсткість поверхні – це сукупність поверхонь з відносно малими кроками, що утворюють рельєф поверхні та впливають на якість поверхневого шару. Якість поверхні має вплив на всі експлуатаційні властивості деталей машин: зносостійкість, втомлювальну міцність, міцність нерухомих посадок, корозійну стійкість та ін.

Шорсткість поверхні після механічного оброблення – це геометричний слід ріжучого інструменту (лезового або абразивного), створений в результаті пластичного чи пружного деформування та супроводжує процес різання вібрацією технологічної системи верстат – пристосування – інструмент – деталь (ВІД).

Взаємозв’язок поверхневого шару з фізико -хімічними і технологічними чинниками процесу показаний на рис. 1.3.

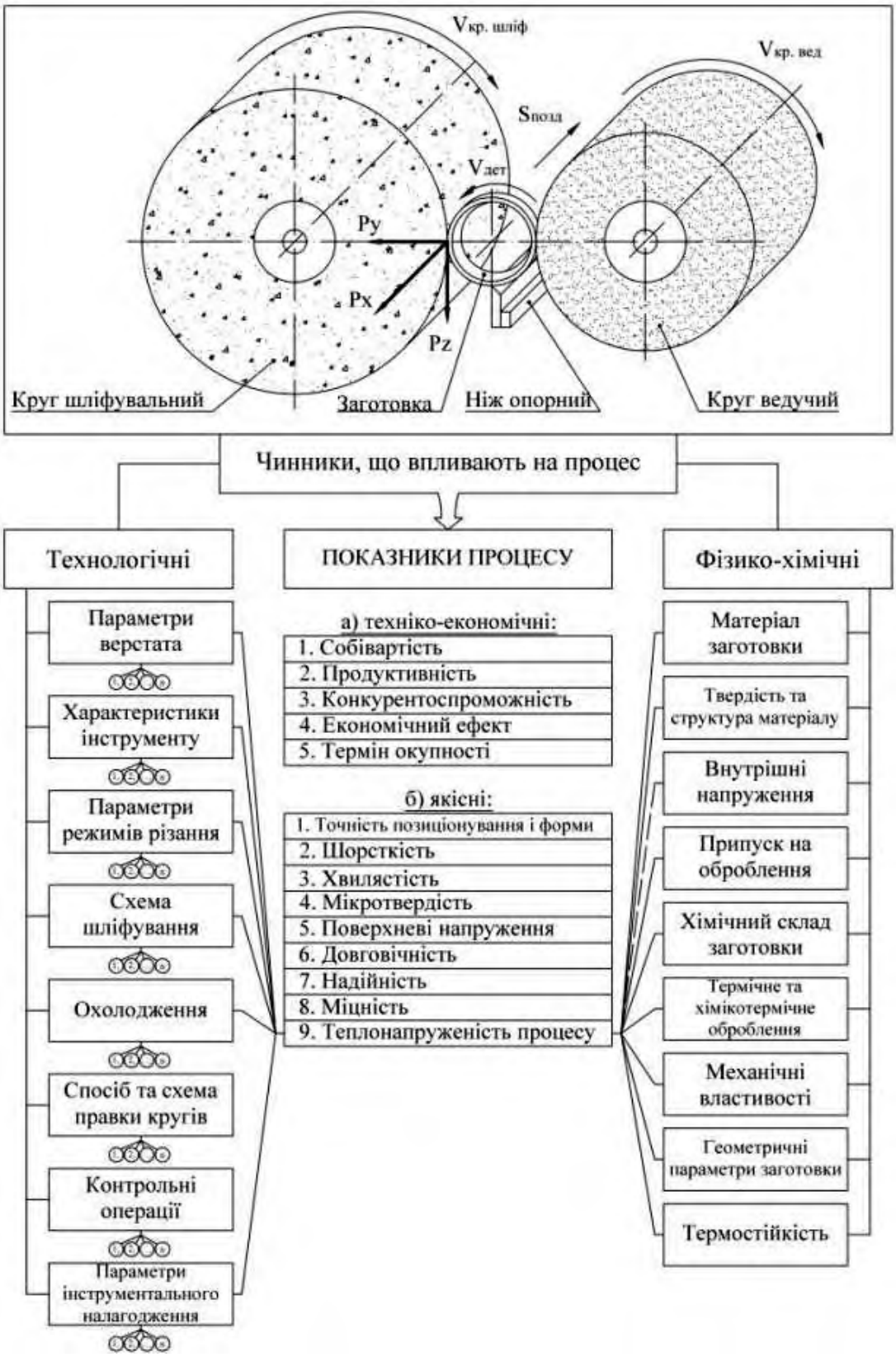


Рис. 1.3. Чинники та показники операцій шліфування кілець роликопідшипників

Причинами, що призводять до видозміни та спотворення основного геометричного профілю, є також копіювання мікронерівностей робочих крайок різця або абразивних зерен, утворення зубців наросту та адгезійні налипання на

обробленій поверхні заготовки; деформування матеріалу заготовки після проходу ріжучого інструменту та інші технологічні чинники, що визначають умови механічного оброблення (мікротріщини в деталях верстату).

Ріжучий інструмент руйнує на своєму шляху різнорідно розміщені зерна металу ; деякі з них, що мають відповідне орієнтування , зрізуються, інші відриваються, утворюючи найдрібніші тріщини в поверхневому шарі заготовки.

Геометричні характеристики нерівностей тісно пов'язані з фізико-хімічними процесами руйнування металу під час оброблення різанням. Так, шорсткість поверхні під час оброблення крихких металів складається з трикутних заглиблень, що відповідають формі вирваних зерен ; в пластичних металах під час великих швидкостей різання сильно деформовані нерівності мають форму пластівців [9].

До якісних параметрів хвилястості відносять крок та форму профілю хвиль, до кількісних – висоту хвиль, радіус при вершині, радіус у впадині та ін. Форма профілю хвиль реальних поверхонь різнорідна: синусоїдальна, параболічна, циклоїдальна.

Процес безцентрового шліфування зовнішньої циліндричної поверхні, яка є базовою для встановлення підшипника в опорі роторної системи проходить за схемою, що характеризується обертальним рухом шліфувального круга $V_{кр.шліф}$, який є рухом різання, обертальним рухом ведучого круга $V_{кр.вед}$ в тому ж самому напрямку . Заготовки кілець подаються в зону шліфування за допомогою ведучого круга, вісь обертання якого знаходиться під деяким кутом до вісі обертання шліфувального круга. Для підтримування заготовок в зоні шліфування використовується ніж опорний. Положення осей обертання шліфувального та ведучого кругів, частота обертання кругів та заготовки, координати розміщення ножа опорного впливають на розмірні та якісні показники процесу шліфування, а визначення значень вказаних параметрів відноситься до завдань проектування інструментального налагодження верстата на шліфувальну операцію .

Основним завданням технологічної підготовки верстата до шліфування конкретного типорозміру заготовки в умовах переналагоджувального виробництва є швидке та зручне визначення параметрів налагодження та реалізація цих параметрів безпосередньо на верстаті . Від швидкості проектування та виконання інструментального переналагодження верстата залежать технологічна продуктивність операції та якісні показники процесу шліфування.

З рис. 1.3 . видно, що на показник теплонапруженості процесу шліфування зовнішніх поверхонь зовнішніх кілець спричиняють вплив значна кількість технологічних чинників серед яких характеристика та параметри руху різального інструменту, параметри режимів різання , параметри інструментального налагодження, схема шліфування, спосіб охолодження , та ряд фізико-хімічних чинників.

З іншого боку аналіз виробничих дефектів на безцентрово-шліфувальних операціях показав, що до 30% всіх дефектів кілець після шліфування відноситься до температурних. Тому , встановлення раціональних температурних параметрів та їх взаємозв'язків з показниками процесу безцентрового шліфування заготовок кілець в умовах переналагоджувального виробництва є актуальною науково - технічноюм проблемою та вимагає ретельного аналізу причин походження та видів температурних дефектів та пошуку методів і засобів їх усунення.

1.3. Аналіз температурних дефектів на шліфувальних операціях поверхонь обертання кілець роликопідшипників

Температурні дефекти, що виникають на шліфувальних операціях оброблення поверхонь обертання зовнішніх кілець роликопідшипників не тільки негативно впливають на експлуатаційні властивості підшипника, як то довговічність, точність базування, зносостійкість, надійність, а й спричиняють значний вплив на подальші операції шліфування доріжки кочення кільця внаслідок дії принципу технологічної спадковості дефектів між операціями.

Під час шліфування доріжки кочення зовнішнього кільця підшипника на безентрово-шліфувальній операції на верстаті SASL5AD базується за допомогою

попередньо обробленої зовнішньої циліндричної поверхні, тому неточності базування передаються на неточність оброблення внутрішньої доріжки кочення зовнішнього кільця (рис.1.4.).

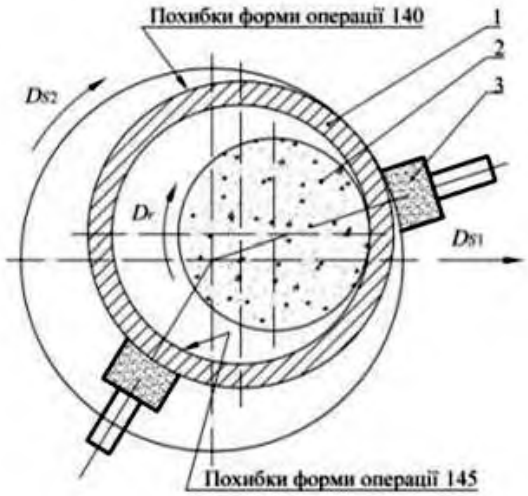


Рис. 1.4. Схема шліфування доріжки кочення кільця зовнішнього:
1 – заготовка кільця; 2 – головка шліфувальна; 3 – опори

До теплових дефектів під час шліфування відносяться припалення та мікротріщини. Існує кілька видів припалень, які характерні для процесу шліфування [6 , 96]:

1. Поодинокі штрихові припалення внаслідок затуплення чи засалювання зерен, або попадання разом із ЗОР в зону різання шламу;

2. Подряпини по всій шліфованій поверхні, які пов’язані з нерівномірністю властивості матеріалу заготовки, порушенням режимів шліфування, недостатнім підведенням охолоджуючої рідини в зону різання, підвищеною твердістю інструменту, зносом або забрудненням інструменту;

3. Вібраційні подряпини і плями;

4. Плями і подряпини на окремих ділянках у зв'язку з порушенням припуску або геометричної точності заготовки;

Головною причиною виникнення припалення на шліфованій поверхні є збільшення контактної температури , що більша за значення температури під час якої виникають припалення для заготовки в деякій області зони різання.

В результаті аналізу робіт А.В. Якімова [140 – 145], В.А . Сипайлова [111], П.І. Ящеріцина [147] та ін [74, 135, 138]. можна виділити чинники , які безпосередньо впливають на температуру в зоні різання (рис. 1.5):

1. Властивості матеріалу заготовки ;
2. Інтенсивність теплового джерела;
3. Швидкість руху теплового джерела;
4. Інтенсивність охолодження.

Висока контактна температура в зоні різання під час шліфування є не тільки причиною виникнення припалення, але і головною причиною формування в поверхневому шарі заготовки залишкових напружень розтягування, які негативно впливають на втомну міцність деталей [10; 30].

Найкращі для заготовки характеристики шліфувального круга (тип абразиву, зернистість, номер структури , тип зв'язки, твердість круга) можуть бути призначені у відповідність з численними рекомендаціями [6, 21 , 26, 53, 57].

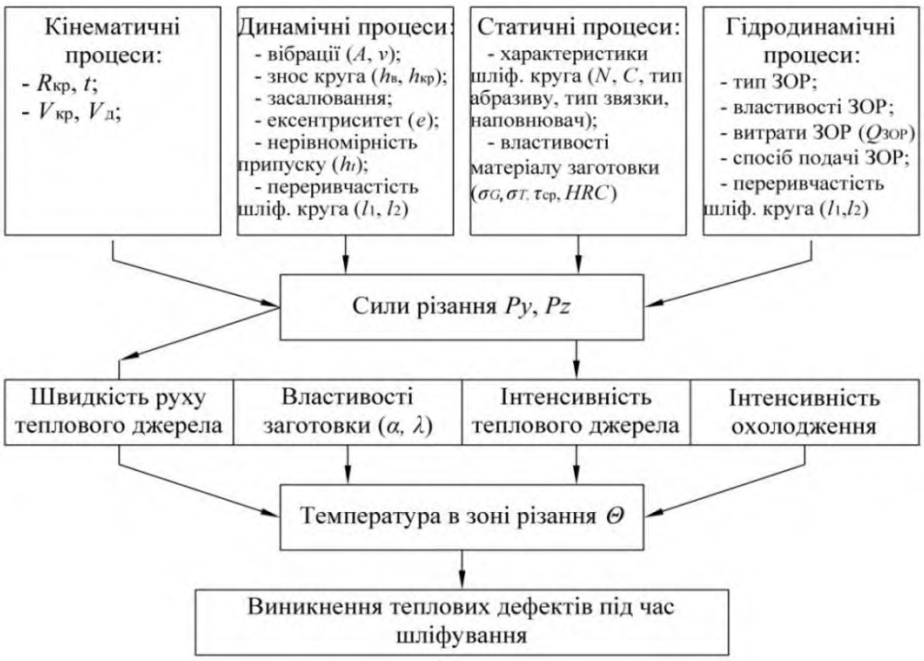


Рис. 1.5. Класифікація процесів, що впливають на виникнення теплових дефектів

Існують наступні основні напрямки забезпечення регламентованої якості поверхні під час шліфування сплавів типу ШХ , схильних до виникнення теплових дефектів.

1. Вибір характеристик круга (тип абразиву, зернистість, номер структури, твердість , зв'язка) [5, 73];

2. Вибір раціональних або оптимальних режимів різання [13, 91];

3. Управління ріжучою здатністю круга безперервною або періодичною правкою, або гідроочищенням [18, 84];

4. Зниження рівня вібрацій в зоні різання [22, 26, 49, 121];

5. Управління значеннями складових сил різання [86, 123];

6. Пружне шліфування [1, 35, 39, 41, 50];

7. Управління динамікою процесу [2, 10, 11, 33, 42, 47 , 53];

8. Вибір типу та марки ЗОР [35 , 59] або заміна способу підведення ЗОР в зону оброблення, в тому числі застосування композиційних , переривчастих або перфорованих шліфувальних кругів [12, 18 , 31, 35, 48, 65, 66, 93, 98 , 140].

Одним із способів зменшення теплонапруженості процесу шліфування є застосування кругів з низькою твердістю . Такі круги працюють у режимі самозаточування, але мають великий розмірний знос, що призводить до збільшення часу, який витрачається на правку круга . Збільшення твердості круга призводить до того, що круг працює в режимі постійного затуплення, що з одного боку призводить до зниження параметрів шорсткості поверхні [36], а з іншого боку до збільшення тангенціальної сили різання під час зносу зерен і, як наслідок, до підвищення температури в зоні різання [43, 100]. Перевагою шліфувальних кругів більшої твердості є їх висока розмірна стійкість, що є необхідною умовою під час оброблення з високою точністю. Необхідно розробити заходи, які дозволили б застосовувати круги більшої твердості та керувати теплонапруженістю за умови змінних режимів роботи круга під час оброблення сплавів , що схильні до виникнення теплових дефектів.

Матеріал абразивного зерна, твердість і зв'язка круга залежать від матеріалу заготовки, його твердості, а також швидкості обертання круга. Зернистість круга залежить від регламентованих параметрів шорсткості поверхні. В якості ЗОР під час шліфування може використовуватися рідке середовище , твердий мастильний матеріал або ЗОР у вигляді аерозолю. Вибір типу та марки

ЗОР здійснюється у відповідності з рекомендаціями, наведеними в довідковій літературі [112]. Проте слід зазначити, що яка б ефективна ЗОР не застосовувалася, вона повністю не вирішує проблему забезпечення шліфування без припалень . [96].

В результаті аналізу існуючих досліджень визначено , що одним з найбільш ефективних способів подачі ЗОР під час безцентрового шліфування сплавів, схильних до теплових дефектів, є подача ЗОР через впадини переривчастого шліфувального круга [29, 74, 140]. Застосування кругів з переривчастою робочою поверхнею дозволяє подавати ЗОР до заготовки в момент переривання різання, знизити теплонапруженість процесу та зменшити ймовірність появи шліфувальних дефектів на поверхні заготовки.

Основними недоліками переривчастих шліфувальних кругів, що обмежують їх технологічні можливості є:

1. Великий розмірний знос круга , коли робоча площа периферії менша, в порівнянні з суцільним кругом;

2. Високий рівень вібрацій в технологічній системі;

3. Деякі різновиди припалів, зазначені вище , не можуть бути усунуті за допомогою відомих переривчастих шліфувальних кругів, наприклад, припали, які зумовлені затупленням або нерівномірним зносом круга, вібраціями в технологічній системі, порушенням припуску або геометричної точності заготовки, неправильним вибором або порушенням режимів різання .

Внаслідок великого розмірного зносу переривчастих кругів рекомендується призначати їх твердість на 2 ступені вище , а зернистість на одну ступінь менше, ніж у звичайних кругів. Збільшення твердості призводить до того, що шліфувальний круг буде працювати переважно в режимі затуплення, що може привести до появи дефектів шліфованої поверхні. Зменшення зернистості також призводить до збільшення теплонапруженості шліфування.

З вище сказаного випливає, що необхідно розробити заходи для усунення недоліків, які властиві для переривчастих кругів і тим самим розширити їхні технологічні можливості , на що і спрямована дана робота. Розрахунок і

проектування переривчастих шліфувальних кругів найбільш широко розглянуті в роботах А.В. Якімова [140 , 148], в яких наведено формули для визначення довжин виступів і впадин. Довжина впадини визначається при умові рідинного охолодження за наступною формулою:

$$l_2 = \frac{V_{\text{кр.}} \cdot \lambda \cdot C \cdot \gamma \cdot 36}{\alpha^2} \quad (1.1)$$

де $V_{кр}$ – швидкість обертання шліфувального круга, м/с; λ – коефіцієнт питомої теплопровідності заготовки, Вт/(м·°С); C – питома теплоємність заготовки, Дж/(кг·°С); γ – густина заготовки, кг/$м^2$; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/ ($м^2$ ·°С).

Під час аналізу літературних джерел за тематикою шліфування переривчастими кругами , виявлено, що недостатньо повно розглянуті питання, пов’язані з впливом динамічних чинників процесу на його ефективність. Під поняттям динамічних чинників процесу шліфування розуміємо наступне:

1. Нерівномірність припуску внаслідок хвилястості вихідної поверхні;
2. Нестабільність фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки;
3. Зміна ріжучої здатності круга в наслідок його затуплення або засалювання;
4. Ексцентриситет і нерівномірний знос шліфувального круга;
5. Вібрації шліфувального круга та заготовки.

Для подальшого вдосконалення високопродуктивного шліфувального інструменту під час оброблення сплавів типу ШХ, які схильні до виникнення теплових дефектів, а також для визначення раціональних режимів оброблення шліфувальним інструментом, необхідно визначити, яким чином кількісно впливають різні динамічні чинники на показники оброблення. Після цього, можна здійснювати керування процесом шліфування з метою підвищення його стабільності, ефективності та продуктивності.

1.4 . Висновки до розділу

1. Проведено аналіз методів та технологічних схем безцентрового шліфування поверхонь обертання. Визначені параметри інструментального налагодження та режимів шліфування, що впливають на показники якості шліфованих поверхонь та на техніко-економічні показники технологічної операції. Встановлено, що 30% від загальної кількості дефектів, що виникають на безцентрово-шліфувальних операціях є наслідком перевищення температури в зоні шліфування , а причинами виникнення температурних дефектів є невідповідність режимів різання та не прогнозованість умов оброблення деталей.

2. На підставі аналізу літературних джерел та виробничого досвіду систематизовані основні напрямки зниження теплонапруженості процесу шліфування. Виявлено неоднозначний характер зміни температури шліфування від умов та режимів оброблення, що вказує на більш складний характер температуроутворення в процесі механічного оброблення, ніж це вважалося на практиці.

3. Забезпечення необхідної якості готового виробу базується на дотриманні ряду принципів і методів, які передбачають послідовне неперервне відслідковування розмірних та інших взаємопов’язаних геометричних параметрів поверхонь деталей, але визначальним етапом формування результату є фінішні шліфувальні операції .

4. Дослідженню підлягають динамічні характеристики технічного оснащення та динаміка перебігу процесів оброблення деталей підшипників, які суттєво впливають на ефективність роботи систем автоматизованого управління якістю оброблення і, відповідно, на кінцевий результат.

Враховуючи актуальність задачі підвищення продуктивності безцентрового шліфування поверхонь обертання кілець та стабілізації якості та експлуатаційних властивостей шліфованих деталей в умовах серійного переналагоджувального підшипникового виробництва та потребу в практичних рекомендаціях стосовно встановлення раціональних геометричних параметрів переривчастих кругів і режимів шліфування, було поставлено завдання: дослідити фізико-механічні

показники якості поверхонь обертання кілець під час їх безцентрового шліфування переривчастими абразивними кругами та запровадити методику технологічного керування теплонапруженістю в зоні шліфування, , а також розробити практичні рекомендації щодо вибору геометричних параметрів переривчастого круга та режимів бездефектного переривчастого безцентрового шліфування.

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ

2.1. Кількісні параметри та фізичні показники для визначення температури шліфування поверхонь обертання

Ґрунтуючись на відомих підходах щодо розрахунку температури під час шліфування , запропонованих професором Якімовим А.В. в його наукових роботах [134, 136-138], в даному розділі запропоновано підхід до задачі визначення температури під час шліфування циліндричних тіл з урахуванням руху теплового потоку в глибину поверхневого шару деталі. Тобто, запропоновано вирішення з урахуванням перерізу адіабатичних сегментів, якими умовно представлений оброблюваний матеріал (заготовка) (рис. 2.1).

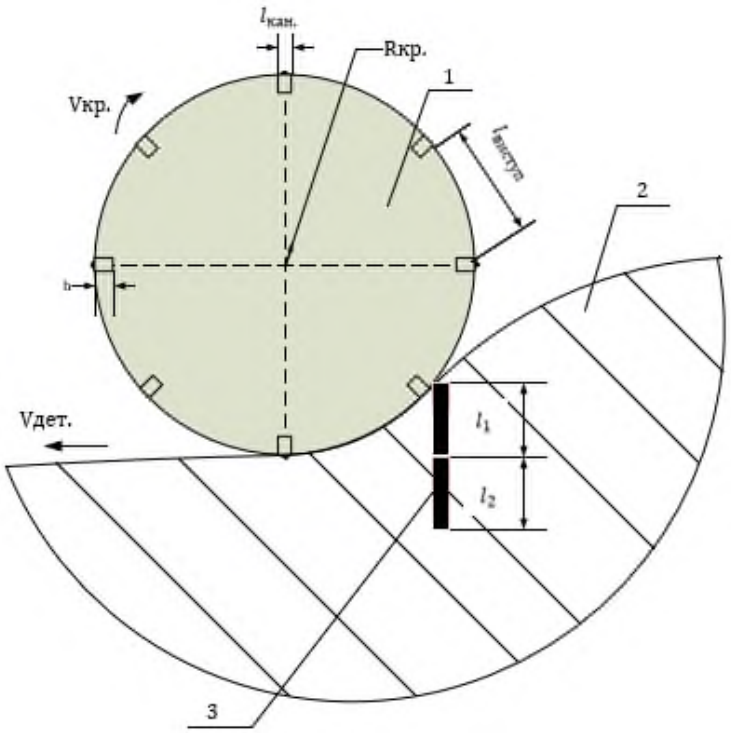


Рис. 2.1. Розрахункова схема процесу шліфування: 1 – шліфувальний круг ; 2 – деталь (заготовка); 3 – адіабатичний стержень

Припустимо, що у процесі шліфування частина сегмента, яка рівна величині знятого припуску (в першому наближені – дорівнює глибині шліфування t) перерізається шліфувальним кругом.

Введемо припущення, що за час впливу теплового потоку τ відбулося перерізування сегмента довжиною l_1, тобто тепловий потік перемістився вздовж сегмента на величину $l_1 = V_{різ} \cdot \tau$, і за цей проміжок часу в результаті різання виділилась певна кількість тепла Q (де $V_{різ}$ – швидкість перерізування сегмента, м/с). Це тепло, використовується на нагрівання сегмента довжиною l_1 (витрачена кількість тепла Q_1), а також на нагрівання сегмента довжиною l_2 за рахунок теплопровідності оброблюваної деталі (витрачена кількість тепла Q_2):

$$Q = Q_1 + Q_2 \tag{2.1}$$

Кількість тепла Q_1 виразимо наступним чином, розділимо сегмент довжиною
l_1 на необмежену кількість елементарних ділянок довжиною Δl. Кожна з них нагріта до різної температури: перша – до температури θ_1, друга до температури θ_2.

Тоді кількість тепла, витрачена на нагрівання першої ділянки сегмента довжиною l_1, буде дорівнювати:

$$Q_{l1} = c \cdot m_1 \cdot \theta_1 \tag{2.2}$$

де c – питома теплоємність оброблюваної деталі, Дж/(кг·°C);

Оскільки $m_1 = \rho\ S\ \Delta l$ – маса першого відрізка адіабатичного сегмента, довжина якого Δl, кг; ρ – густина оброблюваного матеріалу кг/$м^3$; V_1 – об'єм першого відрізка сегмента довжиною Δl, $м^3$; S – площа поперечного перерізу сегмента, $м^2$.

Після перетворення залежність (2.2) набуде вигляду:

$$Q_{l_1} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_1 \quad (2.3)$$

Таким самим чином визначається значення кількості тепла Q_{12} і Q_{1n}, що витрачаються на нагрівання другого та n-го відрізків сегмента

$$Q_{l_2} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_2 \quad (2.4)$$

$$Q_{l_n} = c \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta l \cdot \theta_n \quad (2.5)$$

Сумарна кількість тепла, що витрачається на нагрівання всього сегмента довжиною l_1, визначається як:

$$Q_1 = \sum_i^n \theta_{li} \quad (2.6)$$

З урахуванням залежностей (2.3), (2.4), та (2.5), залежність (2.6) матиме наступний вигляд:

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot \sum_i^n \theta_i \cdot \Delta l \quad (2.7)$$

де θ_i – температура нагрівання i-того (поточного) відрізка сегмента довжиною l_1.

В залежності (2.7) суму всіх складових представлено у вигляді інтегралу:

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot \int_0^{l_1} \theta \cdot dl \quad (2.8)$$

де θ– функція температури нагрівання сегмента довжиною l_1 від часу;

$$dl = \Delta l = V_{\text{різ.}} \cdot d\tau,$$

де $V_{різ}$– швидкість перерізування сегмента, м/с; $d\tau$ – час, за який здійснюється перерізування сегмента довжиною dl.

Після перетворень залежність (2.8) набуде вигляду:

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{\text{різ.}} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau \qquad (2.9)$$

Тепер доцільно визначити кількість тепла Q_2, яке витрачається на нагрівання сегмента довжиною l_1. Для цього використаємо залежність для визначення кількості тепла, яке протікає через сегмент довжиною l_2 внаслідок його теплопровідності:

$$Q_2 = \lambda \cdot S \cdot \frac{Q_{2\text{поч.}} - Q_{2\text{кін.}}}{l_2} \cdot \tau_2 \qquad (2.10)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності деталі, Вт/м·°C; $\theta_{2поч}$ – температура після перерізування частини сегмента довжиною l_2 ; $\theta_{2кін} = 0$ – температура на кінці сегмента довжиною l_2 (умовно дорівнює нулю); τ_2 – час нагрівання сегмента довжиною l_2.

Залежність зміни температури за довжиною сегмента l_2 результаті теплопровідності показана на рис. 2.2.

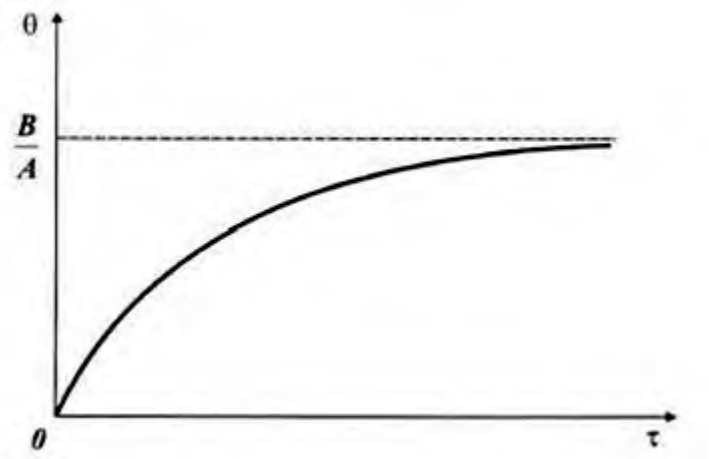


Рис. 2.2. Залежність величини температури θ від часу дії теплового потоку τ

Будемо вважати, що кількість тепла, яке витрачається на нагрівання сегмента довжиною l_2, визначається як:

$$Q_2 = c \cdot m \cdot \theta_2 \cdot 0{,}5 \tag{2.11}$$

та дорівнює кількості тепла, що визначається залежністю (2.10), яке протікає через сегмент довжиною l_2 в результаті його теплопровідності. В залежності (2.11) прийняті наступні позначення: m – маса сегмента довжиною l_2, кг; θ_2 – температура , яка витрачається на нагрівання сегмента довжиною l_2 ; c – питома теплоємність оброблюваної деталі, Дж/(кг °C); коефіцієнт 0,5 визначає середню температуру нагрівання сегмента довжиною l_2.

Після перетворення залежність (2.11) набуде вигляду:

$$Q_2 = 0{,}5 \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot l_2 \cdot \theta_2 \tag{2.12}$$

Розв'язуючи залежність (2.10) відносно довжини l_2, отримаємо :

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot S \cdot \theta_2}{N} \tag{2.13}$$

Підставимо залежність (2.13) в залежність (2.12):

$$Q_2 = 0{,}5 \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{\lambda \cdot S \cdot \theta_2}{N} \cdot \theta_2 \tag{2.14}$$

Таким чином , визначаємо кількість тепла Q_2, яке витрачається на нагрівання сегмента довжиною l_2. Підставляючи отримані залежності (2.9) та (2.14) в залежність (2.1), визначимо загальну кількість тепла, яке витрачається на нагрівання двох частин сегмента довжиною $(l_1 + l_2)$:

$$Q = c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{\text{різ.}} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau + 0{,}5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{{\theta_2}^2}{N} \tag{2.15}$$

Тоді, загальну кількість тепла Q можна виразити як:

$$Q = N \cdot \tau \qquad (2.16)$$

де N– потужність теплового потоку; τ – час за який перерізається сегмент довжиною l_1, та дорівнює часу впливу теплового потоку.

Підставимо залежність (2.16) в залежність (2.15) і отримаємо:

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{\text{різ.}} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau + 0{,}5 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{{\theta_2}^2}{N} = N \cdot \tau \qquad (2.17)$$

В результаті проведених розрахунків було отримано інтегральне рівняння, в якому невідомі величини θ_2 та θ, залежать від часу τ. Для спрощення вирішення рівняння (2.17) виконаємо диференціювання його правої та лівої частин за часом τ, тобто проведемо диференціювання всіх складових рівняння (2.17):

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{\text{різ.}} \cdot \theta(\tau) + c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2 \cdot {\theta_2}'}{N} = N, \qquad (2.18)$$

де θ_2'– перша похідна функції θ_2 по часу τ; $\theta\ \tau$ – температура на останньому елементарному відрізку сегмента довжиною l_1, тобто по довжині сегмента l_1.

Бачимо, що $\theta\ \tau\ = \theta_2$. Тоді рівняння (2.18) набуде остаточного вигляду:

$$c \cdot p \cdot S \cdot V_{різ} \cdot \theta_2 + c \cdot p \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta_2 \cdot \theta_2'}{N} = N \qquad (2.19)$$

В результаті було отримано диференційне рівняння першого порядку:

$$\theta_2' \cdot \theta_2 + A \cdot \theta_2 = B, \qquad (2.20)$$

де $A = \frac{V_{\text{різ}} \cdot N}{\lambda \cdot S}$; $B = \frac{N^2}{c \cdot p \cdot \lambda \cdot S^2}$.

Надалі доцільно вважати, що $\theta_2 = \theta$, тоді диференційне рівняння (2.20) виглядатиме як:

$$\theta' \cdot \theta + A \cdot \theta = B \tag{2.21}$$

Для розв'язання диференційного рівняння (2.21) використано методику, наведену в роботі [9]. Для цього розділимо всі складові рівняння на величину θ :

$$\theta' = \frac{B - A \cdot \theta}{\theta} \tag{2.22}$$

$$\frac{\theta \cdot d\theta}{(B - A \cdot \theta)} = d\tau \tag{2.23}$$

В результаті було отримано диференційне рівняння з роздільними складовими. Для розв'язку потрібно інтегрувати дві частини рівняння, тобто

$$\int \frac{\theta \cdot d\theta}{(B - A \cdot \theta)} = \int d\tau + c \tag{2.24}$$

де C – стала інтегрування.

Визначимо інтеграл, який знаходиться в лівій частині рівняння :

$$\int \frac{\theta \cdot d\theta}{(B - A \cdot \theta)} = -\frac{1}{A} \int \frac{-A \cdot \theta \cdot d\theta}{(B - A \cdot \theta)} = -\frac{1}{A} \int \frac{(B - A \cdot \theta) - B}{(B - A \cdot \theta)} \cdot d\theta =$$

$$= -\frac{1}{A}\left[\int d\theta - \int \frac{B - d\theta}{(B - A \cdot \theta)}\right] = -\frac{1}{A} \cdot \left[\theta + \frac{B}{A} ln(B - A \cdot \theta)\right] \tag{2.25}$$

Підставивши вираз (2.25) в рівняння (2.24), отримаємо:

$$-\frac{1}{A} \cdot \left[\theta + \frac{B}{A} ln(B - A \cdot \theta)\right] = \tau + C \tag{2.26}$$

Постійну інтегрування C було визначено з початкової умови :

$$\theta(\tau = 0) = 0 \tag{2.27}$$

Підпорядковуючи рівняння (2.26) початковій умові (2.27), отримаємо:

$$C = \frac{B}{A^2} \cdot ln\, B \tag{2.28}$$

Підставимо залежність (2.28) в рівняння (2.26):

$$-\frac{1}{A} \cdot \theta - \frac{B}{A^2} \cdot ln(B - A \cdot \theta) = \tau - \frac{B}{A^2} \cdot ln\, B \tag{2.29}$$

Після перетворення рівняння (2.29), отримаємо:

$$ln\left(1 - \frac{A}{B} \cdot \theta\right) = \frac{A^2}{B} \cdot \left(\tau + \frac{\theta}{A}\right) \tag{2.30}$$

$$\theta = \frac{B}{A} \cdot \left[1 - e^{-\frac{A^2}{B} \cdot \left(\tau + \frac{\theta}{A}\right)}\right] \tag{2.31}$$

Як бачимо із залежності (2.31), характер зміни температури θ від часу τ підпорядковується складній закономірності , через те, що температура θ є в лівій і в правій частині залежності. Час τ також збільшується тому, що температура θ , яка є у лівій частині залежності, за даних умов також зростає. Збільшення θ в правій частині залежності також веде до збільшення θ в лівій частині, тобто має цілком однозначний характер зміни температури θ від часу τ, що зображено на рис. 2.3 . Зі збільшенням часу τ температура θ збільшується по експоненціальній залежності, необмежено прямуючи до значення B/A.

Отже, в даному випадку температура θ є обмеженою величиною, тоді як в відомому аналогічному вирішенні [138], яке не враховує перерізування сегментів, якими умовно представлений матеріал, що знімається, температура θ необмежено зростає зі збільшенням τ.

2.2. Теоретичний аналіз приведеної температури поверхневого шару шліфованої деталі

Визначимо величини $\frac{B}{A}; \frac{1}{A}; \frac{B}{A^2}$

$$\frac{B}{A} = \frac{N}{c \cdot p \cdot S \cdot V_{piз}} \tag{2.32}$$

$$\frac{1}{A} = \frac{\lambda \cdot S}{V_{piз} \cdot N} \tag{2.33}$$

$$\frac{B}{A} = \frac{N}{c \cdot p \cdot S \cdot V_{piз}} \tag{2.34}$$

З урахуванням співвідношення $g = N/S$, де g – щільність теплового потоку, виразимо залежності (2.32) і (2.33) наступним чином:

$$\frac{B}{A} = \frac{g}{c \cdot p \cdot V_{piз}} \tag{2.35}$$

$$\frac{1}{A} = \frac{\lambda}{V_{piз} \cdot g} \tag{2.36}$$

Підставляючи залежності (2.34), (2.35) і (2.36) в залежність (2.31), отримаємо:

$$\theta = \frac{g}{c \cdot p \cdot V_{piз}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot p \cdot V_{piз}^2}{\lambda} \cdot \left(\tau + \frac{\lambda \cdot \theta}{V_{piз} \cdot g}\right)}\right] = \frac{g}{c \cdot p \cdot V_{piз}} \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{c \cdot p \cdot V_{piз}^2}{\lambda} \cdot \tau + \frac{c \cdot p \cdot V_{piз}}{g}\right) \cdot \theta}\right] \tag{2.37}$$

Щільність теплового потоку g можна виразити аналітично за допомогою співвідношень, які описані в роботі [144]:

$$g = \frac{N}{S} = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{S} = \frac{\sigma \cdot S_{рап} \cdot V_{кр}}{S} = \frac{\sigma \cdot V_{кр}}{S} = \frac{Q_{пр}}{S} = \frac{\sigma \cdot S \cdot V_{piз}}{S} = \sigma \cdot V_{piз} \tag{2.38}$$

де $P_z = \sigma \cdot S_{рапт}$ – тангенціальна складова сили різання (рис. 2.1), Н; σ – умовне напруження різання під час шліфування, Н/$м^2$; $S_{рапт} = Q_{пр}/V_{кр}$ – раптова сумарна площа поперечного зрізу з усіма одночасно працюючими зернами шліфувального

круга , $м^2$; $Q_{пр} = S \cdot V_{різ}$ – продуктивність оброблення, $м^3$ $с$; $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с; S – площа поперечного перерізу сегмента, $м^2$; $V_{різ}$ – швидкість перерізування сегмента, м/с.

Підставимо залежність (2 .38) в залежності (2.35) і (2 .36):

$$\frac{B}{A} = \frac{\sigma}{c \cdot p}, \tag{2.39}$$

$$\frac{1}{A} = \frac{\lambda}{\sigma \cdot V_{різ}^2} \tag{2.40}$$

Підставимо залежності (2.34), (2.39) і (2.40) у залежність (2.31):

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot p} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot p \cdot V_{різ}^2}{\lambda} \cdot \tau} \cdot e^{-\frac{c \cdot p}{\sigma} \cdot \theta}\right] \tag{2.41}$$

З урахуванням співвідношення $l_1 = V_{різ} \cdot \tau$, залежність (2 .41) прийме наступний вигляд:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot p} \cdot \left[1 - e^{-\frac{c \cdot p \cdot V_{різ}}{\lambda} \cdot l_1} \cdot e^{-\frac{c \cdot p}{\sigma} \cdot \theta}\right] \tag{2.41}$$

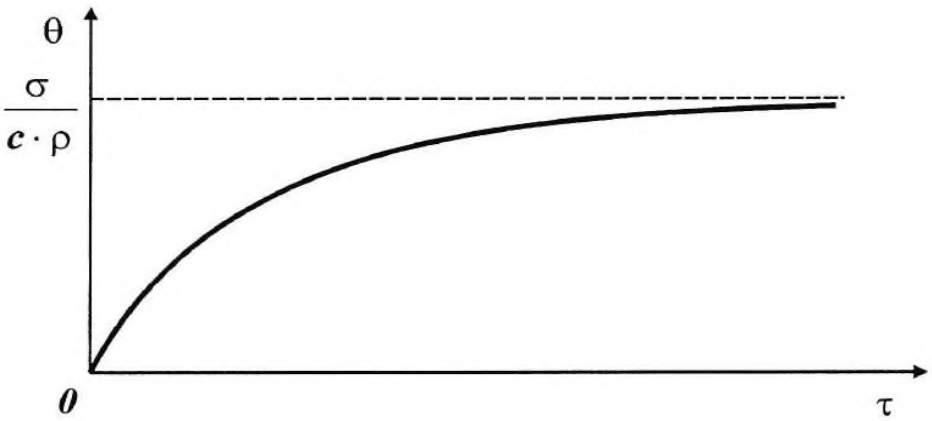


Рис. 2.3. Залежність температури θ від часу τ.

Наявність у залежностях (2.41) і (2.42) множника $e^{\frac{c\cdot\rho}{\sigma}\cdot\theta}$ вказує на зростання температури θ зі збільшенням часу τ (відповідно довжини перерізаної частини сегмента l_1). Загальний вигляд залежності θ від τ і l_1 показаний на рис. 2.3.

Виходячи з наведеного на рис. 2 .3, температура θ зі збільшенням часу τ збільшується, наближаючись до відповідного значення.

Враховуючи складний характер взаємозв'язку температури θ з часом дії теплового потоку τ, введемо новий параметр – показник приведеної температури $\omega = \frac{\theta}{\frac{\sigma}{c\cdot\rho}}$ та проведемо аналіз зміни даного параметру. Для цього виразимо в залежності (2.42) температуру θ безрозмірною величиною ω:

$$l_1 = -\frac{\lambda}{c\cdot p\cdot V_{piз}}\cdot[ln(1-\omega)+\omega] = \frac{\lambda}{c\cdot p\cdot V_{piз}}\cdot\bar{l}_1 \qquad (2.43)$$

де $\bar{l}_1 = -\ln(1-\omega) - \omega$.

Таблиця 2.1

Розрахункові значення безрозмірної величини $\bar{l}_1$

ω	0,095	0,172	0,323	0,54	0,687	0,814	0,89	0,1	0,999	0,9999
$\bar{l}_1$	0,004	0,015	0,072	0,193	0,368	1,047	1,4	2,005	3,6	6,0

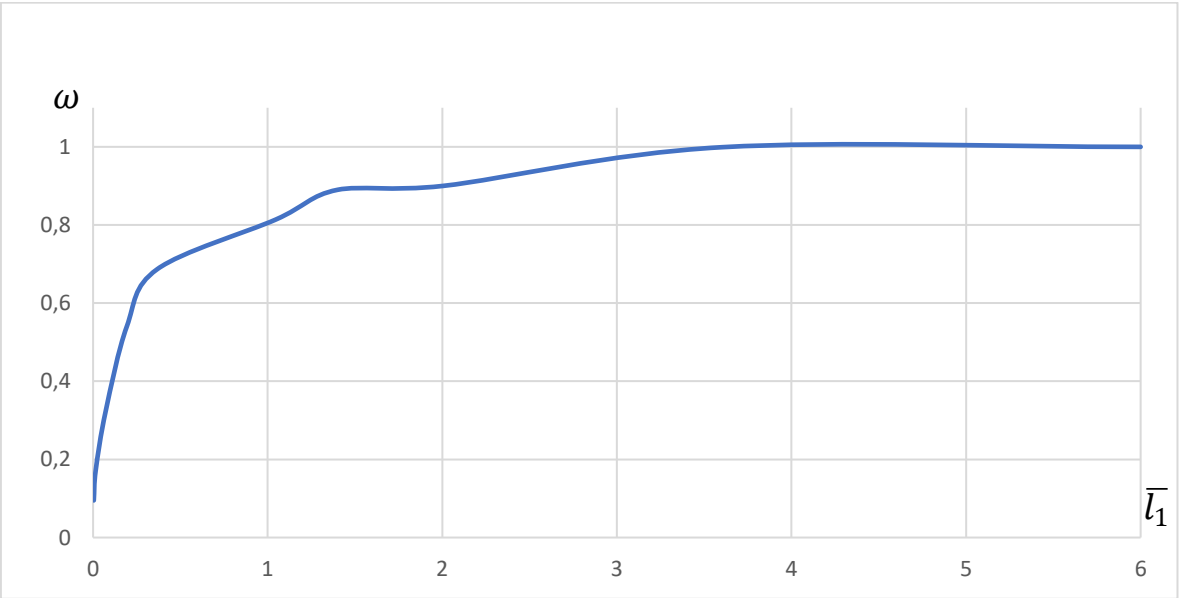


Рис. 2.4. Залежність показника приведеної температури ω від параметра $\bar{l}_1$

В результаті обчислень було отримано залежність для визначення довжини частини сегмента $l1$. В табл. 2 .1 і на рис. 2.4 наведені розрахункові значення показника приведеної температури ω.

З таблиці 2.1 і рис . 2.4 справедливо зробити висновок, що чим більша безрозмірна величина $\overline{l_1}$, тим більший показник приведеної температури ω, який прямує до одиниці. За таким самим законом буде змінюватися показник приведеної температури ω в залежності від часу дії теплового потоку τ:

$$\tau = \frac{l_1}{V_{різ}} = -\frac{\lambda}{c \cdot p \cdot V_{різ}^2} \cdot [ln(1-z)+z] = \frac{\lambda}{c \cdot p \cdot V_{різ}^2} \cdot \bar{l}_1. \qquad (2.44)$$

Задамо значення λ, c, ρ, $V_{різ}$, ω та визначимо з табл. 2.1 значення $\overline{l_1}$, а за допомогою залежності (2 .44) можемо розрахувати час τ. В цьому й полягає запропонована методика розрахунку температури під час шліфування θ за допомогою відомої величини ω.

В загальному випадку (для невстановленого теплового процесу) розрахунок поточної температури шліфування θ можна виконати згідно залежності:

$$\theta = \left(\frac{\sigma}{c \cdot p}\right) \cdot \omega \qquad (2.45)$$

Суть полягає у тому , що спершу за допомогою залежностей (2.43) і (2.44) для заданих значень τ і $\overline{l_1}$ визначаються безрозмірні параметри $\overline{l_1}$і ω. Потім за допомогою залежності (2.45) визначається значення температури під час шліфування.

2.3. Кількісна оцінка балансу тепла в технологічній системі шліфування

Перед тим, як перейти до кількісної оцінки балансу тепла, що утворюється під час оброблення, проведемо перевірку отриманого теоретичного рішення. Для

цього в початкове рівняння (2.19) підставимо функцію температури $\theta = \theta 2$, описану рівнянням (2.41).

Рівняння (2.19) представимо у вигляді:

$$c \cdot p \cdot S \cdot V_{piз} \cdot \frac{1}{N} \cdot \theta + c \cdot p \cdot \lambda \cdot S^2 \cdot \frac{\theta \cdot \theta'}{N^2} = 1$$

Оскільки рівняння (2.41) не вдалось вирішити в явному вигляді відносно температури θ, то використаємо залежність (2.45), яка дозволяє температуру θ виразити через показник приведеної температури ω. Тоді, виходячи з залежності (2.45), отримаємо:

$$\theta' = \frac{\sigma}{c \cdot p} \cdot \omega' \tag{2.46}$$

де θ' і ω'– похідні функцій θ' і ω' за часом τ.

Для визначення похідної ω' виконаємо диференціювання лівої та правої частин рівняння (2.44) за часом. В результаті рівняння (2.44) набуде вигляду:

$$1 = -\frac{\lambda}{c \cdot p \cdot V_{piз}^2} \cdot \omega' \cdot \left[\frac{-1}{(1-\omega)} + 1\right]$$

звідки

$$\omega' = \frac{c \cdot p \cdot V_{piз}^2}{\lambda} \cdot \frac{(1-\omega)}{\omega} \tag{2.47}$$

Підставимо вирази (2.45), (2.46) і (2.47) в початкове диференційне рівняння, та виразимо потужність теплового потоку N (2.38): $N = S \cdot \sigma \cdot V$різ.

Повернемося до рівняння :

$$\omega + (1 - \omega) = 1 \tag{2.48}$$

В даному рівнянні ліва і права частини рівні між собою. Можна зробити висновок, що функція температури θ, яку ми шукали визначена правильно.

Далі визначимо кількість тепла $Q1/Q$, що витрачається на нагрівання ділянки досліджуваного адіабатичного сегмента довжиною $l1$, і кількість тепла $Q2/Q$, що витрачається на нагрівання ділянки досліджуваного адіабатичного сегмента довжиною $l2$, виходячи із рівняння балансу тепла (2.1):

$$\frac{Q_1}{Q} + \frac{Q_2}{Q} = 1 \tag{2.49}$$

Для визначення кількості тепла $Q1$, що описується залежністю (2.9), необхідно підставити в дану залежність замість θ отримані розв'язки (2 .43) і (2.45). Але отриманий розв'язок не повністю буде характеризувати величин θ і ω. Тому в (2.9) час τ будемо розглядати як функцію від величин θ і ω. Інтеграл, який входить в залежність (2.9), опишемо наступним чином:

$$\int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau\, \theta \cdot d\tau = -\frac{\lambda \cdot \sigma}{\left(c \cdot p \cdot V_{piз}\right)^2} \int \left[1 - \frac{1}{(1-\omega)} + \omega\right] \cdot d\omega$$
$$= -\frac{\lambda \cdot \sigma}{\left(c \cdot p \cdot V_{piз}\right)^2} [\omega + ln(1-\omega) + 0{,}5\omega^2].$$

Підставимо отриманий вираз в залежність (2.9):

$$Q_1 = -\frac{\lambda \cdot \sigma \cdot S}{\left(c \cdot p \cdot V_{piз}\right)^2} \cdot [\omega + ln(1-\omega) + 0{,}5\omega^2].$$

Кількість тепла $Q2$ з урахуванням (2.14), (2.38), (2.45) виразимо як:

$$Q_2 = -\frac{\lambda \cdot \sigma \cdot S}{\left(c \cdot p \cdot V_{piз}\right)^2} \cdot \omega^2.$$

Загальна кількість тепла $Q = N \cdot \tau$ з урахуванням (2.38) і (2.44), буде визначатись як:

$$Q = \frac{\lambda \cdot \sigma \cdot S}{\left(c \cdot p \cdot V_{різ}\right)^2} \cdot [ln(1-\omega) + \omega].$$

Підставимо отримані залежності для визначення $Q1$, $Q2$, Q в рівняння (2.49):

$$\left(1 - \frac{\omega^2}{2 \cdot \bar{l}_1}\right) + \frac{\omega^2}{2 \cdot \bar{l}_1} = 1 \qquad (2.50)$$

Ліва і права частини рівняння (2.50) рівні між собою, тобто величина ω, яку ми шукали, описана залежністю (2.43), визначена правильно .

$$\frac{Q_1}{Q} = 1 - \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}; \ \frac{Q_2}{Q} = 1 - \frac{z^2}{2 \cdot \bar{l}_1}. \qquad (2.51)$$

Як бачимо, відносні величини $Q1/Q$, та $Q2/Q$, є протилежними і визначаються показником приведеної температури ω, (див. табл . 2.3).

Таблиця 2.3

Розрахункові значення безрозмірних величин $Q1/Q$, $Q2/Q$ і $Q1/Q2$

ω	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	0,99
Q_1/Q	0	0,07	0,14	0,21	0,38	0,44	0,53	0,72	0,79
Q_2/Q	1	0,93	0,86	0,79	0,62	0,56	0,47	0,28	0,21
Q_1/Q_2	0	0,075	0,163	0,266	0,613	0,786	1,128	2,571	3,762

Чим більша величина ω, тим більше значення $Q1/Q$ і менше $Q2/Q$. Це означає, що зі збільшенням ω кількість тепла $Q1/Q$, яке переходить у стружку

збільшується, а кількість тепла $Q2/Q$, що йде в оброблювану деталь – зменшується. На рис. 2.5 зображено вплив швидкості деталі під час різання на розподіл тепла між стружкою, деталлю та інструментом.

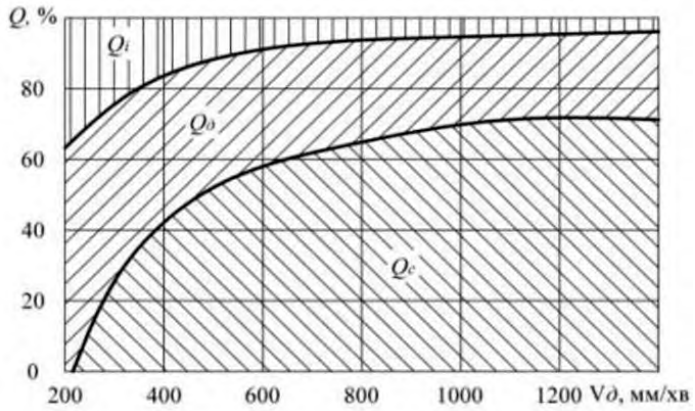


Рис. 2.5. Розподіл тепла Q між елементами технологічної системи під час шліфування заготовки зі сталі ШХ15

Таблиця 2.4

Розподіл тепла між елементами технологічної системи під час шліфування

Матеріал заготовки	К-сть тепла Ккал/хв .	Середня температура стружки $^{\circ}C$	Кількість тепла в %		
			в стружці Q_1	в заготовці Q	в інструменті Q_2
Сталь ШХ15	12,9	390	69,5	29	1,5
Сталь Х12М	13	320	50	48,5	1,5

З цього випливає наступний висновок, що під час шліфувального оброблення, яке характеризується високими температурами різання, кількість тепла, що йде в стружку буде більшою за кількість тепла, яке іде в заготовку. Як бачимо, розподіл тепла між стружкою, деталлю та інструментом безпосередньо залежить від швидкості деталі під час різання.

З рис . 2.5 випливає, що кількість тепла, яке йде в стружку, зі збільшенням швидкості деталі під час різання від 0 до Vд =800 мм/хв, збільшується

наближуючись до 20 %. Даний результат було підтверджено теоретичними дослідженнями (табл . 2.4).

Підтвердженням достовірності отриманого теоретичного вирішення є наведені в табл. 2.4 експериментальні дані середньої температури стружки і розподілу тепла між стружкою , деталлю та інструментом в процесі шліфувального оброблення .

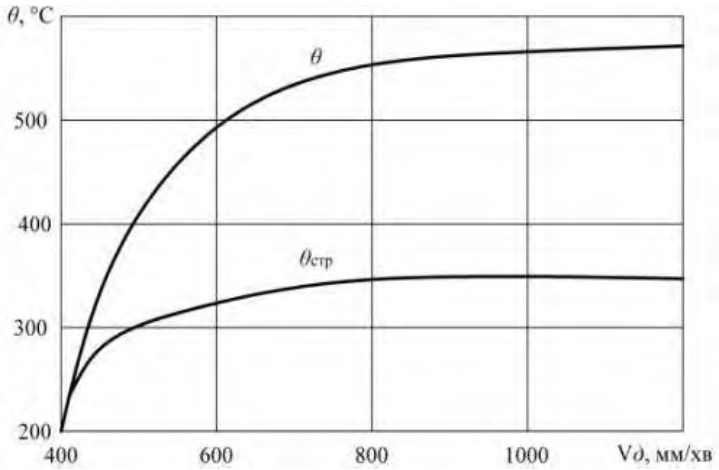


Рис. 2.6. Вплив швидкості деталі Vд на температуру шліфування θ і середню температуру стружки $\theta_{стр.}$ (сталь ШХ15)

Отже, для даних умов оброблення величина ω наближається до граничного значення $\omega \rightarrow 1$, за якого тепловий процес під час шліфування стабілізується , рис. 2.5. Цим доведено можливість реалізації на практиці значень ω, які близькі до граничного значення: $\omega \rightarrow 1$. Тобто кількість тепла , що йде в стружку, зростає, а те тепло, що йде в деталь та інструмент – зменшується. Такий характер розподілу тепла зумовлений збільшенням температури різання зі збільшенням швидкості деталі, рис . 2.6.

Експериментально встановлено кількість тепла, яке йде в стружку або в оброблювану деталь, тобто можна дати оцінку показнику приведеної температури ω, а за ним абсолютній температурі шліфування.

Отже, зі збільшенням середньої температури стружки (для різних оброблюваних матеріалів) змінюється кількість тепла (у % відношенні), що йде в

стружку, деталь та інструмент. Чим більша середня температура стружки, тим більша кількість тепла йде в стружку і менша в деталь . В інструмент йде дуже незначна частина тепла .

2.4. Визначення умов зменшення температури під час процесу безцентрового шліфування поверхонь обертання

Аналізуючи рівняння (2.49) з урахуванням (2.51), можна зробити висновок, що зменшення першого і другого доданку в рівнянні (2.49) веде до зменшення показника приведеної температури ω. Отже для того, щоб зменшити ω, необхідно зменшити кількість тепла Q_1/Q, яке йде в стружку, і навпаки, збільшити кількість тепла Q_2/Q, що йде в оброблювану деталь, рис . 2.12.

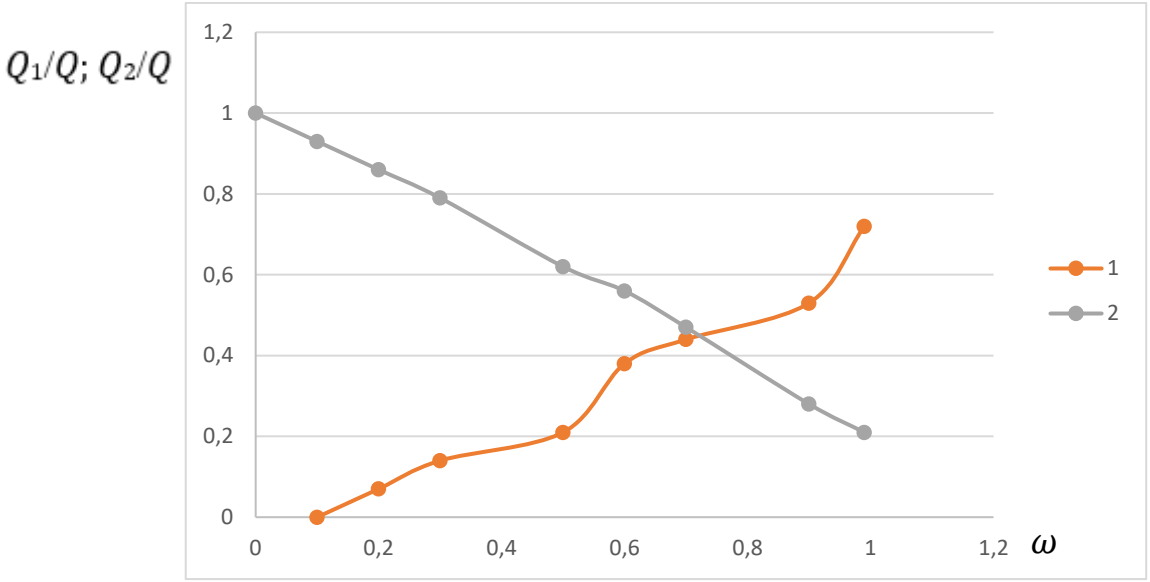


Рис. 2.7. Залежності параметрів Q_1/Q (1) і Q_2/Q (2) від показника приведеної температури ω

Тому виникає питання, яким чином можна зменшити перший і збільшити другий доданок рівняння (2.49). Для цього повернемося до залежності (2.43), та представимо її у наступному вигляді:

$$l\,n(1-\omega)+\omega=\frac{c\cdot\rho}{\lambda}\cdot l_1\cdot V_{\text{різ.}}$$

З наведеної залежності виходить, що досягнути зменшення величини температури ω і відповідно першого доданку рівняння (2.49) можливо лише за рахунок зменшення $l_1 \cdot V_{\text{різ}}$ тобто, зменшення, товщини зрізаного шару l_1 і швидкості перерізання адіабатичного сегмента $V_{\text{різ}}$ (швидкості переміщення теплового потоку в глибину поверхневого шару оброблюваної деталі). Під час безцентрового шліфування величина l_1 рівна глибині шліфування (припуску) t. Параметр $V_{\text{різ}}$ за фізичним значенням – продуктивність оброблення.

Таким чином встановлено, щоб досягнути зменшення першого доданку рівняння (2.49) тобто зменшення кількості тепла Q_1/Q, яке йде в стружку, можна за рахунок зменшення продуктивності оброблення. Це в свою чергу призводить до зменшення показника приведеної температури ω і до збільшення другого доданку рівняння (2.49), тобто збільшення кількості тепла Q_2/Q, яке йде в заготовку за рахунок її теплопровідності.

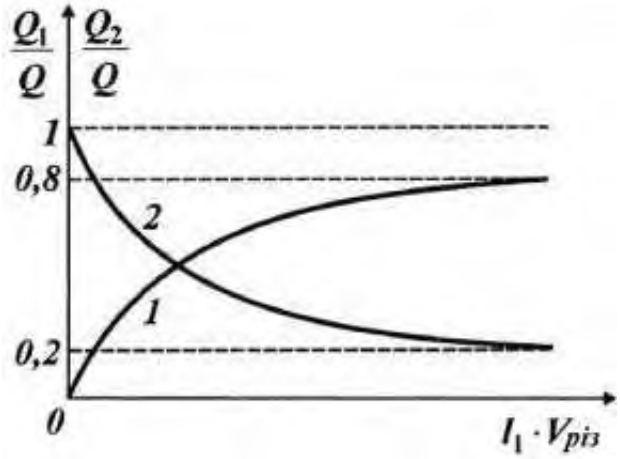


Рис. 2.8. Приклади залежностей параметрів Q_1/Q (1) і Q_2/Q (2) від $l_1 \cdot V_{\text{різ}}$

На рис. 2.8 зображено характер зміни відношення параметрів Q_1/Q і Q_2/Q в залежності від добутку $l_1 \cdot V_{\text{різ}}$ з урахуванням, що зв'язок між параметрами Q_1/Q, Q_2/Q і $l_1 \cdot V_{\text{різ}}$ відбувається за допомогою показника приведеної температури ω.

Отже з рис. 2 .8 можна зробити висновок, що чим більший добуток $l_1 \cdot V_{\text{різ}}$, тобто чим більша продуктивність оброблення, тим більше значення відношення Q_1/Q і менше Q_2/Q. З цього випливає , що під час безцентрового шліфування, яке

характеризується високою продуктивністю оброблення, практично все тепло йде в стружку. На основі проведеного аналізу можна сформулювати умови зменшення температури під час безцентрового шліфування (або температури поверхневого шару заготовки). Згідно з залежністю (2.45), температура під час шліфування θ характеризується двома величинами: σ і ω.

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \omega$$

Чим менші величини: σ і ω , тим менша температура θ. Тому зменшення θ передбачає, по-перше, підвищення ріжучої здатності шліфувального круга і зменшення умовного напруження різання σ . По-друге, – зменшення показника приведеної температури ω , і як наслідок зменшення кількості тепла Q_1 /Q, яке йде в стружку, отже збільшення кількості тепла Q_2/Q, яке йде в заготовку, за рахунок теплопровідності. В свою чергу , зменшення Q_1/Q і збільшення Q_2/Q можливе за рахунок зменшення добутку $l_1 \cdot V_{\text{різ}}$, тобто зменшення продуктивності оброблення.

В теорії шліфування прийнято вважати, що продуктивність оброблення безпосередньо впливає на температуру під час шліфування. В дійсності вплив продуктивності оброблення на температуру під час шліфування θ відбувається не безпосередньо, а через зміну кількості тепла, яке йде в утворену стружку і заготовку. На рис. 2.9 наведена структурна схема умов зменшення температури під час шліфування θ.

Використовуючи отримане теоретичне рішення , проведемо розрахунок миттєвої швидкості V_θ розповсюдження тепла в глибину поверхневого шару заготовки (в глибину адіабатичного сегмента) в залежності від часу дії теплового потоку τ. З фізичної точки зору дана швидкість рівна швидкості переміщення координати (l_1+l_2) вздовж адіабатичного сегмента.

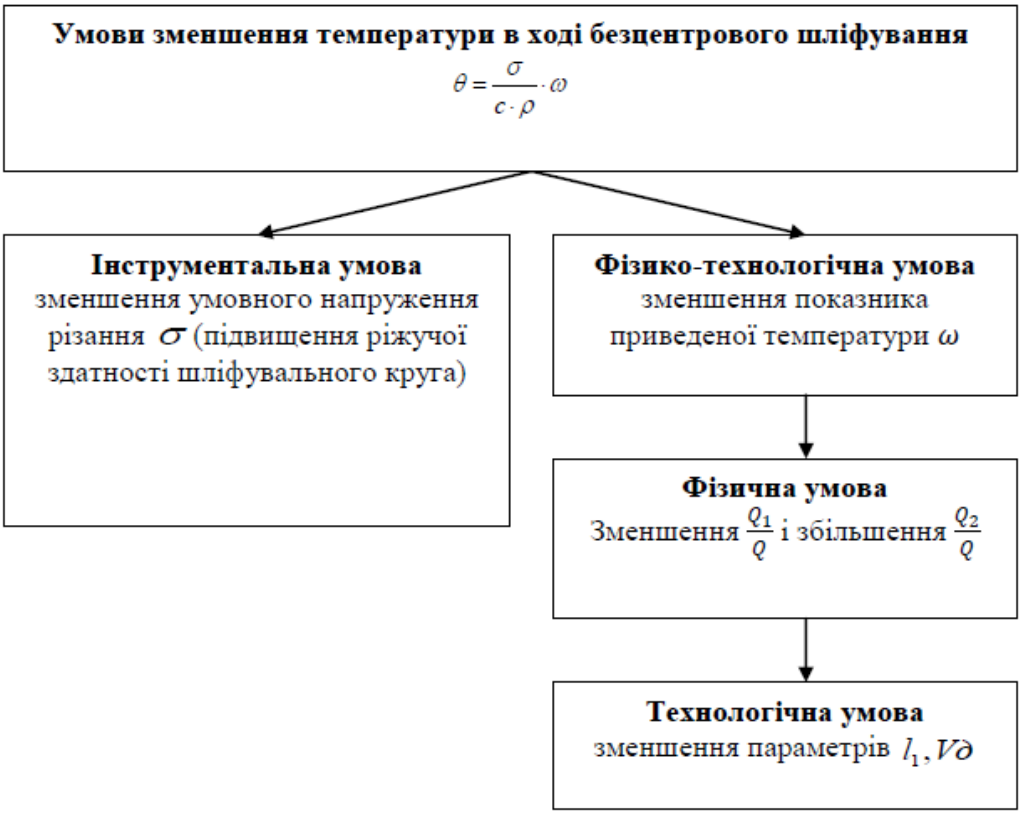


Рис. 2.9. Умови зменшення температури під час шліфування θ

Вона визначається як сума швидкості руху теплового потоку $V_д$ і швидкості зміни в часі довжини сегмента l_2, тобто:

$$V_\theta = V_Д + \frac{dl_2}{d\tau}, \tag{2.52}$$

Для визначення швидкості проведемо диференціювання за часом довжини сегмента l_2, яка визначається наступною залежністю:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \omega}{c \cdot \rho \cdot V_{різ.}} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{різ.}} \cdot \overline{l_2}, \tag{2.53}$$

$$\frac{dl_2}{d\tau} = \frac{\lambda \cdot \omega'}{c \cdot \rho \cdot v_Д} \tag{2.54}$$

В даній залежності похідна ω' визначається за допомогою виразу (2.47). Підставляючи його в залежність (2.54), отримаємо :

$$\frac{dl_2}{d\tau} = V_Д \cdot \left(\frac{1}{\omega} - 1\right). \quad (2.55)$$

Тоді миттєва швидкість розповсюдження тепла V_θ в глибину адіабатичного сегмента, буде визначатись :

$$V_\theta = V_Д + \frac{dl_2}{d\tau} = \frac{V_Д}{\omega}. \quad (2.56)$$

Із залежності (2.56) випливає , що швидкість V_θ визначається приведеним показником температури ω. Чим більша величина ω (відповідно більший час τ і переміщення l_1 теплового потоку), тим менше швидкість V_θ, тобто по мірі переміщення теплового потоку в глибину адіабатичного сегмента швидкість V_θ зменшується (рис.2.10).

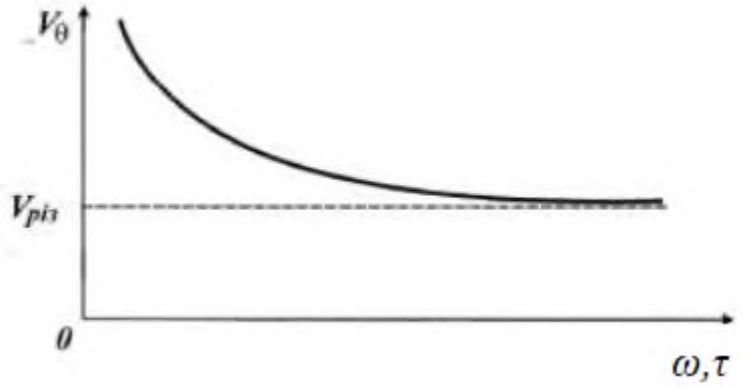


Рис. 2.10. Залежність зміни V_θ від параметрів ω і τ.

Отже, за умови $\omega \to 1$ швидкість V_θ наближається до значення $V_{piз}$.

2.5. Висновки до розділу

1. На підставі відомих підходів до моделювання температури під час безцентрового шліфування, запропоновано підхід до моделювання теплових процесів в зоні різання під час шліфувального оброблення поверхонь обертання кілець роликопідшипників. Складено диференційне рівняння балансу тепла, що розповсюджується в оброблювану заготовку та стружку з урахуванням

переміщення теплового джерела вздовж адіабатичних сегментів, якими умовно представлений припуск, що знімається.

2. Розв'язком диференційного рівняння, встановлено , що формування температури під час шліфування підпорядковується складним фізичним залежностями та вимагає уточнених розрахункових схем, які б враховували переміщення теплового джерела , як вздовж шліфованої криволінійної поверхні, так і в радіальному напрямку, перпендикулярно до шліфованої поверхні обертання.

3. Для спрощення розрахунку основних параметрів теплового процесу в умовах переналагоджувального підшипникового виробництва, отримано аналітичне диференційне рівняння у відносних величинах з використанням показника приведеної температури ω, який визначається як відношення температури шліфування, до граничного значення стабілізованої в часі температури. Даний параметр змінюється в межах 0…1, входить до всіх розрахункових залежностей і дозволяє досить однозначно оцінити закономірності перебігу теплових процесів під час безцентрового шліфування поверхонь обертання, як суцільними так і переривчастими кругами.

4. Встановлено, що з плином часу переміщення теплового джерела, показник приведеної температури ω збільшується за експоненціальним законом. Показано,що зі збільшенням показника приведеної температури ω, абсолютна температура шліфування та довжина сегмента в якому концентрується тепло, збільшуються за експоненціальним законом, а миттєва швидкість розповсюдження тепла в глибину поверхневого шару заготовки – зменшується за експоненціальним законом, прямуючи до швидкості переміщення теплового джерела в глибину поверхневого шару шліфованої поверхні.

5. В результаті проведених теоретичних досліджень, отримано аналітичну залежність, що дозволяє в явному вигляді виразити температуру в зоні різання , через параметри процесу шліфування, такі як товщина шару, що піддається тепловому впливу, який складається з поверхневого шару обробленої деталі та зрізаного припуску, швидкості переміщення теплового джерела в глибину

поверхневого шару деталі, умовного напруження різання й фізико-механічних характеристик матеріалу заготовки.

6. Отримані залежності створюють передумови прогнозування шляхів та способи зменшення температури шліфування на етапі технологічного проектування переналагоджувального підшипникового виробництва. Встановлено, що зі збільшенням показника приведеної температури ω для умов безцентрового шліфування сталі ШХ15 кількість тепла, яке переходить в стружку, збільшується, наближаючись до 70%, а кількість тепла, що переходить в адіабатичний сегмент, зменшується , наближаючись до 30%.

7. На підставі теоретичного підходу до розрахунку теплового балансу під час безцентрового шліфування, визначені основні умови зменшення температури і відповідно підвищення якості оброблення, які полягають в зменшенні кількості тепла, що передається в деталь та збільшення кількості тепла, що передається в стружку.

РОЗДІЛ 3
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, ЩО УТВОРЮЄТЬСЯ В ЗОНІ ШЛІФУВАННЯ ПЕРЕРИВЧИСТИМИ КРУГАМИ

3.1. Режими шліфування переривчастими кругами та їх зв'язок з геометричними параметрами ріжучого інструменту

Теоретичне дослідження температур для різних схем шліфування дозволяє зробити висновок, що граничний стан температурного поля (теплового насичення) настає не відразу після початку процесу шліфування. Від початку процесу до встановлення граничного стану існує малий , але фізично відчутний проміжок часу, протягом якого шліфування протікає в нестаціонарному режимі. Наявність цього тимчасового проміжку можна підтвердити експериментально, шляхом визначення температури. Нестаціонарний режим роботи в процесі шліфування відкриває принципову можливість зниження контактних температур за рахунок періодичного переривання процесу.

Зона контакту абразивного круга з деталлю представляє вузьку смужку прямокутної форми, що рухається вздовж поверхні деталі. Температурне поле в такому випадку можна розраховувати за схемою рухливого нескінченно довгого поверхнево-смугового джерела . Під час шліфування температурне поле в системі координат, зв'язаної з джерелом, починає прямувати до стану теплового насичення, процес встановлюється і поле стає квазістаціонарним. Інтервал до настання наступного циклу повинен бути таким, щоб поверхня встигла охолонути до вихідної температури. Такий процес можна реалізувати , якщо поверхню абразивного круга зробити не суцільною , а переривчастою, тобто розбити її на ряд виступів, які чергуються. Для визначення розмірів різального виступу та канавок необхідно знати час теплового насичення та час охолодження до вихідної температури .

Для вирішення даної задачі, пов'язаної з розрахунком температури в зоні різання у роботі було прийнято наступну розрахункову схему (рис. 3.1).

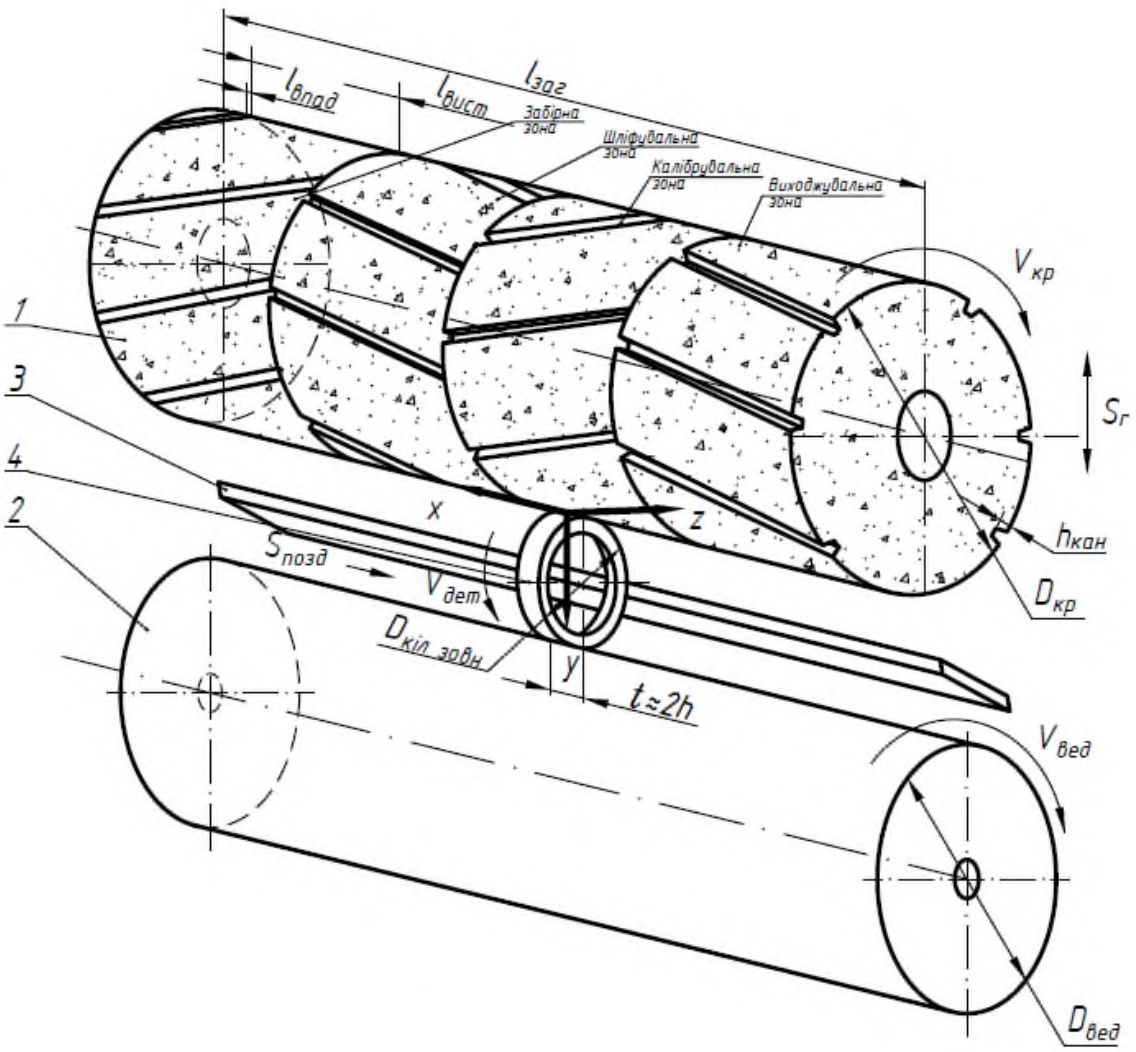


Рис. 3.1. Розрахункова схема утворення нескінченного сегментоподібного теплового джерела: 1 – шліфувальний круг ; 2 – ведучий круг; 3 – ніж опорний; 4 – заготовка

По адіабатичній граничній поверхні напівнескінченого твердого тіла, теплофізичні властивості якого не залежать від температури, з нульовою початковою температурою у позитивному напрямку вздовж осі z з постійною швидкістю $V_д$ швидко рухається нескінченно протяжне смугове сегментоподібне джерело тепла шириною $2h$, з рівномірно розподіленою по площі контакту, постійною в часі щільністю теплового джерела g, при цьому впливом теплообміну на розподіл температури поза джерелом знехтували, та ввели припущення, що поверхня теплоізольована, тобто X=0.

Для того щоб виконувати розрахунки з позитивними значеннями аргументу початок системи координат, зв'язаної з джерелом, помістимо на задню поверхню джерела . За цих умов математична задача сформулюється наступним чином: маємо основне диференціальне рівняння теплопровідності, що з урахуванням руху теплового джерела має вигляд :

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = a\cdot\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Z^2}\right)+V_\partial\cdot\frac{\partial^2\theta}{\partial Z^2} \qquad (3.1)$$

де θ – температура; a – коефіцієнт температуропровідності; V_∂ – швидкість деталі (заготовки); τ – час контакту круга з заготовкою.

За граничних умов слідує , що $\theta|\tau = 0 = 0$, $\theta|X = \infty = 0$:

$$-\lambda\cdot\frac{\partial\theta}{\partial X}\Big|_{-h<z<2h}^{x=0} = g;\ \frac{\partial\theta}{\partial X}\Big|_{-h<z<2h}^{x=0} = 0. \qquad (3.2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; g – щільність теплового потоку.

Таким чином, задача знаходження розв'язку рівняння теплопровідності (3.1) зводиться до вирішення рівняння $\theta = f\ (X, Y, Z, \tau)$ методом теплових джерел. Суть методу теплових джерел полягає в тому, що будь-який процес можна представити як суму процесів вирівнювання температури від нескінченної кількості елементарних джерел тепла , розподілених у просторі та часі. Дія елементарного джерела в нескінченному масиві характеризується функцією джерела :

$$\theta(X,Y,Z,X',Y',Z',\tau) = \frac{2Q}{c\cdot\rho\cdot(4\pi\cdot a\cdot\tau)^{3/2}}\cdot exp\left(-\frac{(X-X')^2\cdot(Y-Y')^2\cdot(Z-Z')^2}{4a\cdot\tau}\right) \qquad (3.3)$$

де Q – кількість тепла, що миттєво виділилося в точці з координатами X' , Y', Z'; c – питома теплоємність; ρ – густина матеріалу.

Під час руху джерела в позитивному напрямку осі Z або під час руху теплопровідного середовища відносно джерела в протилежному напрямку, координата дії джерела відносно середовища Z' буде безупинно змінюватися на величину $V_\partial \cdot \tau$:

$$\theta = \frac{2Q}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a \cdot \tau)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{(X - X')^2 \cdot (Y - Y')^2 \cdot (Z - Z' + V_\partial \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau} \right) \qquad (3.4)$$

Інтенсивність джерела характеризується щільністю теплового потоку g, що являє собою кількість тепла, яке виділяється на одиницю довжини за одиницю часу.

Якщо до розглянутого моменту джерело рухалося протягом часу τ, тоді задачу можна вирішити, провівши інтегрування виразу (3.4) по Y' від $-\infty$ до $+\infty$ Z' від 0 до $2h$ і по часу від 0 до τ, тобто:

$$\theta = \int_0^{2h} dZ' \int_{-\infty}^{+\infty} dY' \int_0^{\tau} \cdot \frac{2Q}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a \cdot \tau)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(X - X')^2 \cdot (Y - Y')^2 \cdot (Z - Z' + V_\partial \cdot \tau)^2}{4a \cdot \tau} \right) \qquad (3.5)$$

Вираз (3.5) описує температурне поле сегментоподібного джерела в процесі насичення. Після інтегрування по Y' було отримано:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} exp\left(\frac{Y - Y'}{4a \cdot \tau}\right)^2 \cdot dY' = \int_{-\infty}^{+\infty} exp\left(-\frac{Y - Y'}{4a \cdot \tau}\right)^2 \cdot dY' =$$
$$= 2\sqrt{a \cdot \tau} \int_{-\infty}^{+\infty} exp\left(-\frac{Y-Y'}{2\sqrt{a \cdot \tau}}\right) \cdot d\left(\frac{Y-Y'}{2\sqrt{a \cdot \tau}}\right) = 2\sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau}. \qquad (3.6)$$

Оскільки $\int_{-\infty}^{+\infty} exp(-u^2) = \sqrt{\pi}$ – інтеграл Гауса, то:

$$\theta = \frac{2g \cdot 2\sqrt{\pi \cdot a}}{c \cdot \rho \cdot (4\pi \cdot a)^{3/2}} \cdot \int_0^{2h} dZ \int_0^{\tau} \frac{\sqrt{\tau}}{\tau^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{X^2 + \left(Z - Z' + V_\partial \cdot \tau\right)^2}{4a \cdot \tau} \right) \cdot d\tau =$$
$$= \frac{g}{2c \cdot \rho \cdot \pi \cdot a} \int_0^{2h} dZ \int_0^{\tau} \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{X^2 + \left(Z - Z' + V_\partial \cdot \tau\right)^2}{4a \cdot \tau} \right) \cdot d\tau. \quad (3.7)$$

Розглянемо інтеграл:

$$\int_0^{2h} \exp\left(-\frac{X^2 + \left(Z - Z' + V_\partial \cdot \tau\right)^2}{4a \cdot \tau} \right) \cdot dZ \quad (3.8)$$

В ході інтегрування по Z', введемо заміну:

$$Z_1 = Z - Z'; dZ_1 = -dZ \text{ при } \begin{cases} Z' = 0; \\ Z' = 2h; \end{cases} Z_1 = Z;\ Z_1 = Z - 2h. \quad (3.9)$$

Згідно умови X=0, що відповідає поверхні шліфованої деталі отримано:

$$\int_z^{z-2h} \exp\left(-\frac{\left(Z_1 + V_\partial \cdot \tau\right)^2}{4a \cdot \tau} \right) \cdot dZ_1 = \int_{z-2h}^{z} \exp\left(-\frac{Z_1 + V_\partial \cdot \tau}{4a \cdot \tau} \right)^2 \cdot dZ_1. \quad (3.10)$$

Після введення позначень:

$$\frac{Z_1 + V_\partial \cdot \tau}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = U;\ \frac{dZ_1}{2\sqrt{a \cdot \tau}} = dU;\ dZ_1 = 2\sqrt{a \cdot \tau} \cdot dU, \quad (3.11)$$

Заміну інтегралу (3.8) представлено у вигляді:

$$\int_{z-2h0}^{z} \exp\left(-\frac{Z_1+V_\partial\cdot\tau}{4a\cdot\tau}\right)^2\cdot dZ_1 = 2\sqrt{a\cdot\tau}\cdot\int_{u_1}^{u_2}\exp(-U^2)\cdot dU =$$

$$= 2\sqrt{a\cdot\tau}\cdot\left(\int_0^{u_2}\exp(-U^2)\cdot dU - \int_0^{u_1}\exp(-U^2)\cdot dU - \right) = \qquad (3.12)$$

$$= 2\sqrt{a\cdot\tau}\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\cdot\left(\Phi(U_2)-\Phi(U_1)\right) = \sqrt{\pi\cdot a\cdot\tau}\cdot\left(\Phi(U_2)-\Phi(U_1)\right),$$

де $\Phi(U) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^u exp(-U)\cdot dU$ – інтеграл ймовірності Гауса або функція Лапласа.

Аргументи *U1* та $_2$ *U2* у виразі (3.12) завжди додатні та відрізняються один від одного на наступну величину:

$$U_1 - U_2 = \frac{Z+V_\partial}{2} - \frac{Z-2h+V_\partial\cdot\tau}{2} = \frac{h}{\sqrt{a\cdot\tau}}. \qquad (3.13)$$

Графік (рис. 3.2) свідчить, що для великих значень аргументу *U*, можна вважати, що *Ф(U)*=1

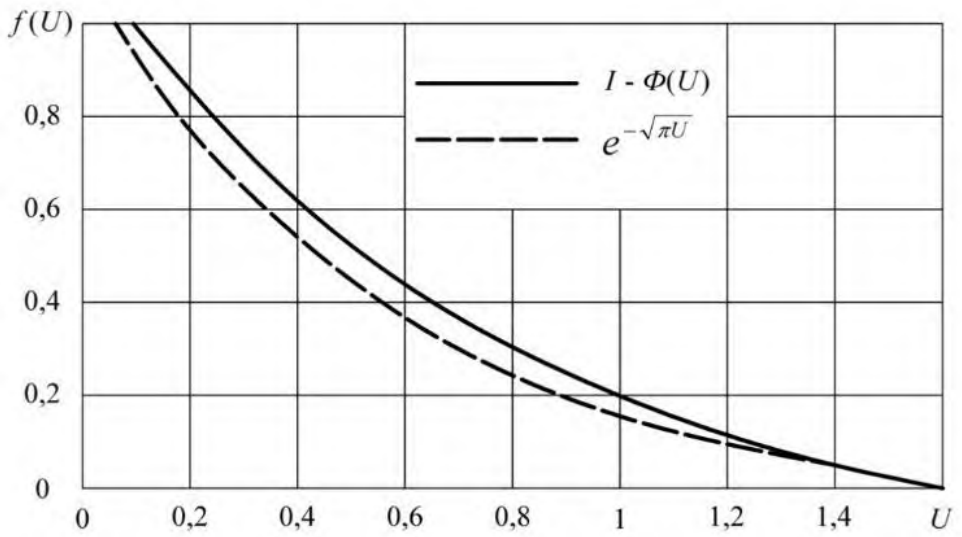


Рис. 3.2. Порівняльні графіки основної та апроксимуючої функцій

Таким чином, вираз (3.12) має вигляд:

$$\int_0^{2h} \exp\left(-\frac{X^2+(Z-Z'+V_\partial\cdot\tau)^2}{4a\cdot\tau}\right)\cdot dZ'=\sqrt{\pi\cdot a\cdot\tau}\cdot\left(1-\Phi(U_1)\right). \quad (3.14)$$

Тоді температурне поле в процесі теплового насичення визначається залежністю:

$$\theta=\frac{g}{2\pi\cdot\lambda}\cdot\int_0^\tau\frac{1}{\tau}\sqrt{\pi\cdot a\cdot\tau}\cdot(1-\Phi(U_1))\cdot d\tau=\frac{g\sqrt{a}}{2\sqrt{\pi}\cdot\lambda}\cdot\int_0^\tau\frac{1-\Phi(U_1)}{\sqrt{\tau}}\cdot d\tau. \quad (3.15)$$

Якщо $Z=2h$, то $U_1=\dfrac{Z-2h+V_\partial\cdot\tau}{2\sqrt{a\cdot\tau}}=\dfrac{V_\partial\cdot\tau}{2\sqrt{a\cdot\tau}}=\dfrac{V_\partial\cdot\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}$.

$$dU_1=\frac{V_\partial}{2\sqrt{a}}\cdot\frac{1}{2\sqrt{\tau}}\cdot d\tau\Rightarrow\frac{d\tau}{\tau}=\frac{4\sqrt{a}}{V_\partial}dU_1. \quad (3.16)$$

при $\tau=0; U_1=0;\ U_1=\dfrac{V_\partial\cdot\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}$.

Таким чином (3.15) набуде вигляду:

$$\theta=\frac{g\sqrt{a\cdot 4\sqrt{a}}}{2\lambda\cdot\sqrt{\pi}\cdot V_\partial}\cdot\int_0^{\frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}}(1-\Phi(U_1))\cdot dU_1=\frac{4g\cdot a\sqrt{\pi}}{2\lambda\cdot\pi\cdot V_\partial}\cdot\int_0^{\frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}}(1-\Phi(U_1))\cdot dU_1. \quad (3.17)$$

Виконаємо інтегрування правої частини рівняння (3.27) по частинах:

$$\Phi(U)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^U exp(-U^2)\cdot dU \qquad ;\ \Phi'(U)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot exp(-U^2), \quad (3.18)$$

було отримано:

$$\int_0^{\frac{\upsilon_i\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}} (1-\Phi(U_1))\cdot dU_1 = U_1\cdot(1-\Phi(U_1))\Big|_0^{\frac{\upsilon_i\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}} + \frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^{\frac{\upsilon_i\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}} U_1\cdot\exp(-U_1^2)\cdot dU_1 =$$

$$= \frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}\left(1-\Phi\left(\frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}\right)\right) - \frac{1}{\sqrt{\pi}}\cdot\int_0^{\frac{\upsilon_i\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}} \exp(-U_1^2)\cdot d(-U_1^2) = \tag{3.19}$$

$$= \frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}\left(1-\Phi\left(\frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}\right)\right) - \frac{1}{\sqrt{\pi}}\cdot\exp\cdot(-U_1^2)\cdot\Big|_0^{\frac{\upsilon_i\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}} =$$

$$= \frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}\left(1-\Phi\left(\frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}\right)\right) - \frac{1}{\sqrt{\pi}}\cdot\exp\cdot\left(-\frac{V_\partial^{\ 2}\cdot\tau}{4a}\right) - 1.$$

Після проведених перетворень отримали рівняння, що виражає залежність температури на шліфованій поверхні від часу:

$$\theta = \frac{2g\cdot a}{\lambda\cdot\sqrt{\pi}\cdot V_\partial}\cdot\left[\frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}\left(1-\Phi\left(\frac{V_\partial\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}}\right)\right) - \frac{\exp\cdot\left(-\frac{V_\partial^{\ 2}\cdot\tau}{4a}\right)-1}{\sqrt{\pi}}\right]. \tag{3.20}$$

Виразом (3.20) зручно користуватися, якщо представити залежність між температурою та часом у критерійному вигляді .

Прийнявши $Q_н = \dfrac{\pi\cdot\lambda\cdot V_\partial\cdot\theta}{2g\cdot a}$ за відносну температуру, вираз (3.20) набуде вигляду:

$$(Q_н = \sqrt{P^2\cdot F}\cdot(1-\Phi(\sqrt{P^2\cdot F})) - \frac{1}{\sqrt{\pi}}\cdot exp[(-P^2\cdot F) - 1]. \tag{3.21}$$

Залежність (3.21) дозволяє визначити час, протягом якого температура поверхні досягне якої-небудь заздалегідь заданої величини. На рис. 3.3 наведено графічну залежність виразу (3.21) від критеріїв $P^2\cdot F$.

Другим етапом теоретичних розрахунків температури в зоні різання під час оброблення абразивним переривчастим інструментом є визначення величини зниження температури залежно від часу припинення процесу шліфування.

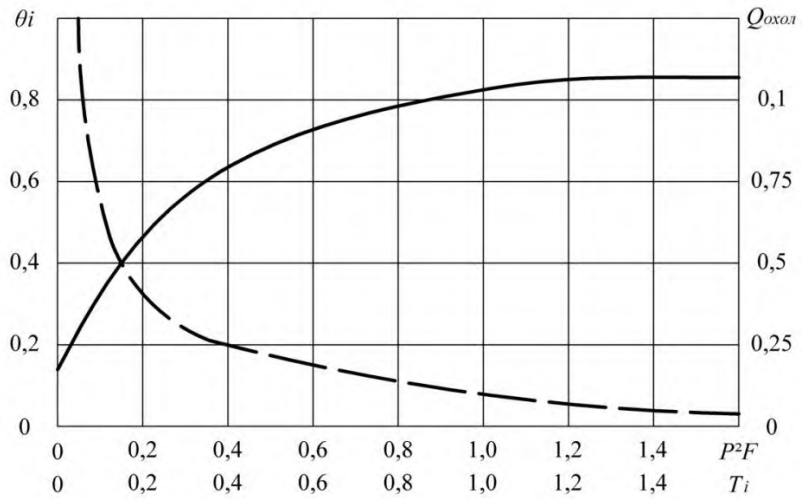


Рис. 3.3. Зміна температури за часом теплового насичення:
– – – - залежність $Q_{н}$ від комплексу $P^2 \cdot F$; —— - залежність $Q_{охол}$ від комплексу θ_i.

Розглянемо задачу про зміну температури вільної поверхні шляхом теплообміну. Зміну середньої температури вважаємо постійною для фіксованого моменту часу. Для оцінки процесу охолодження вільної поверхні приймемо наступну теплову схему: оскільки швидкості охолодження поверхні за рахунок теплообміну з ЗОР після припинення дії джерела тепла великі, то можна знехтувати розсіюванням тепла по осі Z за рахунок теплопровідності . За рахунок введення цього припущення розрахунковий процес охолодження поверхні буде відбуватися дещо повільніше, ніж реальний.

Таким чином, задачу зміни середньої температури поверхні в процесі охолодження зведено до вирішення наступного рівняння:

Розв’язком такої задачі при X=0 буде наступна функція [124]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau_{охол}} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}. \qquad (3.22)$$

$$\frac{\theta-\theta_{охол}}{\theta_0-\theta_{охол}} = exp\left[\left(\frac{\alpha\cdot n}{\lambda}\right)^2 \cdot a \cdot \tau_{охол}\right] \cdot \left[1 - \Phi\left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau_{охол}}\right)\right]. \quad (3.23)$$

Записавши рівняння в вигляді критерію , отримаємо:

$$Q_{охол} = exp\, \theta_i{}^2 \cdot [1 - \Phi(\theta_i)], \quad (3.24)$$

де $\theta_i = \frac{\alpha\cdot\sqrt{\tau_{охол}}}{\lambda\cdot c\cdot\gamma}$ – критерій Тихонова.

Розрахуємо геометричні параметри і час, після закінчення якого забезпечується зниження температури на 25-30% від максимального значення .

Вихідні дані: матеріал деталі сталь ШХ15; швидкість деталі $V_д$=600 мм/хв; швидкість круга $V_{кр}$=30 м/с; $v_{витр\ ЗОР}$=7 л/с; зовнішній радіус шліфувального круга R=250 мм; ширина зони контакту h=12 мм; коефіцієнт теплообміну $v \approx 5{,}2 \cdot 10^{\ 4} v_{вит.}^{0,8}$ Вт/м $^{2}\cdot°C$; коефіцієнт теплопровідності матеріалу a = 0,08 см²/с; коефіцієнт теплопровідності матеріалу λ=39 …40 Вт/м·°C при температурі 400ºС .

З графіку (рис. 3.3) видно, що $Q = 0{,}75$ та відповідає комплексу $P^2 \cdot F$ =0,63, отже:

$$\tau = \frac{0{,}63\cdot 4\cdot 8\cdot 10^{-6}}{(5/60)^2} = 0{,}0029 \text{ с}. \quad (3.25)$$

Час досягнення визначеної температури залежить від швидкості джерела , що дозволяє змінювати цей час у широких межах. Після того, як процес шліфування припинився , наступає невеликий часовий проміжок, протягом якого поверхня охолоджується потоком ЗОР. Проміжок часу між двома сусідніми робочими виступами повинен бути таким, щоб поверхня могла охолонути на визначену величину. Оскільки поверхня в перерві між робочими циклами вільна , теплообмін здатний істотно змінити її температуру.

Час , необхідний для охолодження поверхні знайдемо виходячи з умови $\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau_{охол}} = 0{,}24$ (рис.3.3). Підставивши дані, було отримано наступне:

$$\tau_{охол} = \frac{0.24^2 \cdot 40^2}{(5{,}2 \cdot 10^4 \cdot 7^{0.8})^2 \cdot 8 \cdot 10^{-6}} = 0{,}0021\text{с}. \quad (3.26)$$

Знаючи час охолодження можна визначити ширину канавки на циліндричній поверхні шліфувального круга:

$$l_{канавки} = V_{кр} \cdot \tau_{охол} = 30 \cdot 10^3 \cdot 0{,}00021 = 6{,}3 \quad (3.27)$$

Ширину різального виступу знайдемо з умови:

$$l_{виступу} = V_{кр} \cdot \tau = 30 \cdot 10^3 \cdot 0{,}0029 = 87 \quad (3.28)$$

Однакового зниження температури можна досягнути при різних співвідношеннях різального виступу та впадини. Оскільки $l_{кан.}/l_{вист.} < 0.1$, то механічна стійкість переривчастого круга не поступається суцільному, тому є можливість зменшити число пазів шляхом збільшення ширини канавки та різального виступу.

Число різальних виступів можна визначити з умови:

$$\varepsilon_{вис} = \frac{2\pi \cdot R}{l_{впад} + l_{вис}} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 250}{12 + 119} = 12 \quad (3.29)$$

В результаті було отриманоі адекватне рівняння математичної моделі теплонапруженості безцентрового шліфуванняі, на основі якого встановлено закономірність зміни температуриі та проведено моделювання теплонапруженості процесу різання, шляхомі вибору раціональних режимів.

Дослідження температури від $V_{кр}$, $V_д$, t для випадку шліфування сталі ШХ15 показало, що практично за будь-яких режимів різання температура контакту абразивного переривчастого інструменту з подачею ЗОР через канавки помітно нижча, ніж для суцільного круга з подачею ЗОР методом поливу. До того ж чим інтенсивніші режими шліфування, тим ця різниця більша.

Причини зниження температури під час переходу від суцільного шліфування до переривчастого наступні:

по-перше, це менша інтенсивність теплоутворення. Потужність тепловиділення пропорційна тангенціальній силі різання P_z, а вона під час переривчастого шліфування нижча на 20…30%, ніж при суцільному шліфуванні;

по-друге, канавки переривчастого інструменту розраховані так, щоб за час контакту різального виступу з оброблюваною поверхнею температура не встигала встановитися і, отже, не досягала свого максимального значення.

Регулюючи ширину виступів, можна керувати процесом теплоутворення в будь-який момент, від початку контакту, забезпечуючи регламентоване значення температури. За час переривання контакту, тривалість якого залежить від ширини канавки, відбувається охолодження контактної поверхні заготовки, потім знову нагрівання і тощо. Чим менше відношення ширини виступу до ширини канавки круга, тим нижча температура переривчастого шліфування за інших рівних умов. В процесі переривчастого шліфування ЗОР подається безпосередньо в зону різання, чого під час суцільного шліфування досягнути складно, тому тепловідведення в зовнішнє середовище під час переривчастого шліфування інтенсивніше , ніж під час звичайного.

3.2. Розрахунок температури безцентрового шліфування переривчастими шліфувальними кругами

Враховуючи складний характер зв’язку приведеного показника температури ω з глибиною шліфування t та швидкістю деталі $V_д$, виконаємо відповідно до залежності $\frac{c\cdot\rho}{\lambda}\cdot t = \frac{\lambda\cdot\omega}{c\cdot\rho\cdot l_2}\sqrt{\frac{2\cdot R_{кр.}\cdot\omega}{l_2\cdot\bar{l}_1}}$ кількісну оцінку впливу глибини шліфування t на основні параметри теплового процесу. Під час розрахунку використовуємо вихідні дані: c = 175 ,9 Дж/(кг·°С); ρ = 15·10^3 кг/м^3; λ = 50 Вт/(м·°С); 2$R_{кр}$ = 0,25 м; $V_д$ = 600 мм /хв.

Розрахункові значення параметрів $\bar{l}_1$; ω; l_2; l_1 =t; l_2 / l_1; Q_1/ Q; Q_2/ Q; Q_2/ Q_1 (табл. 3.1)

Таблиця 3.1

$t \cdot 10^{-3}$,м	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
$\overline{l_1}$	0,0042	0,012	0,022	0,034	0,047
ω	0,09	0,15	0,19	0,24	0,27
$l_2 \cdot 10^{-3}$,м	0,426	0,5	0,52	0,57	0,57
$l_1 \cdot 10^{-3}$,м	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
l_2/l_1	21,3	12,5	8,7	7,1	5,7
Q_1/Q	0,05	0,1	0,13	0,17	0,19
Q_2/Q	0,95	0,9	0,87	0,83	0,81
Q_2/Q_1	19	9	6,7	4,9	4,3

Як видно з табл. 3.1, зі збільшенням глибини шліфування t безрозмірна величина $\overline{l_1}$ і приведений показник температури ω збільшуються . Відповідно будуть збільшуватися й абсолютні значення температури шліфування θ, що визначається залежністю (2.45).

В табл. 3.1 наведені значення довжини l_2, розраховані згідно залежності (2.53) з урахуванням встановлених за залежністю значень швидкості переміщення теплового потоку:

$$V_{різ} = \frac{Q_{пит}}{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}} = V_Д \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}$$

Справедливим буде висновок, що довжина l_2 зі збільшенням глибини шліфування t збільшується і приймає значення, яке суттєво перевищує l_1 = t, однак слід відмітити, що інтенсивність збільшення довжини l_2 зі збільшенням глибини шліфування t незначна. Отже зі збільшенням глибини шліфування t в 5 раз (з 40 до 200 мкм) довжина l_2 збільшилась тільки в 1 ,34 рази. Це важливий результат, який вказує на те, що за рахунок зменшення глибини шліфування t складно досягнути зменшення довжини l_2 .

В табл. 3.2 для порівняння наведені розрахункові значення основних параметрів теплового процесу під час шліфування для різних значень швидкості деталі $V_д$, тут глибина шліфування прийнята постійною і дорівнює $t = 0{,}002 \cdot 10^{-3}$ м та $l_1 = t = 0{,}002 \cdot 10^{-3}$ відповідно.

Таблиця 3.2

Розрахункові значення параметрів l_1; ω; l_2; $l_1 = t$; l_2/l_1 ; Q_1/Q; Q_2/Q; Q_2/Q_1

$V_Д$, м/хв	30	60	90	120	150
$\overline{l_1}$	0,0042	0,0084	0,0126	0,0168	0,021
ω	0,09	0,125	0,15	0,17	0,185
$l_2 \cdot 10^{-3}$,м	0,426	0,3	0,24	0,2	0,175
l_2/l_1	21,3	15	12	10	8,75
Q_1/Q	0,05	0,09	0,1	0,12	0,13
Q_2/Q	0,95	0,91	0,9	0,88	0,87
Q_2/Q_1	19	1,01	9	7,3	6,7

Знаючи приведений показник температури ω, визначений за допомогою (2.52), можна визначити значення кількості тепла Q_1/Q і Q_2/Q, яке йде в утворену стружку та в поверхневий шар заготовки кільця відповідно. В табл. 3.1 наведені розрахункові значення Q_1/Q; Q_2/Q ; Q_2/Q_1. Зі збільшенням глибини шліфування t кількість тепла Q_1/Q, що йде в утворену стружку, збільшується, а кількість тепла Q_2/Q, що йде в заготовку кільця, зменшується . Причому, кількість тепла, яке йде в заготовку , суттєво перевищує кількість тепла, що йде в утворену стружку. Відношення Q_2/Q_1 зі збільшенням глибини шліфуванн t зменшується, однак за такої умови приймає більші значення. Цим, можна пояснити , чому довжина l_2 значно більша довжини $l_1 = t$. На рис. 3.4 та рис . 3.5 графічно показано характер зміни параметрів , наведених в табл. 3.1, зі зміною глибини шліфування t.

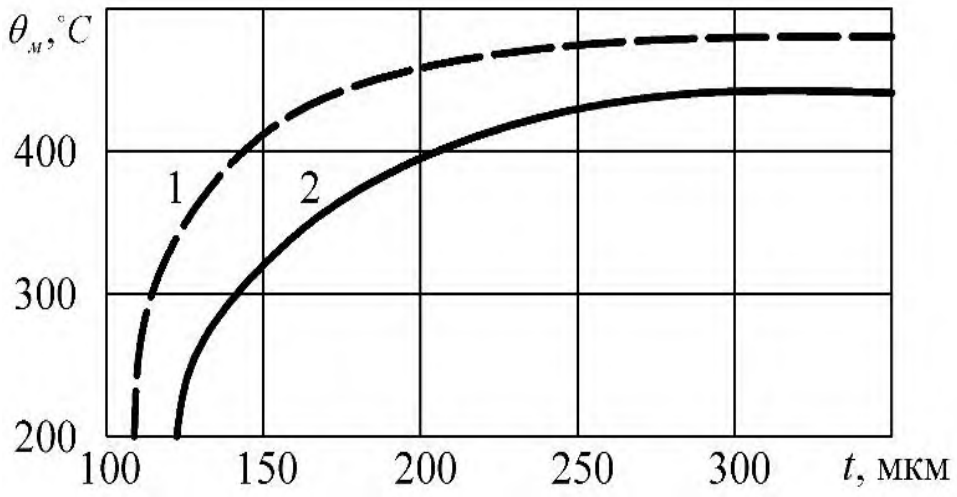


Рис. 3.4. Температурні залежності під час шліфування кілець із сталі ШХ15 на верстаті SASL5AD (1 – суцільним кругом ; 2 – переривчатим кругом)

Як слідує з табл . 3.2, зі збільшенням швидкості деталі $V_д$ безрозмірна величина $\overline{l_1}$ та приведений показник температури ω збільшуються, але з меншою інтенсивністю , ніж від збільшення глибини шліфування t (табл . 3.1).

Довжина адіабатичного сегмента l_2 в якому концентрується тепло, зменшується зі збільшенням швидкості деталі $V_д$. Як видно з табл. 3 .1, зі збільшенням глибини шліфування t, довжина адіабатичного сегмента l_2 збільшується. Відповідно, за рахунок збільшення швидкості деталі $V_д$ можна зменшити довжину l_2, тобто товщину поверхневого шару обробленої деталі , в якому концентрується тепло і який є потенційним джерелом утворення температурних дефектів на обробленій поверхні.

Як слідує з табл. 3.2 , швидкість деталі $V_д$ в порівнянні з глибиною шліфування t (табл. 3.1) значно менше впливає на зменшення кількості тепла Q_2/Q , що йде в заготовку. В даному випадку фактично все тепло, яке утворюється під час шліфування йде в заготовку.

На рис. 3 .6 показано характер зміни параметрів, які наведені в табл. 3.2 зі зміною швидкості деталі $V_д$. Отже, збільшення $V_д$ дозволяє, разом зі збільшенням температури шліфування (параметрів ω і θ), зменшувати товщину дефектного шару обробленої деталі l_2.

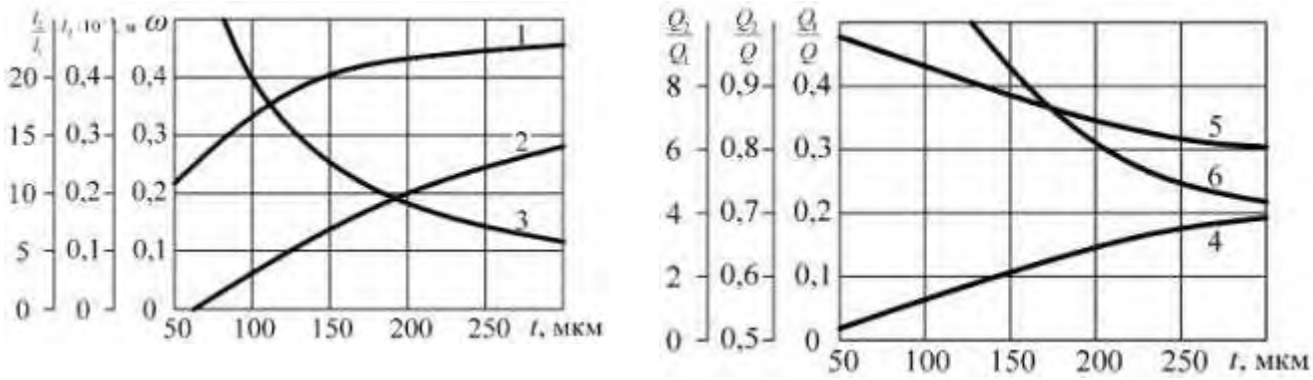


Рис. 3.5. Залежності параметрів l_2 (1); ω (2); l_2/l_1(3); $Q_1\ /Q$ (4); Q_2/Q (5); $Q_2/\ Q_1$ (6) від глибини шліфування t

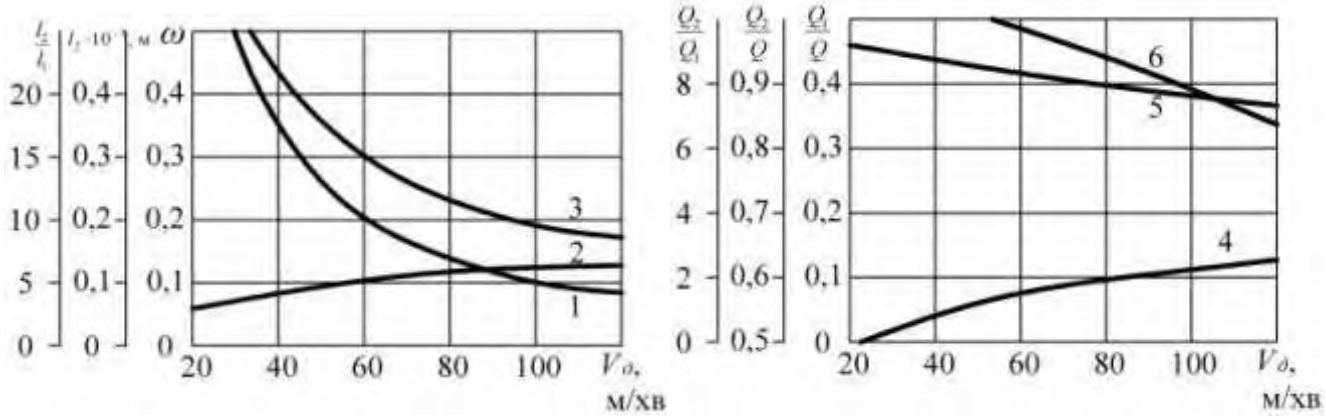


Рис 3.6. Залежності параметрів l_2(1); ω (2); l_2/l_1(3); $Q_1/\ Q$ (4); $Q_2\ /Q$ (5); $Q_2/\ Q_1$(6) від швидкості деталі $V_д$

На графіках показано, що збільшення $V_д$ дозволяє, разом зі збільшенням температури шліфування (параметрів ω і θ), зменшувати товщину дефектного шару деталей l_2.

3.3. Умови зниження температури під час переривчастого шліфування поверхонь обертання кілець

В загальному випадку температура шліфування θ визначається залежністю (2.45), в яку входять два змінних параметри: умовне напруження різання σ та

приведений показник температури ω, який змінюється в межах 0…1. Тому, зменшити температуру шліфування θ можна зменшенням цих двох параметрів .

Зменшення умовного напруження різання σ, визначимо за допомогою залежності для встановлення умовного напруження різання σ:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{ст}}{K_{різ}}$$

де – $\sigma_{ст}$ межа міцності оброблюваного матеріалу на стиснення, Н/м^2; $К_{різ} = P_z/P_y$ – коефіцієнт різання; P_z, P_y – тангенціальна і радіальна складові сили різання, Н; пов'язані з підвищенням ріжучої здатності шліфувального круга за рахунок збільшення коефіцієнта різання $К_{різ}$.

Даний коефіцієнт залежить від наступних чинників: гостроти ріжучих зерен круга, інтенсивності тертя оброблюваної заготовки з шліфувальним кругом. Тому для збільшення $К_{різ}$ необхідно в процесі шліфування забезпечити своєчасне випадання із зв'язки круга зношених зерен. Ця умова досягається застосуванням ефективних методів правки круга, а саме, безперервної правки, що забезпечує стабілізацію в часі ріжучої здатності шліфувального круга.

$$\frac{c \cdot p}{\lambda} \cdot Q_{пит} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}} = \overline{l_1}$$

Як бачимо, зменшення параметра ω припускає зменшення безрозмірної величини $\overline{l_1}$. Це означає , що безрозмірна величина $\overline{l_1}$ тим менша , чим менша питома продуктивність оброблення $Q_{пит}$ і глибина шліфування t. Отже для зменшення величини l_1, приведеного показника температури ω і відповідно температури шліфування θ, оброблення доцільно виконувати по схемі багатопрохідного шліфування, тобто з мінімально-можливою глибиною

шліфування t і максимально- можливою швидкістю деталі $V_д$ для заданої питомої продуктивності оброблення $Q_{пит}$.

В загальному випадку приведений показник температури ω залежить від часу τ і швидкості переміщення теплового потоку $V_{різ}$, згідно залежності (2 .44). Тому для заданої швидкості $V_{різ}$ зменшити параметр ω можна зменшенням часу τ.

Це досягається в першу чергу за рахунок періодичного переривання процесу шліфування шляхом використання переривчастих кругів , введення додаткових коливань круга або оброблювальної деталі .

На основі проведеного аналізу сформульовано основні умови зменшення температури шліфування θ (рис. 3.7).

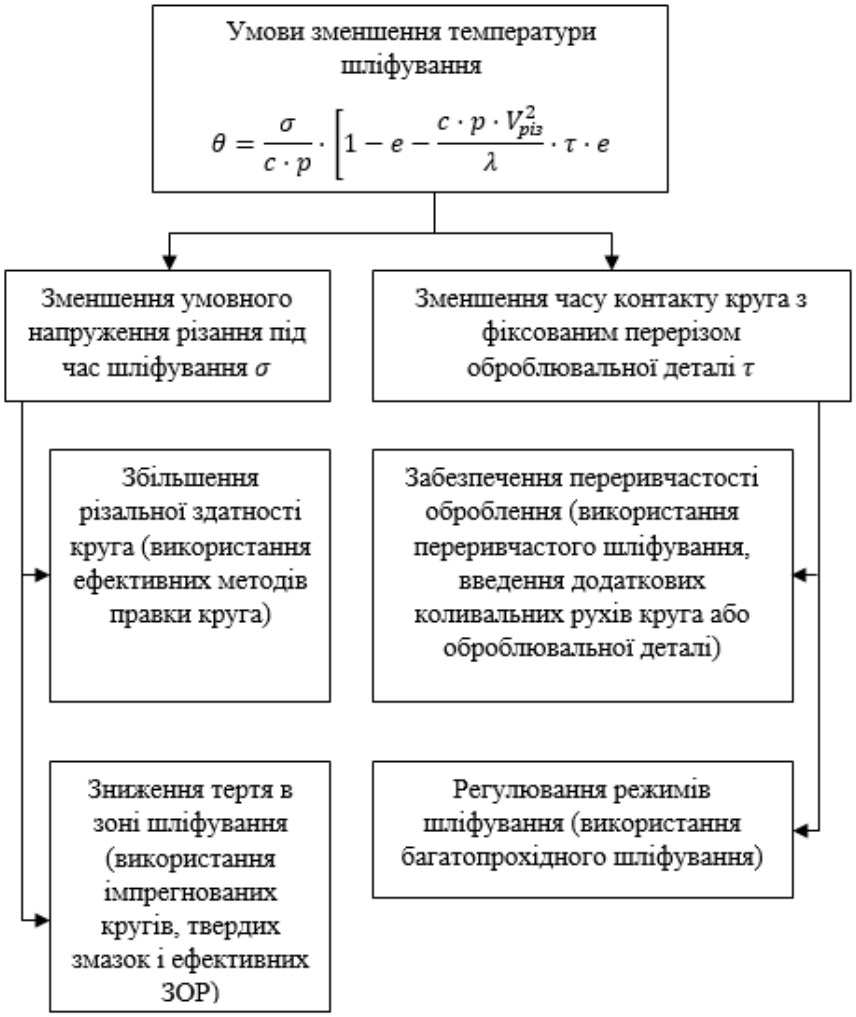


Рис. 3.7. Шляхи зменшення температури під час переривчастого шліфування

Другим, не менш ефективним шляхом зменшення часу τ є керування режимами шліфування, наприклад, за рахунок використання багатопрохідного шліфування , яке забезпечує зменшення приведеного показника температури ω.

3.4. Висновки до розділу

1. Отримано аналітичні залежності для визначення геометричних параметрів шліфувального інструменту , таких як зовнішній діаметр шліфувального круга D = 500 мм, число канавок ε = 12, що забезпечує 20% зниження температури в зоні різання . Встановлено, що збільшення кількості канавок шліфувального круга призводить до зменшення температури шліфування, за рахунок зменшення часу контактування ріжучих виступів круга з шліфованою поверхнею. Зростання ширини виступу шліфувального круга $l_{\text{виступ}}$ та зменшення ширини канавки $l_{\text{канавки}}$ зумовлює зростання ріжучої здатності шліфувального круга внаслідок збільшення числа активних зерен, які беруть участь в різанні, однак це призводить до зростання контактної температури шліфування. Зменшення відношення $l_{\text{виступ}}/l_{\text{канавки}}$ зумовлює протилежні процеси, однак зниження температури можна досягнути при різному співвідношенні ширини різального виступу та ширини впадини.

2. Максимальне $l_{\text{виступ}}/l_{\text{канавки}}$ = 1 забезпечує рівномірне самозаточування круга та най менше значення температури шліфування. Відношення $l_{\text{виступ}}/l_{\text{канавки}}$, що відповідає 60/1 забезпечує високу зносостійкість шліфувальних кругів, але дещо збільшує температуру шліфування.

3. Розроблена методика розрахунку основних параметрів теплового процесу під час безцентрового шліфування переривчастими кругами, проведена їх кількісна оцінка відносно зміни режимів шліфування та геометричних параметрів шліфувального інструменту. Встановлено, що приведений показник температури ω приймає значення (0,15 …0,27), відповідно абсолютне значення температури при шліфуванні кругом з кількістю канавок 12 дорівнює 440 -480°С при цьому миттєва швидкість розповсюдження тепла в глибину поверхневого шару заготовки в 3…6 разів більше швидкості переміщення теплового джерела в

глибину поверхневого шару шліфованої деталі. Кількість тепла, що переходить в стружку складає 25…32%, що в 3,5 …4,5 разів менше кількості тепла, що переходить в заготовку.

4. Проведена кількісна оцінка впливу глибини шліфування та швидкості деталі на основні параметри теплового процесу під час безцентрового шліфування зовнішніх поверхонь обертання кілець роликопідшипників. Встановлено, що зі збільшенням глибини шліфування приведений показник температури ω збільшується. Встановлено, що зі збільшенням частоти обертання деталі приведений показник температури ω безперервно збільшується, а товщина поверхневого шару заготовки, в якому концентрується тепло зменшується і приймає значення в декілька разів більше глибини шліфування. Отже , кількість тепла, що переходить в стружку збільшується в межах 20…30%, однак з меншою інтенсивністю, чим від збільшення глибини шліфування t .

5. Обґрунтовані основні умови зменшення температури під час переривчастого шліфування, які полягають в зменшенні умовного напруження різання і часу дії теплового джерела в зоні шліфування. В першому випадку – це досягається підвищенням ріжучої здатності шліфувального круга, та зниженням тертя в зоні шліфування. В другому випадку забезпеченням переривчастості оброблення та регулюванням режимів шліфування.

РОЗДІЛ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ З ПОКАЗНИКАМИ ОПЕРАЦІЙ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ

4.1. Програма та методика експерементальних досліджень

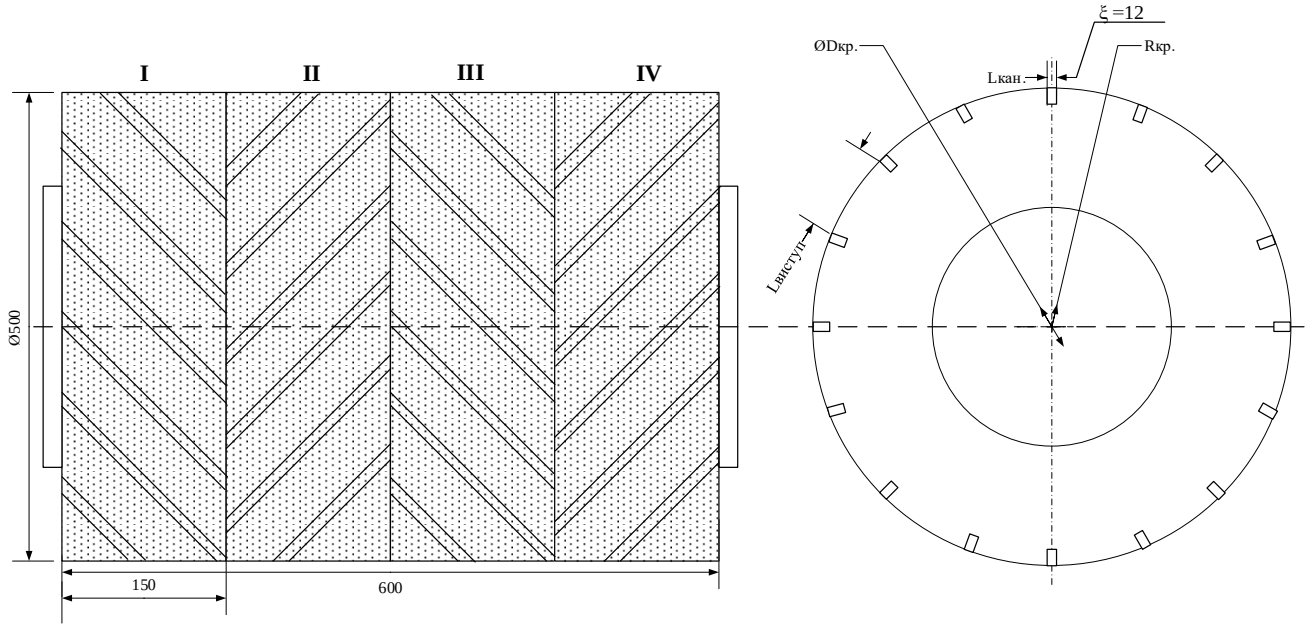
У практиці світового машинобудування відбувається постійне підвищення вимог до якості та конкурентоспроможності виробів. Питання керування якістю поверхневого шару деталей машин під час шліфування залишається актуальною проблемою сучасного підшипникового виробництва . Оскільки, надійність та довговічність машин і механізмів визначається надійністю опор кочення, то виникає проблема підвищення експлуатаційних характеристик підшипників кочення, які вирішальним чином залежать від точності геометричної форми поверхонь обертання, що забезпечується процесом шліфування.

Особливо актуальним є питання зниження теплонапруженості процесу шліфування під час оброблення поверхонь обертання, який супроводжується високими контактними температурами внаслідок значної площі контакту круга із заготовкою та виникнення теплових дефектів. Як наслідок, довговічність підшипників знижується в 3-4 рази [2]. Результати статистичних досліджень діючого підшипникового виробництва, показали, що шліфувальні операції на двосторонніх безцентрово-шліфувальних автоматах в технологічному циклі формоутворення кілець роликопідшипників супроводжуються значною кількістю бракованих деталей внаслідок припалювань поверхонь після оброблення та зниження мікротвердості. Припалювання погіршують якість поверхонь, призводять до зниження твердості поверхневого шару, а також виникнення тріщин, що призводить до зменшення ресурсу роботи підшипникового вузла та виробу в цілому.

Програма експериментальних досліджень зв'язків технологічних чинників з температурою в зоні шліфування та з якістю шліфованих поверхонь, передбачає:

– дослідження температури під час шліфування поверхонь обертання зовнішніх кілець роликопідшипників;
– дослідження шорсткості шліфованої поверхні;
– дослідження мікротвердості поверхневого шару;
– дослідження силових параметрів процесу різання.

Застосування переривчастих шліфувальних кругів (рис. 4.1) в технологічному циклі оброблення кілець підшипників є високопродуктивним методом оброблення [148].



№ абразивного диска	Зернистість	
	Чорнове шліфування	Напівчистове шліфування
I	110	75
II	75	60
III	60	30
IV	30	22

Рис. 4.1. Шліфувальний переривчастий збірний круг з різнонаправленими похилими ріжучими виступами (число канавок ε=12)

Це пояснюється тим, що такі шліфувальні круги можуть працювати за умови підвищених швидкостей, що дає змогу зменшити силу різання, яка припадає на одиничне зерно абразиву , та підвищити зносостійкість такого

шліфувального круга, зменшити теплонапруженність процесу різання та уникнути появи припалювань поверхонь, що обробляються, забезпечити задані параметри мікрогеометрії , значно зменшити використання ЗОР.

Шліфувальні круги з переривчастою ріжучою поверхнею можна розділити на переривчасті , композиційні та комбіновані.

Запропоновано конструкцію багатосекційного циліндра (шліфувального круга) з переривчастою ріжучою частиною, яка характеризується наявністю впадин, що розміщуються на поверхні кожного наступного диска у вигляді гвинтоподібних поверхонь . Зернистість кожного наступного абразивного диска зменшують, при цьому у останньому диску зернистість мінімізують або встановлюють останній диск гладким (без абразивних зерен) для виконання цим диском функції вигладжування поверхні деталей, призначених для оброблянння шліфуванням. Крім цього , враховують перед нанесенням гвинтоподібних пазів їх кількість , ширину, глибину та потрібний кут нахилу. Після виконання операції з виготовлення зазначених пазів, здійснюють з'єднання абразивних дисків у циліндричну конструкцію за допомогою метизів. Наявність вирізів на шліфувальному крузі , утворених під кутом γ до осі обертання сприяють подачі в зону різання потоку повітря під підвищеним тиском. Потужний струмінь повітря видуває стружку із зони різання, пришвидшує процес окислення та згорання. Окислена стружка стає ламкою, набуває округленої форми, не налипає на поверхню зерен і не проникає в поверхню круга. Переривчасті шліфувальні круги з похилими ріжучими виступами забезпечують прокачування ЗОР і повітря через прорізи, що дозволяє зменшити теплонапруженність процесу різання.

Температуру в зоні шліфування можна знизити, якщо шліфування проводити з певними розривами, причому тривалість різання між цими розривами зробити менше часу теплового насичення металу та за час розриву частково охолодити поверхню. Такий процес можна здійснити кругами, які мають на робочій поверхні ряд виступів, що чергуються і впадин певної довжини.

Переривчасті шліфувальні круги характеризуються рядом геометричних та конструктивних параметрів від величини значень яких буде залежати теплонапруженність процесу різання.

До основних геометричних параметрів переривчастого круга можна віднести: кількість канавок, довжина ріжучого виступу та впадини. Конструктивні параметри визначаються формою впадин між ріжучими частинами, наявністю демпфуючих елементів .

Основні причини, які призводять до появи невідповідностей шорсткості, мікротвердості та хвилястості зовнішнього кільця роликопідшипників :

– причини пов’язані з налаштовуванням та технічним станом технологічного устаткування; недоліки технологічного оснащення й спорядження ;

– недоліки вибраної системи формоутворення робочих поверхонь деталей підшипників;

– нехтування чинником технологічної спадковості під час формування технологічного маршруту оброблення робочих поверхонь;

– невідповідність режимів шліфування.

Після проведення аналізу причин появи геометричних невідповідностей можливо стверджувати, що усунення таких недоліків шляхом направленого технологічного впливу є ключовим напрямком покращення та стабілізації експлуатаційних показників поверхонь обертання роликових підшипників.

4.2. Планування та проведення експерементальних досліджень

В підшипниках кочення ковзальний контакт змінюється контактом кочення, завдяки чому змінюються витрати на тертя. Але конструкція підшипника кочення така, що не дозволяє повністю звільнитись від елементів, які зумовлюють наявність незначного контакту ковзання . Тому в підшипниках кочення проходять складні зміни , котрі накладають додаткові похибки на роботу підшипника [12].

До підшипників загального та спеціального призначення ставиться багато вимог, які можна згрупувати (поділити) на загальні та специфічні.

Загальні вимоги, що пов’язані з розвитком машинобудування та приладобудування, є зменшення шумності та вібрацій, моменту опору обертання , підвищення точності, виконання геометричних розмірів, збільшення довговічності , надійності, зносостійкості.

До специфічних вимог віднесемо теплостійкість , антинамагнічуваність, стійкість до корозії та ряд конкретних вимог, особливо для підшипників космічних апаратів та інших об’єктів, що працюють в специфічних експлуатаційних умовах.

Зменшення моменту опору обертання є однією з основних характеристик багатьох підшипників кочення, особливо в деталях приладів та прецизійнихверстатах, де момент часто визначає основні показники пристрою в цілому . Експериментальні дослідження та практичні спостереження показують, що складові моменту опору обертання, особливо змінна його частина, змінюються з кутом повороту, ці зміни мають велике значення в підшипниках, що працюють на малих швидкостях і обмежених кутах повороту .

Як показують дослідження [11, 12, 13, 14] основною причиною виникнення та зміни складових моменту опору обертання є похибки розмірів та форми поверхонь кочення (овальність кілець, роликів), мікронерівності робочих поверхонь, забруднення підшипника дрібними частинками продуктів зношення абразиву та інше, а також непостійність мікротвердості поверхонь кочення. Тому момент опору обертання необхідно розглядати як один з основних параметрів, які характеризують робочі властивості підшипника кочення.

Точність виконання геометричних розмірів нормується спеціальними документами та квалітетами . Клас точності вибирається в залежності від потрібної точності обертання вузлів машин та приладів, яка значною мірою визначається точністю обертання підшипника. Оскільки точність окремих деталей підшипника в значній мірі впливає на його експлуатаційні характеристики, а особливо на такі як довговічність, надійність, зносостійкість,

зменшення шумів та вібрацій, і враховуючи той факт , що точність закладається на етапі технологічного проектування та виготовлення деталей підшипників то даному аспекту як складовій загального показника якості слід виділити особливе місце в рамках дисертаційної роботи. Не слід ототожнювати категорію «показник» з поняттям «характеристика » і «властивість».

Для проведення досліджень використовувалася методика повного факторного експерименту, який представлений планом 2^n, де n=3, n=4 [109, 110]. Щаблі чинників та інтервали варіювання встановлювали експериментальним шляхом.

Дисперсію параметра оптимізації визначали за формулою :

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y_c)}{n-1} \tag{4.1}$$

де Y_i – отримане значення параметра оптимізації; Y_c – середнє значення параметра оптимізації; n – кількість паралельних дослідів.

Коефіцієнти математичної моделі розраховували за формулами:

1) вільний член визначали за формулою :

$$B_o = \frac{\sum_{i=1}^{N} Y_i}{N} \tag{4.2}$$

2) коефіцієнти регресії, що характеризують лінійні ефекти, визначали за формулою:

$$B_i = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_{ij} \cdot Y_i}{N} \tag{4.3}$$

3) коефіцієнти регресії, що характеризують ефекти взаємодії, визначали за формулою:

$$B_{il} = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_{ij} \cdot X_{il} \cdot Y_i}{N} \quad (4.4)$$

де i, l – номер факторів; j – номер досліду в матриці планування ; Y_j – значення параметра оптимізації в j-ому досліді; X_{ij}, X_{lj} – кодування значень (±1) чинників i та l в j-ому досліді ; N – число дослідів у матриці.

Середнє квадратичне відхилення для коефіцієнтів визначали за формулою:

$$S_{B_i} = +\sqrt{\frac{S_y^2}{N}}. \quad (4.5)$$

Довірчий інтервал коефіцієнта регресії:

$$\Delta_{Bi} = \pm t \cdot S_{Bi} \quad (4.6)$$

де t – критерій Стьюдента.

Критерій Стьюдента визначається за формулою:

$$t_к = \frac{|b_n|}{|S(b_n)|} \quad (4.7)$$

де b_i – значення коефіцієнта.

Коефіцієнти рівняння перевіряли на значущість за умовою $t_i > t_{табл.}$ Табличне значення критерію Стьюдента приймали при рівні статистичної значущості α= 5% [104].

Перевірку адекватності опису математичної моделі проводили за F – критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}. \quad (4.8)$$

Дисперсію адекватності моделі визначали за формулою:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N}(Y_{ej}-Y_{pj})^2}{N-l}. \quad (4.9)$$

Знайдене F_p порівнювали із табличним значенням $F_{табл}$, яке встановлювали для 5–процентного рівня статистичної значущості та числі ступенів вільності $f_{ад}$=N– l, $f_в$= N–(n–1) [113]. Таким чином , якщо $F_p<F_m$, то вважали, що математична модель адекватна експериментальним даним і її можна використати для подальших досліджень. Для отримання узагальнених даних за результатами досліджень для кожного із показників здійснювали не менше 5–ти паралельних випробувань. Отримані результати експериментів піддавали комп'ютерному обробленню (програмний продукт MathCad 16).

З метою зменшення похибки під час досліджень властивостей та пошуку оптимальних величин проводили п'ять паралельних вимірювань, на базі яких вираховували середнє арифметичне значення:

$$\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}, \quad (4.10)$$

де y_i – результати окремих дослідів; $\overline{y}$ - середнє арифметичне значення всіх паралельних дослідів; n – кількість паралельних дослідів.

Для виключення помилкових рначень отриманих величин застосовували критерій Стьюдента:

$$\frac{y_i-y}{s} \geq t, \quad (4.11)$$

де y_i – результат окремо взятого досліду; y – середнє арифметичне всіх результатів; S – квадратична помилка ; t – табличне значення критерію Стьюдента.

Квадратичну помилку визначали за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_i - y)^2}{n}}. \quad (4.12)$$

Статистична обробка результатів експериментів дозволила визначити з достатнім ступенем надійності досліджувані параметри за допомогою випробувань.

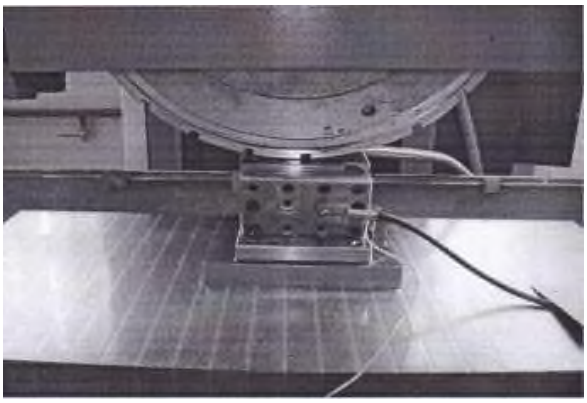
Шліфування зразків проводили з використанням ЗОР на безцентрово - круглошліфувальному верстаті SASL5AD (рис.4.2). Застосовувався шліфувальний круг із електрокорунду білого на керамічній зв'язці твердістю СМ2 марки 1- 600х500х305 14А25 -Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с . Глибину шліфування змінювали в межах 0,1 …0,5 мм, швидкість деталі – в межах 10…50 м/хв, повздовжню подачу заготовок кілець змінювали в межах від 300…800 мм/хв. Швидкість обертання круга встановлювалась рівною 35 м/с, а ширина шліфувального круга В = 500 мм.

Рис. 4.2. Налаштування безцентрово -круглошліфувального верстату SASL5AD

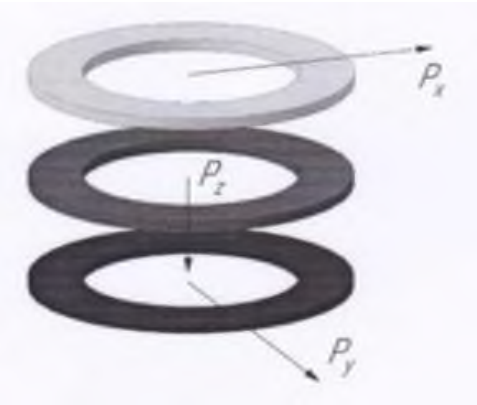
Перед проведенням експериментів абразивні шліфувальні круги правили методом обточування алмазно-металевим карандашом з повздовжньою подачею $S_{х.пр}$=0 ,4 м/хв, повздовжньою подачею $S_{у/пр}$ =30 мм/хв, числом робочих проходів – 4 , проходів виходжування – 4.

Параметри режимів різання контролювались під час проведення експериментальних досліджень за допомогою секундоміра, електронного динамометра рис. 4.3., для вимірювання шорсткості доріжки поверхонь

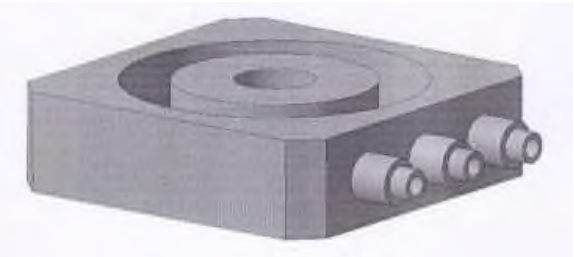
обертання профілограф-профілометр SURTRONIC-3, прилад MWA100C для вимірювання мікрогеометрії поверхонь кочення. Для визначення температури в зоні різання використовувався пірометр пістолетного типу з діапазоном вимірювання температури від 50-1000°*C*, марки HT-826.



а)



б)



в)

г)

Рис. 4.3. Електронний динамометр

В якості приладів, що реєструють дані, використовували осцилографи С8 - 11 та С1-19Б, які дозволяли без попереднього підсилення фіксувати процеси.

4.3. Дослідження зв’язків параметрів режимів безцентрового шліфування з температурою та показниками якості шліфувальних операцій

Теплові явища , що супроводжують процес шліфування, значно впливають на якість шліфованих поверхонь. Високі температури шліфування викликають дефекти в поверхневому шарі шліфованої деталі (припали , тріщини й ін.), що знижують якість деталі , у зв'язку із чим температурний чинник набуває значення одного з основних чинників процесу шліфування . Для призначення науково

обґрунтованих режимів високоякісного шліфування необхідна уява про температурне поле в зоні оброблення.

Для проведення досліджень з визначення впливу режимів різання на температуру шліфування використовувалася методика повного факторного експерименту, який представлений планом 2^3 (варіювання трьох технологічних параметрів на двох рівнях). Основні чинники, що впливають на температуру різання під час шліфування заготовки, залежать від глибини різання t, швидкості заготовки V_∂, числа канавок шліфувального круга ε.

$$\theta = f(t, V_\partial, \varepsilon) \tag{4.13}$$

У першому наближенні функцію (4.13) можна представити у наступному вигляді:

$$\theta = C \cdot t^a \cdot V_\partial^b \quad \cdot \varepsilon^c \tag{4.14}$$

де C – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу й умови оброблення; t – глибина різання, мм; V_∂ – швидкість заготовки, м/хв; ε – число канавок

Необхідно зазначити, що математична модель не описує систему в цілому, а лише окремий комплекс чинників , які є визначальними під час шліфування заготовок зі сталі ШХ15.

В логарифмічному представленні рівняння (4.14) буде поліномом першого степеня:

$$\ln\theta = \ln C + a\ln t + b\ln V_\partial + c\ln\varepsilon. \tag{4.15}$$

Під час переходу до безрозмірних величин у загальному вигляді рівняння (4.15) запишемо:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3. \qquad (4.16)$$

Експерименти проводили використовуючи методику повного факторного аналізу , тобто одночасного варіювання усіх змінних чинників, $x_1(t)$, $x_2(V)$, $x_3(\varepsilon)$. Кожна з цих змінних варіюється на двох рівнях (2^k), де k – число змінних. Визначили невідомі b_0 і коефіцієнти b_1, b_2, b_3.

Вибір режимів оброблення проводився із врахуванням можливостей обладнання та граничних режимів оброблення, як це показано в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Режими шліфування і кодові позначення

Рівень	Режими шліфування			Кодове позначення		
	t, мм	$V_д$, м/хв	ε	x_1	x_2	x_3
Верхній	0,4	40	36	1	1	1
Середній	0,3	30	24	0	0	0
Нижній	0 ,2	20	12	-1	-1	-1

Ці рівні закодовані за допомогою рівнів перетворення таким чином, щоб верхній рівень відповідав +1, а нижній –1.

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= \frac{2(ln\, t - ln\, 0{,}04)}{(ln\, 0{,}04 - ln\, 0{,}02)} + 1 \\ x_2 &= \frac{2(ln\, V_д - ln\, 15)}{(ln\, 15 - ln\, 5)} + 1 \\ x_3 &= \frac{2(ln\, \theta - ln\, 32)}{(ln\, 32 - ln\, 24)} + 1 \end{aligned}\right\} \qquad (4.17)$$

Для оцінки відхилень контролюючого параметра від середнього значення за даними m спостережень обрахували дисперсію відтворення S_v^2 . Під час перевірки гіпотези однорідності дисперсії використовували G – критерій Кохрена, який рівний відношенню максимальної дисперсії S_{vmax}^2 до суми

дисперсії $\sum_{v=1}^{8} S_v^2$.Заданий рівеньзначимості q = 5%, число ступенів вільності $V_{1B,}V_{B2} = N = 8$. Внаслідок однорідності дисперсії результати усереднювали. Коефіцієнти регресії b_1 визначали даних $\overline{y}, x_{iv}$ в кодових позначеннях з послідуючим діленням отриманого значення на загальне число точок в плані матриці N. За усередненою дисперсією, загальному числу точок в плані та числі спостережень m обчислювали середньоквадратичне відхилення дисперсії помилки $\{S_{bi}^2\}, \{S_{bi}\}$, отриманих коефіцієнтів регресії b_i. Рівень значимості , що задається, приймали рівним q = 5%, число ступенів вільності $V_{3B} = N(m-1) = 40$. Адекватність отриманої моделі оцінювали за F – критерієм Фішера на основі дисперсії адекватності S_{ad}^2 при прийнятому рівні значимості q = 5% і числі степенем вільності $N_{1ad} = N - l = 5 - 3 = 2$(l - число значимих коефіцієнтів) і $V_{3B} = N(m - 1) = 40$. Для отримання кінцевих залежностей проводили заміну змінних в рівнянні регресії і приводили його до степеневого вигляду.

За даними експериментальних досліджень і наступного статистичного оброблення результатів була отримана математична модель температури різання. Математична модель дійсна лише в межах інтервалів варіювання технологічних параметрів. Аналіз отриманої математичної залежності показав, що найбільший вплив на збільшення температури різання має збільшення глибини різання й меншою мірою – число канавок шліфувального круга (ε). Швидкість заготовки (V_∂) впливає на температуру різання під час шліфування, її збільшення призводить до зниження температурного впливу на поверхню, яку обробляють.

Найбільш високі значення коефіцієнта кореляції (у межах до 0,95) були отримані між температурою різання й глибиною різання оброблюваної деталі. На основі результатів досліджень, використовуючи метод найменших квадратів і властивості скалярного добутку основних векторів, кінцева формула для визначення температури різання в процесі шліфування має вигляд:

$$\theta = 611{,}8 \cdot t^{0{,}34} \cdot V_\partial^{-0{,}05} \cdot \varepsilon^{0{,}28} \qquad (4.18)$$

де t – глибина різання, мм; V_∂ – швидкість заготовки, м/хв; ε – число канавок.

На рис. 4.4 наведено співставлення розрахункових даних за формулою (4.9) і експериментальних результатів в залежності від глибини різання.

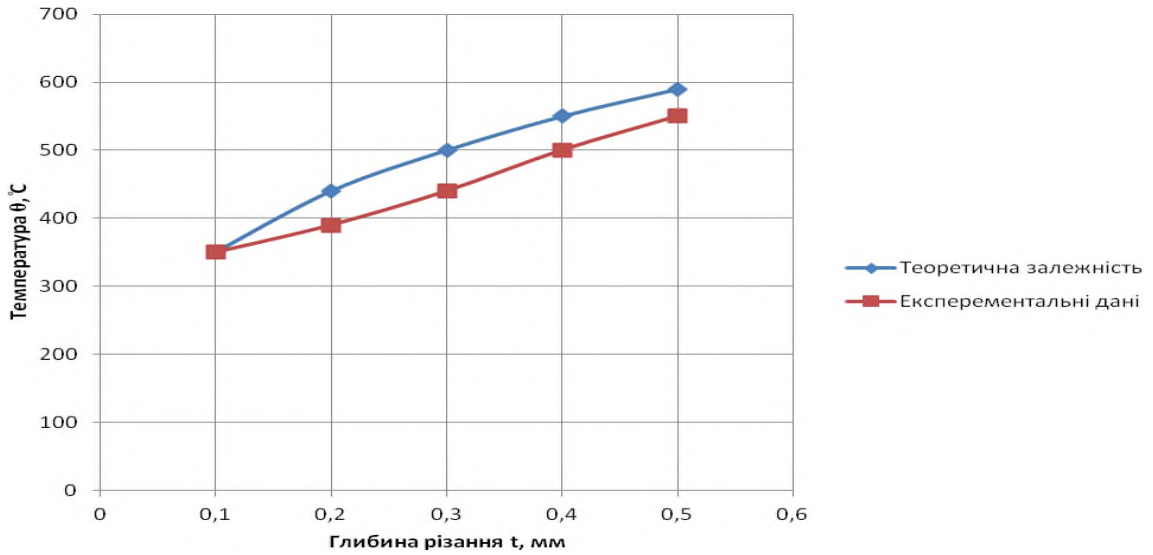


Рис. 4.4. Вплив глибини різання на температуру при

$V_д$=10м/хв, $V_{кр}$=35м/с, ε =12

Отримана теоретична залежність підтверджується експериментальними результатами . Адекватність отриманої моделі температури шліфування перевіряли за допомогою *F*-критерію Фішера. Табличне значення критерію F_m при 5%-ному рівні значимості рівно 8,845 [109]. Розрахункове значення критерію Фішера складає 2,286, що менше табличного значення . Таким чином, отримана модель температури різання адекватна при 5%-ому рівні значимості.

На рис. 4.5 показані поверхні відгуку залежності температури різання деталі від швидкості обертання заготовки та глибини різання під час переривчастого шліфування кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с, які побудовані з використанням регресійної залежності 4.18.

Вплив температури на якість поверхневого шару деталі під час оброблення заготовок змінюється в залежності від кількості канавок шліфувального круга. Внаслідок невисокої теплопровідності (рис. 4.6.) вплив температури розповсюджується на поверхневі шари деталі.

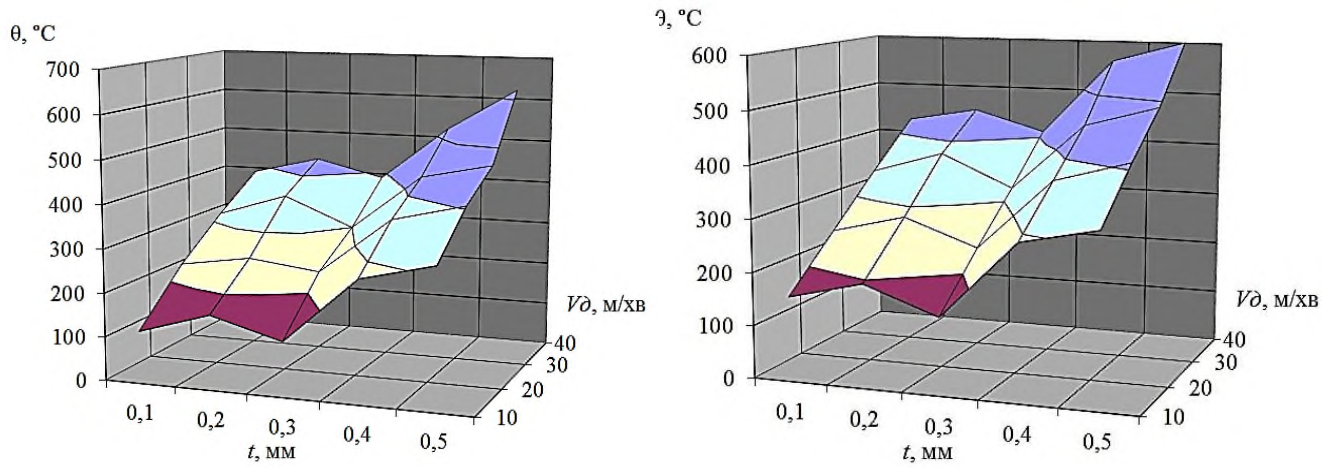


Рис. 4.5. Поверхні відгуку залежності температури різання деталі від швидкості заготовки та глибини різання, коли число канавок: а – 12, б – 24

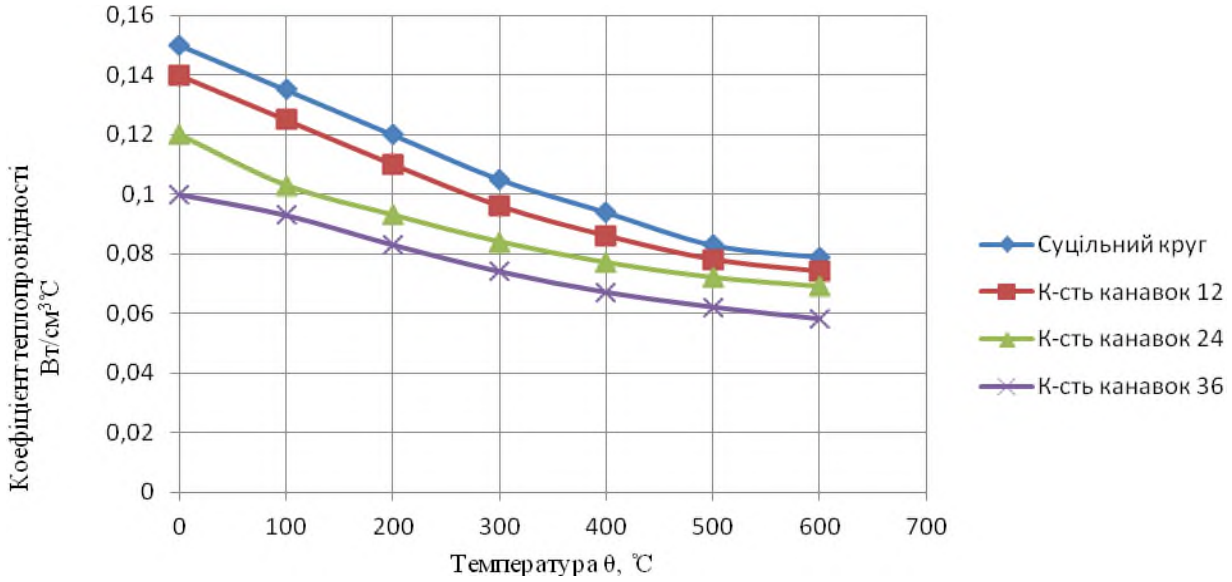


Рис. 4.6. Залежність теплопровідності матеріалів від температури

До особливостей процесу шліфування заготовок відноситься обмежене використання мастильно-охолоджувальної рідини , яка потрапляючи в мікротріщини заготовки змінює фізико -механічні характеристики поверхневого шару матеріалу.

Результати вимірювання температури різання залежно від глибини різання показано на рис. 4.7. Було встановлено, що із зростанням числа канавок

збільшується температура різання, тому що зменшується коефіцієнт теплопровідності, погіршуються умови тепловідводу, що не дає температурі рівномірно розподілитися по всьому об'єму деталі.

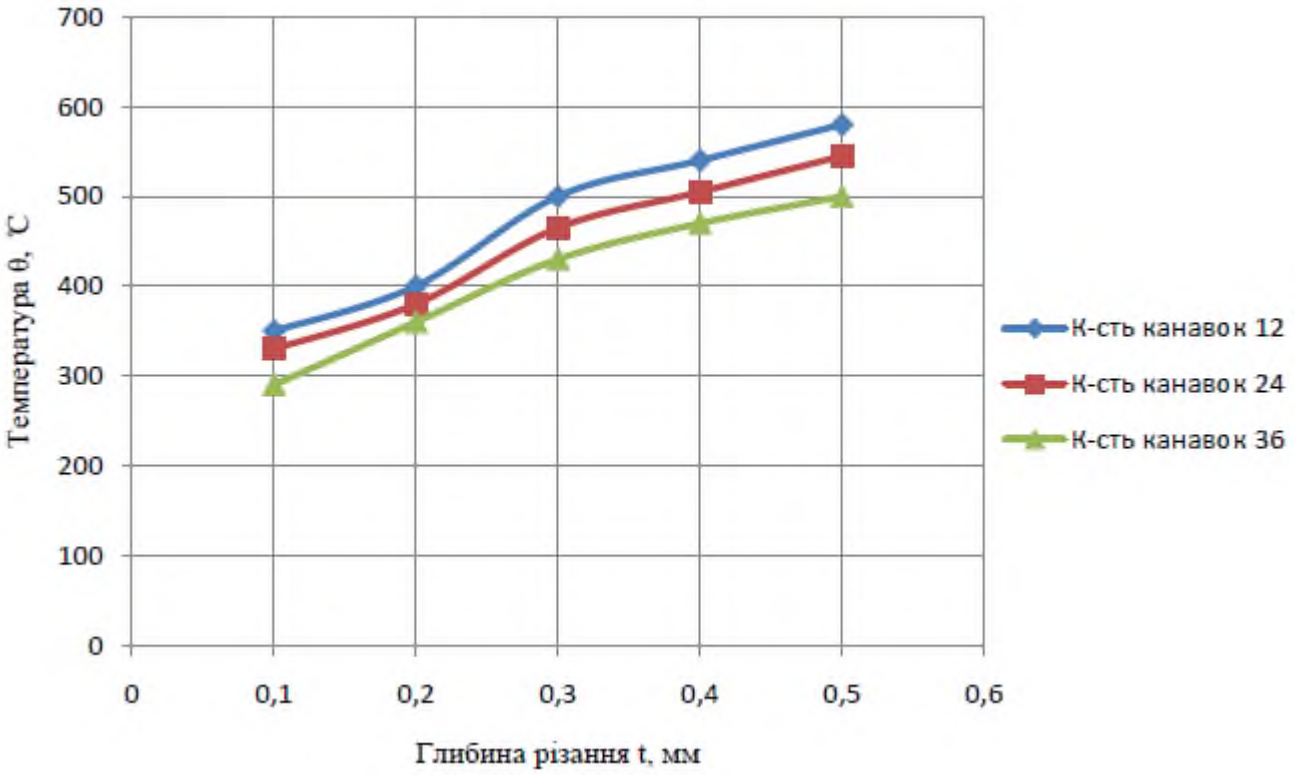


Рис. 4.7. Залежність температури різання від глибини різання при $V_д$=10 м/хв, $V_{кр}$=35 м /с,t=0,5 мм

Експериментально встановлено , що зі збільшенням глибини різання зростає температура шліфування, при t=0,1 мм температура на поверхні деталі становить θ =300С°, а при глибині різання t=0,5 мм температура різання θ = 590°С.

Зі збільшенням швидкості переміщення деталі температура в зоні різання не суттєво зменшується, при швидкості різання $V_д$=10м /хв температура на поверхні деталі становить θ =480°С, а при $V_д$=30м/хв температура різання θ =450°С (рис. 4.8).

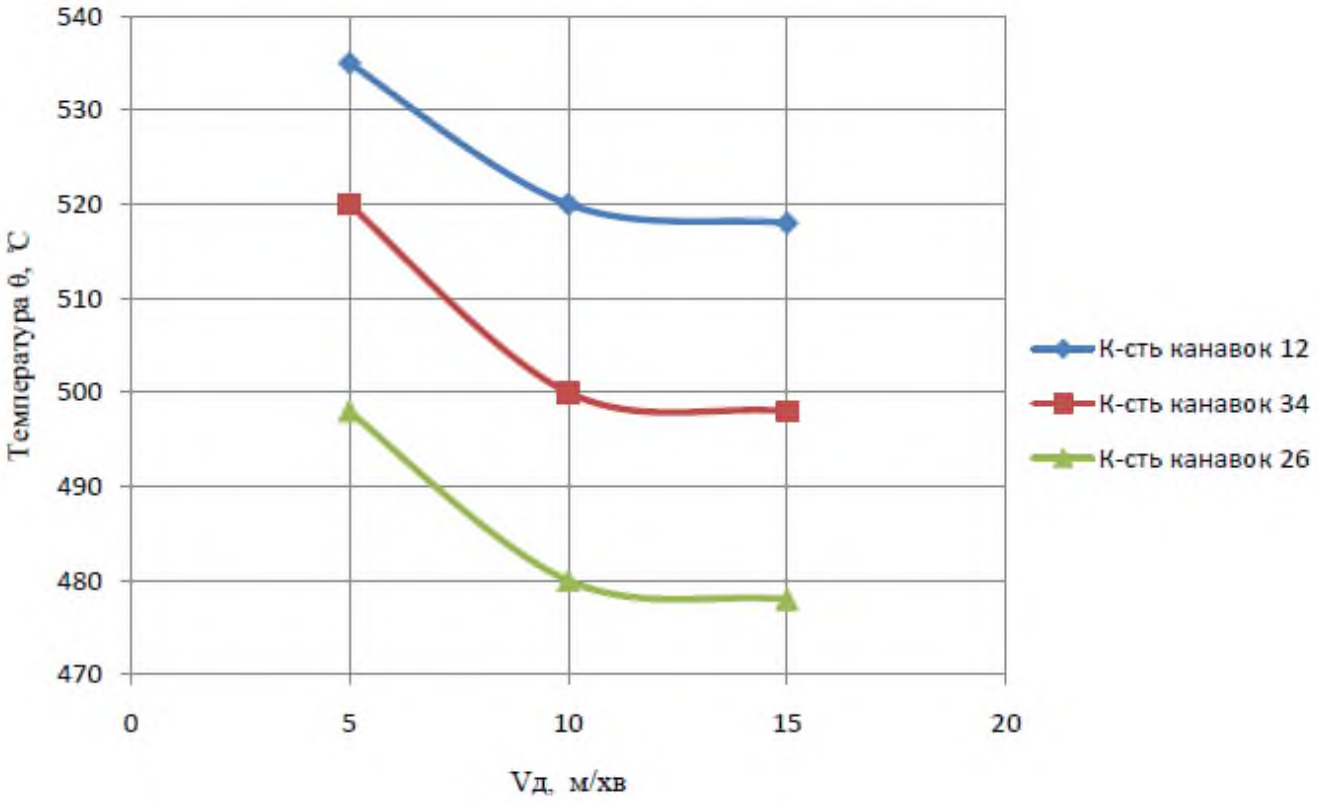


Рис . 4.8. Залежність температури різання від швидкості заготовки при $V_{кр}$=35м/с., t=0 ,5мм.

Результати, що були отримані в ході експерименту співпадають з результатами робіт, що відносяться до дослідження поверхонь обертання [80].

Високі миттєві температури, що виникають під час шліфування кілець роликопідшипників призводять до структурних змін у поверхневому шарі матеріалу, появі припалень і шліфувальних мікротріщин . Зміна структури поверхневого шару деталі, що утворюється в результаті високих миттєвих температур і інтенсивного виділення тепла на невеликих ділянках поверхневого шару деталі викликає зниження механічних властивостей поверхневого шару деталі, головним чином зниження його твердості й зносостійкості.

Високі температури під час переривчастого шліфування кілець обертання, залежно від марки загартованої сталі заготовки, викликали дефекти на поверхневому шарі шліфованого зразка, такі як припалювання (рис. 4.9) і мікронерівності, мікротріщини (рис. 4.10). Під час оброблення заготовки кругом з числом канавок 12 в різних режимах різання значних дефектів не виявлено.

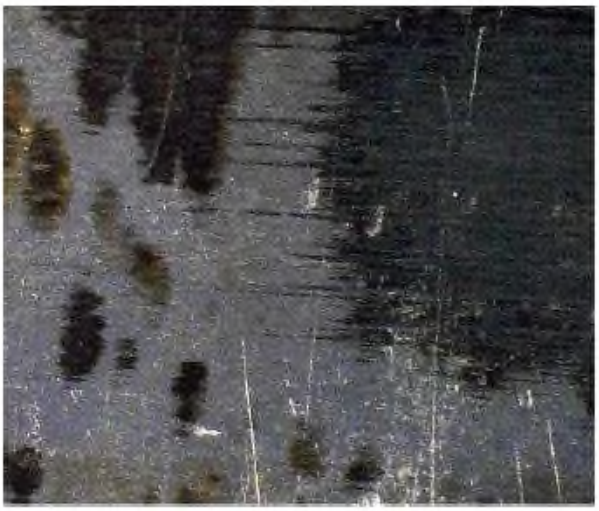


Рис. 4.9. Припалення під час шліфування

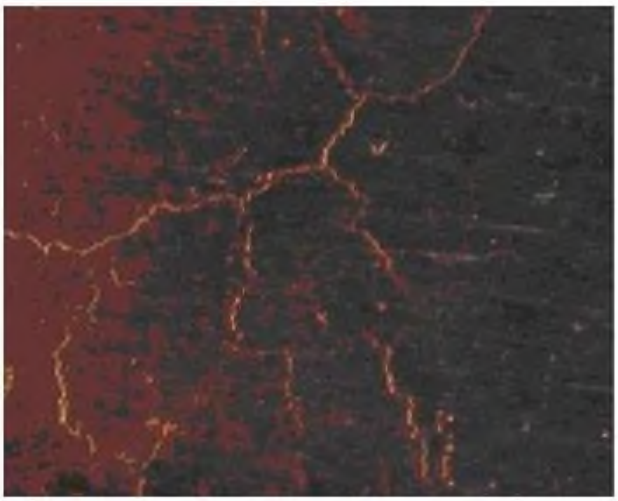


Рис. 4.10. Мікротріщини під час шліфування

Так під час шліфування деталі з глибиною різання t=0,3 мм у результаті контактної температури різання θ=520 °С на поверхні деталі виникають часткові припали , а при глибині різання t=0,5 мм і температурі різання θ=580°С на поверхні деталі утворюються суцільні припали (рис. 4 .10). В даних режимах оброблення дрібні припали стали причиною зниження твердості поверхневого шару із HRC 70 до HRC 56. Під час шліфування заготовки у результаті контактної температури θ =590°С утворювалися мікротріщини. Поверхня обробленої деталі покрита окремими мікротріщинами (рис. 4.10), які виникли у наступних режимах оброблення: t=0 ,5мм, V=10м/хв. Шліфувальні тріщини утворювалися в результаті великого контактного тиску, температур і сил тертя абразивних зерен по поверхні шліфованої заготовки. Тобто, під час збільшення параметрів режимів різання й збільшенні твердості заготовки, збільшується ймовірність виникнення дефектів у вигляді припалів на поверхні деталі. Для усунення припалів й мікротріщин, зниження температури під час оброблення поверхонь кочення слід застосовувати переривчасте шліфування. Оцінку силового впливу (рис. 4.11) на оброблену поверхню деталі проведемо через вимірювання її твердості до і після шліфування. Вимірювання твердості

досліджуваної поверхні проводились за методом Брінелля за допомогою приладу 2109ТБ.

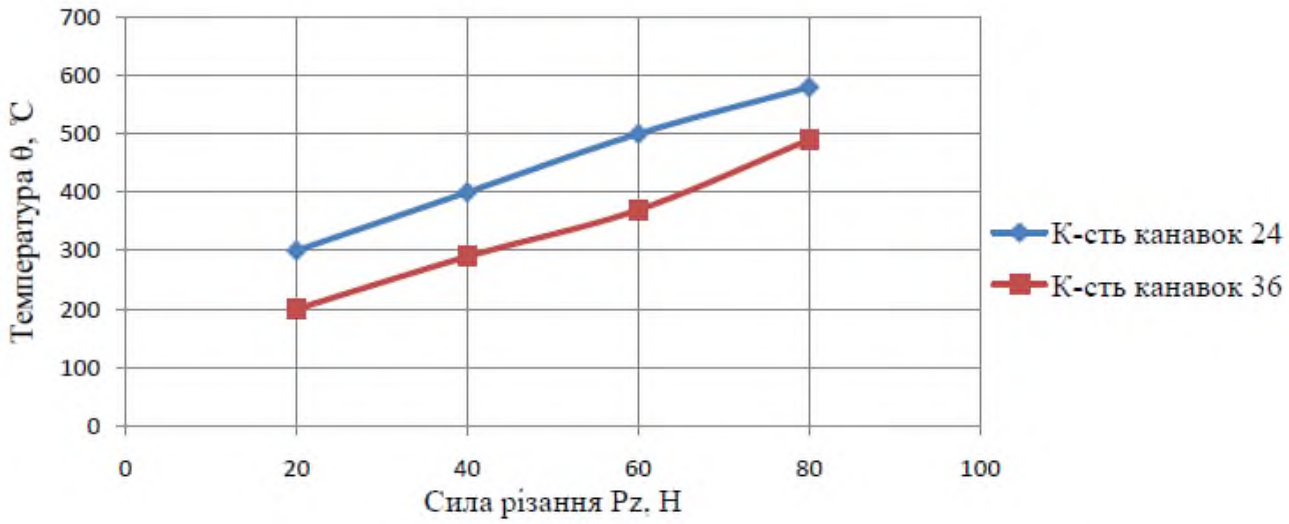


Рис. 4.11. Залежність між силою різання P_z та температурою

Отже, тангенціальна сила P_z характеризує теплову енергію (роботу), що витрачається під час шліфування, яка виражається через контактну температуру, а отже є тим самим чинником, що визначає якість шліфованої поверхні.

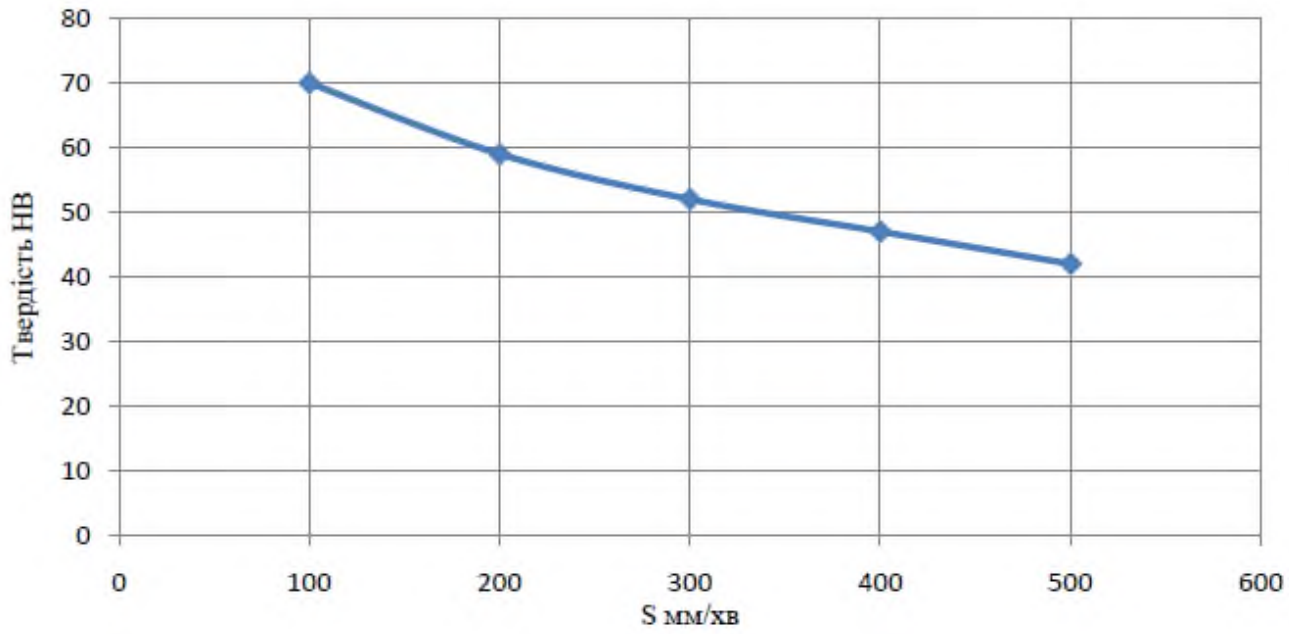


Рис. 4.12. Вплив повздовжньої подачі на мікротвердість поверхневого шару число канавок 12

На рисунку 4.12 показано характер зміни твердості поверхні оброблюваної заготовки в залежності від швидкості заготовки та повздовжньої подачі. Мікротвердість вихідної заготовки перед механічним обробленням становить HRC 46. Як випливає із рис . 4.12 мікротвердість поверхні заготовки при числі канавок шліфувального круга 12 і швидкості заготовки 5 м/хв зростає в 2 рази . Із збільшенням швидкості заготовки твердість поверхні безперервно зменшується. При $V_д$=10м/хв вона приймає значення HRC 54, що в 1,52 рази менше твердості поверхні при обробленні із швидкістю заготовки 4м/хв.

4.4. Дослідження шорсткості поверхні шліфованої деталі

Зерна, розташовані в робочій поверхні круга, залишають на поверхні заготовки подряпини. Заміри шорсткості поверхні проводилась на приладі – Surtronic-3 (Taylor-Hobson, Англія), шорсткість контролювалась за параметром R_a на базовій довжині 0 ,8 мм. На кожній досліджуваній поверхні вимірювання проводили в 3…5 місцях (рис. 4 .13).

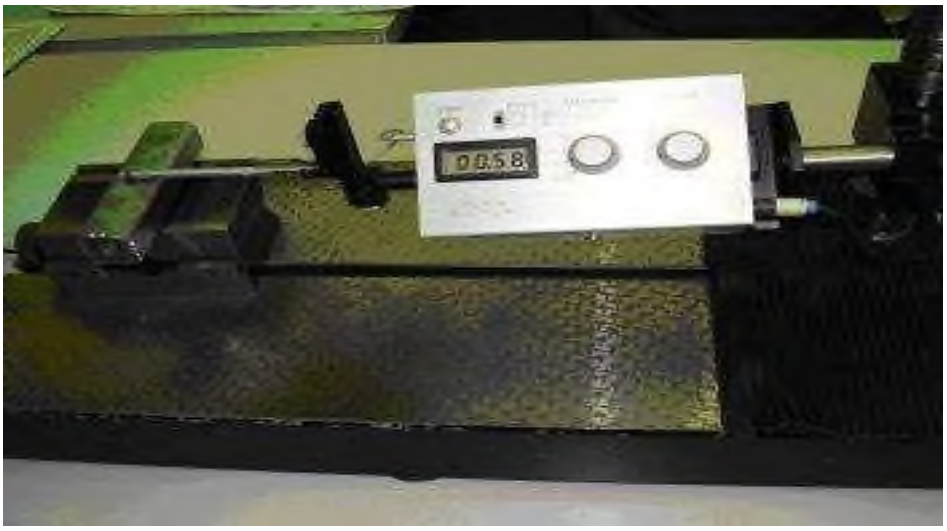


Рис. 4.13. Прилад –Surtronic-3, дослідний стенд для вимірювання шорсткості поверхні

Сили різання P вимірювалися за допомогою трьохкомпонентного тензометричного динамометра.

Для проведення досліджень з визначення впливу режимів різання на шорсткість поверхні використовувалася методика повнофакторного експерименту, який представлений реплікою 2^3 (варіювання трьох технологічних параметрів на двох рівнях). Основні чинники, що впливають на шорсткості *Ra* під час шліфування поверхонь обертання, залежить від повздовжньої подачі *S*, швидкості заготовки V_∂, кількості канавок шліфувального круга ε та описуються математичною залежністю :

$$Ra = C \cdot S^a \cdot V_\partial{}^b \cdot \varepsilon^c \text{ мкм} \qquad (4.19)$$

де *C* – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості заготовки й умови оброблення ; *S* – повздовжня подача, мм/хв; V_∂ – швидкість заготовки, м/хв; ε – число канавок шліфувального круга. Математична модель описує лише окремий комплекс чинників, які є визначальними під час шліфування заготовок. В логарифмічному представленні рівняння буде поліномом першого степеня:

$$ln\, R\, a = ln\, C + a\, ln\, S + b\, ln\, V + c\, ln\, \varepsilon \qquad (4.20)$$

При переході до безрозмірних величин у загальному вигляді рівняння (4.20) можна записати:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \qquad (4\ .20)$$

Експерименти проводили на основі багатофакторного аналізу , тобто одночасного варіювання усіх змінних чинників, $x_1(S)$, $x_2(V)$, $x_3(\varepsilon)$. Необхідно визначити постійну b_0 і коефіцієнти b_1, b_2, b_3. Кожна з цих змінних варіюється на двох рівнях (2^k), де *k* – число змінних.

У результаті статистичного оброблення результатів була отримана наступна регресійна залежність висотних параметрів мікрорельєфу в поверхневому шарі :

$$Ra = 0{,}017 \frac{S^{0,25} \cdot \varepsilon^{1,24}}{V_{\partial}^{0,03}} \qquad (4.22)$$

де: S – повздовжня подача, мм /хв; V_{∂} – швидкість заготовки, м/хв; ε - число канавок шліфувального круга.

Вибір режимів оброблення проводився із урахуванням можливостей обладнання і граничних режимів оброблення, як це показано в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Режими шліфування і кодові позначення

Рівень	Режими шліфування			Кодове позначення		
	S, мм/хв	$V_д$, м/хв	ε	x_1	x_2	x_3
Верхній	0,4	40	36	1	1	1
Середній	0 ,3	30	24	0	0	0
Нижній	0,2	20	12	-1	-1	-1

Кодування значення чинників визначалося за формулою:

$$x_i = \frac{2 \cdot \left(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_i^{в}\right)}{\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_i^{н}} + 1, \qquad (4\ .23)$$

де x_i – кодоване значення *i*- го чинника; $\tilde{x}_i$ – натуральне значення і- го чинника; $\tilde{x}_i^{в}$ – натуральне значення верхнього рівня і- го чинника; $\tilde{x}_i^{н}$ – натуральне значення нижнього рівня і- го чинника .

За даними формули (4.18) побудовані графічні залежності шорсткості поверхні під час переривчастого шліфування заготовок та представлені експериментальні значення. На рис . 4.14 зображено залежність шорсткості поверхні під час шліфування заготовок від подачі.

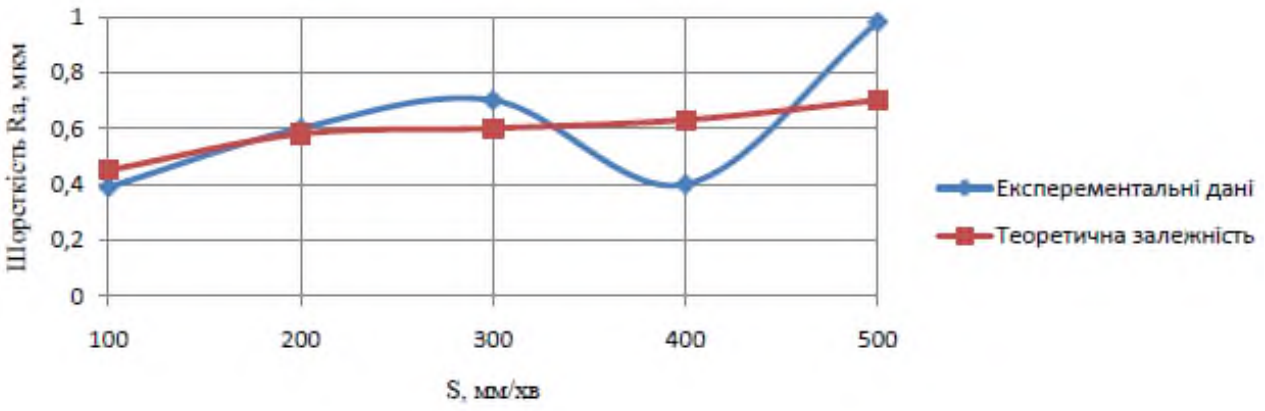


Рис. 4.14. Вплив повздовжньої подачі на шорсткість поверхні, при *Vд*=20м/хв, *Vкр*=35м/с , *t* =0,2мм, *ε* =12 число канавок

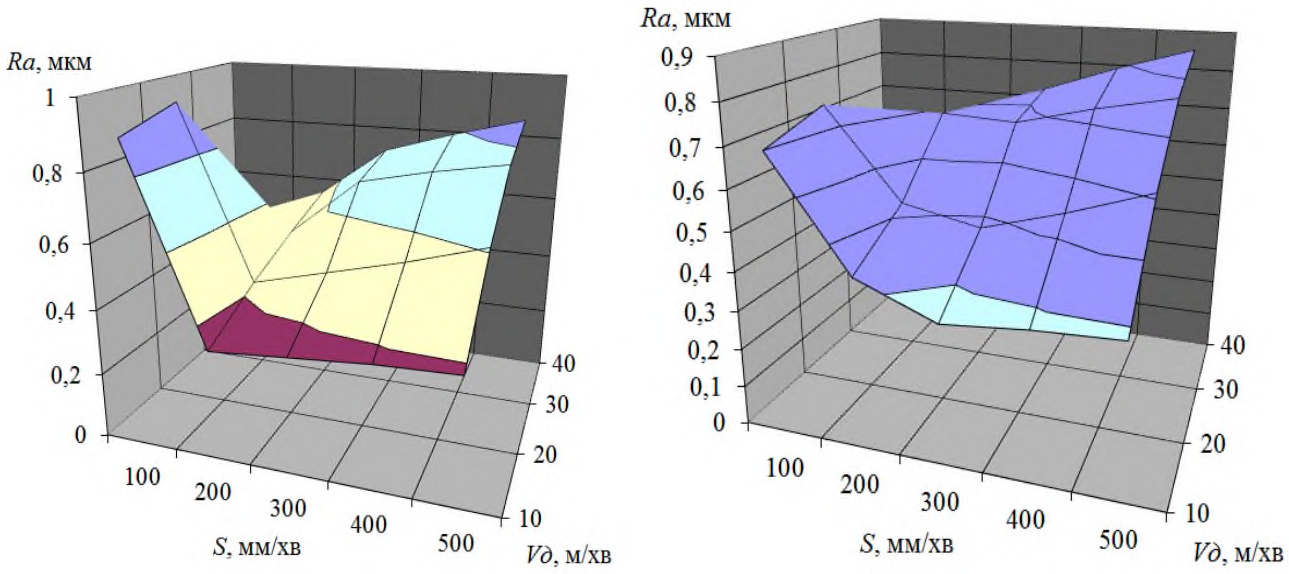
Таким чином, під час шліфування висотні параметри шорсткості залежать від повздовжньої подачі (*S*) та зернистості шліфувального круга (ψ). Швидкість заготовки ($V_д$) має зворотній плив на шорсткість поверхні, збільшення швидкості переміщення деталі веде до зменшення висотних параметрів мікрорельєфу поверхневого шару. На висоту мікрорельєфу поверхневого шару деталі значно впливають усі досліджувані чинники за винятком швидкості заготовки, вплив якої в дослідженому діапазоні варіювання виявився незначним.

На рис. 4.15 показані двовимірні поверхні середньоарифметичного відхилення профілю шорсткості *Ra* на поверхні заготовки в області використовуваних значень швидкостей заготовки та повздовжньої подачі під час шліфування поверхонь обертання кілець з загартованої сталі ШХ15, які побудовані з використанням регресійних залежностей. Зі зменшенням подачі шліфувального круга у два рази можна суттєво знизити середньоарифметичне відхилення профілю шорсткості *Ra* (рис. 4 .15, а та б). Найменші значення *Ra* можуть бути отримані за відсутності мікротріщин на оброблюваній поверхні.

З рисунку 4.16 видно , що чим більша швидкість заготовки, тим менша висота мікронерівностей поверхні під час оброблення.

Зі збільшенням мікронерівностей деталі під час оброблення збільшується число мікротріщин після шліфування, що веде до збільшення висотних

параметрів мікрорельєфу поверхневого шару , що негативно впливає на якісь поверхневого шару



а) б)

Рис. 4.15 . Поверхні відгуку залежності висотних параметрів *Ra* мікрорельєфу поверхні деталі від швидкості заготовки та повздовжньої подачі під час безцентрового шліфування кругом 1 -600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с з кількістю канавок: а –12 , б –24

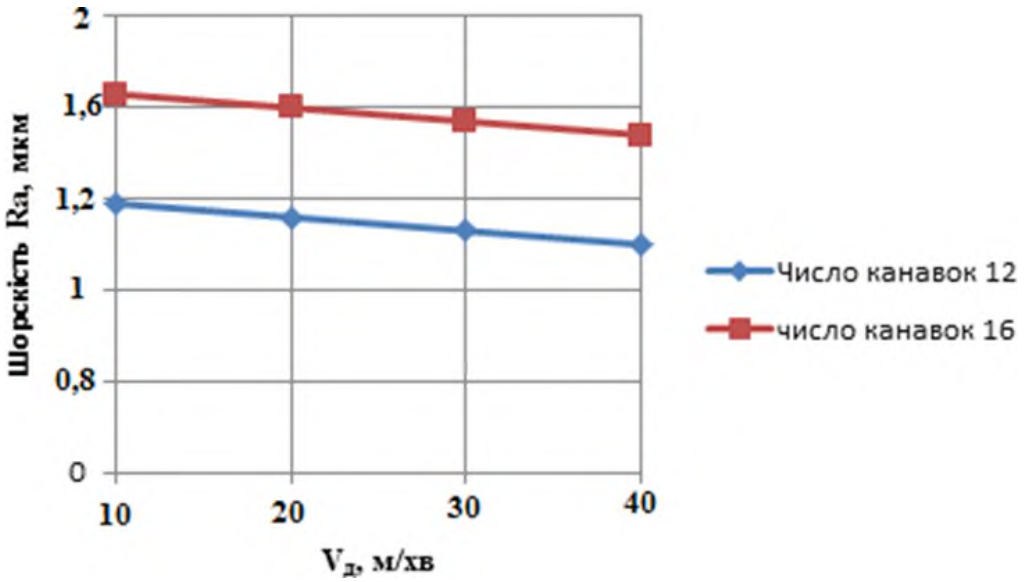


Рис. 4.16. Вплив швидкості заготовки на шорсткістьі поверхні при S=200 мм/хв, $V_{кр}$=35 м/с, t=0,2 мм

Отже, оптимальне збільшення швидкості заготовки дозволяє зменшити утворення дефектів. Результати дослідження впливу повздовжньої подачі на шорсткість поверхні показано на рисунку 4 .17.

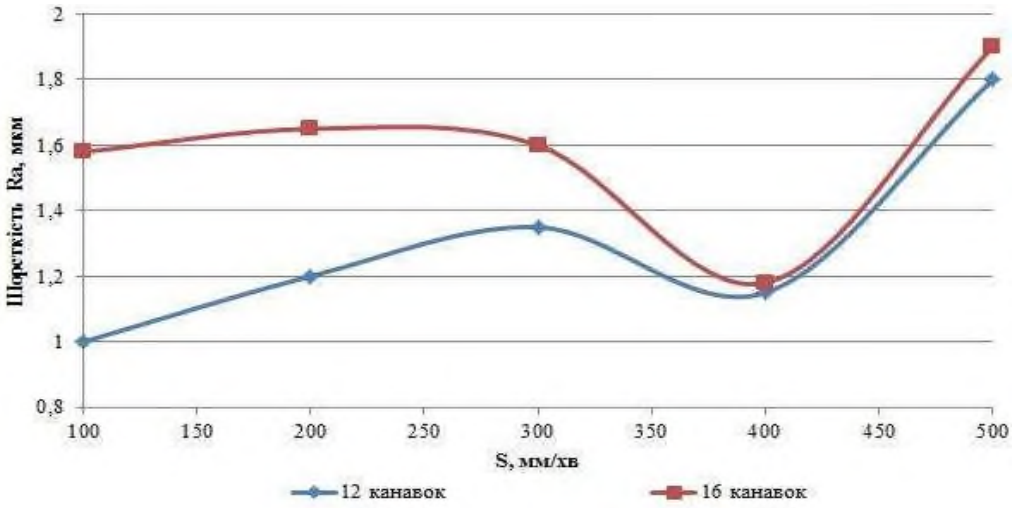


Рис. 4.17. Вплив повздовжньої подачі на шорсткість поверхні при $V_д$=20м/хв , $V_{кр}$=35м/с, t =0,2мм

З рисунку 4.17 видно, що під час змінення повздовжньої подачі з 100 мм/хв до 300 мм/хв шорсткість оброблюваної поверхні відносно висока, потім вона різко падає, а при зростанні подачі до 500 мм/хв знову збільшується. Це можна пояснити особливостями процесу , що проходить в зоні різання. З невеликими повздовжніми подачами проходить налипання оброблюваного матеріалу на зерна шліфувального круга, що призводить до підвищення мікронерівностей, а на високих повздовжніх подачах підвищується температура в зоні різання збільшується знос ріжучого інструмента, що також призводить до збільшення шорсткості поверхні.

Аналіз отриманих даних показав, що найменша шорсткість поверхні спостерігається під час S=400 мм/хв. При низьких температурах, мікронерівності на поверхні деталі залишаються. Під час оброблення заготовки зі сталі з підвищеною мікротвердістю мікрорельєф обробленої поверхні різко погіршується, збільшується висота мікронерівностей та виникають мікротріщини. Під час збільшення повздовжньої подачі до S=500 мм/хв у

деталях з підвищеною мікронерівністю утворюються мікротріщини в зоні шліфування. Такий самий процес спостерігається під час збільшення глибини різання, як показано на рисунку 4.18.

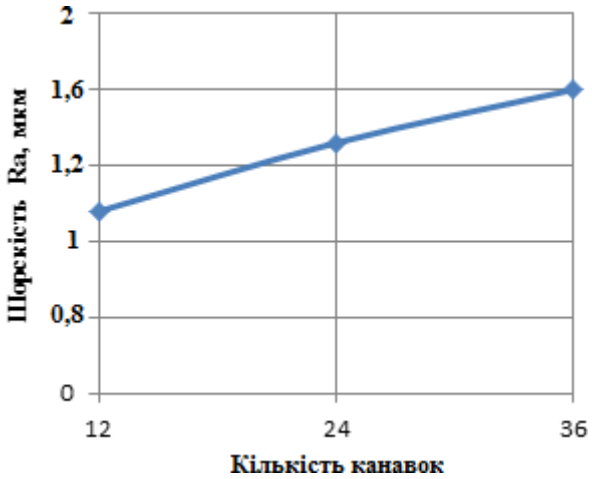


Рис. 4.18. Вплив кількості канавок на шорсткість поверхні при S=200 мм/хв, $V_{кр}$=35 м/с, t=0,2 мм

Чим вищі вимоги до оброблюваної поверхні, тим значима роль залишкової мікронерівності . Іноді через залишкові мікронерівності неможливо отримати поверхню високої точності. Мікронерівність на поверхні виробу є концентратором напруження і як наслідок зменшує строк експлуатації виробу. З рис. 4.18 видно , що чим більша кількість канавок шліфувального круга , тим більша висота мікронерівностей оброблюваної поверхні.

Таким чином, прогнозуючи можливість отримання високоякісного поверхневого шару деталі потрібно поряд з режимами різання враховувати кількість канавок шліфувального круга під час переривчастого безцентрового шліфування.

4.5. Дослідження силовивих параметрів при шліфуванні

Фізичні й хімічні процеси і явища, що виникають між ріжучими елементами інструмента й оброблюваною поверхнею, лежать в основі формування параметрів мікрорельєфу й дефектного шару поверхні деталі .

Для ефективного шліфування заготовки з метою одержання високих експлуатаційних властивостей деталей необхідно визначити область режимів різання, що забезпечують максимальну швидкість видалення припуску при підтримці необхідної якості поверхневого шару .

Для зручності аналізу силу різання умовно ділять на радіальну *Py* і тангенціальну складові *Pz*. Підсумовуванням складових сили різання, що діють на одиничні зерна, визначають результуючі їхні значення під час шліфування. Якщо радіальна складова сили різання під час шліфування визначає силовий вплив інструмента на оброблюваний матеріал за лінією зрізу й формування дефектного шару під дією силового фактора під час шліфування, то тангенціальна складова – енергоємність і тепловий потік у зоні контакту. Силові й теплові поля є результатом взаємодії алмазних зерен з заготовкою, що обробляють.

Під час шліфування заготовок зовнішніх кілець з загартованої сталі ШХ15 сили різання мають невеликі значення, але зростає вплив сил різання на точність оброблюваної деталі. Встановлено, що під час оброблення матеріалів з мікрорельєфом вище 10%, сили різання менші , ніж під час оброблення загартованих сталей. Так , для перлітних, ферито-перлітних, сили різання вищі в 1,5 рази, ніж для матеріалів , що мають феритну структуру [12].

Але до теперішнього часу не встановлено залежність сили різання під час переривчастого безцентрового шліфування від фізико -механічних характеристик заготовки. Отримання такої залежності дало б змогу прогнозувати вплив сил різання на якість поверхневого шару заготовки в залежності від режимів різання. Для досягнення поставленої мети потрібно визначити вплив режимів шліфування на сили різання з врахуванням числа канавок переривчастого круга.

Для проведення досліджень з визначення впливу режимів різання на сили шліфування використовувалася методика повного факторного експерименту, який представлений планом 2^4 (варіювання чотирьох технологічних параметрів на двох рівнях). Основні чинники , що впливають на сили різання під час шліфування поверхні заготовки, залежить від повздовжньої подачі *S*, швидкості

заготовки $V_д$, числа канавок ε, глибини різання t. Враховуючи, що 60% силового впливу приходиться на радіальну силу різання Py, тоді :

$$Py = f(S, V_д, \varepsilon, t) \tag{4.24}$$

У першому наближенні функцію (4.24) можна представити у наступному вигляді:

$$Py = C \cdot S^a \cdot V_д^{\,b} \cdot \varepsilon^c \cdot t^d \text{ мкм}, \tag{4.25}$$

де C – коефіцієнт, що враховує фізико -механічні властивості заготовки й умови оброблення, S – повздовжня подача, мм/хв; $V_д$ – швидкість заготовки , м/хв; ε – число канавок; t – глибина різання , мм.

Необхідно зазначити, що математична модель не описує систему в цілому, а лише окремий комплекс чинників, які є визначальними під час шліфування заготовок. В логарифмічному представленні рівняння (4 .25) буде поліномом першого степеня:

$$\ln Py = \ln C + a \ln S + b \ln V + c \ln \varepsilon + d \ln t \tag{4.26}$$

При переході до безрозмірних величин у загальному вигляді рівняння (4.26) запишемо:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 \tag{4.27}$$

Експерименти проводили використовуючи методику повного факторного аналізу тобто одночасного варіювання усіх змінних чинників x_1(S), x_2(V), x_3(ε), x_4(t). Кожна з цих змінних варіюється на двох рівнях (2^k), де k – число змінних. Визначили невідомі b_0 і коефіцієнтиb_1, b_2, b_3, b_4.

Вибір режимів оброблення проводився таким чином, щоб спростити кодування із врахуванням можливостей обладнання та граничних режимів

оброблення. В таблиці 4.3 представлені верхній (+) і нижній (-) рівні варіювання технологічних параметрів, які вибиралися з умов технологічних можливостей застосовуваного устаткування , а також відсутності мікротріщин і припалень на обробленій поверхні заготовок.

Таблиця 4.3

Значення технологічних параметрів, які використовуються в експериментальних дослідженнях та кодові позначення

Рівень	Режими шліфування				Кодове позначення		
	S, мм/хв	$V_д$, м/хв	ε	*t, мм*	x_1	x_2	x_3
Верхній	400	40	36	0,4	1	1	1
Середній	300	30	24	0,3	0	0	0
Нижній	200	20	12	0,2	-1	-1	-1

Під час перевірки гіпотези однорідності дисперсії використовували G - критерій Кохрена. Адекватність отриманої моделі оцінювали за F – критерієм Фішера на основі вирахуваної дисперсії адекватності S_{ad}^2 при прийнятому рівні значимості q = 5% і числі степеням вільності $N_{1ad} = N - l = 16 - 4 = 12$ (l- число значимих коефіцієнтів) і $V_{3_B} = N\,(m - 1) = 80$. Для отримання кінцевих залежностей проводили заміну перемінних в рівнянні регресії та приводили його до степеневого вигляду. За даними експериментальних досліджень і статистичного оброблення результатів були отримані математичні моделі радіальної й тангенціальної складових сили шліфування . Отримані математичні моделі дійсні лише в межах інтервалів варіювання технологічних параметрів.

Аналіз отриманих математичних залежностей показав, що найбільший вплив на збільшення складових сили шліфування P_y, P_z мають збільшення глибини різання й меншою мірою – повздовжньої подачі заготовки *(S)* та швидкість заготовки ($V_д$). Кількість канавок шліфувального круга *(ε)* впливає на складові сили різання під час переривчастого шліфування, збільшення яких призводить до зниження силового впливу на оброблювану поверхню. Найбільш високі значення коефіцієнта кореляції (у межах до 0,797) були отримані між

радіальною складовою сили різання й глибиною різання оброблюваної деталі. Також був установлений тісний кореляційний зв'язок між радіальною складової сили різання й подачею S (коефіцієнти кореляції 0,49).

Експериментальні значення радіальної складової сили різання та її лінійна апроксимація від подачі представлені на рис . 4.19. Була перевірена вірогідність постійних коефіцієнтів регресії (за t критерієм) і оцінка реальності зв'язку між змінними (для рівня значимості 0 ,05). Вона показала значимість коефіцієнтів регресії й кореляції для рівняння радіальної складової сили різання .

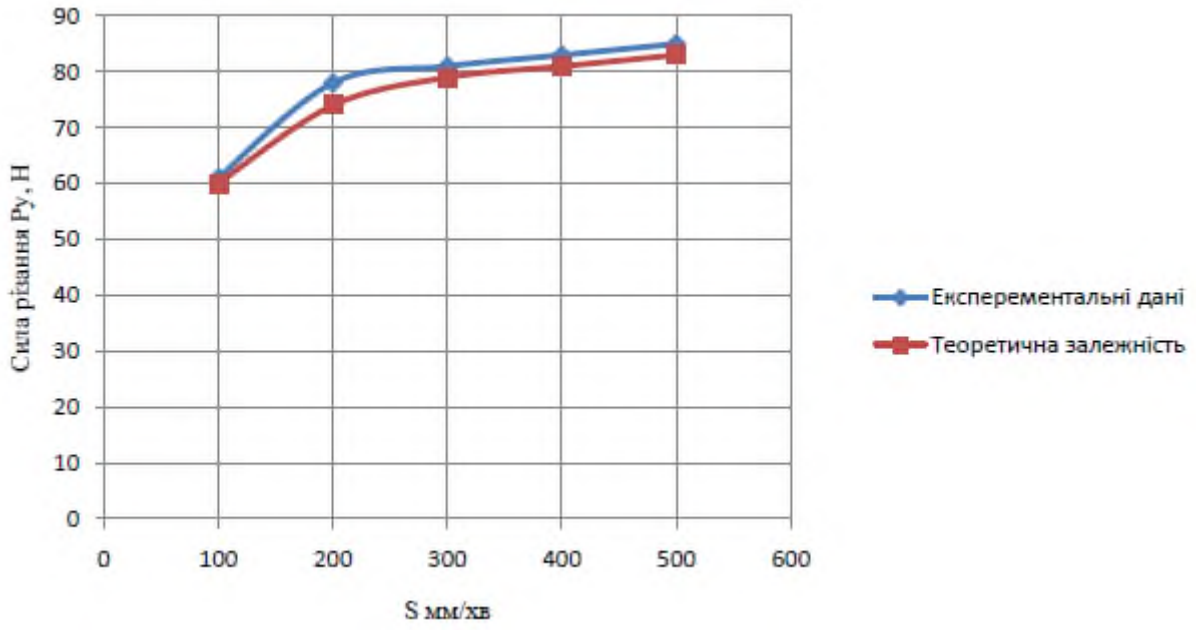


Рис. 4.19. Вплив повздовжньої подачі на силу різання, при $V_д$=20м/хв, $V_{кр}$=35м/с, t=0,2 мм, S=300 мм/хв

У результаті проведених експериментальних досліджень із наступним регресійним аналізом отриманих даних були отримані залежності радіальної й тангенціальної складових сили шліфування:

$$Py = 350{,}7\frac{S^{0,17}\cdot V_д^{\,0,07}\cdot t^{0,27}}{\varepsilon^{0,13}} \quad (4.28)$$

$$Pz = 2909{,}7\cdot S^{0,31}\cdot V_д^{\,0,12}\cdot \varepsilon^{-0,99}\cdot t^{0,18} \quad (4.29)$$

де S – повздовжня подача, мм/хв; $V_д$ – швидкість заготовки, м/хв; ε – число канавок; t– глибина різання, мм.

На рис. 4.20. показано поверхню відгуку залежності радіальної сили різання P_y від числа канавок шліфувального круга деталі та глибини різання під час переривчастого шліфування кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с, з числом канавок рівним 12, $V_д$=30 м/хв, яка побудована на основі регресійної залежності (4.27).

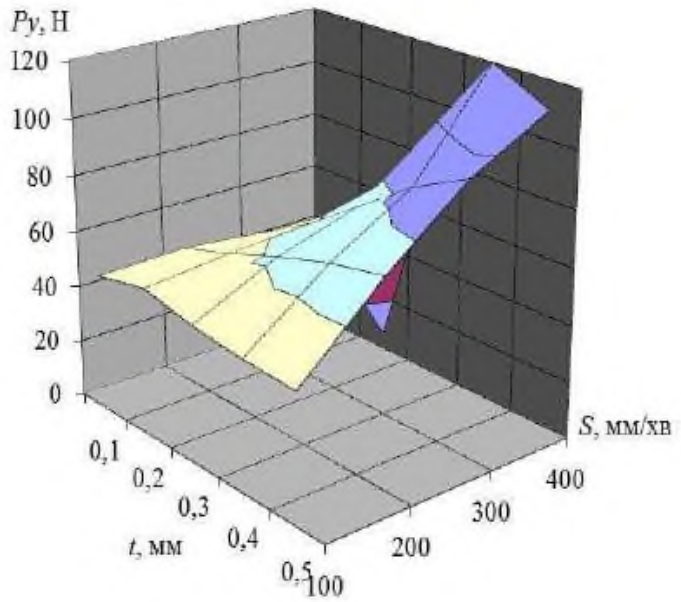


Рис. 4.20. Поверхня відгуку залежності радіальної сили різання P_y від повздовжньої подачі деталі та глибини різання кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с з числом канавок рівним 12 $V_д$=30м/хв .

На рис. 4.21 показано поверхню відгуку залежності радіальної сили різання P_y від глибини різання та поперечної подачі під час переривчастого шліфування кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1 -СМ2 7К1А 35 м/с при ε =24 , $V_д$=10 м/хв, яка побудована на основі регресійної залежності (4.27).

На тангенціальну силу різання мають значний вплив всі досліджувані чинники за виключенням мікронерівності деталі, вплив якої в досліджуваному діапазоні варіювання є незначним . Адекватність отриманої моделі тангенціальної складової сили шліфування перевіряли за допомогою F-критерію Фішера.

Табличне значення критерію $F_т$ при 5%-ному рівні значимості рівні 5,844. Розрахункове значення критерію Фішера складає 2,816, що менше табличного значення.

Таким чином, отримана модель тангенціальної складової сили шліфування адекватна при 5%-ому рівні значимості. Залежність тангенціальної складової сили різання від режимів різання така ж як і радіальної складової.

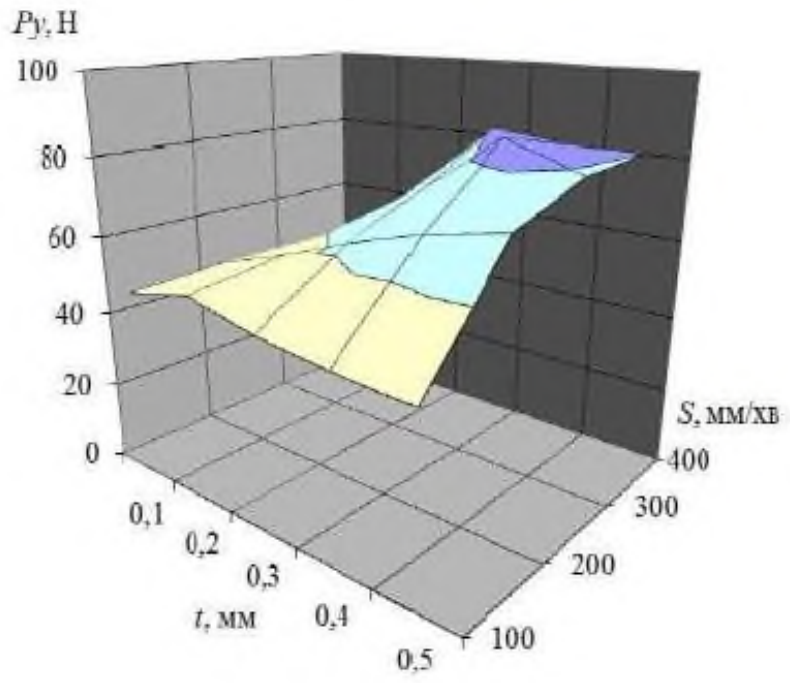


Рис. 4.21. Поверхня відгуку залежності радіальної сили різання P_y від глибини різання, повздовжньої подачі на операції безцентрового шліфування переривчастим кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м /с з числом канавок рівним 12

Найбільший вплив на тангенціальну складову має мікронерівність деталі, яка із зростанням призводить до зменшення сили різання.

На рис. 4.22 показано поверхню відгуку залежності тангенціальної сили різання P_z від повздовжньої подачі деталі S та глибини різання t під час переривчастого шліфування кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с при $V_д$=20 м/хв, числі ріжучих виступів круга 12 , яка побудована на основі регресійної залежності (4.28).

Бачимо, що збільшення глибини різання призводить до росту тангенціальної сили різання і фактично збільшує теплонапруженість процесу шліфування.

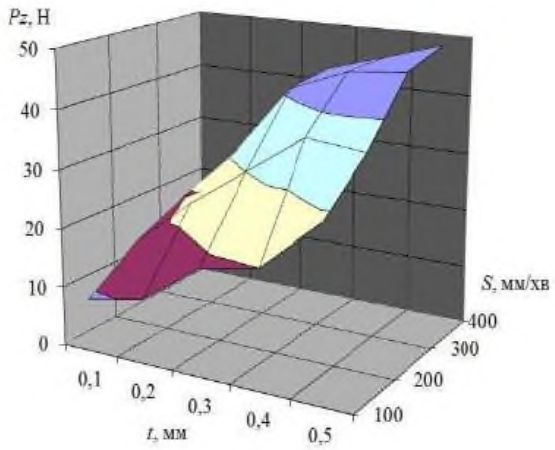


Рис. 4.22. Поверхня відгуку залежності тангенціальної сили різання P_z від глибини різання , повздовжньої подачі на операції безцентрового шліфування переривчастим кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с з числом канавок рівним 12

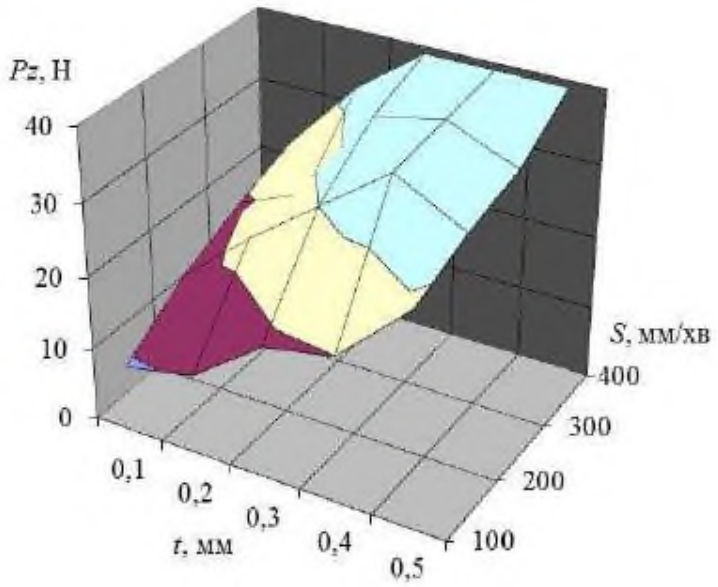


Рис. 4.23. Поверхня відгуку залежності тангенціальної сили різання P_zвід глибини різання та повздовжньої подачі під час переривчастого шліфування кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с при ε=24, V_∂=10м/хв.

На рис . 4.23 показано поверхню відгуку залежності тангенціальної сили різання P_z від глибини різання та повздовжньої подачі під час переривчастого шліфування кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с при $\varepsilon = 24$, $V_д$= 10 м/хв, яка побудована на основі регресійної залежності (4.29).

Проаналізувавши наведені графіки , бачимо, що збільшення глибини різання призводить до росту радіальної та тангенціальної складової сили різання .

На рис. 4.24 наведено результати дослідження впливу глибини різання на силу різання *Py* та *Pz,* коли число канавок ε =12. Найбільше значення та інтенсивність зміни по мірі збільшення глибини різання характерне для радіальної складової сили різання, найменше – для осьової, в цілому ж співвідношення між складовими сили різання можна представити як P_x: P_y: P_z=0,1:2 :1.

Із збільшенням режимів різання температура поверхні заготовки збільшується, а твердість у зоні різання зменшується. Під час зростання глибини різання збільшується частка пластичних деформацій при руйнуванні матеріалу припуску , а, отже, і сила різання. Так як при рівній продуктивності збільшення швидкості заготовки в порівнянні з ростом глибини шліфування викликає менші температури на поверхні заготовки, тому у вираженні радіальної складової сили різання показник ступеня при швидкості заготовки менше показника ступеня при глибині різання.

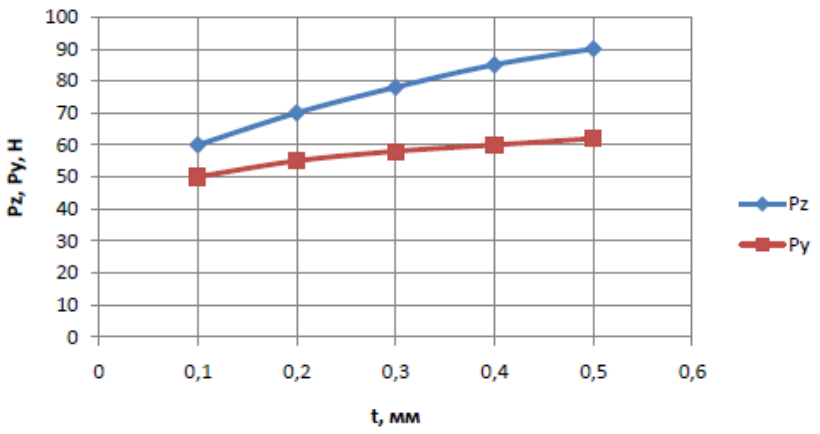


Рис. 4.24. Вплив глибини різання на силу різання, при

$V_д$=20м/хв , $V_{кр}$=35м/с, S=200мм/хв, ε =12

Результати дослідження впливу числа канавок на силу різання наведено на рис. 4.28, з якого видно, що збільшення числа канавок призводить до зниження сил різання. У разі збільшення числа канавок з 12 до 24 зменшується радіальна та тангенціальна складові сили різання.

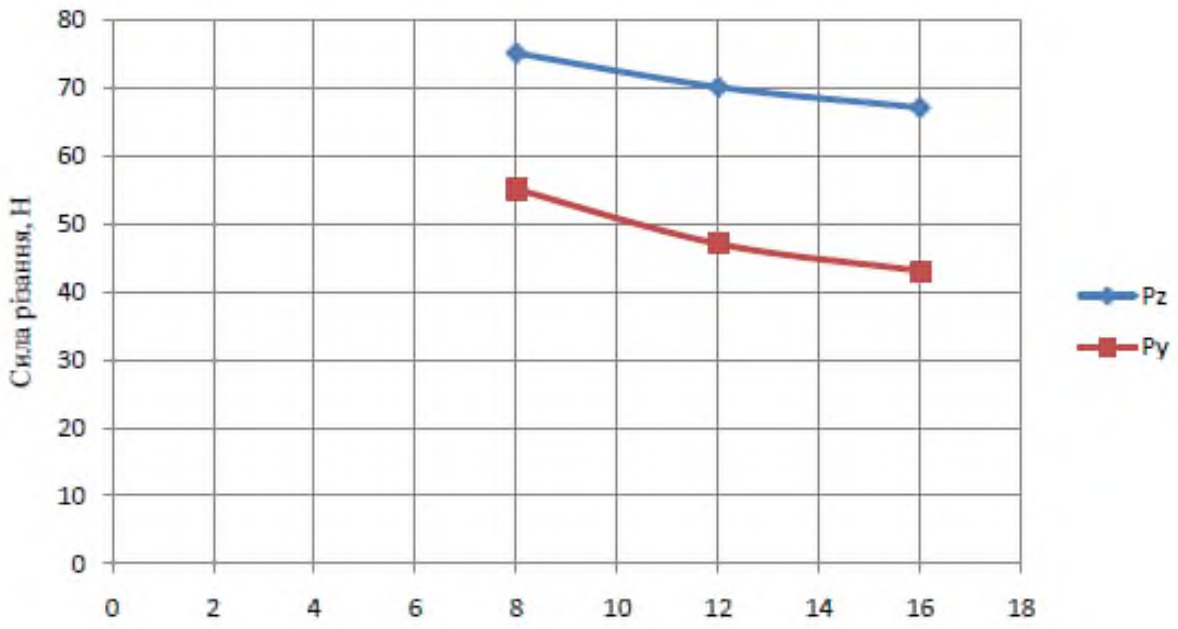


Рис. 4.25. Вплив числа канавок на силу різання, під час переривчастого шліфування кругом: 1 -600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с, V_o=20 м/хв, $V_{кр}$=35 м/с, S= 200 мм/хв , t=0,2 мм

Для досліджуваного матеріалу характерно, що із збільшенням числа канавок зменшується металічне січення зрізуваного шару, і як наслідок , зменшується зусилля деформування та механічні характеристики матеріалу .

Під дією зростаючої температури різання, механічні характеристики матеріалу в шарі, що зрізується, знижуються. Зі збільшенням мікронерівності матеріалу це призводить до зниження опору матеріалу деформації та зменшення коефіцієнта тертя між стружкою та шліфувальним кругом, що призводить до зниження сил різання.

Результати дослідження впливу швидкості різання на силу різання представлено на рис. 4.26, з якого випливає, що підвищення швидкості заготовки

незначно впливає на силу різання. Під час шліфування заготовок додається ще один важливий чинник – мікронерівність. Під час оброблення заготовок зі сталі ріжучі зерна шліфувального круга піддаються мікроударам, частота яких збільшується з підвищенням швидкості заготовки та викликає зростання сили різання .

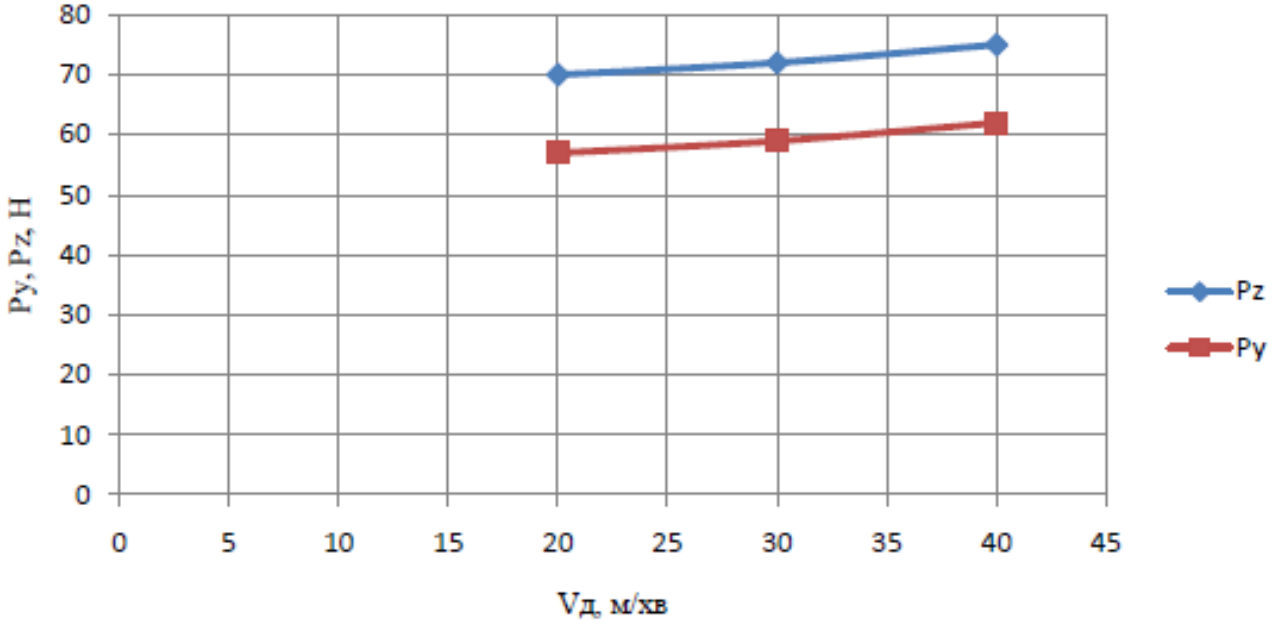


Рис. 4.26. Вплив швидкості заготовки на сили різання під час переривчастого шліфування кругом 1-600х500х305 14А25-Н С1-СМ2 7К1А 35 м/с, ε =12, $V_{кр}$=35м /с, S=400мм/хв, t=0,2мм

Як видно з рис. 4.26 з підвищенням швидкості заготовки сила P_y зростає, але ці показники досить малі.

На відміну від шліфування суцільними кругами під час шліфування переривчастими кругами за рахунок зменшення тривалості контакту з заготовкою зменшуються сили різання.

Закономірність зміни сили різання від повздовжньої подачі показано на рис . 4.27, з якого випливає, що збільшення повздовжньої подачі призводить до росту радіальної та тангенціальної складових сили різання.

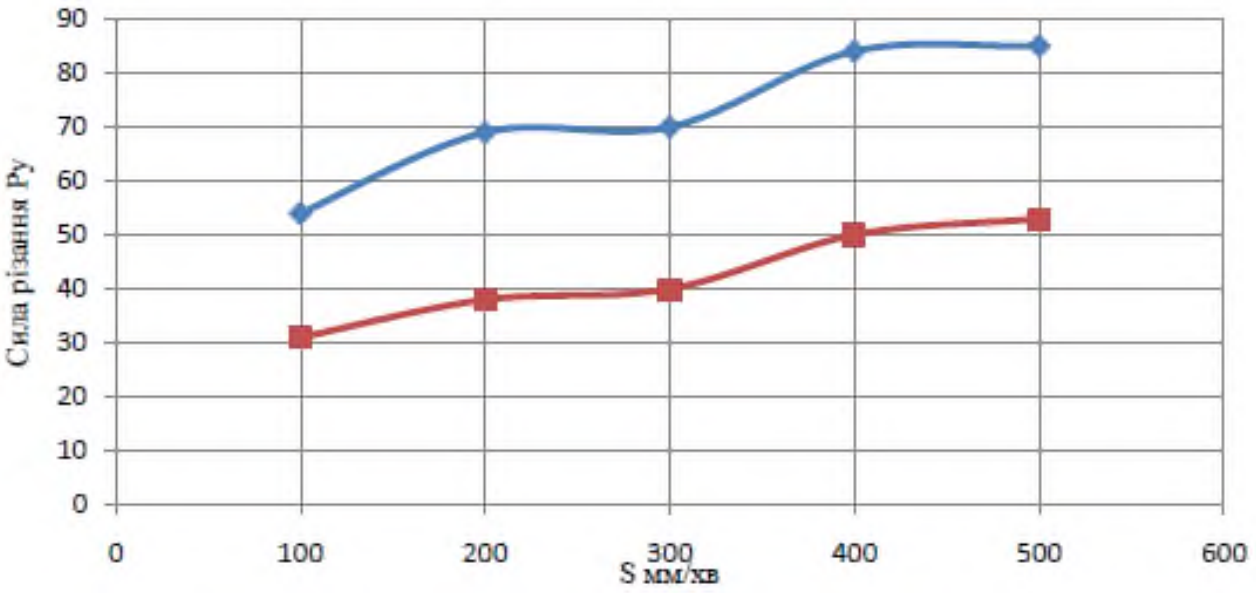


Рис. 4.27. Залежність сили різання від повздовжньої подачі при ε=12, $V_{кр}$=35м/с, t=0,2мм

На рисунку бачимо, що із збільшенням повздовжньої подачі збільшується радіальна сили різання. Під час шліфування в поверхневому шарі відбуваються процеси фізичного та «структурного» зміцнення. «Структурне» зміцнення призводить до часткового закриття поверхневих мікротріщин та ущільнення поверхневого шару шліфованої деталі. Наслідком фізичного зміцнення є утворення наклепу в поверхневому шарі заготовки, що призводить до збільшення сили різання під час переривчастого шліфування.

4.6. Конструювання переривчастого інструменту для безцентрового шліфування поверхонь обертання

Проектування конструкції переривчастих шліфувальних кругів необхідно проводити в наступній послідовності:

1. Визначення кінематичних показників процесу, характеристик ріжучого шару інструменту;

2. Знаходження середніх і пікових складових сил різання та коефіцієнтів, що характеризують динаміку процесу;

3. Визначення характеристик переривчастого круга згідно з математичними моделями.

Розглянемо приклад проектування конструкції переривчастого шліфувального круга.

Вихідні дані:

Якість обробленої поверхні : R_a = 0,32 мкм; [$h_в$]=0,005 мм; заготовка: сталь ШХ15, σ_B= 590...730 МПа; σ_T= 370...410 МПа; σ_5 = 20 %; ψ = 45%; KCU = 440 кДж/м^2

Шліфувальний круг: R = 0,5 м; B = 0 ,75 м; гранично допустима величина зносу h_{umax} = 0,03·10^{-3} м.

Вибір кінематичних показників процесу і розрахунок параметрів абразивного інструментаю .

1. У відповідності з вимогами до регламентованої шорсткості обробленої поверхні, механічними та теплофізичними властивостями заготовки , жорсткістю та вібростійкістю верстата призначимо наступні параметри шліфувального круга та режимів різання: N = 40 , C = 6, карбід кремнію зелений, твердість – С2 ; $V_{кр}$ = 35 м/с; $V_з$= 0,05 м/с; t = 0,02 мм, $n_в$ = 12.

2. Знайдемо величини сил різання за умови відсутності впливу динамічних чинників з різною максимальною величиною затуплення круга (табл. 4.4), коефіцієнти динамічності для кожної з гармонік в спектрі відносних вібрацій круга і заготовки (табл. 4 .5), а також коефіцієнти, що враховують неточність поверхні заготовки.

Таблиця 4.4

Розрахункові значення сил різання при відсутності динамічних впливів

Сила	Величина затуплення круга h_u·10^{-3},м		
	0,03	0,04	0,05
P_z, Н	15,1	22,9	32,4
P_y, Н	63,8	108,6	165,8

Таблиця 4.5

Розрахунок коефіцієнтів динамічності

ν, Гц	$A \cdot 10^{-6}$, м	$k_Д^y$	$k_Д^z$
74	3,5	1,4	1,98
150	2,5	1,29	1,84
350	1,5	1,23	1,76
450	1,5	1,26	1,90
		2,8	12,18
$k_Д^y = 1{,}36$		$k_Д^y = 1{,}43$	

3. Розраховуємо варіанти параметрів переривчастого шліфувального круга для різних значень граничної величини затуплення круга (табл. 4.6). Показник продуктивності визначимо по мірі затуплення круга h_u = 0,03·10^{-3} м. Під час визначення затупленості круга бачимо, що чим менша жорсткість переривчастого круга, тим більша тривалість роботи круга без утворення припалів заготовки

Таблиця 4.6

Розрахунок параметрів переривчастих кругів

h_{umax} = 0,03·10^{-3} м					
Варіант	$l_{вист.}$, м	$l_{кан.}$, м	$c \cdot 10^6$ Н/м	$K_п$	K_c
1	0,012	0,0175	6,25	0,604	0,244
2	0,016	0,0135	4,88	0,526	0,326
3	0,020	0,0095	4,15	0,472	0 ,407
4	0,026	0,0035	3 ,52	0,416	0,530
h_{umax} = 0 ,04·10^{-3} м					
5	0,012	0,0175	5,06	0,538	0,326
6	0,016	0,0135	4 ,30	0,484	0,435
7	0 ,020	0,0095	3,85	0,446	0,543
8	0,026	0,0035	3,39	0,403	0,706
h_{umax} = 0,05·10^{-3} м					
9	0,012	0,0175	4,48	0,498	0,407
10	0,016	0,0135	3,95	0,455	0,543
11	0,020	0,0095	3,59	0 ,423	0,679
12	0,026	0 ,0035	3,21	0,384	0,883

На рис. 4.28 показано зміну критерію продуктивності для розроблених кругів (табл. 5.3) по мірі їх затуплення h_u = 0,03 ·10^{-3} м. Вибір значення

максимального затуплення шліфувального круга h_{umax} залежить від його зернистості N.

З рис. 4.28 видно, що круги з меншою довжиною ріжучих виступів мають більшу продуктивність, оскільки володіють високою жорсткістю (табл . 4.6). Однак під час однакового числа ріжучих виступів круга з малою довжиною виступів мають значно меншу стійкість, що призводить до затуплення і потребують частих правок переривчастих кругів

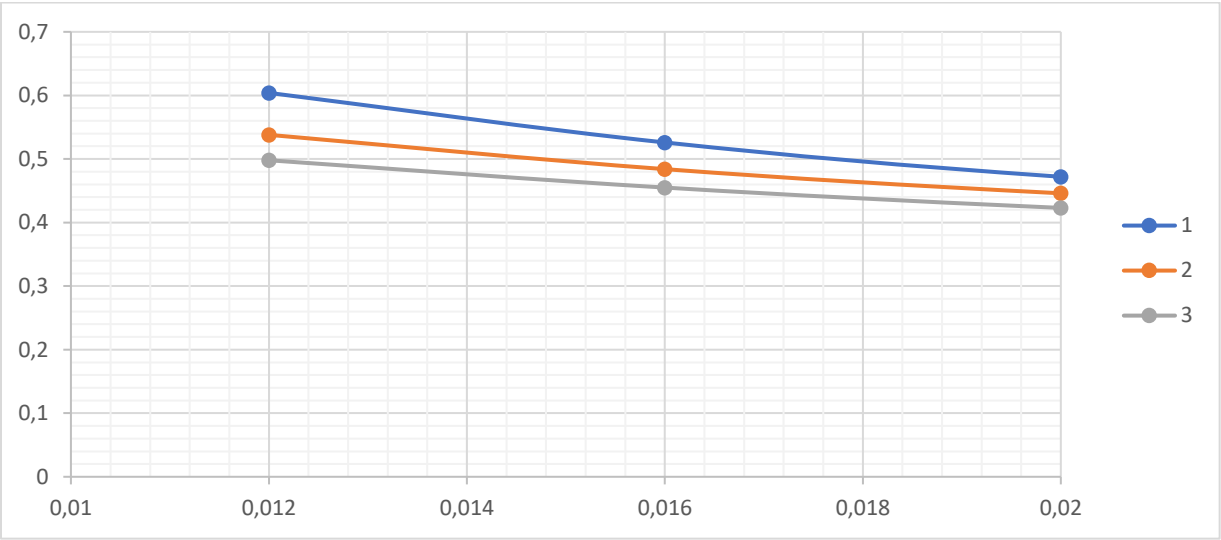


Рис. 4.28 Залежність критерію продуктивності від ширини канавки 1 – h_{umax} = 0,03·10 $^{-3}$ м; 2 – h_{umax} = 0,04·10 $^{-3}$ м; 3 – h_{umax} = 0,05·10 $^{-3}$ м

Для підвищення стійкості таких кругів необхідно проводити наступні заходи:

1. Збільшувати число ріжучих виступів, але так, щоб довжина западини була не менше мінімально допустимої, щоб поверхня заготовки встигла охолонути до температури $\theta_{шліф}$, а також , щоб виконувалася умова відсутності параметричного резонансу;

2. Застосовувати абразиви більшої твердості.

Таким чином, для забезпечення максимальної продуктивності слід проектувати круг з великим числом і малою протяжністю ріжучих виступів і відносно високою їх жорсткістю. Для підвищення ефективності оброблення

можливо застосування шліфувальних з різною твердістю або зернистістю, які чергуються.

На рис. 4 .29 показано зміну критерію продуктивності в залежності від ступеня затуплення шліфувального круга для варіантів 3, 7, 11 (див. табл. 4.6) з однаковою довжиною ріжучих виступів l_1 = 0 ,02 м і впадин l_1 = 0,0095 м. Графік 4.29 підтверджує, що управління теплонапруженістю під час затуплення круга відбувається за рахунок управління продуктивністю оброблення. Під час цього чим менше жорсткість переривчастого круга, тим більша тривалість роботи круга без утворення припалів заготовки.

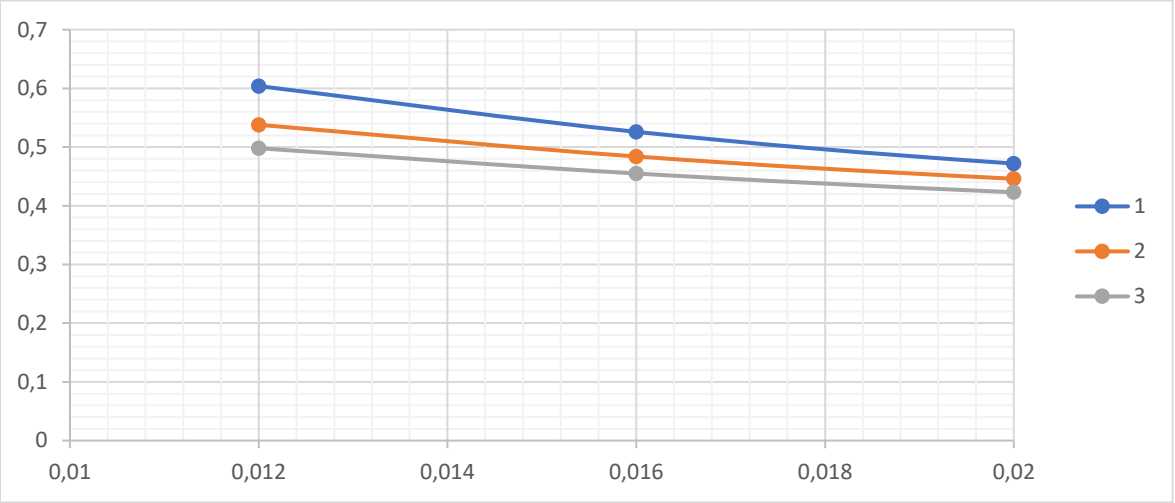


Рис. 4.29. Залежність критерію продуктивності від ширини виступу 1 – варіант 3 (табл . 4.6); 2 – варіант 7 (табл. 4.6); 3 – варіант 11 (табл. 4.6)

Таким чином, переривчасті шліфувальні круги дозволяють проводити оброблення з максимально можливою продуктивністю, що забезпечує відсутність теплових дефектів шліфованої поверхні, тобто дозволяють захищати поверхню заготовки від надмірного силового і температурного впливу, що виникає під час затуплення круга та впливу динамічних чинників, а це в свою чергу дозволяє знизити ймовірність виникнення теплових дефектів шліфованої поверхні.

Серед отриманих в табл. 4.6 варіантів слід вибирати або оптимальний за продуктивністю, або оптимальний за стійкістю круг, або ж середній варіант, що поєднує в собі достатню стійкість і задовільну продуктивність .

Таким чином, будемо стверджувати, що застосування переривчастих кругів дозволяє керувати зміною сил різання під час впливу динамічних чинників процесу шліфування та теплонапруженням процесу, що дозволяє уникнути браку (появи механічних дефектів) на операціях шліфування, так як дозволяє усунути всі види температурних дефектів.

4.7. Висновки до розділу

1. На підставі використання запропонованої збірної конструкції переривчастого шліфувального круга розроблена високоефективна технологія безцентрового шліфування циліндричних поверхонь кілець роликопідшипників з важливістю керуванням зернистістю збірної, робочої , калібрувальної та виходжувальної зони різання. Поєднання різної зернистості в конструкції збірного шліфувального круга дало змогу покращити показники якості шліфованих поверхонь до Ra 1-1,2 мкм, знизити та стабілізувати температуру в зоні шліфування до 400 °С та вилучити з технологічного процесу шліфування базової поверхні кільця одну операцію напівчорнового шліфування .

2. Розроблено план експериментальних досліджень зв’язків конструкторсько-технологічних чинників та показників безцентрово-шліфувальних операцій з параметрами якості шліфованих поверхонь, температурою шліфування, силовими параметрами процесу шліфування суцільними та переривчастими шліфувальними кругами та конструктивними параметрами переривчастих шліфувальних кругів.

3. Експериментально та теоретично досліджено вплив глибини різання , числа канавок шліфувального круга, швидкості різання та величини повздовжньої подачі на температуру шліфування. Встановлено співвідношення температури, що передається в стружки та температури, що передається в тіло заготовки, як 60% і 30% відповідно.

4. На підставі проведених експериментальних досліджень побудовані поверхні відгуку залежності температури від глибини різання, швидкості обертання заготовки та числа канавок шліфувального круга, які покладені в

основу розробленого алгоритму прогнозування температури шліфування. Розбіжність теоретичного розрахунку та експериментальних досліджень не перевищила 10%.

5. Експериментально встановлені залежності між температурою шліфування , тангенціальною складовою P_z і радіальною складовою P_y під час переривчастого шліфування кругами зі значенням числа канавок 12, 24 та 36. Виявлено , що збільшення числа канавок переривчастого шліфувального круга призводить до зниження температури шліфування, однак шорсткість поверхні зростає від 1,2 до 2 ,2 мкм.

6. Усі технологічні чинники, які призводять до зниження температури шліфування відповідно призводять до збільшення твердості (мікротвердості) шліфованої поверхні. Встановлено, що збільшення числа канавок шліфувального круга з 12 до 24 забезпечує збільшення твердості HRC поверхні на 2-4 одиниці. Збільшення повздовжньої подачі заготовки під час безцентрового шліфування дозволяє зменшити твердість шліфованої загартованої поверхні на 3-5 одиниць HRC.

7. Експериментально досліджені зв’язки параметрів шорсткості шліфованих переривчастими кругами поверхонь кілець з швидкістю різання, повздовжньою подачею заготовки, глибиною різання та числом канавок переривчастого шліфувального круга. Проведена серія експериментальних досліджень підтвердила результати моделювання температурних процесів в зоні безцентрового переривчастого шліфування заготовок кілець . Побудовані поверхні відгуку залежності параметра шорсткості Ra від режимів шліфування та числа канавок шліфувального круга покладені в основу розробленої методики проектування шліфувальних операцій і інструментальних налагоджень верстатів-автоматів . Розбіжність теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень не перевищила 10%.

8. Отримані важливі результати експериментальних досліджень впливу силових параметрів шліфування на температуру шліфування . Встановлено, що збільшення тангенціальної сили різання на 10Н шляхом збільшення глибини

різання, або повздовжньої подачі підвищує температуру в зоні шліфування на 50°С. Такий характер залежності може бути покладений в основу системи адаптивного керування температурою безцентрового переривчастого шліфування поверхонь обертання кілець .

9. Дослідження конструкції переривчастого круга виявило резерви для збільшення продуктивності знімання припуску та шляхів підвищення ресурсу роботи шліфувального інструменту, виявлено, що число правок переривчастого шліфувального круга можливо зменшити на 30% за рахунок раціонального підбору співвідношення довжини ріжучих виступів та впадин круга та числа гвинтових канавок на поверхні круга.

10. Запропонована технологія виготовлення (нарізання) гвинтових канавок переривчастого шліфувального круга з використанням механізму вирівнювання (правки) верстата SASL5AD, за рахунок чого зменшилась прогнозована собівартість шліфувального круга на 25%.

11. Впроваджена конструкція шліфувального круга може застосовуватись для шліфування широкого спектру типорозмірів зовнішніх кілець роликопідшипників виробничої номенклатури базового підприємства.

РОЗДІЛ 5
РОЗРОБЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ

5.1. Визначення максимально можливої продуктивності оброблення з урахуванням температури шліфування

Справедливо стверджувати, що показник приведеної температури ω приймає невеликі значення – значно менші за одиницю. В табл. 5.1 наведені розрахункові значення параметрів τ; $V_{\text{різ}}$; l_1; ω.

Отже під час шліфування зовнішніх поверхонь кілець роликопідшипників тепловий процес не встигає стабілізуватись в часі , тому оброблення виконується в невстановленому тепловому режимі .

Стабілізація теплового процесу можлива тільки під час суттєвого збільшення питомої продуктивності оброблення $Q_{\text{пит}}$. Але це приводить до недопустимо великих значень температури шліфування, які відповідають умові $\omega \to 1$.

Таблиця 5.1.

Розрахункові значення параметрів τ, $V_{\text{різ}}$, l_1, ω

Вид шліфування	τ, с	$V_{різ} \cdot 10^{-3}$,м/с	$\bar{l}_1$	ω
Переривчатим кругом	0,00173	5,8	0,003	0,0769
Суцільним кругом	1,73	0,58	0,03	0,2285

З табл. 5.1 бачимо, що під час високої продуктивності оброблення $Q_{\text{пит}}$=600 мм²/хв=10^{-3} м² /с і глибини шліфування t=10^{-3} м приведений показник температури ω і безрозмірна величина l_1набувають невеликих значень: ω =0,2285 ; l_1 =0,03. В даному випадку стабілізація теплового процесу під час шліфування не відбувається , а має місце невстановлений тепловий процес. Стабілізація теплового процесу можлива, якщо збільшити питому продуктивність оброблення $Q_{\text{пит}}$ в 20 разів, а глибину шліфування t– в 10 разів.

Залежність зміни температури шліфування θ від питомої продуктивності оброблення $\theta_{пит}$ (глибини шліфування t і швидкості деталі $V_д$) набуде вигляду, як показано на рис . 3.8. Зі збільшенням глибини шліфування, та швидкості деталі показник приведеної температури ω зростає .

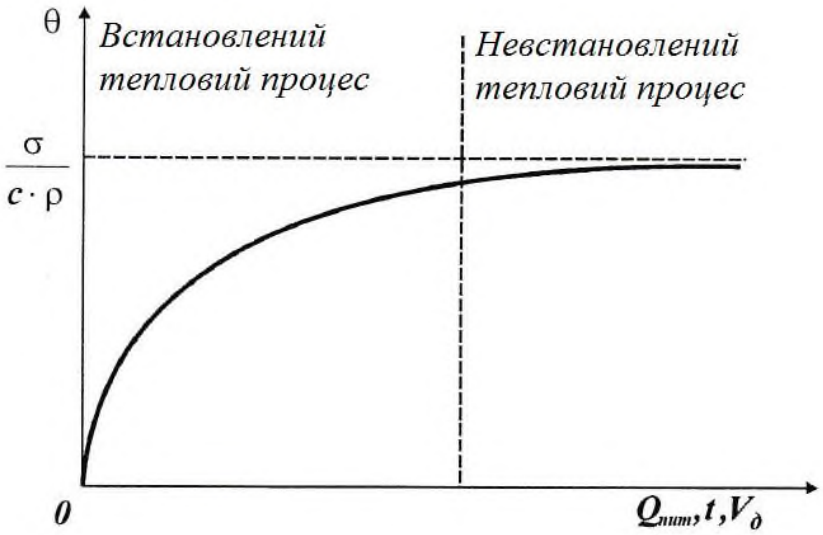


Рис. 5.1. Залежність $Q_{пит}$ від t і швидкості деталі $V_д$

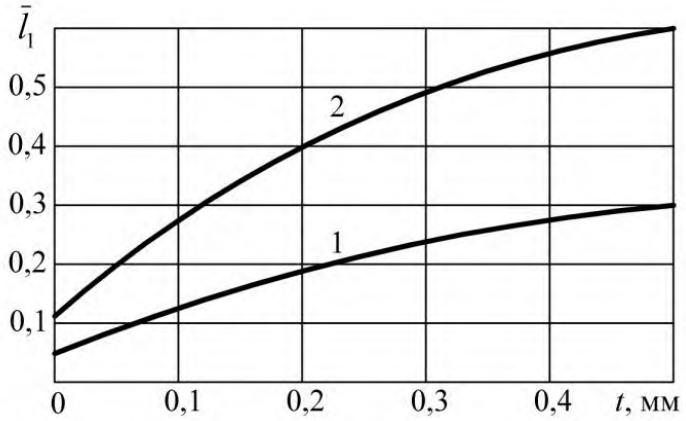
В такому випадку безрозмірна величина l_1, відповідно до залежності:

$\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр.}}} = \overline{l_1}$, де $\overline{l_1} = -\ln((1-\omega) - \omega)$, стане рівною $\overline{l_1} = 1{,}8$, а показник приведеної температури ω – рівний 0 ,936.

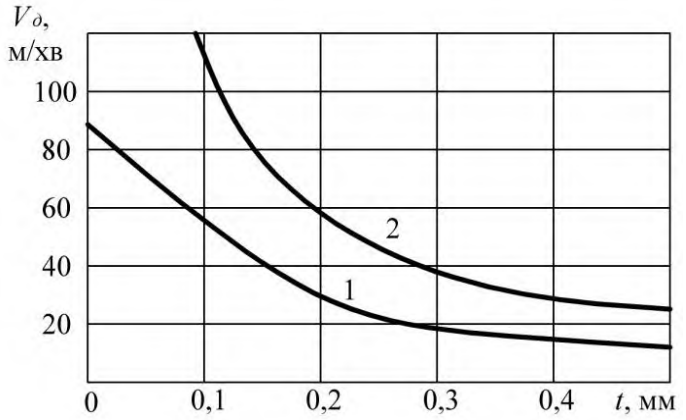
На рис. 5.1 умовно показано зони встановленого і невстановленого теплового процесу під час шліфувального оброблення. Враховуючи вплив питомої продуктивності оброблення $Q_{пит}$ на приведений показник температури ω , встановимо кількісний зв'язок $Q_{пит}$ з ω. Для розрахунків візьмемо ті ж вихідні дані, які були взяті для розрахунку основних параметрів теплового процесу під час шліфування сталі ШХ15, наведені в табл. 5.1 і табл. 5 .2.

На рис. 5.2, а наведені значення безрозмірної величини $\overline{l_1}$ для двох значень $Q_{пит}$: 6000 мм²/хв = 10^{-4}м² /с і 12000 мм²/хв $2 \cdot 10^{-4}$м²/с, вони розраховані за допомогою залежності (3.10). На рис. 5.2 б наведені значення ω, взяті з табл. 3 .1

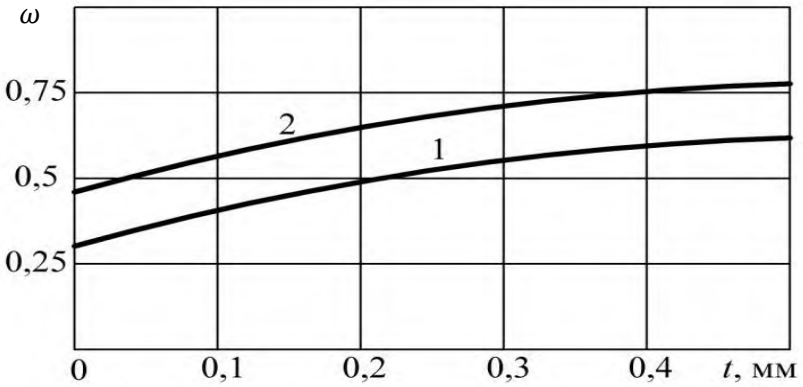
для встановлених значень $\overline{l_1}$, а на рис. 5.2 в – значення швидкості деталі $V_{\text{дет}}$. розраховані за залежністю: $V_{\text{дет}} = \frac{Q_{\text{пит.}}}{t}$.



а)



б)



в)

Рис. 5.2. Залежності параметрів l_1 (а), ω(б), $V_д$(в) від глибини шліфування t: 1 – $Q_{\text{пит}}$=600 мм²/хв=10 $^{-3}$м²/с; 2 – $Q_{\text{пит}} = 1200$ мм²/хв $= 2 \cdot 10^{-4}$м²/с

З рис. 5.2 а слідує, що з збільшенням глибини шліфування t безрозмірна величина $\overline{l_1}$ безперервно збільшується , приймаючи значення 0,1 ... 0,3 (для $Q_{пит} = 6000$ мм²/хв $= 10^{-4}$ м2 /с) і 0,2 ... 0,6 ($Q_{пит} = 12000$ мм²/хв $= 2 \cdot 10^{-2}$ м² /с). Приведений показник температури ω зі збільшенням глибини шліфування t також збільшується, досягаючи значення , що рівне 0,74.

Встановлений тепловий процес може бути реалізований під час безцентрового переривчатого шліфування сталі ШХ15 (рис. 5.1). В табл. 5.2 наведені фізико- механічні властивості сталей ШХ15 і Х12М.

Таблиця 5.2

Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/(м·°С)	Питома теплоємність с, Дж/(м·°С)	Густина $p \cdot 10^3$, кг/м^3
Сталь ШХ15	32…38	480	8…9
Сталь Х12М	24,5…36	498	9,5…11

Отже, під час шліфування важко реалізувати встановлений тепловий процес (ω → 1) навіть за умови великої питомої продуктивності оброблення $Q_{пит}$. З урахуванням характеристик матеріалів заготовок, що наведені в табл. 5.2 , очевидно, що будуть виконуються наступні нерівності:

$$1.\ \theta_{сталь ШХ15} = \left(\frac{\sigma}{c \cdot p}\right)_{сталь ШХ15} < \theta_{сталь Х12М} = \left(\frac{\sigma}{c \cdot p}\right)_{сталь Х12М}$$

$$2.\ \left(\frac{c \cdot p}{\lambda}\right)_{сталь ШХ15} = \left(\frac{c \cdot p}{\lambda}\right)_{сталь Х12М} \Rightarrow \omega_{сталь ШХ15} > \omega_{сталь Х12М}$$

які свідчать про можливість практичної реалізації під час переривчатого шліфування сталей встановленого теплового процесу, рис . 5.3.

Як слідує із рис. 3 .10 зі збільшенням $Q_{пит}$ температура шліфування θ збільшується за експоненціальною залежністю, а потім стабілізується . Аналогічним чином змінюється приведений показник температури ω . По суті при ω <1 має місце невстановлений тепловий процес, а при ω →1 – встановлений тепловий процес. Цим підтверджено, що під час досягнення умови ω →1 можливо практично необмежено збільшувати питому продуктивність

оброблення $Q_{пит}$ без збільшення температури шліфування θ. Отже, цим можна пояснити основний ефект безцентрового переривчастого шліфування, яке реалізує надзвичайно високу питому продуктивність оброблення $Q_{пит}$ у межах 10000 мм^2/хв. За умови відносно невеликих температурах шліфування.

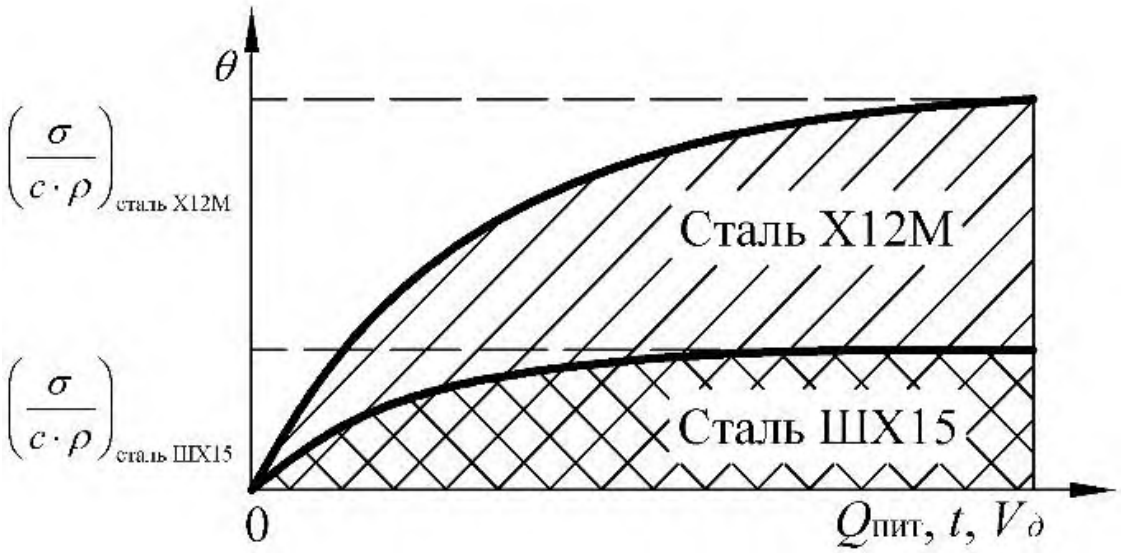


Рис. 5.3 . Залежність температури шліфування θ від продуктивності оброблення

Наведені на рис. 5.3 експериментальні значення температури в залежності від глибини шліфування показують , що перехід в зону переривчастого шліфування (яке
характеризується відносно невеликими швидкостями деталі) дозволяє реалізувати встановлений тепловий процес (ω →1), тобто друга (стабілізована) ділянка розрахункової залежності $\omega - Q_{пит}$, рис . 5.3. Це, по-перше, свідчить про достовірність розробленої математичної моделі формування температури під час шліфування з урахуванням руху теплового потоку в глибину поверхневого шару оброблюваної деталі, а по-друге вказує на можливість суттєвого підвищення продуктивності оброблення в умовах безцентрового переривчастого шліфування .

Розглянемо основні умови підвищення продуктивності оброблення з урахуванням обмеження за температурою шліфування. Під час багатопрохідного шліфування (що характеризується невеликими глибинами шліфування і збільшеними значеннями швидкості деталі) вийти на стабілізовану ділянку

залежності приведеного показника температури ω від глибини шліфування t або швидкості деталі $V_д$ (рис. 5.3) неможливо. В даному випадку реалізується невстановлений тепловий процес, під час якого відбувається збільшення приведеного показника температури ω від глибини шліфування t або швидкості деталі $V_д$, при цьому питома продуктивність оброблення $Q_{пит}$ значно менша, ніж під час переривчатого шліфування .

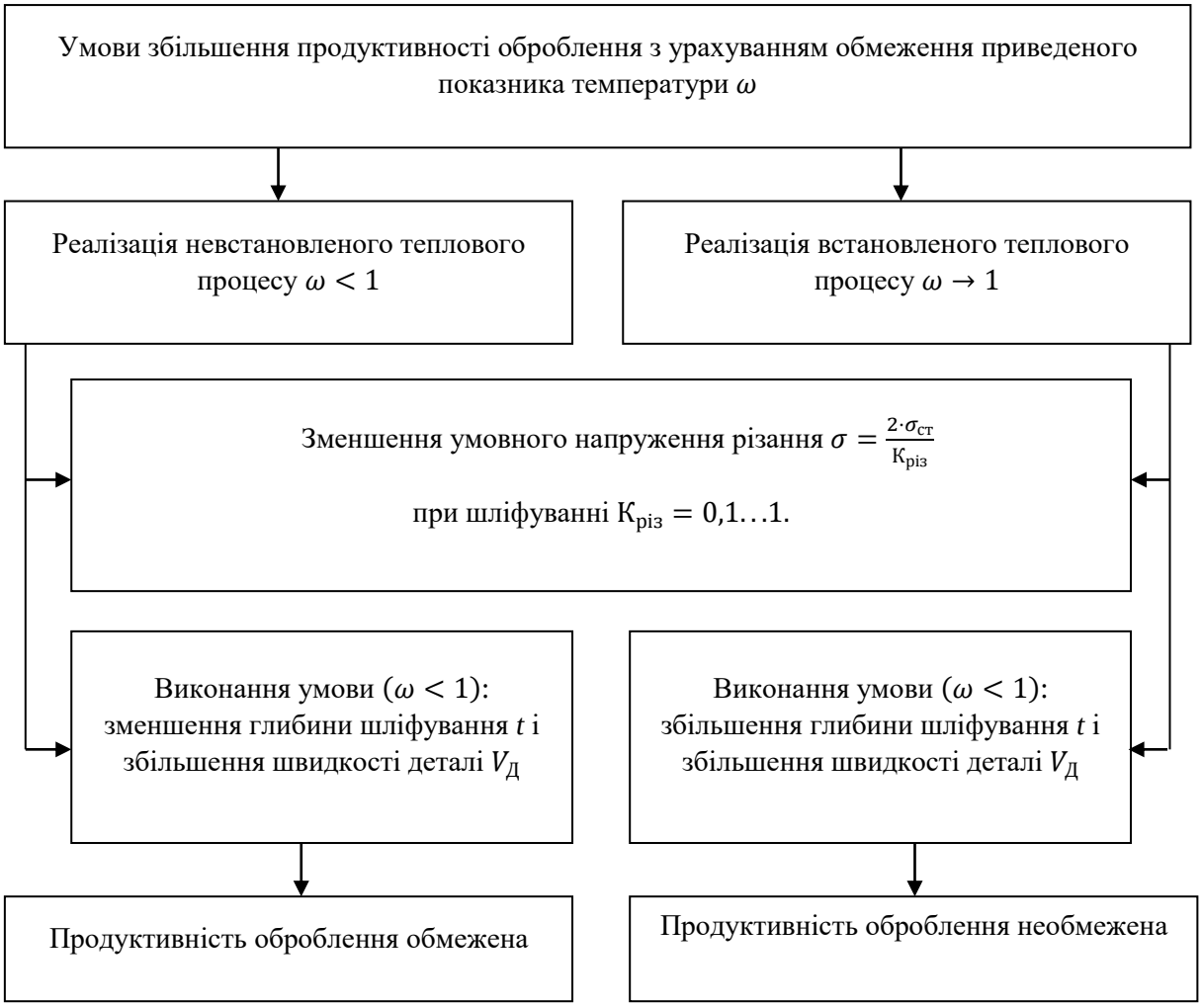


Рис. 5.4. Умови підвищення продуктивності оброблення з урахуванням обмежень за температурою під час шліфування

На підставі проведених теоретичних та експерементальних досліджень зв’язків параметрів технологічної системи шліфування з показниками процесу оброблення розроблена структурно-функціональна схема адаптивної системи

керування температурою безцентрового шліфування базових поверхонь обертання кілець роликопідшипникі (рис. 5.4.).

Для практичної реалізації встановленого теплового процесу (стабілізованої ділянки графіка ω – $Q_{пит}$, рис .5.3), під час якого приведений показник температури ω не залежить від питомої продуктивності оброблення $Q_{пит}$, необхідно зменшити максимальне значення температури шліфування $\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \omega$ при $\omega = 1$ до значення, що виключає появу припалів й інших температурних дефектів на обробленій поверхні.

Таким чином, для реалізації наведеної на рис. 5.3 розрахункової залежності ω – $Q_{пит}$ необхідно забезпечити суттєве (в 4…5 разів) зменшення умовного напруження різання σ.

Головним шляхом зменшення умовного напруження різання $\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{ст.}}}{K_{\text{різ.}}}$ збільшення коефіцієнта різання $K_{\text{різ.}}$.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що під час застосування переривчастого шліфування коефіцієнт різання $K_{\text{різ}}$ змінюється у межах 0,1…1,0, тобто цей коефіцієнт не перевищує значення 1.

5.2. Методика розрахунку параметрів режиму переривчастого шліфування , що забезпечують умови бездефектної роботи

Теоретично встановлена залежність температури шліфування θ від питомої продуктивності оброблення $Q_{\text{пит}}$ (рис. 5.1) дозволила сформулювати дві основних вимоги до реалізації процесу шліфування з врахуванням обмеження за температурним фактором. З метою збільшення продуктивності оброблення необхідно реалізувати встановлений тепловий процес ($\omega \rightarrow 1$), цим самим забезпечити зменшення умовного напруження різання σ. Якщо ж потрібно зменшити температуру шліфування, то необхідно реалізувати невстановлений тепловий процес ($\omega < 1$), продуктивність оброблення під час якого значно менша, ніж під час встановленого теплового процесу. Однак, зменшення приведеного показника температури ω веде до зменшення кількості тепла Q_1 / Q,

яке йде в стружку, і збільшення кількості тепла $Q_2/\ Q$, яке йде в поверхневий шар заготовки.

За умови ω $\rightarrow 0$ практично все утворене під час шліфування тепло буде йти в поверхневий шар заготовки кільця. Це призводить до збільшення товщини поверхневого шару заготовки l_2, в якому концентрується тепло та який є потенційним джерелом утворення різного виду температурних дефектів. Отже, щоб зменшити ймовірність утворення температурних дефектів на обробленій поверхні, а в кращому випадку зовсім їх виключити, необхідно під час оброблення обмежити дві величини: температуру шліфування θ (або приведений показник температури ω) і товщину шару l_2 оброблюваної деталі, в якому концентрується тепло. Це забезпечується шляхом призначення за визначеною методикою режимів шліфування.

Дана методика полягає в наступному: на рис. 5.5 показані умови зменшення температури поверхневого шару заготовки в процесі її абразивного оброблення.

Нехай задана величина l_2, в яку входять два змінних параметра ω і V_{pi3}. Приймемо, що приведений показник температури ω також заданий. Тоді змінним параметром залишиться тільки V_{pi3}.

Для його визначення необхідно представити наступну залежність:

$$V_{pi3} = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot p \cdot l_2} \tag{5.19}$$

Підставляючи у залежність (5.20) задані значення λ, ω, c, ρ i l_2, визначається величина V_{pi3}. Далі, згідно залежності (2.43), розраховується довжина l_1, яка по суті є глибиною шліфування.

Щоб видалити припуск товщиною П та забезпечити задані значення ω і l_2 необхідно виконати n проходів шліфувального круга, (по схемі безцентрового шліфування):

$$n = \frac{\text{П}}{l_1} \tag{5.20}$$

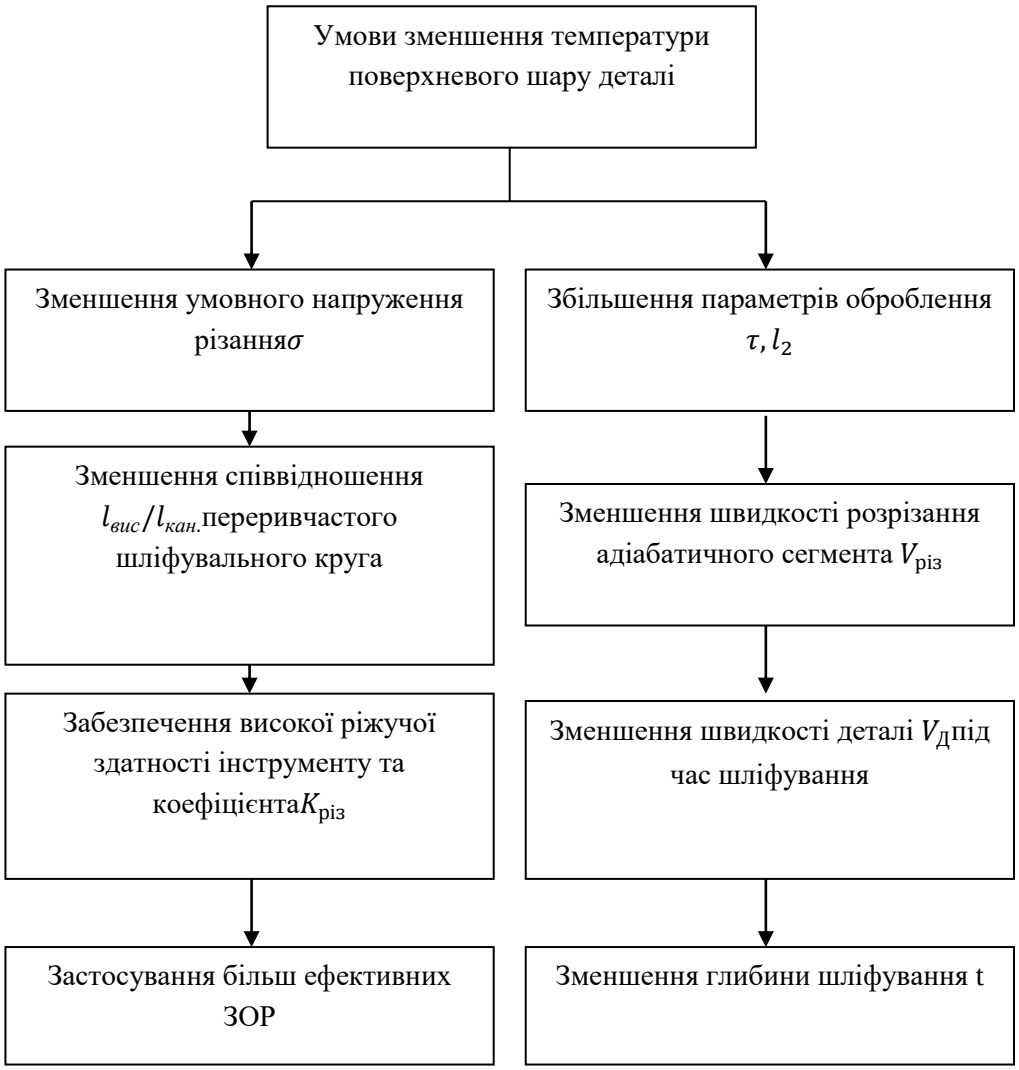


Рис. 5.5. Умови зменшення температури поверхневого шару деталі під час безцентрового переривчастого шліфувального оброблення

Дане рівняння є спрощеним, оскільки швидкість переміщення теплового джерела $V_{\text{різ}}$ залежить від швидкості деталі $V_{\text{д}}$ і глибини шліфування t, тому необхідно скористатися залежністю (2.43), коли $l_1 = t$, так як за даної умови температура приймає максимальне значення:

$$t = \frac{\lambda}{c \cdot p \cdot V_{різ}} \cdot [ln(1 - z) + z] \tag{5.21}$$

Параметр $V_{\text{різ}}$ в залежності (5.21) виразимо за допомогою (5.19):

$$t = -l_2 \cdot \frac{[ln(1-z)+z]+\omega}{z} = \frac{l_2 \cdot \overline{l_1}}{z} \quad (5.22)$$

В результаті було отримано аналітичну залежність для визначення глибини шліфування t . Параметри ω і l_2, які входять в залежність (3.4) регламентовані технологічними умовами. Значення відношення l_1/ω, яке входить в залежність (5.22), (для різних значень ω) наведені в табл. 3.1. З табл. 3 .1 виходить, що відношення l_1/ω більше , чим більший приведений показник температури ω.

Невідому швидкість деталі $V_д$ було визначено за допомогою залежності (5.19), в результаті швидкість $V_{різ}$ виразимо через залежність (3.6):

$$V_Д = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot p \cdot l_2} \sqrt{\frac{2 \cdot R_{кр}}{t}} \quad (5.23)$$

Підставимо в залежність (5.23) залежність (5 .22):

$$V_Д = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot p \cdot l_2} \sqrt{\frac{2 \cdot R_{кр} \cdot z}{l_2 \cdot \overline{l_1}}} \quad (5.24)$$

Порівнюючи залежності (3.41) і (3.43), бачимо, що параметри ω , l_1 l_2 безпосередньо впливають на глибину шліфування t і швидкість деталі $V_д$. Таким чином , розроблена інженерна методика розрахунку оптимальних параметрів режиму шліфування (швидкості деталі та глибини шліфування) з урахуванням вимог до температури та товщини поверхневого шару заготовки, в якому концентрується тепло (товщини дефектного шару деталі).

5.3. Адаптивна система бездефектного шліфування на базі шліфувального автомата SASL5AD

В основу системи адаптивного керування покладена кореляційна залежність між тангенціальною складовою сили різання P_z та температурою шліфування θ для заданих значень технологічних параметрів і режимів різання. Керуючим

чинником в процесі шліфування використовується частота обертання заготовки , яка залежить від частоти обертання ведучого круга $V_{\text{вед}}$. Зменшення частоти обертання деталі призводить до збільшення теплонапруженості в зоні різання заготовки, що супроводжується збільшенням тангенціальної сили різання P_z. (рис . 5.6).

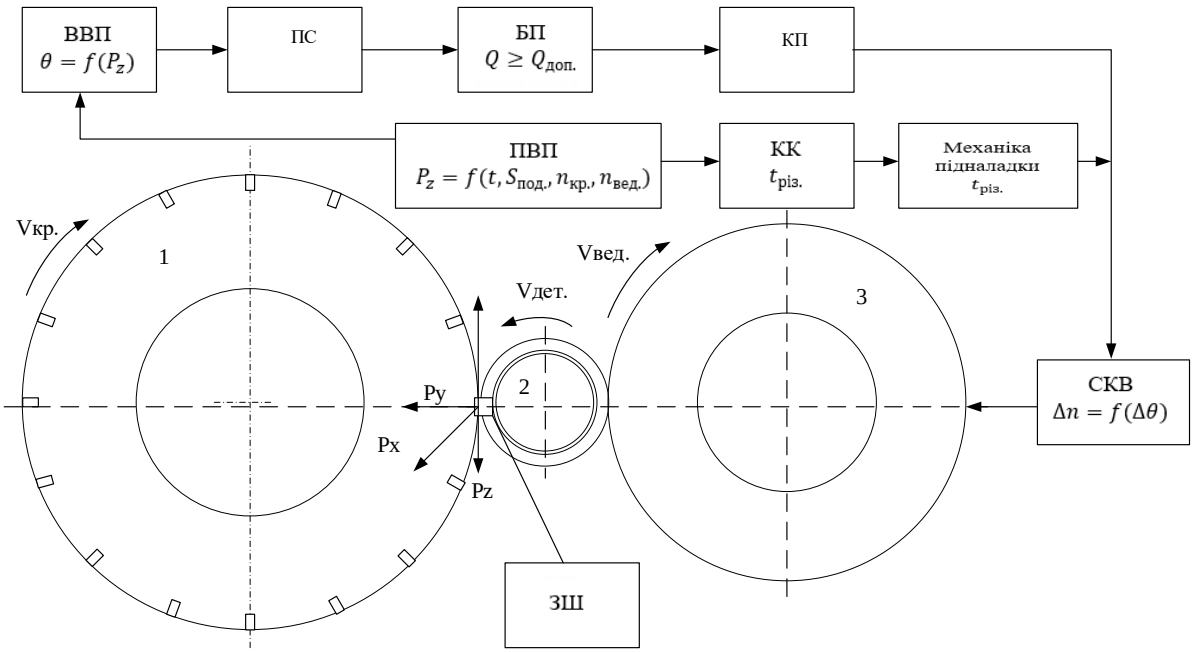


Рис. 5.6. Система адаптивного бездефектного шліфування на базі безцентрово-шліфувального верстату SASL5AD: 1 – шліфувальний круг; 2 – заготовка; 3 – ведучий круг; ЗШ – зона шліфування; ПВП – первинний вимірювальний перетворювач; ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач; ПС – підсилювач сигналу; БП – блок порівняння; КП – керуючий прилад; КК – контролер керування; СКВ – система керування верстатом; Δn – зміна частоти обертання ведучого круга; $\Delta\theta$ – регульована температура; $t_{\text{різ.}}$– глибина шліфування

Коливання тангенціальної сили різання під час шліфування заготовки контролюється за допомогою електронної схеми та високочутливого ватметра, що підключені до приводу головного руху шліфувального верстата. Зміна тангенціальної сили різання супроводжується зміною реактивної потужності приводу головного руху шліфувального верстата, яка фіксується електронним

давачем, після чого сигнал підсилюється і подається на схему керування частотою обертання ведучого круга верстата.

На підставі теоретичних та експериментальних досліджень розроблена функціональна схема системи адаптивного керування процесом шліфування за величиною тангенціальної сили різання, що відповідає певному значенню температури в зоні шліфування, тобто можливо стверджувати, що розроблена система адаптивного керування шліфуванням за величиною допустимої температури, шорсткістю шліфованої поверхні з обмеженням за продуктивністю шліфування. Такий підхід дозволив створити технологію бездефектного оброблення кілець в умовах переналагоджувального підшипникового виробництва.

Застосування абразивного інструменту з переривчастою ріжучою поверхнею та різним значенням зернистості окремих секцій збірного шліфувального круга створює можливості для керування фізико-механічними можливостями шліфованої поверхні. Твердість поверхні після чистового шліфування рівна 58-62 одиниць HRC. Створені умови для бездефектного шліфування сплавів, що схильні до теплових дефектів.

Розроблено алгоритм оперативного визначення параметрів технологічної операції безцентрового шліфування кілець для прогнозування допустимої температури шліфування та розрахунку параметрів інструментального налагодження шліфувального автомата SASL5AD, використання якого , дало можливість підвищити технологічну гнучкість шліфувальних операцій в умовах переналагоджувального виробництва, підвищити продуктивність переналагоджувальних операцій та впровадити технологію бездефектного високопродуктивного безцентрового шліфування.

5.4. Алгоритм визначення параметрів переривчастого абразивного інструменту для контролю температури шліфування

Вхідною інформацією для розрахунку конструктивних параметрів шліфувального переривчастого круга є:

t – глибина шліфування (припуск); b – ширина кільця (довжина зони контакту); $V_{кр}$ – швидкість обертання круга; α – температуропровідність заготовки; $D_{кр}$ – діаметр шліфувального круга; $S_{поз}$ – поздовжня подача заготовки; $V_д$ - швидкість обертання заготовки; $D_к$ – зовнішній діаметр кільця (рис. 5.7).

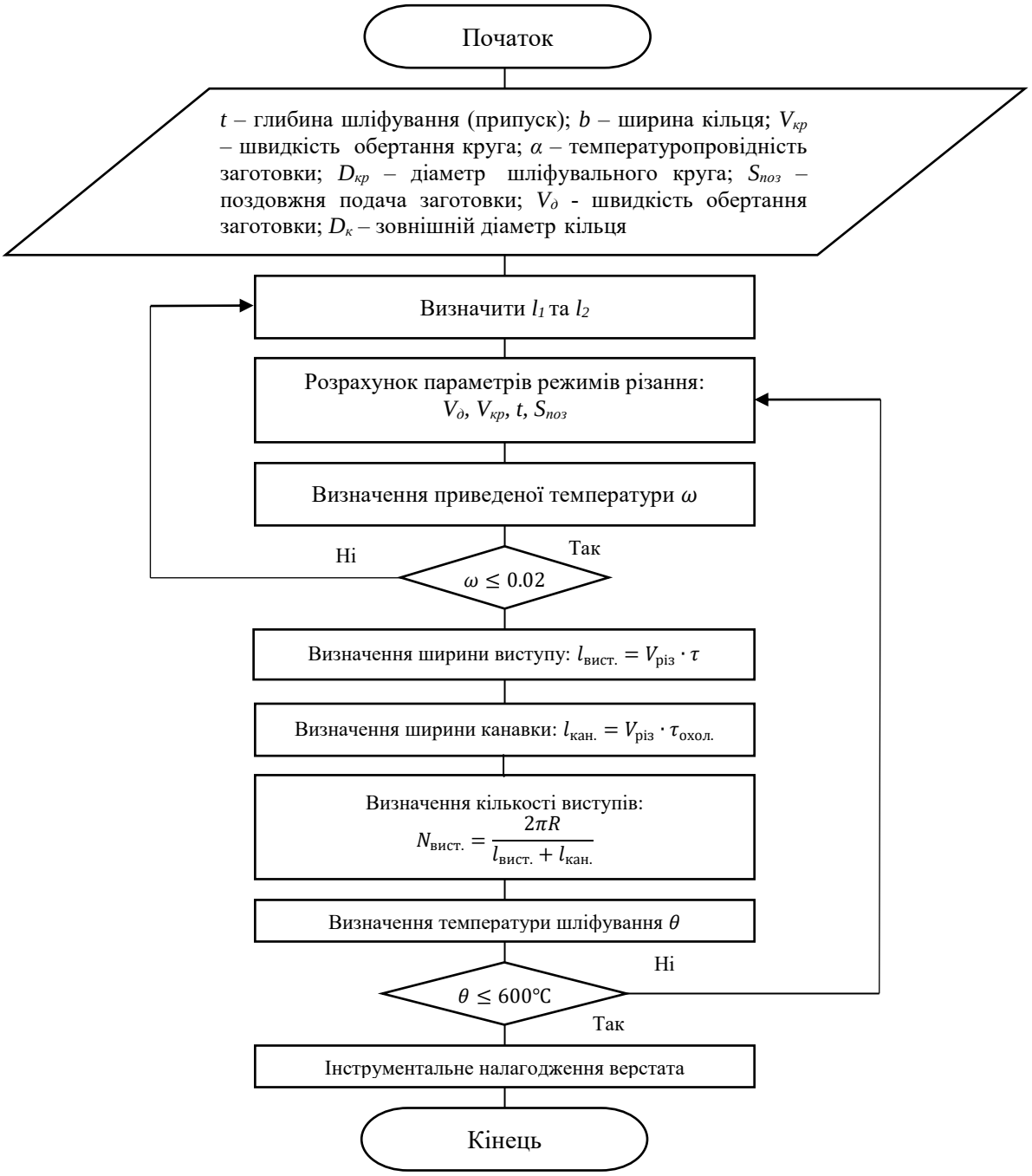


Рис. 5.7. Алгоритм визначення параметрів переривчастого шліфувального круга для контролю температури в зоні шліфування

На підставі робочого креслення вибраного типорозміру кільця визначається операційний та загальний припуск на шліфування зовнішньої циліндричної поверхні. Для конкретної шліфувальної операції визначаються величини l_1 і l_2– довжини адіабатичного сегменту, що відповідають величині припуску на оброблення та товщині тіла кільця після операції шліфування

На наступному етапі визначаються значення режимів різання, а саме: швидкість обертання деталі $V_д$ та шліфувального круга $V_{кр}$, повздовжня подача заготовки $S_{позд}$, глибина різання t.

За формулами розділу 2 та 3 визначається значення показника приведеної температури та критеріїв продуктивності. Після перевірки допустимого значення показника приведеної температури ω , переходимо до визначення геометричних параметрів переривчастого шліфувального круга, таких, як: ширина різального виступу $l_{вис} = V_{кр} \cdot \tau$, ширина та глибина впадини $l_{кан} = V_{кр} \cdot \tau_{охол}$, число секцій збірного шліфувального круга, зернистість кожної секції, співвідношення $l_{кан.}$ впадини до $l_{вис}$ виступу.

Наступним блоком алгоритму є визначення параметрів інструментального налагодження безцентрово-шліфувального верстата для шліфування базових циліндричних поверхонь зовнішніх кілець в умовах переналагоджувального підшипникового виробництва. Для розрахунку параметрів інструментального налагодження використовуємо формули розділів 3, 4.

Умовні позначення та назви параметрів інструментального налагодження верстата:

α – кут повороту ведучого круга для створення руху подачі кілець під час шліфування на прохід;

α' – кут повороту пристрою для рівняння ведучого круга для створення гіперболоїда твірної ведучого круга;

$\Delta\alpha$ – кут різниці між α і α' в залежності від діаметра деталі та діаметра ведучого круга;

γ – кут шліфувального простору для шліфування в «сталому діапазоні»;

λ – кут повороту тримача копірної лінійки для створення конічності ведучого круга;

k – кут повороту поворотних салазок для регулювання паралельності шліфувальної зони;

Δk – кут поправки кута k для суттєвого поворотного переміщення тримача копірної лінійки на кут λ;

H_r – значення відстані опускання осі ведучого круга для регулювання вибраного кута шліфувального простору;

S_v – значення переміщення точки «застою», переміщення найменшого діаметру гіперболоїда ведучого круга в мм від середини (точка повороту) назад або вперед.

5.5. Висновки до розділу

1. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень приведених в розділах 3, 4 розроблена схема системи адаптивного керування процесом шліфування за величиною тангенціальної сили різання, що відповідає певному значенню температури в зоні шліфування, тобто можливо стверджувати, що розроблена система адаптивного керування шліфуванням за величиною допустимої температури, шорсткістю шліфованої поверхні з обмеженням за продуктивністю шліфування. Такий підхід дозволив створити технологію бездефектного оброблення кілець в умовах переналагоджувального підшипникового виробництва з економічним ефектом від впровадження 180 тис. гривень.

2. Розроблена інженерна методика розрахунку оптимальних параметрів режиму шліфування (швидкість деталі і глибина шліфування) з урахуванням обмежень за температурою і товщиною поверхневого шару оброблюваної деталі.

3. Застосування абразивного інструменту з переривчастою ріжучою поверхнею та різним значенням зернистості окремих секцій збірного шліфувального круга створює можливості для керування фізико-механічними властивостями шліфованої поверхні. Твердість поверхні після чистового

шліфування рівна 58-62 одиниць HRC. Створені умови для бездефектного шліфування сплавів, що схильні до теплових дефектів.

4. Розроблено алгоритм оперативного проектування технологічної операції безцентрового шліфування кілець та прогнозування допустимої температури шліфування на шліфувальному автоматі SASL5AD, використання якого створило можливості для підвищення технологічної гнучкості шліфувальних операцій в умовах переналагоджувального виробництва, пришвидшення виконання переналагоджувальних операцій та впровадження бездефектного високопродуктивного шліфування. Виробничими дослідженнями встановлено, що час проектування операцій шліфування скоротився в 2 рази, а час і трудомісткість переналагодження верстата на шліфування іншого типорозміру кільця скоротились на 40%.

5. Розроблений алгоритм проектування технологічних операцій шліфування може використовуватись для створення та функціонування адаптивних систем шліфування інших поверхонь обертання зовнішніх та внутрішніх кілець роликових підшипників в умовах переналагоджувального виробництва, а швидке та оперативне прогнозування параметрів якості шліфованих поверхонь та техніко-економічних показників створює передумови для бездефектного оброблення деталей підшипників в умовах серійного переналагоджувального виробництва

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційні роботі на підставі отриманих науково обгрунтованих результатів розв’язана важлива науково-практична задача створення ефективної технології бездефектного фінішного механічного оброблення поверхонь обертання кілець роликопідшипників в умовах серійного переналагоджувального виробництва за рахунок використання високоефективного переривчастого абразивного інструмента, вдосконалення переналагоджувальних операцій та використання методики прогнозування технологічних показників на стадії проектування технології.

1. Проведено аналіз методів та технологічних схем безцентрового шліфування поверхонь обертання. Визначені параметри інструментального налагодження та режимів шліфування, що впливають на показники якості шліфованих поверхонь та на техніко-економічні показники технологічної операції. Встановлено, що 30% від загальної кількості дефектів, які виникають на безцентрово-шліфувальних операціях оброблення базових поверхонь кілець є наслідком перевищення температури в зоні шліфування, а причинами виникнення температурних дефектів є невідповідність режимів різання та непрогнозованість умов оброблення деталей у зв’язку з чинником багатономенклатурності частопереналагоджуваного виробництва.

2. Проведено аналіз існуючих розрахункових схем шліфування з позиції теплоутворення і встановлені шляхи технологічного керування теплонапруженістю процесу шліфування. Доведено, що ефективним методом зниження теплонапруженості є застосування шліфування переривчастим абразивним інструментом, однак конструктивні параметри та характеристики переривчастих кругів для безцентрового шліфування мають визначатись за результатами теоретичних та експериментальних досліджень.

3. Розроблено математичну модель для визначення умов та способів зменшення температури шліфування на етапі технологічного проектування шліфувальних операцій. Обгрунтовано доцільність використання для

безцентрового шліфування кілець роликопідшипників високопродуктивних переривчастих шліфувальних кругів. Встановлено, що зі збільшенням показника приведеної температури ω для умов безцентрового переривчастого шліфування деталей кількість тепла, яке переходить в стружку, збільшується, наближаючись до 70%, а кількість тепла, що переходить в адіабатичний стержень, зменшується, наближаючись до 30%.

4. Отримано аналітичні залежності для визначення геометричних параметрів переривчастого шліфувального інструменту, таких як зовнішній діаметр шліфувального круга D = 500 мм, число канавок ε = 12, що забезпечує 20% зниження температури в зоні різання. Встановлено, що збільшення кількості канавок шліфувального круга призводить до зменшення температури шліфування, за рахунок зменшення часу контактування ріжучих виступів круга з шліфованою поверхнею. Зростання ширини виступу шліфувального круга $l_{\text{виступ}}$ та зменшення ширини канавки $l_{\text{канавки}}$ до певної міри зумовлює зростання ріжучої здатності шліфувального круга внаслідок збільшення числа активних зерен, які беруть участь в різанні, однак це призводить до зростання контактної температури шліфування. Зменшення відношення $l_{\text{виступ}}/l_{\text{канавки}}$ зумовлює протилежні процеси, однак зниження температури можна досягнути при різному співвідношенні ширини різального виступу та ширини впадини.

Максимальне співвідношення $l_{\text{виступ}}/l_{\text{канавки}}$ = 1 забезпечує рівномірне самозаточування круга та найменше значення температури шліфування. Відношення $l_{\text{виступ}}/l_{\text{канавки}}$, що відповідає 60/1 забезпечує високу зносостійкість шліфувальних кругів, але призводить до збільшення температури шліфування на 20 – 25%.

5. На підставі використання запропонованої збірної конструкції переривчастого шліфувального круга розроблена високоефективна технологія безцентрового шліфування циліндричних поверхонь кілець роликопідшипників з можливістю керуванням зернистістю збірної, робочої , калібрувальної та виходжувальної зони різання. Поєднання різної зернистості в конструкції збірного шліфувального круга дало змогу покращити показники якості

шліфованих поверхонь до Ra 1-1,2 мкм, знизити та стабілізувати температуру в зоні шліфування до 400 °С та вилучити з технологічного процесу шліфування базової поверхні кільця одну операцію напівчорнового шліфування .

6. Експериментально встановлені залежності між температурою шліфування та тангенціальною складовою сили різання P_z і радіальною складовою P_y під час переривчастого шліфування кругами зі значенням числа канавок 12, 24 та 36. Виявлено, що збільшення числа канавок переривчастого шліфувального круга призводить до зменшення складової сили різання P_z та зниження температури шліфування, однак шорсткість поверхні при цьому зростає від 1 ,2 до 2,2 мкм, що допустимо для чорнового та напівчистового абразивного оброблення поверхонь кілець. Встановлені також досить важливі залежності шорсткості шліфованої поверхні та її твердості від режимів оброблення, параметрів шліфувального круга та параметрів налагодження безцентрово-шліфувального верстата. На підставі експериментальних досліджень побудовані поверхні відгуку, які покладені в основу методики пришвидшеного переналагодження безцентрово-шліфувального верстата в умовах переналагоджувального виробництва.

7. Розроблено алгоритм оперативного проектування технологічної операції безцентрового шліфування кілець, прогнозування допустимої температури шліфування та розрахунку параметрів інструментального налагодження шліфувального автомата SASL5AD використання якого, створило можливості для підвищення технологічної гнучкості шліфувальних операцій в умовах переналагоджувального виробництва, пришвидшення виконання переналагоджувальних операцій та впровадження прогресивної технології бездефектного високопродуктивного шліфування. Виробничими дослідженнями встановлено, що час проектування операцій шліфування скоротився в 2 рази, а час і трудомісткість переналагоджування верстата на шліфування іншого типорозміру кільця скоротились на 40%.

8. Розроблено алгоритм оперативного проектування технологічної операції безцентрового шліфування кілець, прогнозування допустимої температури шліфування та розрахунку параметрів інструментального налагодження

шліфувального автомата SASL5AD використання якого, створило можливості для підвищення технологічної гнучкості шліфувальних операцій в умовах переналагоджувального виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаптивное управление металлорежущими станками / [Бронштейн Г.В., Городецкий М.С. и др.]. – М.: НииМаш, 1973. – 227 с.

2. Адаптивное управление технологическими процессами / [Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Протопопов С.П. и др.]. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.

3. Артоболевский И.И. Введение в акустическую динамику машин / И.И. Артоболевский, Ю.И. Боровницкий, М.Д. Генкин. – М.: Наука, 1979. – 296с.

4. Бабаков И.Н. Теория колебаний / И.Н. Бабаков. – М.; Наука, 1968. – 560с.

5. Братчиков А.Я. Способы пропитки абразивных кругов / А.Я . Братчиков // Абразивы: науч.-техн. реф. сб. - М.: НИИмаш, 1974. - Вып.1.

6. Братчиков А. Я. Тепловые процессы при шлифовании импрегнированными абразивными кругами / А. Я. Братчиков // Абразивы: науч.-техн. реф. сб. - М.: НИИмаш, 1974. - Вып.6.

7. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 556 с.

8. Бальмонт В.Б. Вибрации подшипников шпинделей станков / В.Б. Бальмонт, Е.Н. Сарычев Е.Н. – М.: НИИМАШ. – 1984. – 64 с.

9. Билик Ш.М. Макрогеометрия деталей машин. / Ш.М. Билик. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.

10. Бугров Я.С., Никольский С.М. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного. – М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. Лит., 1981. – 448с.

11. Борисов Б.Я. Снижение контактных температур при шлифовании сплава ЖС6К / Б.Я. Борисов, А.К. Цокур А.К. // Вестник машиностроения. – 1969. – №9. – С. 15–17.

12. Бохонский А.И., Мозолевская Т.В. Гашение колебаний при токарной обработке нежестких деталей. / А.И. Бохонский, Т.В. Мозолевская //

Автоматизация gроизодственных процессов в машиностроении и приборостроении. – Львов: Высшая школа, – 1981.– Выпуск 20. – С. 37–41.

13. Брозголь И.М. Влияние финишных операций на долговечность подшипников. (Обзор) / И.М. Брозголь, – М.: НИИНАвтопром, – 1979. – С. 3–22 с.

14. Васин С.А. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учеб. для техн. вузов / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. - 446 с.

15. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. /Ред. В.Н.Челомей (пред.). - М.: Машиностроение, 1980 — Т.З. Колебания машин, конструкций и их элементов/ Под ред. Ф.М.Диментберга и К.С.Колесникова. 1980. 544 е., ил.

16. Вибрация и шум подшипников качения: Обзор / [Бальмот В.Б., Самотин О.Н., Варламов Е.Б., Авдеев А.М.] – М.: Цнинтэиавтопром, 1987. – 125 с.

17. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. - М.: Машиностроение, 1993. - 336 с.

18. Гавриш А.П. Автоматизация технологической подготовки машиностроительного производства / А.П. Гавриш. – К.: Техника, 1982. – 215с.

19. Горбунов Б.И. Уравновешивающие устройства шлифовальных станков / Б.И. Горбунов, В.Г. Гусев. – М.: Машиностроение,1976. – 167с.

20. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. / А.И. Грабченко. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьковском университете, 1985. – 184с.

21. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А.И. Грабченко. – Харьков : Высш. Школа, 1985. – 184 с.

22. Гринюк С.В., Міскевич 0.1. Технологічне керування точністю обробки поверхонь роликопідшипників в автоматизованих системах // Науковий журнал «Комп’терно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво» - Луцьк: Видавництво ЛНТУ. - Вип. 33. - 2018. - С. 56-60.

23. Гринюк С.В., Поліщук М.М. Дослідження впливу режимів різання переривчистими кругами на температуру шліфування кілець роликопідшипників // The 3 th International scientific and practical conference “MAN AND ENVIRONMENT, TRENDS AND PROSPECTS”! (February 10-11, 2020) SH SCW "NEW ROUTE" Tokyo, Japan 2020. 321-327 p.

24. Данильченко Ю.М. Прецизійні шпіндельні вузли на опорах кочення (теорія і практика) / Ю.М. Данильченко, Ю.М. Кузнецов. – Тернопіль – Київ: Економічна думка, 2003. – 344 с.

25. Дегтяренко Н.С. Методика исследования температуры при шлифовании твердого сплава / Н.С. Дегтяренко, И.А. Коменкович // Вопросы заточки инструментов (труды ВНИИ инструмент). М., 1966. – выпуск 2.

26. Демкин Н.Б. Качествоповерхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981, – 244с.

27. Джугурян Т.Г. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / Т.Г. Джугурян, П.А. Линчевский, О.А. Оргиян. – К.: Техника, 2000. – 300 с.

28. Дунин-Барковский И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.И. Карташева.М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

29. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Саратовский университет, 1975. – 127 с.

30. Ефимов В.В. Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании. - Саратов: Издательство Саратовского университета, 1985.

31. Ильницкий И.И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И.И. Ильницкий. – Москва – Свердловск: Машгиз, 1958. – 142 с.

32. Захаренко И.П. Эффективные методы шлифования алмазным инструментом. - М.: НИИМАШ, 1978. - 45 с.

33. Капустин Н.М. Точность обработки при бесцентровом шлифовании. / Н.М. Капустин // Вопросы точности в машиностроении. – М.: Машгиз, 1960, – С. 28– 47.

34. Качествоповерхности при алмазно-абразивной обработке/ [Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий и др.]. – Киев: Наук. думка, 1978. – 244с.

35. Казимирчук А.Ф. Обрабатываемость износостойких покрытий / Сверхтвердые материалы. - 1979. - №2. - С. 51-53.Кащук В.А., Верещагин А.Б. Справочник шлифовщика. - М.: Машиностроение, 1988. — 480 е.: ил. - (Серия справочников для рабочих).

36. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.Н. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.

37. Капанец Э.Ф., Кузьмич К.К., Прибыльский В.И., Тилигузов Г.В. Точность обработки при шлифовании / Под ред. П.И.Ящерицына. - Мн.: Наука и техника, 1987. - 152 с.

38. Кораблев П.А. Точность обработки на металлорежущих станках в приборостроении / П.А. Кораблев. – М.: Машгиз, 1962. – 228 с.

39. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов Ю.К. – Саратов : Изд-во Сарат. Ун-та., 1989. – 160 с.

40. Корсаков В.С. Точность механической обработки / В.С. Корсаков. – М.: Машиностроение, 1971. – 379 с.

41. Корчак С.Н. производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

42. Костецкий Б.И. Тепловые режимы шлифования металлов / Б.И. Костецкий // Вестник машиностроения. – 1947. – №1. – С. 51–53.

43. Костецкий Б.И. Шлифование закаленных сталей / Б.И. Костецкий. – Гостехиздат, 1947. – 155 с.

44. Круги для скоростного шлифования // Режущие инструменты. – 1971. – №45. – С. 14–15.

45. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.

46. Кудинов В.А. Закономерности развития колебаний и волнистости круга и изделия при врезном шлифовании / В.А. Кудинок, Н.Т. Тодоров // Станки и инструмент. – 1970. – №2. – С. 1–3.

47. Кузнецов Ю.М. Теорія технічних систем / Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, С.А. Дубиняк. – Київ – Тернопіль, 1997 – 310 с.

48. Кузьмин П.А. Малые колебания и устойчивость движения / П.А. Кузьмин. – М.: Наука, 1973. – 208 с.

49. Ларшин В.П. Интегрированная технологическая система шлифования сложнопрофильных деталей (на примере резьбошлифования): дис. доктора техн. наук : 05.02.08 / Ларшин Василий Петрович. – Одесса, 1999. – 335 с.

50. Ларшин В.П. Управление температурной погрешностью шага резьбы ходовых винтов при резьбошлифовании / В.П. Ларшин // Сборник трудов конференции «Процессы абразивной обработки». – Волжский, 1999. – С. 132–135.

51. Лебедев В.Г. Автоматическое управление качеством деталей машин при шлифовании / В.Г. Лебедев. – Киев: и-во: Знание, 1981. – 25 с.

52. Лебедев В.Г. Технологические основы управления качеством поверхностного слоя при шлифовании: дис. доктора. тех. наук : 05.02.08. / Лебедев Владимир Георгиевич. – Одесса, 1991. – 478 с.

53. Левин А.Н. Методы автоматического управления уровнем колебаний в металлорежущих станках / А.Н. Левин // Станки и инструмент. – 1973. – №3. – С. 30–32.

54. Левин М.А. Прогнозирование параметров качества при механической обработке деталей / М.А. Левин. – Севастополь: НТО им. А.Н. Крылова, 1984. – 57 с.

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

56. Лоповок Т.С. Волнистость поверхности и ее измерение / Т.С. Лоповок. – М.: Изд-во стандартов, 1973, – 184с.

57. Лурье Т.Б. Шлифование металлов / Т.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 175с.

58. Марчук В.И. Связь параметров волнистости рабочих поверхностей с виброакустическими характеристиками роликоподшипников / В.И. Марчук, В.Ю. Заблоцкий // Высокие технологии: тенденции развития: материалы XIII международного научно-технического семинара, 12–17 сентября 2003 г. – Харьков- Алушта: НТУ ХПИ, 2003. – С. 78–81.

59. Матюха П.Г. Научные основы стабилизации выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействий на рабочую поверхность круга. Автореферат дис. на соискание ученой степени д.т.н., Харьков, 1996. — 48 с.

60. Металлорежущие инструменты: Учебник для вузов по специальностям Технология машиностроения, Металлорежущие станки и инструменты /Г.Н.Сахаров, О.Б.Арбузов, Ю.Л.Боровой и др./ — М.: Машиностроение, 1989. – 328-с.

61. Марчук В.И. Управление параметрами качества рабочих поверхностей колец конических роликоподшипников / В.И. Марчук, В.Т. Михалевич // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: труды 5-й международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК ФЭД, 2002. – С. 127–130.

62. Марчук В.І. Вплив режимів токарної обробки та діаметра заготовки на формування показників якості оброблюваних поверхонь / В.І. Марчук, В.Ю .Денисюк // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2004. – №1 (28). – С. 19–25.

63. Марчук В.І. Вплив технологічних чинників автоматно-токарної операції на величину крокових похибок мікро топографії поверхні, представленої в 3-D системі / В.І. Марчук, В.Ю. Денисюк В.Ю, А.Ч. Собашек // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник за напрямом Інженерна механіка – 2003. – Випуск 13. – С.105–110.

64. Марчук В.І., Равенець Л.М., Гринюк С.В. Технологічне керування теплонапруженістю процесу безцентрового шліфування кілець

роликопідшипників// Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» - Луцьк: Видавництво ЛНТУ. - Вил. 7. - 2015. - С. 87-90.

65. Марчук В.І., Марчук І.В, Гринюк С.В., Сачковська Л.О. Моделювання процесу безцентрового шліфування робочих поверхонь кілець роликопідшипників в умовах серійного виробництва // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки») - Луцьк: Луцький НТУ, 2019. Вип. 66. - С. 234-239.

66. Марчук В.І, Сачковська Л.О., Гринюк С.В. Про вплив температури шліфування на показники якості поверхонь кілець роликопідшипників // Збірник наукових праць IX-тої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» 3-7 лютого 2020 Львів-Плай 120-121с.

67. Марчук В.І., Гринюк С.В., Сачковська Л.О. Динамічна модель процесу шліфування переривчастими кругами // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». - Луцьк: Луцький НТУ, 2020. - №16. - С.33-37.

68. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А.А. Маталин. – М.–Л.: Машгиз, 1956. – 252 с.

69. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А.А. Маталин. – К.: Техника, 1971. – 144 с.

70. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1970. – 318с.

71. Михайлин С.М. Экспериментальное исследование теплонапряженности процесса шлифования (вычислительный и натурный эксперименты). Известия вузов. Машиностроение. 2007. №9.

72. Мишнаевский JI.JI. Износ шлифовальных кругов. — К.: Наук, думка, 1982. — 188 с.

73. Никитин Б.В. Расчет динамических характеристик металлорежущих станков / Б.В. Никитин. – М.: Машгиз, 1962. – 110 с.

74. Новиков Ф.В. Математическое обеспечение САПР ТП шлифования / Ф.В. Новиков, А.А. Якимов // Совершенствование процессов абразивно-алмазной обработки в машиностроении. – Пермь: ППИ, 1987. – С. 21–28.

75. Новиков Ф.В. Теоретические основы высокопроизводительного шлифования кругами из синтетических сверхтвердых материалов: дис. доктора техн. наук : 05.02.08 / Федор Васильевич Новиков. – Одесса, 1993. – 330 с.

76. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при шлифовании. / Ю.К. Новоселов. – Саратов : Изд-во ун-та, 1979. – 231 с.

77. Основы технологии машиностроения / [Кован В.М. и др.]. – М.: Машиностроение, 1965. – 521 с.

78. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. –Л.: Изд-во Ленинград. Ун-та, 1981. – 144 с.

79. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний / Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1971. – 240 с.

80. Патент № 142710 B24B 5/00 Спосіб виготовлення шліфувального круга/ МарчукВ.І., МарчукІ.В., ГринюкС.В., Сачковська Л.О. (Україна). -№ u 2019 11730; Заявл. 09.12.2019; Опубл. 25.06.2020р. Бюл. №12Перель Л.Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор: [Справочник]. – М.: Машиностроение. – 1989. - №4. – С. 130- 134.

81. Петренко В.А. Управління якістю на підприємстві: навчальний Посібник / В.А. Петренко, О.М. Левченко, Є.С. Шубін. – Кіровоград : КДТУ, 2002. – 262 с.

82. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / [К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер и др.] – М.: Мир, 1977. – 447 с.

83. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей / В.А. Прилуцкий. – М.: Машиностроение, 1978, – 136 с.

84. Рагульскис К.М. Вибрации подшипников / Рагульскис К.М., Юркаускас А.Ю. – Л.: Машиностроение, ленинградское отделение, 1985, – 119 с.

85. Равенець Л.М. Вдосконалення системи суперфінішного оброблення поверхонь обертання кілець в технологічному комплексі підшипникового виробництва. Науковий журнал Технологічні комплекси Луцького НТУ № 2 (10) Луцьк.: Вид-во ЛНТУ, 2014.- С.169-174

86. Равенець Л.М., Лук'янчук Ю.А., Ільчук Ю.В. Формування мікропрофілю поверхонь обертання на операціях безцентрового переривчатого шліфування. Збірник наукових праць Перспективні технології та прилади, Випуск № 5 (2), Луцьк.: Вид-во ЛНТУ, 2014.С.74-81

87. Равенець Л.М., Марчук В.І., Марчук С.В., Марчук І.В. Моделювання динаміки процесу безцентрового шліфування кілець роликопідшипників. Збірник наукових праць Перспективні технології та прилади, Випуск № 3, Луцьк.: Вид-во ЛНТУ, 2013.-С.72-78

88. Равенець Л.М., Марчук В.І., Марчук С.В. Моделювання динамічних процесів операцій безцентрового шліфування поверхонь обертання. Збірник наукових праць Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві, Випуск №1(2)– Одеса.: АО Бахва, 2013.- С.154-160

89. Равенець Л.М., Марчук І.В., Марчук С.В. До визначення власних частот шпиндельного вузла безцентрово-шліфувального автомата SASL 5D для шліфування поверхонь обертання кілець роликопідшипників Збірник наукових праць Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві, Випуск № 1(2) – Одеса.: АО Бахва, 2013.- С

90. Равенець Л.М., Марчук В.І., Приступа С.О., Вплив технологічних чинників на умови стружкоутворення та параметри ефективності безцентрово-шліфувальних операцій. Міжнародний збірник наукових праць Донецького національного технічного університету Машиностроение и техносфера XXI века, Том 2, Донецьк-2013.- С.142-149

91. Равенець Л.М., Марчук В.І., Марчук С.В. Моделювання зв'язків конструкторсько-технологічних чинників з показниками технологічних операцій підшипникового виробництва. Науковий журнал Технологічні комплекси Луцького НТУ № 2 (8) Луцьк.: Вид-во ЛНТУ, 2013.- С.86-90

92. Равенець Л.М., Марчук В.І., Приступа С.О., До моделювання експлуатаційних характеристик роликопідшипників Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета

Прогрессивные технологии и системы машиностроения №1(47), Донецьк-2014.- С.201-206

93. Равенець Л.М., Марчук В.І., Марчук С.В. Моделювання динамічної системи безцентрового шліфування робочих поверхонь роликопідшипників Збірник наукових праць Перспективні технології та прилади, Випуск № 4 (1), Луцьк.: Вид-во ЛНТУ, 2014.С.74-81

94. Равенець Л.М., Марчук В.І., Моделювання віброакустичних характеристик роликопідшипника Наукові нотатки Міжвузівський збірник, Луцького НТУ, Випуск 44 (січень-березень) Луцьк.: Вид-во ЛНТУ, 2014.- С.174-178

95. Равенець Л.М., Марчук В.І., Марчук С.В., Прогнозування віброакустичних параметрів підшипника на етапі виготовлення кілець. Збірник наукових праць Сучасні технології в машинобудуванні, Випуск № 9, Харків.:Видавничий центр НТУ ХП» -2014.С.190-198

96. Равенець Л.М., Марчук В.І., Про вплив технологічних чинників суперфінішної обробки кілець роликопідшипників на вихідні параметри процесу Збірник наукових праць Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві, Випуск № 3(8), Одеса.: АО Бахва, 2015.- С.83-89

97. Равенець Л.М., Марчук В.І., Ештеіві Абдулсалам Мусбах Про вплив параметрів якості робочих поверхонь кілець на експлуатаційні характеристики високоточних роликових підшипників. Збірник наукових праць Перспективні технології та прилади, Випуск № 6 (1), Луцьк.: Вид-во ЛНТУ, 2015.С.49-53

98. Равенець Л.М., Марчук В.І., До моделювання процесу безцентрового шліфування доріжок кочення внутрішніх кілець роликопідшипників Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету, Якімова О.В. м. Одеса, ОНПУ,2015.С.231-237.

99. Раванець Л. М. Підвищення ефективності технології шліфування кілець роликопідшипників в умовах переналагоджувального виробництва : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Раванець Леся Миколаївна – Луцьк, 2015. – 207 с.

100. Резников А.Н. Основы расчета шлифовальных процессов в технологических расчетах : [Учебное пособие] / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – Куйбышев : КуАИ, 1986. – 153 с.

101. Решетов Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение. 1986. – 336 с.

102. Рыжов Э.В.Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко. – Киев: Наук. думка, 1994. – 181 с.

103. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

104. Свирщев В.И. К вопросу исследования динамики прерывистого шлифования / В.И. Свирщев, В.И. Потемкин // Методы чистовой обработки. – Киев, 1975. – С. 22-23.

105. Свирщев В.И. Некоторые вопросы аналитического исследования процесса прерывистого шлифования / В.И. Свирщев, В.И. Потемкин // Технологические методы повышения качества и долговечности деталей машин. – Пермь, 1975. – №165. – С. 163-168.

106. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167с

107. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник/ Под ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. - М.: Машиностроение, 1986. — 352с., ил.

108. Спришевский А.И. Подшипники качения / А.И. Спришевский. – М.: Машиносвтроение, 1968. – 632 с.

109. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

110. Струтинський В.Б. Математичне моделювання металорізальних верстатів / В.Б. Струтинський, П.П. Мельник. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 570с.

111. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки : [підручник]. – Житомир : ТІТІ, 2001. – 612с.

112. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

113. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. –320 с.

114. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. –208 с.

115. Сухарев В.М., Денисов А.С. „Двустороннее шлифование‖. - К.: Техника, 1976.-80 с.

116. Талиан Г. Успехи в исследовании вибраций подшипников качения и снижение их уровня / Г. Талиан, О. Густавсон // Механика. – 1965. – №6. – С. 31–52.

117. Тараненко В.А. Технологические способы и средства повышения точности обработки нежестких деталей / В.А. Тараненко, В.Г. Митрофанов, М.Г. Косов. – М.: ВНИИТЭМР, 1987. – Выпуск 2. – 64 с.

118. Тейлор Д.И. Идентификация дефектов подшипников с помощью спектрального анализа / Д.И. Тейлор // Труды американского общества инженеров механиков: Конструирование и технология машиностроения. – 1980. – №2. – С. 1–8.

119. Теоретические основырезания и шлифования материалов : [Учебное пособие] / [А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов]. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450с.

120. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. / [А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др.] ; под. ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

121. Технологические основы обеспечения качества машин. / [К.С. Колесникова, Г.Ф. Баландина, А.М. Дальского и др.] : под ред. К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 25 с.

122. Технологические основы обеспечения качества машин / [Колесников К.С. и др.]. – 1990. – 256 с.

123. Технология машиностроения / [А.В. Якимов, В.Н. Царюк, А.А. Якимов и др.]. – Одесса : Астропринт, 2001. – 601 с.

124. Технология машиностроения: [Учебник] / А.В. Якимов, А.А. Якимов, В.П. Ларшин, В.Н. Свирщев. – Пермь, 2002. – 563 с.

125. Торлин В.Н. Финишные операции в гибком автоматизированном производстве / В.Н. Торлин, А.С. Баталин. – К.: Техника, 1987. – 208 с.

126. Управление процессом шлифования / [А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирщев, В.П. Ларшин]. – К.: Техніка, 1983. – 184 с.

127. Унянин А.Н. Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ульяновск, 2006.

128. Филимонов Л.И. Стойкость шлифовальных кругов / Л.И. Филимонов. Л.: Машиностроение. 1973. – 300 с.

129. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344с.

130. Эльянов В.Д. Эксплуатационные возможности шлифовальных кругов / В.Д. Эльянов. – М.: НИИМАШ, 1976. – 55 с.

131. Якимов А.А. Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес / А.А. Якимов. Одесса : «Астропринт», 2003. – 456 с.

132. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

133. Якимов А.В. Обоснование маршрута обработки и размерный анализ технологических процессов : [Учебное пособие] / А.В. Якимов, П.А. Линчевский, А.А. Якимов. – К.: НМК. ВО, 1993. – 128 с.

134. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 172 с.

135. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов, Ю.А. Бояршинов и др. // Вестник машиностроения. – 1967. – №3. – С. 76-78.

136. Якимов А.В. Теоретическое обоснование условий повышения эффективности технологии машиностроения / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков // Вісник інженерної академії України. – Киев, 2000. – С. 13–16.

137. Якимов О.В. Високопродуктивне шліфування / О.В. Якимов, Ф.В. Новиков. – К.: ІНТМ, 1995. – 180с.

138. Якімов О.В., Марчук В.І., Лінчевський П.А., Якімов О.О., Ларшин В.П. Технологія машино- та приладобудування: Підручник. – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2005. – 712 с.

139. Яценко С.М. Підвищення ефективності технології фінішної обробки деталей пар тертя поршневих насосів / Автореферат дис.. на здобуття наукового ступеня к. т. н./ Одеса – 2006

140. Ящерицин П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей / П.И. Ящерицин. – Минск : наука и техника, 1971. – 212 с.

141. Ящерицын П.И. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев.–Минск : Наука и техника, 1972. – 480 с.

142. Ящерицын П.И. Технологическая и эксплуатационная наследственность и еѐ влияние на долговечность машин / П.И. Ящерицин, Ю.В. Скорыпин. – Минск : Наука и техника, 1978. – 119 с.

143. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицин, Э.В. Рыжов, В.И. Аверчиков. – Минск : Наука и техника, 1977. – 255 с.

144. Hryniuk S. Investigation of the influence of cutting modes and intermittent grinding wheel parameters on the grinding temperature of the roller bearings // «Modern engineering and innovative technologies» - Karlsruhe, Germany, March 2020. Issue №11 Partl.-С. 17-21.

145. Marchuk V., Hrynjuk S., Hrysjuk I. An analysis of intercommunications of technological factors is with indexes of quality of polishing operations // Technological Complexes. - Lutsk, 2017 - №1(14) -P. 36-43.

146. Marchuk V., Hryniuk S, Dzhuhuryan T. Simulation of dimensional accuracy in an automated grinding system of surfaces of rotation // «Перспективні технології та прилади». Збірник статей. Випуск 14. м. Луцьк, червень 2019 р. - Луцьк: Луцький НТУ, 2019. - С. 82-87.

147. Marchuk V.I., Marchuk I.V., Dzhuguryan T.G., Grinyuk S.V., Karpyuk V.O**.** On the influence of operating characteristics of grinded wheels on the quality indicators of grinded parts // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». - Луцьк: Луцький НТУ, 2020. - №17. - С.86-92.

148. Ravenets L., Marchuk I., Grunyuk S., Eshteivi A. Technological processing system superfinishing raceways rings roller bearings // Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади» - Луцьк: Видавництво ЛНТУ. - Вип. 9. - 2016. - С. 121-125.

149. Ravenets L., Mechanism of origin of structural vibrations in conical roller bearings / Świć Antoni,Marchuk V.I., Marchuk S.V., Ravenets L.M. // ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH JOURNAL - 2014, nr 23, vol. 8, s. 68-72 [MNiSW: 5].

ДОДАТКИ

ШЛІФУВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ КІЛЬЦЯ ЗОВНІШНЬОГО

3010.01141.0

КАРТА ПЕРЕБІГУ ПРОЦЕСУ

10141.0

Аркуш: 1 | Аркушів: 1

КІЛЬЦЕ ЗОВНІШНЄ | 6-7512А.01 | 1700

Розробив	
Перевірив	
Погодив	
Технолог ШСЦ	
Н.контр.	
Затвердив	

Операція											
Назва	ЗАГОТОВКА	ТОРЦЕШЛІФУВАННЯ		БЕЗЦЕНТРОВЕ ШЛІФУВАННЯ		ВНУТРІШНЄ ШЛІФУВАННЯ В КАНАЛІ № 8, 10			МИТТЯ І КОНТРОЛЬ	
	Поступлення після термічної обробки	Торці		Зовнішня циліндрична поверхня		Доріжка кочення			Миття	Інженерний контроль поступлення на сортування і складання
		попереднє	кінцеве			чорнове	чистове	доводка		
№		110	120	125,130	135,140	150	155	160	162	
Обладнання		3344AE	3344AE	SASL 5AD	SASL 5AD	SIW-4B	SIW-4B	SIW-4B		
Клас характеристик			SC, CC	SC	SC, CC	SC,CC	SC, CC	SC, CC	SC	SC, CC
Блок-схема перебігу процесу		O	O	O	O, L	O	O, L	O, L, S		
Схема обробки	24,35±0,08; Ø89,02±0,20; Ø110,50±0,20	24,0 +0,120 +0,070	24,0 -0,050 -0,100	Ø110,0 +0,100 +0,070; Ø110,0 +0,270 +0,230	Ø110,0 -0,002 -0,011; Ø110,0 +0,030 +0,010	Ø90,236 -0,150 -0,200	Ø90,236 -0,018 -0,056	Ø90,236 -0,004 -0,046		24,0 -0,150; Ø90,236 -0,054; 15°06'34"; Ø110,0 -0,015
Документація	20203.0	60141.1		60141.2	60141.3	60141.4	60141.5	60141.6		20103.0
Оснастка		42241.0								
Режими правки		3010.71241.0								
Транспортування		3010.01204.0								
Креслення	7512А.01									

Умовні позначення:
- ○ - операція;
- O - контроль оператором;
- L - контроль в лабораторії;
- S - сортування;
- транспортні зв'язки в автоматичній лінії;
- транспортування;
- тимчасове зберігання;
- SC - важлива характеристика;
- CC - критична характеристика;

Інв.№ правд.	Підпис	Дата									
								Зм.	Зам.	Пов.	Підпис	Дата

Додаток 1 РР 415.1.1.2-3010-0

Додаток Б
Патент на корисну модель

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 142710

СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА

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

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.06.2020.**

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України Д.О. Романович

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ * Ідентифікаційний код 37508596 *

Продовж. дод. Б

УКРАЇНА (19) UA (11) 142710 (13) U

(51) МПК (2020.01)
B24B 5/00

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2019 11730
(22) Дата подання заявки: 09.12.2019
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.06.2020
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.06.2020, Бюл.№ 12

(72) Винахідник(и):
Марчук Віктор Іванович (UA),
Марчук Ірина Вікторівна (UA),
Гринюк Сергій Васильович (UA),
Сачковська Людмила Олексіївна (UA)

(73) Власник(и):
Марчук Віктор Іванович,
вул. Селищна, 39, м. Луцьк, Волинська обл., 43007 (UA),
Марчук Ірина Вікторівна,
просп. Молоді, 6, кв. 3, м. Луцьк, Волинська обл., 43024 (UA),
Гринюк Сергій Васильович,
вул. Шкільна, 10, кв. 5, м. Ківерці, Волинська обл., 45200 (UA),
Сачковська Людмила Олексіївна,
вул. 8-го Березня, 2-а, смт Колки, Маневицький р-н, Волинська обл., 44681 (UA)

(74) Представник:
Кужель Емма Вікторівна, реєстр. №144

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА

(57) Реферат:

Спосіб виготовлення шліфувального круга включає отримання набору попередньо підібраних за геометричними параметрами та фізико-механічними властивостями абразивних дисків з центральними отворами у кожному із них для кріплення на консолі шпинделя шліфувального верстату. Диски жорстко з'єднують між собою, утворюючи з них багатосекційний циліндр. На поверхню кожної секції наносять пази гвинтоподібної траєкторії. При цьому фізико-механічні властивості дисків вибирають так, щоб кількість абразиву і зернистість поступово зменшувалися від початкової до останньої секції. Пази у кожній наступній секції виконують у протилежному напрямку до попередньої. Ширину кожної секції та ширину паза гвинтоподібної траєкторії, а також кількість пазів і кут їх нахилу вибирають при попередньому експрес-аналізі матеріалу деталей, призначених для шліфування.

UA 142710 U

Продовж. дод. Б

UA 142710 U

Корисна модель належить до галузі верстатобудування, а саме до засобів виробництва абразивного інструменту, призначеного до безцентрової обробки з чорновою та чистовою включно, поверхонь деталей, виконаних у вигляді тіла обертання, зокрема трубчастих виробів, циліндрів, кілець підшипників та ін.

Аналіз сучасного стану металообробки доводить, що для підвищення продуктивності застосовують обробний інструмент з високоміцних метало- і металокерамічних твердих сплавів, переносячи акцент на підвищення швидкості обробки деталей до 3000-5000 м/хв. у технологічних процесах точіння, фрезерування, свердління, зенкування. Проте, при шліфуванні швидкості обробки не перевищують 25-30 м/хв., хоча шліфування у технологіях машинобудування є найбільш поширеним методом обробки. Так, наприклад, у моторобудуванні частка шліфувальних операцій перевищує 25 %, причому вона постійно збільшується із створенням і застосуванням нових матеріалів моторів, обробка яких металевим інструментом утруднена чи унеможливлена взагалі. На високу значимість і впливову роль шліфування у технологіях металообробки вказує і те, що шліфування є не лише методом фінішної або передфінішної обробки, але й процесом безпосереднього зняття технологічних припусків матеріалу із заготовок до заданого розміру при врахуванні поширених сучасних методів виготовлення заготовок із мінімізацією припусків на обробку при штампуванні деталей, литва у оболонкові форми, по моделях, що виплавляють і випаровують і т. ін.

Підвищення продуктивності процесу шліфування шляхом застосування високих швидкостей обробки абразивним інструментом через фізико-механічну природу останнього не може бути здійснено. Завдання щодо підвищення продуктивності шліфування фахівці спромагаються вирішувати шляхом покращення якості абразивного інструменту та його конструкцій. З огляду на це, пропозиції з покращення якості, вдосконалення технологічності виготовлення та конструкцій абразивних інструментів є актуальним завданням нинішнього часу.

Відомий збірний шліфувальний круг, спосіб виготовлення якого полягає у створенні його абразивних фрагментів, що виконують у формі сегментів, які закріплюють в осьовому напрямі за допомогою пружних елементів, які встановлюють у проміжках на виконаному у вигляді металевого багатогранника корпусу [патент RU № 2147275, МПК B24D 5/08, 1999р.].

Недоліком такого способу виготовлення є низька технологічність процесу виготовлення та обмеженість функцій отриманого шліфкруга, тому що такий шліфкруг здатний обробляти лише внутрішні поверхні деталей з невеликим діаметром, а шліфувати ним зовнішню поверхню деталей, типу тіла обертання, взагалі неможливо.

Найбільш близьким аналогом корисної моделі є збірний шліфувальний круг, який виготовляють із абразивних дисків з отворами у центрі, та які жорстко з'єднують між собою у багатосекційний циліндр і закріплюють його на консолі шпинделя шліфувального верстату, при цьому на поверхню циліндра у кожній секції наносять гвинтоподібні пази, а кількість абразиву та його зернистість поступово зменшують від початкової до останньої секції, крім того, геометричні параметри збірного шліфкруга та нахил гвинтоподібних пазів обирають адекватними виду операцій шліфування. [патент України на корисну модель № 119694, МПК B24B 5/00, 2017 р.]

Суттєвим недоліком такого способу виготовлення шліфувального круга є те, що гвинтовий паз виконаний як цілісна гвинтова траєкторія, що погіршує відведення решток крихт абразиву таких деталей, що виготовляють за таким способом, крім того у шліфувальному кругу утворюється в процесі шліфування недостатньо гарна циркуляція охолоджуючої рідини, що сприяє підвищенню температури у зоні шліфування, чим у цілому знижує продуктивність процесу шліфовки.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищити продуктивність процесу шліфування, покращити шорсткість відшліфованих поверхонь шляхом зміни технологічних операцій виготовлення шліфкруга.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі виготовлення шліфувального круга, що включає отримання набору попередньо підібраних за геометричними параметрами та фізико-механічними властивостями абразивних дисків з центральними отворами у кожному із них для кріплення на консолі шпинделя шліфувального верстату, диски жорстко з'єднують між собою, утворюючи з них багатосекційний циліндр, а на поверхню кожної секції наносять пази гвинтоподібної траєкторії, причому фізико-механічні властивості дисків вибирають так, щоб кількість абразиву і зернистість поступово зменшувалися від початкової до останньої секції, згідно з корисною моделлю, пази у кожній наступній секції виконують у протилежному напрямку до попередньої, при цьому ширину кожної секції та ширину паза гвинтоподібної траєкторії, а також кількість пазів і кут їх нахилу вибирають при попередньому експрес-аналізі матеріалу деталей, призначених для шліфування.

Спосіб здійснюють таким чином.

Продовж. дод. Б

Заздалегідь виготовлені абразивні диски з центральним отвором у кожному підбирають за однаковими діаметрами. Деталь, що призначена для шліфування, піддають експрес-аналізу для наступного визначення інших (крім діаметра) параметрів абразивних дисків, а саме: їх ширини. За результатами цього ж експрес-аналізу визначають, а якими саме фізико-механічними властивостями слід складати диски для утворення багатосекційного круга (визначають зернистість та кількість абразиву у них).

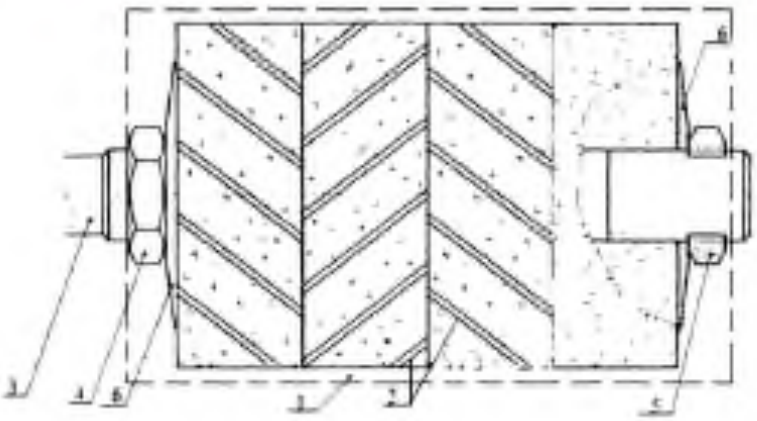
При складанні багатосекційного циліндра (шліфувального круга) зернистість кожного наступного диска зменшують, при цьому у останньому диску зернистість мінімізують або встановлюють останній диск гладким (без абразивних зерен) для виконання цим диском функції вигладжування поверхні деталей, призначених для оброблення шліфуванням. Крім цього, враховують перед нанесенням гвинтоподібних пазів їх кількість, ширину, глибину та потрібний кут нахилу. Після виконання операції з виготовлення зазначених пазів, здійснюють з'єднання абразивних дисків у циліндричну конструкцію за допомогою метизів.

Корисна модель пояснюється кресленням, на якому представлено шліфувальний круг, виконаний за способом, що пропонується. Шліфувальний круг 1 містить зазвичай II-IV секції, на поверхні кожної секції виконані гвинтоподібні пази 2. Шліфкруг змонтований на шпинделі 3 шліфувального верстату. Між собою секції шліфкруга 1 жорстко скріплені метизами 4, 5, а для підвищення надійності кріплення на бічних сторонах першої і останньої секції змонтовані шайби 6.

Отже, виготовлений шліфкруг надає можливість підвищити продуктивність шліфування, оптимізувати відведення решток абразиву та крихт відшліфованих деталей завдяки новому розташуванню пазів на поверхні абразивних дисків, покращити розподіл охолоджуючої речовини, чим знизити температуру у зоні шліфування та чим збільшити довговічність абразивного інструменту. Сукупність нових суттєвих ознак сприяє покращенню якості шліфування у цілому, надає можливість отримати оброблені таким шліфкругом деталі з заданою шорсткістю.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб виготовлення шліфувального круга, що включає отримання набору попередньо підібраних за геометричними параметрами та фізико-механічними властивостями абразивних дисків з центральними отворами у кожному із них для кріплення на консолі шпинделя шліфувального верстату, диски жорстко з'єднують між собою, утворюючи з них багатосекційний циліндр, а на поверхню кожної секції наносять пази гвинтоподібної траєкторії, причому фізико-механічні властивості дисків вибирають так, щоб кількість абразиву і зернистість поступово зменшувалися від початкової до останньої секції, який відрізняється тим, що пази у кожній наступній секції виконують у протилежному напрямку до попередньої, при цьому ширину кожної секції та ширину паза гвинтоподібної траєкторії, а також кількість пазів і кут їх нахилу вибирають при попередньому експрес-аналізі матеріалу деталей, призначених для шліфування.



Додаток В

Визначення тангенціальної сили різання P_z

Процес безцентрового шліфування кілець

Безцентрово-шліфувальний верстат SASL5AD (загальний вигляд)

Робоча зона безцентрово-шліфувального верстату SASL5AD

Дослідження на шорсткість шліфованої поверхні

Додаток Г

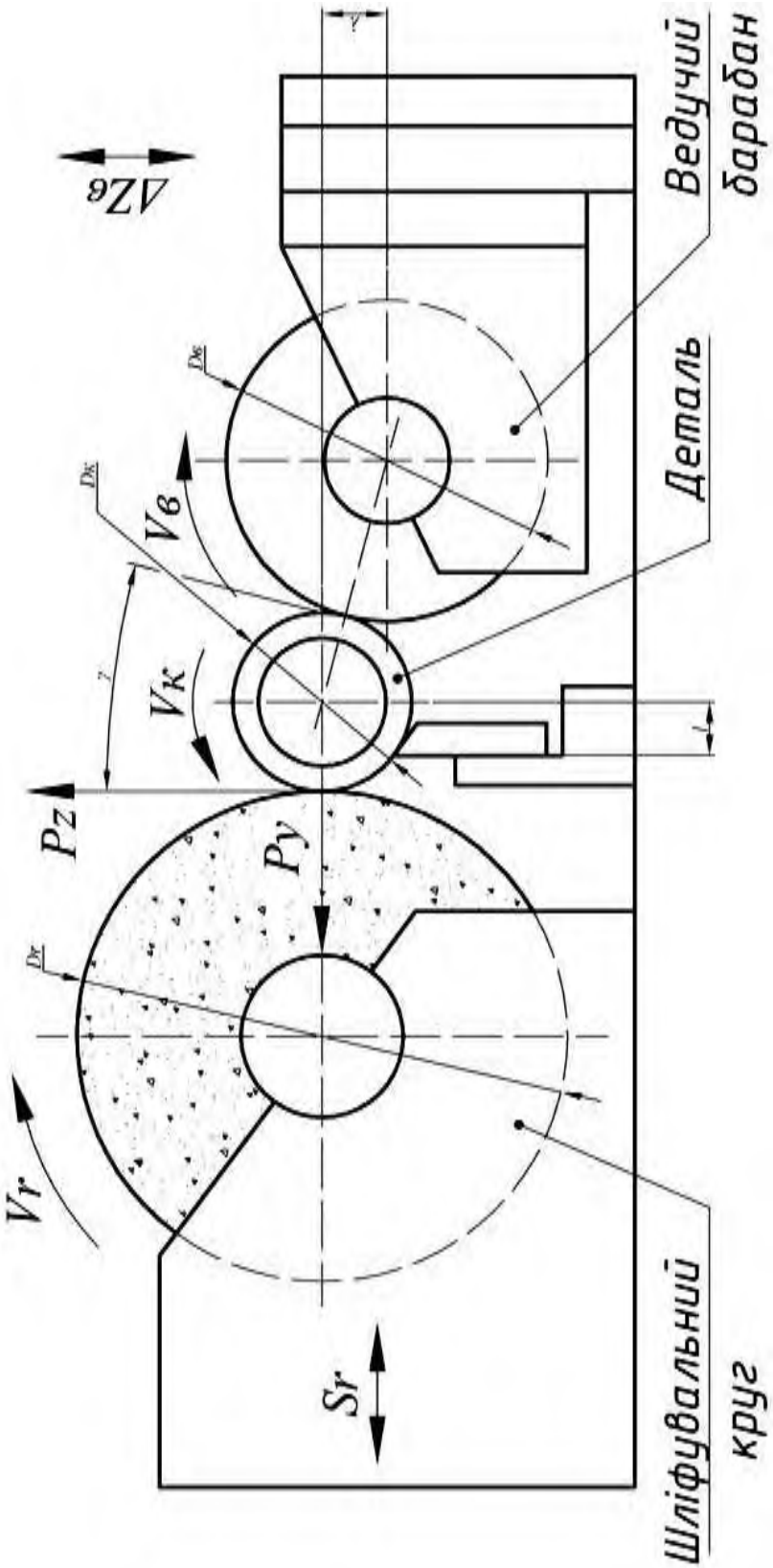



Схема безцентрового шліфування ролика роликопідшипника на автоматі SASL5AD