

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ліщенко Наталя Володимирівна

УДК 621.923.1:621.833

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОФІЛЬНОГО
ЗУБОШЛІФУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК
НА ОСНОВІ АДАПТАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ

05.02.08 – технологія машинобудування

13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

—  — Н.В. Ліщенко

Науковий консультант: Ларшин Василь Петрович, доктор технічних наук,
професор

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Ліщенко Н.В. Підвищення продуктивності профільного зубошліфування на верстатах з ЧПК на основі адаптації елементів технологічної системи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (13 – механічна інженерія). – Одеська національна академія харчових технологій МОН України, Одеса, 2018.
– Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2018.

У вступі наведено обґрунтування вибору теми дослідження, сформульовано мету, завдання і методи дослідження. Описано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію матеріалів дисертації, публікації, що відображають її зміст, виділено особистий внесок здобувача.

У першому розділі «Аналіз стану питання, мета і завдання дослідження» виконано аналіз трудомісткості технологічного процесу виготовлення зубчастих коліс. Встановлено значна доля затрат часу на зубошліфувальну операцію (від 40 до 70 %). Тому задача підвищення продуктивності зубошліфування є актуальною. Розглянуто технологічні можливості існуючих методів зубошліфування. Встановлено, що найбільше застосування одержали два методи зубошліфування: метод профільного шліфування і метод обкату черв'ячним кругом. Виконано аналіз методів визначення припуску на зубошліфування, в тому числі при його вимірюванні на етапі налагоджування зубошліфувального верстата з ЧПК. Встановлено, що припуск на зубошліфування є змінна величина по периферії зубчастого колеса і не розглядається як сукупність систематичної і випадкової компонент. Отже немає відповідної теорії визначення припуску на основі детермінованої і стохастичної моделей, які відповідають зазначеним компонентам припуску. Крім того, ці моделі можна було б використовувати при визначенні величини відведення шліфувального круга при обмеженій кількості дискретних

вимірів припуску. Температура зубошліфування є одним з факторів, що обмежує продуктивність операції. Відомо два підходи до визначення температури шліфування: феноменологічний – на основі рішення диференціального рівняння теплопровідності Фур'є (аналітичний метод визначення температури) і імітаційне моделювання температурного поля – на основі комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів.

Як математичне забезпечення підсистем проектування, моніторингу і технологічної діагностики операції профільного зубошліфування, які працюють у режимі реального часу перевагу має перший підхід, тому що вимагає меншого часу для ухвалення рішення. Другий підхід є більш трудомістким і може використовуватися для обґрунтування правомірності першого. У цій області не проведено аналіз і класифікація наявних аналітичних рішень адекватних тепловим явищам при зубошліфуванні. Ці рішення повинні бути подібні за початковими і граничними умовами. Не проведено дослідження наступності цих рішень, встановлення критеріїв наступності та діапазонів їх зміни для умов профільного зубошліфування.

При аналізі математичних моделей для визначення температурного поля при шліфуванні у роботі використовувався феноменологічний підхід до визначення температури шліфування для тривимірного, двовимірного і одновимірного температурного поля на основі диференціального рівняння теплопровідності Фур'є. Для підсистем проектування, моніторингу і технологічної діагностики профільного зубошліфування необхідно знайти умови заміни більш складних рішень (двовимірне і тривимірне) теплофізичної задачі на більш просте (одновимірне) без істотної втрати точності визначення температури. Для підтвердження правомірності цих умов доцільно застосувати метод імітаційного моделювання за допомогою відповідних комп'ютерних програм.

Крім того, необхідно описати температуру шліфування в широкому інтервалі зміни частоти і скважності імпульсів теплового потоку, починаючи від макроциклів шліфувальних кругів з штучно нарізаними западинами до мікроциклів шліфування високопоруватими кругами. Такий підхід у літературі не

розглянуто і становить інтерес для вибору режимів шліфування за температурним критерієм і для обґрунтування характеристик високопоруватих кругів, які використовуються при профільному зубошліфуванні і дозволяють підвищити продуктивність операції. Для оцінки ефективності операції зубошліфування на етапах виробництва і його підготовки використовується ряд параметрів: Q_w ($\text{мм}^3/\text{с}$), Q'_w ($\text{мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})$), V_w (мм^3), V'_w ($\text{мм}^3/\text{мм}$). Необхідно встановити зв'язок цих параметрів з температурою шліфування і зносом шліфувального круга. Виконано аналіз систем моніторингу і технологічної діагностики як інформаційних елементів технології профільного зубошліфування на верстатах з ЧПК, які дозволяють забезпечити вихідні параметри зубчастих коліс.

На підставі проведеного аналізу сформульовані мета і завдання досліджень.

В другому розділі «Теоретичний аналіз продуктивності профільного зубошліфування на верстаті з ЧПК» наведено методологію наукових досліджень, яка включає три напрямки вивчення технологічної системи зубошліфування: моделювання, оптимізація і керування. Ці напрямки характеризують досліджуваний об'єкт як систему, що має параметри: вхідні, стану і вихідні. На основі теоретико-імовірнісного і частотного підходів розроблено методи визначення припуску на зубошліфування, які дозволяють визначати максимальне значення припуску по периферії зубчастого колеса. Встановлено, що за результатами вимірювання, припуск на зубошліфування містить постійну z_0 і змінну Δz складові. Відповідно до теоретико-імовірнісного підходу розглянуто змінну складову припуску Δz , припускаючи наявність у ній систематичної періодичної $\Delta z_{\text{сист}}$ і випадкової аперіодичної $\Delta z_{\text{вип}}$ компонент. Запропоновано метод імітаційного моделювання припуску на основі віртуальних приладів, які формують сигнал, який містить систематичну та випадкову компоненти припуску. Розроблено стохастичну і детерміновану моделі припуску для визначення максимального припуску за результатами його вибіркового дискретних вимірів. Скорочення числа вимірів, яке є ресурсом підвищення продуктивності операції, повинно бути обґрунтовано і досліджено через оцінні функції, перша з яких являє собою суму квадратів різниць відліків екстремальних значень припуску,

знайдених за обмеженою і максимальною кількістю вимірів, друга – різниця порядкових номерів западин з максимальним припуском, які знайдені за обмеженою і максимальною кількістю вимірів. Розроблено номограми з вибору числа вимірів припуску на етапі налагодження зубошліфувального верстата з ЧПК. Досліджено ряд параметрів для оцінки ефективності процесу: Q_w , Q'_w , V_w , V'_w . При аналізі схеми профільного зубошліфування може бути знайдена аналогія зі схемою профільного прямокутного шліфування за обсягом матеріалу, що видаляється в одиницю часу. Розгляд цієї аналогії дозволив сформулювати і довести теорему про еквівалентний прямокутний профіль, який при тій же глибині різання t_{i+1} має такий самий за площею перетин зрізу $S_{i+1} = W_{a(i+1)} t_{i+1}$, де $W_{a(i+1)}$ – активна ширина профілю. Розроблено методику визначення активної ширини $W_{a(i+1)}$ еквівалентного прямокутного профілю. Проведений теоретичний і експериментальний аналіз дозволив сформулювати і довести теорему вирівнювання припуску, відповідно до якої вирівняні ліворуч і праворуч екстремальні значення припуску (мінімальні, максимальні або різниці максимумів і мінімумів тощо) не залежать від місця розташування початкової западини, від якої починають вимірювання припуску по двох сторонах.

В розділі 3 «Розробка наукових основ прикладної теплофізики зубошліфування» виконано дослідження температурного поля при зубошліфуванні на основі використання феноменологічного підходу до визначення температури від рухливого плоского джерела: прямокутного тривимірного, смугового двовимірного і напівобмеженого одновимірного. Показано, що кривизну евольвентного профілю можна не враховувати. Знайдено області зони контакту шліфувального круга і деталі, в яких результати визначення температури відрізняються не більш ніж на 10 %.

Обґрунтовано використання рішення одновимірного диференціального рівняння теплопровідності для технологічного проектування і технологічної діагностики процесу шліфування в тому числі з урахуванням охолоджувальної дії МОР. На основі цього рішення розроблено єдину математичну модель

температурного циклу шліфування, що містить етапи нагрівання і примусового охолодження при граничних умовах другого і третього роду, відповідно. Досліджено вплив MOP на температуру шліфування і її розподіл по глибині поверхневого шару з урахуванням постійної і змінної температури MOP. Розроблено математичну модель для визначення температури макро- і мікропереривчастого шліфування, яка дозволяє виконати оптимізацію частоти і скважності макро- і мікроімпульсів теплового потоку за критерієм найменшої температури переривчастого шліфування при однаковій середній щільності імпульсного теплового потоку, яка характеризує роботу шліфувального круга. На основі теорії макропереривчастого шліфування проф. Якимова О.В. при додатковій вимозі постійності середньої щільності імпульсного теплового потоку показана тенденція зменшення температури шліфування по мірі збільшення кількості «ріжучих виступів» (N) і зменшення скважності ($1/s$) імпульсів теплового потоку. Це обумовлює правомірність заміни макропереривчастих шліфувальних кругів на мікропереривчасті високопоруваті шліфувальні круги.

В розділі 4 «Експериментальні дослідження параметрів стану технологічної системи абразивної обробки» наведено експериментальні дослідження звичайних і високопоруватих шліфувальних кругів. Встановлено вплив режимів на потужність і питому роботу шліфування, а також на щільність теплового потоку з обліком пружних віджаттів при шліфуванні. Відповідно до прийнятої методології активного експерименту на процесі-аналогу (плоскому шліфуванні), визначали параметри, які характеризують експлуатаційні характеристики звичайних і високопоруватих шліфувальних кругів. За результатами цього експерименту встановлено перевагу високопоруватих кругів за їх експлуатаційними характеристиками у порівнянні зі звичайними кругами. Тому при зубошліфуванні використані аналогічні круги, які замовлені та виготовлені для верстата з ЧПК Höfler RAPID 1250. Експериментально апробовано і досліджено реальний процес зубошліфування звичайними і високопоруватими шліфувальними кругами. Встановлено, що при однакових режимах зубошліфування високопоруваті круги (золь-гель корунд, електрокорунд, монокорунд) в порівнянні зі звичайним кругом

(електрокорунд) забезпечують кращі експлуатаційні характеристики за кількістю правок, потужністю зубошліфування, рівню сигналу акустичної емісії.

Для підтвердження правомірності використання розробленої теорії переривчастого шліфування для високопоруватих кругів виконано дослідження топографії поверхні цих кругів на мікроскопі УИМ-21. Знайдено усереднені розміри ріжучих ділянок (l_1) і пор (l_2) між ними для високопоруватих кругів. Для досліджуваних кругів отримано усереднені параметри N і s . Встановлено, що знайдені параметри N і s відповідають інтервалу знижених температур шліфування в отриманій теоретичній залежності.

Виконано імітаційне моделювання температурного поля в середовищі COMSOL Multiphysics. Встановлено, що максимальні значення температури і щільності теплового потоку розташовані в верхній частині евольвентного профілю зуба і не співпадають по висоті зуба, причому максимум температури розташовано нижче максимуму щільності теплового потоку. Вивчено перехідний процес формування температурного поля навколо рухомого теплового джерела і встановлено час теплового насичення. Підтверджується можливість заміни рухомого (3D) джерела на нерухомий (2D) при $H \geq 4$ і $H/L \leq 1$ ($H/L = 0,85$), так як максимальні поверхневі температури близькі (різниця не перевищує 0,7 – 4,03 %) в інтервалі зміни швидкості теплового джерела (осьової подачі) від 1 м/хв до 12 м/хв.

Встановлено, що найбільший вплив охолодження на максимальну поверхневу температуру призводить к її зниженню на 7 %. Імітаційне моделювання підтвердило можливість заміни швидкості теплового джерела в три- і двовимірному рішенні часом його дії в одновимірному рішенні (1D), а також дозволило визначити кількість ділянок в зоні контакту евольвентної поверхні, розташованих по висоті зуба.

Встановлено, що оптимальна кількість ділянок з можливих варіантів: 1, 2, 3, 6 і 9 складає 3 з щільностями теплового потоку, усередненими на цих ділянках за своїми миттєвими значеннями. Тобто, в центрі цих 3-х ділянок для розрахунку температури можна користуватися одновимірним рішенням.

В розділі 5 «Розробка теоретичних передумов для визначення режимів зубошліфування» виконано дослідження із проектування технологічної операції і розробці відповідної підсистеми автоматизованого проектування. Для цього виконано аналіз структури циклу зубошліфування на верстаті з ЧПК. Елементами структури циклу є кількість етапів і робочих ходів у кожному з етапів, послідовність обробки западин, послідовність виконання вимірювальних циклів, кількість правок на кожному з етапів тощо. Автоматизований цикл зубошліфування включає наступні етапи: вимірювання припуску по периферії зубчастого колеса, властиво, зубошліфування, проміжні вимірювання вихідних параметрів зубчастого колеса (довжина загальної нормалі, індивідуальна похибка кроку, накопичена похибка кроку, радіальне биття, загальна похибка профілю, повна похибка лінії зуба тощо), проміжна правка шліфувального круга і остаточне вимірювання вихідних параметрів зубчастого колеса. До числа параметрів, які обумовлюють температуру профільного зубошліфування, відносяться миттєві глибини шліфування: нормальна t_n і вертикальна t_v . Оскільки при дослідженні теплових явищ при зубошліфуванні необхідно враховувати одночасно t_v і t_n , то необхідно знати їхнє відношення, що дозволяє знаходити одну із цих глибин при відомій іншій. Розроблено методику розрахунку миттєвих значень щільності теплового потоку і середніх значень температур профільного зубошліфування, яка дозволяє визначати температуру на поверхні на декількох ділянках евольвентного профілю шліфувального круга шляхом усереднення миттєвих розрахункових значень щільності теплового потоку по площі цих ділянок. Розроблено методику визначення режимів зубошліфування з використанням питомої інтенсивності шліфування Q'_w , яку попередньо задають на чорновий, напівчистовий і чистовий етапи обробки і яка пов'язана з температурою шліфування T_H . Призначають максимально можливу осьову подачу V_f . Знаючи Q'_w і питому роботу шліфування A_{num} , які визначають на етапі випробування шліфувальних кругів, обчислюють температуру T_H і порівнюють її з фіксованим критичним значенням T_{KP} . Якщо $T_H < T_{KP}$, то обчислюють бездефектну глибину шліфування t_v із рівняння

$Q'_w = t_v \cdot V_f$. В протилежному випадку ($T_H > T_{KP}$), значення параметра Q'_w зменшують до бездефектного рівня. Встановлено, що для усунення накопичення тепла на третьому чистовому етапі зубошліфування, при відомому виді і способі подачі МОР, можна керувати величиною коефіцієнта теплообміну α_h , величиною вихідної температури МОР $\varphi(\tau_c)$ і режимами зубошліфування (t_v і V_f), а також застосуванням холостих робочих ходів (без набору глибини шліфування).

В розділі 6 «Розробка підсистем автоматизованого проектування, моніторингу і технологічної діагностики» представлено теоретичні передумови для розробки убудованих підсистем проектування, моніторингу і технологічної діагностики операції і способи, які враховують індивідуальні особливості зубчастого колеса при керуванні процесом. Розроблено структурні схеми підсистем проектування, моніторингу і технологічної діагностики. Крім параметрів Q'_w і V'_w запропоновано використовувати A_{num} і T_H , так як вони визначають якість поверхневого шару деталей і входять у склад математичного забезпечення розробленої підсистеми автоматизованого проектування. Запропоновано спосіб вирівнювання припуску, який, по-перше, дозволяє знайти налагоджувальну западину, яка після центрування шліфувального круга в цій западині, забезпечує вирівнювання припуску по периферії зубчастого колеса, і, по-друге, знайти западину з максимальним припуском, в яку при налагодженні на зубошліфувальному верстаті позиціонують шліфувальний круг, і в якій фіксують координату фактичного торкання шліфувального круга і зубчастого колеса після відводу шліфувального круга на величину зафіксованої різниці між найбільшим припуском і припуском у налагоджувальній западині. Розроблено методику дворівневого розрахунку режимів зубошліфування. На першому рівні задають інтервали зміни параметрів Q'_w і V'_w на кожному з етапів шліфування; на другому рівні для обраних інтервалів Q'_w і V'_w визначають режими зубошліфування: глибину різання t_v і осьову подачу V_f з обліком питомої роботи A_{num} і температури T_H . Розроблено спосіб визначення інтервалу і моменту правки шліфувального круга в залежності від його фактичної роботи, яку визначають за

кількістю його фактичних торкань. Це дозволяє врахувати індивідуальний розподіл припуску на бічних сторонах западин ЗК в технології профільного зубошліфування.

Ключові слова: продуктивність операції, адаптація, профільне зубошліфування, технологічна система, якість поверхневого шару, припуск на зубошліфування, математична модель припуску, температура зубошліфування, режими зубошліфування, діагностика операції.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Ларшин В.П. Экспериментальное исследование технологических смазок при сверлении / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, Е.А. Трифонова // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2009. – Вып. 2(32). – С. 31 – 36.

2. Лищенко Н.В. Технологія ресурсвідновлюваної обробки в машинобудуванні / Н.В. Лищенко // Наукові праці Одеської нац. акад. харч. технологій. – Одеса, 2009. – Вип. 36. – Том 2. – С. 283 – 287.

3. Лищенко Н.В. Определение жесткости элементов технологической системы / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, С.Н. Макаров // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. Технічні науки. – Харків, 2010. – Вип. 106. – С. 81 – 92.

4. Ларшин В.П. Анализ ресурса стойкости режущего инструмента / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.Н. Макаров // Вісник нац. техніч. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування». – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – Вип. 59. – С. 101 – 106.

5. Ларшин В.П. Компьютерная обработка экспериментальных данных / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, А.П. Рыбалко, Е.А. Трифонова // Міжвуз. збірник «Наукові нотатки». – Луцьк, 2010. – Вип. 29. – С. 103 – 106.

6. Лищенко Н.В. Определение температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании / Н.В. Лищенко // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. Технічні науки. – Харків, 2011. – Вип. 115. – С. 136 – 143.

7. Лищенко Н.В. Модель температурного цикла шлифования для технологической диагностики процесса / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Вісник

Харк. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. Технічні науки. – Харків, 2011. – Вип. 118. – С. 185 – 193.

8. Лищенко Н.В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на температуру шлифования / Н.В. Лищенко // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2011. – Вып. 2(36). – С. 80 – 86.

9. Лищенко Н.В. Анализ способов определения припуска на механическую обработку / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, С.Н. Макаров // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2011. – Вып. 1(35). – С. 36 – 42.

10. Лищенко Н.В. Влияние принудительного охлаждения на температуру шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2012. – Вып. 2(39). – С. 86 – 92.

11. Лищенко Н.В. Оптимизация геометрических параметров прерывистых шлифовальных кругов / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Вісник нац. техніч. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ». – 2012. – Вип. 65. – С. 110 – 117.

12. Лищенко Н.В. Определение температуры при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Міжвуз. збірник «Наукові нотатки». – Луцьк, 2013. – Випуск 40. – С. 150 – 158.

13. Lishchenko N.V. Nonstationary and discontinuous grinding temperature determination / N.V. Lishchenko, V.P. Larshin // Вісник нац. техніч. ун-ту України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ». – 2013. – № 67. – С. 137 – 142.

14. Lishchenko N.V. Nonstationary and interrupted grinding temperature determination / N.V. Lishchenko, I.A. Ryabenkov, V.P. Larshin // Резание и инструменты в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. – Вып. 85. – С.191–201.

15. Рыбалко А.П. Системы технологической диагностики и адаптивного управления для станков с ЧПУ / А.П. Рыбалко, Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПИ», 2015. – Вип.1 (25). – С. 150 – 161.

16. Лищенко Н.В. Спектральный анализ при измерении параметров шероховатости и волнистости фрезерованной поверхности / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, Ф.С. Сабилов // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 10. – С. 222 – 234.

17. Лищенко Н.В. Частотные характеристики профилограммы поверхности и вибрации при ее обработке / Н.В. Лищенко // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 1(25). – С. 94 – 108.

18. Лищенко Н.В. Определение интенсивности зубошлифования на основе аналитического уравнения эвольвенты / Н.В. Лищенко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 11. – С. 137 – 149.

19. Лищенко Н.В. Оптимизация профильного зубошлифования на станке с ЧПУ и системой измерения припуска / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, В.В. Нежебовский // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 1 (26). – С. 50 – 61.

20. Лищенко Н.В. Разделение профиля поверхности на систематическую и случайную составляющие / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Резание и инструменты в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 86. – С. 62 – 73.

21. Ларшин В.П. Исследование технологической системы зубошлифования / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Перспективні технології та прилади. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – Вип. 10. – С. 104 – 114.

22. Ларшин В.П. Мониторинг и технологическая диагностика на станках с ЧПУ / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 1(27). – С. 86 – 98.

23. Лищенко Н.В. Визначення режимів зубошліфування за температурним критерієм / Н.В. Лищенко // Міжвуз. збірник «Наукові нотатки». – Луцьк, 2017. – Вип. 60. – С. 147 – 155.

24. Лищенко Н.В. Определение припуска на зубошлифование по его дискретным измерениям / Н.В. Лищенко // Перспективні технології та прилади. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – Вип. 11. – С. 168 – 175.

25. Lishchenko N. V. Profile Gear Grinding Temperature Reduction and Equalization / Lishchenko N.V., Larshin V.P. // Journal of Engineering Sciences, Sumy, 2018. – Volume 5. – Issue 1 (2018). – pp. A 1 – A 7.

26. Лищенко Н.В. Разработка имитационной модели припуска на основе теоретико-вероятностного подхода / Н.В. Лищенко // Резание и инструменты в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 88. – С. 124 – 135.

27. Lishchenko N. Theoretical-probabilistic model for defining the gear grinding stock allowance / N. Lishchenko // Вісник ТНТУ: зб. наук. праць. – Тернопіль: НТУ «ХПІ», 2018. – Вип. 1(89). – С. 89 – 99.

28. Ліщенко Н.В. Дослідження наступності аналітичних рішень для визначення температури шліфування / Н.В. Ліщенко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – №1 (43). – С. 78 – 87.

29. Ліщенко Н.В. Визначення температури профільного зубошліфування / Н.В. Ліщенко // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського: збірник наукових праць. – Кременчук: КрНУ, 2018. – Вип. 1 (108). – С. 100 – 108.

30. Пат. 86096 України, МПК В24 В 51/00 Спосіб керування переривчастим шліфуванням / Н.В. Ліщенко, В.П. Ларшин, А.В. Мочуляк. – № u 2013 08515; заявл. 08.07.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23. – 8 с.: іл.

31. Пат. 86823 України, МПК С21D 10/00. Спосіб механічної обробки металів різанням / Н.В. Ліщенко, В.П. Ларшин. – № u 2013 09201; заявл. 22.07.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 3 с.: іл.

32. Пат. 88351 України, МПК В24В 49/00. Спосіб визначення температури шліфування / Н.В. Ліщенко, В.П. Ларшин. – № u 2013 12258; заявл. 21.10.2013; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 5. – 4 с.

33. Пат. 89290 України, МПК В24В 51/00. Спосіб визначення глибини різання при багатопрхідному шліфуванні / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин. – № u 2013 14345; заявл. 09.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. – 6 с.

34. Пат. 119835 України, G01В 5/20 (2006.01). Спосіб контролю зубчастих коліс перед зубошліфуванням / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин. – № u 201703853; заявл. 19.04.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19/2017.

35. Лищенко Н.В. Влияние теплообмена с охлаждающей средой на температуру шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив – 2011: сб. статей Междунар. научн.-техн. конф., Волгогр. Гос. архит.-строит. ун-т, ВИСТех ВолГАСУ. – Волгоград: ВолГАСУ, 2011. – С. 130 – 133.

36. Лищенко Н.В. Определение температуры шлифования при периодическом тепловом потоке / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Вестник УГАТУ. – Уфа, 2013. – Т. 17, № 8(61). – С. 117 – 122.

37. Лищенко Н.В. Температура при шлифовании прерывистыми и высокопористыми кругами / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – Тольятти, 2015. – № 3-1(33-1). – С. 75 – 83.

38. Лищенко Н.В. Технологическая диагностика сверления на станках с ЧПУ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, Р.Р. Башаров // СТИН № 6, Москва, 2015. – С. 36 – 40.ë

39. Ларшин В.П. Теоретический анализ методов наладки зубошлифовального станка с ЧПУ / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: Материалы VI Всероссийской межвуз. научн.-техн. конф., 24-26 февраля 2016 р. – Уфа: УГАТУ, 2016. – С. 190 – 197.

40. Ларшин В.П. Выравнивание припуска по профилю при наладке на зубошлифование методом копирования / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях

металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы VI Всероссийской межвуз. научн.-техн. конф., 24-26 февраля 2016 г. – Уфа: УГАТУ, 2016. – С. 181 – 189.

41. Ларшин В.П. Методология исследования технологической системы шлифования / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // СТИН № 3, Москва, 2018.– С. 14 – 15.

42. Лищенко Н.В. Температурное поле при шлифовании с учетом влияния СОЖ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Новые и нетрадиц. технологии в ресурсо – и энергосбережении: Мат. научн.-техн. конф., 19-22 сентября 2011 г. – К.: АТМ Украины, 2011. – С. 106 – 110.

43. Лищенко Н.В. Определение температуры прерывистого шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин В.П., А.В. Якимов // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2012. – Вып. 2(39). – С. 80 – 85.

44. Лищенко Н.В. Определение температуры прерывистого шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Физические и компьютерные технологии: Труды 18 междунар. научн.-техн. конф., 5-6 декабря 2012 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2012. – С. 108 – 113.

45. Ларшин В.П. Планирование многофакторного эксперимента с учетом взаимодействия факторов / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Новые и нетрадиц. технологии в ресурсо – и энергосбережении: Мат. научн.-техн. конф., 22-24 мая 2013 г. – К.: АТМ Украины, 2013. – С. 66 – 69.

46. Лищенко Н.В. Определение температуры шлифования для оптимизации процесса / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, Р.А. Бережной // Новые и нетрадиц. технологии в ресурсо – и энергосбережении: Мат. научн.-техн. конф., 22-24 мая 2013 г. – К.: АТМ Украины, 2013. – С. 100 – 102.

47. Лищенко Н.В. Настройка станков при зубошлифовании по методу копирования / Н.В. Лищенко, А.Н. Ковальчук, В.П. Ларшин // Физические и компьютерные технологии: Труды 21 междунар. научн.-техн. конф., 24-25 декабря 2015 г. – Харьков. – Д.: ЛИРА, 2015. – С. 39 – 45.

48. Лищенко Н.В. Анализ распределения припуска по профилю впадины при зубошлифовании / Н.В. Лищенко, В.В. Нежебовский, В.П. Ларшин // Физические и компьютерные технологии: Труды 21 междунар. науч.-техн. конф., 24-25 декабря 2015 г. – Харьков. – Д.: ЛИРА, 2015. – С. 45 – 48.

49. Лищенко Н.В. Выравнивание припуска по профилю при зубошлифовании методом копирования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Физические и компьютерные технологии: Труды 21 междунар. науч.-техн. конф., 24-25 декабря 2015 г. – Харьков. – Д.: ЛИРА, 2015. – С. 144 – 150.

50. Лищенко Н.В. Теория выравнивания припуска по профилю при зубошлифовании профильным кругом / Н.В. Лищенко // Физические и компьютерные технологии: Труды 21 междунар. науч.-техн. конф. 24-25 декабря 2015 г. – Харьков. – Д.: ЛИРА, 2015. – С. 150 – 152.

51. Лищенко Н.В. Определение производительности профильного шлифования на станке с ЧПУ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.Н. Ковальчук // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПШ», 2016. – Вип. 11. – С. 150 – 162.

52. Ларшин В.П. Профильное шлифование зубчатых колес высокопористыми абразивными кругами / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.В. Рябченко, В.В. Нежебовский, Г.В. Середа // Оборудование и инструмент, 2016. – № 5 /190/. – С. 20–23.

53. Ларшин В.П. Исследование технологической системы профильного зубошлифования / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, А.Н. Ковальчук // Фізичні і комп'ютерні технології: Матеріали ХХІІ міжнар. наук.-техн. конф., 7-9 грудня 2016 р. – Харків. – Д.: ЛІРА, 2016. – С. 202 – 207.

54. Ларшин В.П. Теоретико-вероятностный и частотный подходы в технологическом анализе / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, В.В. Нежебовский // Фізичні і комп'ютерні технології: Матеріали ХХІІ міжнар. наук.-техн. конф., 7-9 грудня 2016 р. – Харків. – Д.: ЛІРА, 2016. – С. 208 – 212.

55. Лищенко Н.В. Расчет плотности теплового потока и температуры на разных участках эвольвентного профиля при зубошлифовании / Н.В. Лищенко,

В.П. Ларшин // Фізичні і комп'ютерні технології: Матеріали XXII міжнар. наук.-техн. конф., 7-9 грудня 2016 р. – Харків. – Д.: ЛПА, 2016. – С. 212 – 216.

56. Лищенко Н.В. Определение мгновенной глубины зубошлифования на основе аналитического уравнения эвольвенты / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Фізичні і комп'ютерні технології: Матеріали XXII міжнар. наук.-техн. конф., 7-9 грудня 2016 р. – Харків. – Д.: ЛПА, 2016. – С. 217 – 221.

57. Лищенко Н.В. Оптимизация числа измерений припуска по впадинам зубчатого колеса / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Проблеми розвитку регіону: промисловий і економічний аспект: всеукраїнська наук.-техн. конф., 2-3 червня 2016 р.: тези доповідей. – Первомайськ: ППВ НУК, 2016. – С. 17 – 20.

58. Лищенко Н.В. Испытания высокопористых шлифовальных кругов на плоскошлифовальном станке / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, С.В. Рябченко // Новые и нетрадиц. технологии в ресурсо- и энергосбережении: мат. научн.-техн. конф., 21-23 сентября 2016 г. – О.: ОНПУ, 2016. – С. 111 – 115.

59. Лищенко Н.В. Методы оптимизации технологической операции зубошлифования на станке с ЧПУ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.Н. Ковальчук // Новые и нетрадиц. технологии в ресурсо- и энергосбережении: мат. научн.-техн. конф. 21-23 сентября 2016 г. – О.: ОНПУ, 2016. – С. 105 – 108.

60. Ларшин В.П. Профильное шлифование высокопористыми кругами / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.В. Рябченко // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: зб. наук. праць – О.: АО Бахва, 2016. – Вип. 2(13). – С. 121 – 127.

61. Лищенко Н.В. Определение припуска на зубошлифование / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць. – О.: Наука і техніка, 2016. – Вип. 2(13). – С.130 – 137.

62. Лищенко Н.В. Определение структуры припуска на зубошлифование / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Новые и нетрадиц. технологии в ресурсо- и энергосбережении: Мат. научн.-техн. конф., 20-22 сентября 2017 г. – О.: ОНПУ, 2017. – С. 92 – 95.

63. Ларшин В.П. Испытания высокопористого шлифовального круга / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.В. Рябченко // Новые и нетрадиц. технологии в ресурсо- и энергосбережении: мат. научн.-техн. конф., 20-22 сентября 2017 г. – О.: ОНПУ, 2017. – С. 84 – 88.

64. Лищенко Н.В. Зубошлифование высокопористыми кругами на станке с ЧПУ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.Н. Ковальчук, В.В. Нежебовский // Новые и нетрадиц. технологии в ресурсо- и энергосбережении: мат. научн.-техн. конф., 20-22 сентября 2017 г. – О.: ОНПУ, 2017. – С. 88 – 92.

65. Ларшин В.П. Имитационное моделирование припуска / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Резание и инструменты в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 88. – С. 107 – 117.

ABSTRACT

Lishchenko N.V. Profile grinding productivity increasing on CNC machines on the basis of grinding system elements adaptation. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences on specialty 05.02.08 – Manufacturing engineering (13 – Mechanical engineering). – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2018. – Kharkiv National University «Kharkiv Polytechnic Institute» Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

A research topic choice reasoning is given in the introduction as well as the purpose, tasks and methods of the research are formulated. The scientific novelty and practical value of the obtained results are described. The data on testing materials of the dissertation, publications reflecting its content, personal contribution of the applicant are given.

In section 1 «Analysis of the status of the question, the purpose and problems of the study», an analysis of the gears production technological process laboriousness is made. The significant amount of time spent on grinding operation (from 40 up to 70%) is established. Therefore, the task of increasing the productivity of the gear grinding is actual. Existing grinding methods technological possibilities are considered.

It is established that the only two methods of gear grinding are the most used: discontinuous profile and continuous generating ones. The analysis of the methods of determining gear grinding stock, including ones when measuring it at the stage of adjustment of the CNC grinding machine is performed. It is established that the stock is a variable value along the periphery of the gear and is not considered as a totality of systematic and random components. That is why there is no appropriate theory for the stock determining which based on the deterministic and stochastic models that correspond to the specified components of the stock. In addition, these models could be used to withdraw the grinding wheel with the stock limited discrete measurements numbers of the stock. The grinding temperature is one of the factors which limit the productivity of the operation.

Two approaches to determining the temperature of grinding are known: phenomenological or temperature determination analytical method on the basis of the differential Fourier heat conductivity equation solution and temperature field simulation on the basis of computer simulation by the finite element method.

As a mathematical support of CAD, monitoring and technological diagnostics subsystems for profiled grinding operations which are working in real time, the advantage has the first approach, because it requires less time to make a decision. The second approach is more labor intensive and can be used to justify the legality of the former. In this area, the analysis and classification of available analytical solutions that are adequate to thermal phenomena during tooth grinding is not carried out. These decisions should be similar to each other as for the initial and boundary conditions. There was no research on the continuity of these solutions as well as the establishment of continuity criteria and their ranges for conditions of profile grinding.

In analyzing mathematical models for determining the temperature field during grinding, a phenomenological approach to determining the grinding temperature for a three-, two-, and one-dimensional temperature field was used on the basis of a Fourier' differential heat conductivity equation. For subsystems of CAD, monitoring and technological diagnostics of profile gear grinding it is necessary to find the conditions for the replacement of more complex solutions (two- and three-dimensional) of the thermophysical problem to a simpler (one-dimensional) without a significant loss of accuracy of temperature determination. To confirm the legality of these conditions, it is advisable to apply the simulation model with the help of appropriate computer programs.

Besides it is necessary to describe the grinding temperature in a wide range of changes in the frequency and intensity of the heat flux pulses, ranging from the macrocycles of the reciprocating displacements of the grinding wheel to the microcycles of grinding with high porosity wheels.

Such an approach in the literature is not considered and is of interest for choosing grinding modes by the temperature criterion and to substantiate the high porosity wheel specifications for profile grinding with the aim of productivity increase. A number of

parameters are used to assess the grinding operation effectiveness at the stages of production and its preparation: Q_w (mm^3/c), Q'_w ($\text{mm}^3/(\text{s}\cdot\text{mm})$), V_w (mm^3), V'_w (mm^3/mm). It is necessary to establish a connection between these parameters with the grinding temperature and the grinding wheel wear. Monitoring and technological diagnostics systems analysis is made as like as information elements of the adaptive grinding technology on CNC machines, which allow to provide the final parameters of gears. On the basis of performed analysis, the aim and tasks of the scientific research are formulated.

In section 2 «Theoretical analysis of the profile grinding productivity on a CNC machine», the methodology of scientific research, which includes three directions of the technological grinding system study – modeling, optimization and control – is given. These directions characterize the investigating object as a system that has parameters: input, state, and output ones. On the basis of the theoretical-probabilistic and frequency approaches, methods of determining the gear grinding stock are developed and allow determining the stock maximum value along the gear periphery. It is established that according to the results of measurements, the stock for gear grinding contains a constant z_0 and variable Δz components. In accordance with the theoretical -probabilistic approach, the variable component Δz of the stock is considered, assuming the presence of a systematic periodic Δz_{cucm} and random aperiodic component Δz_{sun} in it. The method of simulation of the stock on the basis of virtual devices, which form the signal containing the systematic and random components of the stock, is proposed. The stochastic and deterministic models of the stock are developed for determining the maximum stock value based on the results of its selective discrete measurements. The reduction in the number of measurements, which is the resource for increasing the productivity of the operation, must be substantiated and investigated through the evaluation functions, the first of which is the sum of the squares of the differences in the readouts of the stock extreme values, which is found by the limited and the maximum number of measurements, the second is the difference between the ordinal numbers of the maximum stock spaces, which are found for a limited and maximum number of measurements. The nomograms on the choice of the measurements number of the stock

at the CNC grinding machine adjustment stage were developed. A number of parameters are investigated to evaluate the process efficiency: Q_w , Q'_w , V_w , V'_w . In the analysis of the profile grinding scheme, it can be found an analogy with the pattern of profile rectangular grinding on the amount of material removed per unit time. Consideration of this analogy allowed us to formulate and prove the theorem about an equivalent rectangular profile, which, at the same depth of cut t_{i+1} , has the same cross-sectional area $S_{i+1} = W_{a(i+1)} t_{i+1}$, where $W_{a(i+1)}$ - the active profile width. A method for determining the active width $W_{a(i+1)}$ of an equivalent rectangular profile is developed. The theoretical and experimental analysis made it possible to formulate and prove the stock alignment theorem, according to which the extreme values of the stock (minimum, maximum or difference between maximum and minimum etc.) aligned to the left and to the right, do not depend on the location of the initial space, from which the stock is measured on two sides.

In section 3 «Development of the scientific principles of applied thermophysics for gear grinding» a study of the temperature field in grinding is performed on the basis of the used phenomenological approach to the determination of temperature from the moving flat source in the form of three-dimensional rectangular, two-dimensional strip or one-dimensional that bounded on one side. It is shown that the involute profile curvature cannot be taken into account. It is found areas of the contact zone between grinding wheel and workpiece in which the results of the temperature determination differ by no more than 10%.

It is substantiated the use of a solution of a one-dimensional differential heat equation for gear grinding design and diagnostics, including taking into account the cooling effect of lubricoolant. On the basis of this solution, a single mathematical model of a grinding temperature cycle is developed for heating and forced cooling stages under boundary conditions of the second and third kinds, respectively. The influence of lubricoolant on the grinding temperature and its distribution by the surface layer depth is investigated taking into account the constant and variable temperature of the lubricoolant.

A mathematical model was developed to determine a macro- and micro-interrupted grinding temperature, which makes it possible to optimize the frequency and duty ratio of macro- and micro-pulses of the heat flux according to the criterion of the least interrupted grinding temperature with the same average pulsed heat flux density, which characterizes a work of the grinding wheel. On the basis of the prof. O.V. Yakimov' macro-interrupted grinding theory with the constant mean value of pulsed heat flux density additional requirement, a tendency of reduction of the grinding temperature is shown as the number of «cutting ledges» (N) and duty ratio (s) decrease. This determines relevancy of the replacement of macro-interrupted grinding wheels on the micro-interrupted high-porosity ones.

In section 4 «Experimental studies of the technological system state parameters of abrasive machining», experimental studies of ordinary and high-porosity grinding wheels are given. The influence of grinding modes on the grinding power and specific energy as well as on the heat flow density with taking into account elastic deformations in grinding is established. In accordance with the accepted methodology of the active experiment on the analogue process (flat grinding), parameters which characterize the performance of ordinary and high-porosity grinding wheels were determined. According to the results of this experiment, the advantage of high-porosity wheels is determined by their performance characteristics compared with conventional wheels. Therefore, similar gear grinding wheels which are ordered and manufactured for the CNC machine Höfler RAPID 1250 are used. The actual gear grinding process with conventional and high-porosity grinding wheels is experimentally tested and researched. It is established that with the same gear grinding modes, high-porosity wheels (sol-gel corundum, electrocorundum, monocorundum) in comparison with the conventional wheels (electrocorundum) provide better performances by the number of dressings, gear grinding power, the level of the acoustic emission signal.

To confirm the possibility of the developed theory use of discontinuous grinding by high-porosity wheels, the high-porosity wheel surface topography was performed on the microscope УИМ-21. The averaged dimensions of the grain cutting regions (l_1) and

the pores (12) between them are found for the mentioned high-porosity wheels. The averaged parameters N and s are obtained for these wheels. It is established that these parameters correspond to the interval of reduced grinding temperatures in the obtained theoretical dependence.

The temperature field simulation by means of COMSOL Multiphysics environment is performed. It is established that the maximum values of both the temperature and the heat flow density are located in the involute tooth profile upper part and do not match in height of the tooth, and the maximum temperature is located below the heat flux density maximum which is located at the top of the tooth. The transient process of formation of the temperature field around the moving thermal source is studied and the thermal saturation time is set. The possibility of replacing the moving (3D) source with a fixed (2D) at $H \geq 4$ and $H / L \leq 1$ ($H / L = 0,85$) is confirmed, since the maximum surface temperatures are close to each other (the difference between them does not exceed 0,7 – 4,03%) in the interval of the heat source velocity (axial feed) from 1m / min to 12m / min. It is established that the greatest influence of cooling on the maximum surface temperature leads to its decrease by 7%. The simulation model confirmed the possibility of replacing the heat source's velocity in a three- and two-dimensional solution with the time of its action in a one-dimensional solution (1D), and also allowed to determine the number of 3 sections in the contact area of the involute surface located at the height of the tooth.

It is established that the optimal number of 3 sections from the possible variants: 1, 2, 3, 6 and 9 is the 3 ones with heat flux densities, which are averaged over these areas by their instantaneous values. That is, one-dimensional solution can be used in the center of these 3 sections to calculate the temperature.

In section 5 «Development of theoretical premises for determining the gear grinding modes» it is made a study on the design of a technological operation and a development of an appropriate automated design subsystem. To do this, an analysis of the gear grinding cycle structure on a CNC machine is performed. Elements of the cycle structure are the number of stages and strokes in each of the stages, the sequence of gear spaces machining, the sequence of measuring cycles, and the number of wheel dressings

in each of the stages, etc. The automated grinding cycle includes the following steps: measuring the stock at the periphery of the gear, grinding itself, intermediate measurements of the gear parameters (length of the general norm, individual pitch deviation, total pitch deviation, radial runout, total profile deviation, tooth trace total deviation, etc.), intermediate grinding wheel dressing and gear output parameters final measurement. There are instant depths of gear grinding which determine the profile grinding temperature, namely are normal t_n and vertical t_v ones. Since in the gear grinding thermal phenomena study it is taken into account simultaneously both t_v and t_n , it is necessary to know their relation which allows to find one of these depths under the known other. A method of calculating the instant values of the heat flux density and the temperature mean values of the profile grinding is developed, which allows determining the surface temperature in several sections of the grinding wheel involute profile by averaging the heat flux density instant calculated values over the area of these sections. It is developed a method to determine the gear grinding modes with the use of grinding specific material removal rate Q'_w , which is predetermined on the rough, semi-finish, and finish stages of machining and which is related to the grinding temperature. An axial feed V_f is assigned as much as possible. Knowing the Q'_w and A_{num} values which is determined at the stage of testing grinding wheels, it is calculated the temperature of T_H and compared with a fixed critical value of T_{KP} . If $T_H < T_{KP}$, then the defect depth of the grinding t_v is calculated from the equation of $Q'_w = t_v \cdot V_f$. In the opposite case, i.e. $T_H > T_{KP}$, the parameter value of Q'_w are reduced to a defect-free level. It is established that in order to eliminate an accumulation of heat at the third stage of gear grinding with the known form and method of lubricoolant feeding, it is possible to control the value of the heat transfer coefficient α_h , the value of the initial temperature of the lubricoolant $\varphi(\tau_C)$, gear grinding modes (t_v and V_f), and the use of idle working steps (without a set of grinding depth).

In section 6 «Development of subsystems of automated designing, monitoring and grinding diagnosis» the theoretical premises for the development of embedded

designing, monitoring and grinding diagnosis subsystems as well as methods which take into account the individual features of gears during process control are presented. Designing, monitoring and grinding diagnosis subsystems structural schemes are developed. In addition to the parameters Q'_w and V'_w it is proposed to use the specific grinding energy A_{num} and grinding temperature T_H , since they determine the quality of the surface layer of parts and are part of the mathematical software of a developed subsystem of automated design. A method of the stock aligning is offered, which firstly allows to find the setting gear space, which after a grinding wheel centering in this space ensures the stock alignment along the periphery of the gear, and secondly, to find the space with the maximum stock, in which the grinding wheel is positioned in setting gear grinder up, and in which the actual contact coordinate of the grinding wheel and the gear is fixed after grinding wheel withdraw by the value of the fixed difference between the maximum stock and the stock in the setting space. Two levels calculation gear grinding modes method is developed. At the first level, the intervals for changing the Q'_w and V'_w parameters at each stage of grinding is set; at the second level the gear grinding modes for the selected intervals of the Q'_w and V'_w are determined with considering the specific grinding energy A_{num} and grinding temperature T_H . Time interval and grinding wheel dressing time moment determining method is developed taking into account the grinding wheel actual work, which is determined by the number of actual touches of the wheel. This makes it possible to take into account the individual stock distribution on the gear wheel lateral sides in profile gear grinding technology.

Key words: operation productivity, adapting, profile gear grinding, grinding system, surface layer quality, gear grinding stock, grinding stock mathematical model, gear grinding temperature, gear grinding modes, operation diagnosing.

List of publisher publications

1. Larshin V.P. Eksperimental'noe issledovanie tekhnologicheskikh smazok pri sverlenii / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, E.A. Trifonova // Trudy Odes. politekhn. un-ta. – Odessa, 2009. – Vyp.2(32). – S. 31 – 36.

2. Lishhenko N.V. Tekhnolohiia resursovidnovliuvanoi obroby v mashynobuduvanni / N.V. Lishhenko // Naukovi pratsi Odeskoi nats. akad. kharch. tekhnolohii. – Odesa, 2009. – Vyp. 36. – Tom 2. – S. 283 – 287.

3. Lishhenko N.V. Opredelenie zhestkosti ehlementov tekhnologicheskoy sistemy / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, S.N. Makarov // Visnyk Khark. nats. tekhn. un-tu silsk. hosp-va im. Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. – Kharkiv, 2010. – Vyp. 106. – S. 81 – 92.

4. Larshin V.P. Analiz resursa stojkosti rezhushhego instrumenta / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, S.N. Makarov // Visnyk nats. tekhnich. un-tu Ukrainy «Kyivskyi politekhnichniy instytut». Seriiia mashynobuduvannia». – K.: NTUU «KPI».– 2010. – Vyp. 59. – S. 101 – 106.

5. Larshin V.P. Komp'yuternaya obrabotka ehksperimental'nykh dannykh / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, A.P. Rybalko, E.A. Trifonova // Mizhvuz. zbirnyk «Naukovi notatky». – Lutsk, 2010. – Vyp. 29. – S. 103 – 106.

6. Lishhenko N.V. Opredelenie temperatury i glubiny defektnogo sloya pri shlifovanii / N.V. Lishhenko // Visnyk Khark. nats. tekhn. un-tu silsk. hosp-va im. Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. – Kharkiv, 2011. – Vyp. 115. – S. 136 – 143.

7. Lishhenko N.V. Model' temperaturnogo tsikla shlifovaniya dlya tekhnologicheskoy diagnostiki protsessa / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Visnyk Khark. nats. tekhn. un-tu silsk. hosp-va im. Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. – Kh., 2011. – Vyp.118. – S. 185 – 193.

8. Lishhenko N.V. Issledovanie vliyaniya smazochno-okhlazhdayushhej zhidkosti na temperaturu shlifovaniya / N.V. Lishhenko // Trudy Odes. politekhn. un-ta. – Odessa, 2011. – Vyp.2(36). – S. 80 – 86.

9. Lishhenko N.V. Analiz sposobov opredeleniya pripuska na mekhanicheskuyu obrabotku / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, S.N. Makarov // Trudy Odes. politekhn. un-ta. – Odessa, 2011. – Vyp. 1(35). – S. 36 – 42.

10. Lishhenko N.V. Vliyanie prinuditel'nogo okhlazhdeniya na temperaturu shlifovaniya / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Trudy Odes. politekhn. un-ta. – Odessa, 2012. – Vyp. 2(39). – S. 86 – 92.

11. Lishhenko N.V. Optimizatsiya geometricheskikh parametrov preryvistykh shlifoval'nykh krugov / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Visnyk nats. tekhnich. un-tu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya mashynobuduvannia». – K.: NTUU «KPI». – 2012. – Vyp. 65. – S.110 – 117.

12. Lishhenko N.V. Opredelenie temperatury pri shlifovanii preryvistymi i vysokoporistymi krugami / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Mizhvuz. zbirnyk «Naukovi notatky». – Lutsk, 2013. – Vypusk 40. – S. 150 – 158.

13. Lishchenko N.V. Nonstationary and discontinuous grinding temperature determination / N.V. Lishchenko, V.P. Larshin // Visnyk nats. tekhnich. un-tu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya mashynobuduvannia». – K.: NTUU «KPI». – 2013. – № 67. – S. 137 – 142.

14. Lishchenko N.V. Nonstationary and interrupted grinding temperature determination / N.V. Lishchenko, I.A. Ryabekov, V.P. Larshin // Rezanie i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. – KHar'kov: NTU«KHPI», 2015. – Vyp. 85. – S. 191 – 201.

15. Rybalko A.P. Sistemy tekhnologicheskoy diagnostiki i adaptivnogo upravleniya dlya stankov s CHPU / A.P. Rybalko, N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – Vyp.1 (25). – S. 150 – 161.

16. Lishhenko N.V. Spektral'nyj analiz pri izmerenii parametrov sherokhovatosti i volnistosti frezerovanoj poverkhnosti / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, F.S. Sabirov // Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – Vyp.10. – S. 222 – 234.

17. Lishhenko N.V. CHastotnye kharakteristiki profilogrammy poverkhnosti i vibratsii pri ee obrabotke / N.V. Lishhenko // Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats. – Kharkiv, NTU «KhPI», 2015. – Vyp. 1(25). – S. 94 – 108.

18. Lishhenko N.V. Opredelenie intensivnosti zuboshlifovaniya na osnove analiticheskogo uravneniya ehvol'venty / N.V.Lishhenko // Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats.– Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – Vyp. 11. – S. 137–149.

19. Lishhenko N.V. Optimizatsiya profil'nogo zuboshlifovaniya na stanke s CHPU i sistemoy izmereniya pripuska / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, V.V. Nezhebovskij // Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats. – Kharkiv, NTU «KhPI», 2016. – Vyp. 1 (26). – S. 50 – 61.

20. Lishhenko N.V. Razdelenie profilya poverkhnosti na sistematicheskuyu i sluchajnyuyu sostavlyayushhie / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Rezanie i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. – KHar'kov: NTU «KHPI», 2016. – Vip.86. – S. 62 – 73.

21. Larshin V.P. Issledovanie tekhnologicheskoy sistemy zuboshlifovaniya / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko // Perspektyvni tekhnolohii ta prylady. – Lutsk: Lutskiyi NTU, 2017.– Vyp.10. – S.104 – 114.

22. Larshin V.P. Monitoring i tekhnologicheskaya diagnostika na stankakh s CHPU / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko // Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats. – Kharkiv, NTU «KhPI», 2017. – Vyp. 1(27). – S. 86 – 98.

23. Lishhenko N.V. Viznachennya rezhimiv zuboshlifuvannya za temperaturnim kriteriem / N.V. Lishhenko // Mizhvuz. zbirnyk «Naukovi notatky». – Lutsk, 2017. – Vypusk 60.– S. 147 – 155.

24. Lishhenko N.V. Opredelenie pripuska na zuboshlifovanie po ego diskretnym izmereniyam / N.V. Lishhenko // Perspektyvni tekhnolohii ta prylady. – Lutsk: Lutskiyi NTU, 2017.– Vyp.11. – S. 168 – 175.

25. Lishchenko N. V. Profile Gear Grinding Temperature Reduction and Equalization / Lishchenko N. V. Larshin V. P // Journal of Engineering Sciences. Sumy, 2018. – Volume 5. – Issue 1 (2018). – pp. A 1 – A 7.

26. Lishhenko N.V. Razrabotka imitatsionnoj modeli pripuska na osnove teoretiko-veroyatnostnogo podkhoda / N.V. Lishhenko // Rezanie i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. – KHar'kov: NTU «KHPI», 2018. – Vyp. 88. – S. 124 – 135.

27. Lishchenko N. Theoretical-probabilistic model for defining the gear grinding stock allowance / N. Lishchenko // Visnyk TNTU: zb. nauk. prats. – Ternopil: NTU «KhPI», 2018. – Vyp. 1(89). – S. 89 – 99.

28. Lishhenko N.V. Doslidzhennya nastupnosti analitichnikh rishen' dlya viznachennya temperaturi shlifuvannya / N.V. Lishhenko // Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii: zbirnyk naukovykh prats. – Kramatorsk: DDMA, 2018. – №1 (43). – S. 78 – 87.

29. Lishhenko N.V. Viznachennya temperaturi profil'nogo zuboshlifuvannya / N.V. Lishhenko // Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho: zbirnyk naukovykh prats. – Kremenchuk: KrNU, 2018. – Vypusk 1 (108). – S. 100 – 108.

30. Pat. 86096 Ukrainy, MPK V24 B 51/00 Sposib keruvannia pereryvchastym shlifuvanniam / N.V. Lishchenko, V.P. Larshyn, A.V. Mochuliak. – № u 2013 08515; zaiavl. 08.07.2013; opubl. 10.12.2013, Biul. № 23. – 8 s.: il.

31. Pat. 86823 Ukrainy, MPK C21D 10/00. Sposib mekhanichnoi obrobky metaliv rizanniam / N.V. Lishchenko, V.P. Larshyn.– № u 2013 09201; zaiavl. 22.07.2013; opubl. 10.01.2014, Biul. № 1. – 3 s.: il.

32. Pat. 88351 Ukrainy, MPK V24V 49/00. Sposib vyznachennia temperatury shlifuvannia / N.V. Lishchenko, V.P. Larshyn. – № u 2013 12258; zaiavl. 21.10.2013; opubl. 11.03.2014, Biul. № 5. – 4 s.

33. Pat. 89290 Ukrainy, MPK V24V 51/00. Sposib vyznachennia hlybyny rizannia pry bahatoprokhidnomu shlifuvanni / N.V. Lishchenko, V.P. Larshyn. – № u 2013 14345; zaiavl. 09.12.2013; opubl. 10.04.2014, Biul. № 7. – 6 s.

34. Pat. 119835 Ukrainy, G01B 5/20 (2006.01). Sposib kontroliu zubchastykh kolis pered zuboshlifuvanniam / N.V. Lishchenko, V.P. Larshyn. – № u 201703853; zaiavl. 19.04.2017; opubl. 10.10.2017, Biul. № 19/2017.

35. Lishenko N.V. Vliyanie teploobmena s okhlazhdayushhej sredoj na temperaturu shlifovaniya / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Protsessy abrazivnoj obrabotki, abrazivnye instrumenty i materialy. SHlifabraziv – 2011: sb. statej Mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf., Volgogr. Gos. arkhitekt.-stroit. un-t, VISTekh VolGASU. – Volgograd: VolGASU, 2011. – S. 130 – 133.

36. Lishhenko N.V. Opredelenie temperatury shlifovaniya pri periodicheskom teplovom potoke / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Vestnik UGATU. – Ufa, 2013. – T.17, № 8(61). – S. 117 – 122.

37. Lishhenko N.V. Temperatura pri shlifovanii preryvistymi i vysokoporistymi krugami / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta. – Tol'yatti, 2015. – №3-1(33-1). – S. 75 – 83.

38. Lishhenko N.V. Tekhnologicheskaya diagnostika sverleniya na stankakh s CHPU / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, R.R. Basharov // STIN № 6, Moskva, 2015. – S. 36 – 40.

39. Larshin V.P. Teoreticheskij analiz metodov naladki zuboshlifoval'nogo stanaka s CHPU / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko // Sovremennye tendentsii v tekhnologiyakh metalloobrabotki i konstruktsiyakh metalloobratyvyvayushhikh mashin i komplektuyushhikh izdelij: Materialy VI Vserossijskoj mezhvuz. nauchn.-tekhn. konf., 24-26 fevralya 2016 r. – Ufa: UGATU, 2016. – S. 190 – 197.

40. Larshin V.P. Vyravnivanie pripuska po profilyu pri naladke na zuboshlifovanie metodom kopirovaniya / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko // Sovremennye tendentsii v tekhnologiyakh metalloobrabotki i konstruktsiyakh metalloobratyvyvayushhikh mashin i komplektuyushhikh izdelij: materialy VI Vserossijskoj mezhvuz. nauchn.-tekhn. konf., 24-26 fevralya 2016 r. – Ufa: UGATU, 2016. – S. 181 – 189.

41. Larshin V.P. Metodologiya issledovaniya tekhnologicheskoy sistemy shlifovaniya / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko // STIN № 3, Moskva, 2018. – S. 14 – 15.

42. Lishhenko N.V. Temperaturnoe pole pri shlifovanii s uchetom vliyaniya SOZH / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Novye i netradits. tekhnologii v resurso – i ehnergoberezhonii: Mat. nauchn.-tekhn. konf., 19-22 sentyabrya 2011 g. – K.: ATM Ukrainy, 2011. – S. 106 – 110.

43. Lishhenko N.V. Opredelenie temperatury preryvistogo shlifovaniya / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin V.P., A.V. YAKimov // Tr. Odes. politekhn. un-ta. – Odessa, 2012. – Vyp. 2(39). – S. 80 – 85.

44. Lishhenko N.V. Opredelenie temperatury preryvistogo shlifovaniya / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii: Trudy 18 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., 5-6 dekabrya 2012 g. – KHar'kov: KHNPk «FEHD», 2012. – S. 108 – 113.

45. Larshin V.P. Planirovanie mnogofaktornogo ehksperimenta s uchedom vzaimodejstviya faktorov / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko // *Novye i netradits. tekhnologii v resurso – i ehnergoberezhonii: Mat. nauchn.-tekhn. konf.*, 22-24 maya 2013 g. – K.: ATM Ukrainy, 2013. – S. 66 – 69.

46. Lishhenko N.V. Opredelenie temperatury shlifovaniya dlya optimizatsii protsessa / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, R.A. Berezhnoj // *Novye i netradits. tekhnologii v resurso – i ehnergoberezhonii: Mat. nauchn.-tekhn. konf.*, 22-24 maya 2013 g. – K.: ATM Ukrainy, 2013. – S. 100 – 102.

47. Lishhenko N.V. Nastrojka stankov pri zuboshlifovanii po metodu kopirovaniya / N.V. Lishhenko, A.N. Koval'chuk, V.P. Larshin // *Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii: Trudy 21 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.*, 24-25 dekabrya 2015 g. – KHar'kov. – D.: LIRA, 2015. – S. 39 – 45.

48. Lishhenko N.V. Analiz raspredeleniya pripuska po profilyu vpadiny pri zuboshlifovanii / N.V. Lishhenko, V.V. Nezhebovskij, V.P. Larshin // *Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii: Trudy 21 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.*, 24-25 dekabrya 2015 g. – KHar'kov. – D.: LIRA, 2015. – S. 45 – 48.

49. Lishhenko N.V. Vyravnivanie pripuska po profilyu pri zuboshlifovanii metodom kopirovaniya / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // *Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii: Trudy 21 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.*, 24-25 dekabrya 2015 g. – KHar'kov. – D.: LIRA, 2015. – S. 144 – 150.

50. Lishhenko N.V. Teoriya vyravnivaniya pripuska po profilyu pri zuboshlifovanii profil'nym krugom / N.V. Lishhenko // *Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii: Trudy 21 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* 24-25 dekabrya 2015 g.– KHar'kov. – D.: LIRA, 2015. – S. 150 – 152.

51. Lishhenko N.V. Opredelenie proizvoditel'nosti profil'nogo shlifovaniya na stanke s CHPU / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, A.N. Koval'chuk // *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni: zb. nauk. prats.– Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – Vyp. 11. – S. 150 – 162.*

52. Larshin V.P. Profil'noe shlifovanie zubchatykh koles vysokoporistymi abrazivnymi krugami / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, S.V. Ryabchenko, V.V.

Nezhebovskij, G.V. Sereda // *Oborudovanie i instrument.* –2016. – №5 /190/. – S. 20 – 23.

53. Larshin V.P. Issledovanie tekhnologicheskoy sistemy profil'nogo zuboshlifovaniya / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, A.N. Koval'chuk // *Fizychni i kompiuterni tekhnolohii: Materialy KhKhII mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 7-9 hrudnia 2016 r.* – Kharkiv. – D.: LIRA, 2016. – S. 202 – 207.

54. Larshin V.P. Teoretiko-veroyatnostnyj i chastotnyj podkhody v tekhnologicheskom analize / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, V.V. Nezhebovskij // *Fizychni i kompiuterni tekhnolohii: Materialy KhKhII mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 7-9 hrudnia 2016 r.* – Kharkiv. – D.: LIRA, 2016. – S. 208 – 212.

55. Lishhenko N.V. Raschet plotnosti teplovogo potoka i temperatury na raznykh uchastkakh ehvol'ventnogo profilya pri zuboshlifovanii / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // *Fizychni i kompiuterni tekhnolohii: Materialy KhKhII mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 7-9 hrudnia 2016 r.* – Kharkiv. – D.: LIRA, 2016. – S. 212 – 216.

56. Lishhenko N.V. Opredelenie mgnovennoj glubiny zuboshlifovaniya na osnove analiticheskogo uravneniya ehvol'venty / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // *Fizychni i kompiuterni tekhnolohii: Materialy KhKhII mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 7-9 hrudnia 2016 r.* – Kharkiv. – D.: LIRA, 2016. – S. 217 – 221.

57. Lishhenko N.V. Optimizatsiya chisla izmerenij pripuska po vpadinam zubchatogo koleasa / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // *Problemy rozvytku rehionu: promyslovyi i ekonomichnyi aspekt: vseukrainska nauk.-tekhn. konf., 2-3 chervnia 2016 r.: tezy dopovidei.* – Pervomaisk: PPV NUK, 2016. – S.17 – 20.

58. Lishhenko N.V., Ispytaniya vysokoporistykh shlifoval'nykh krugov na ploskoshlifoval'nom stanke / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, S.V. Ryabchenko // *Novye i netradits. tekhnologii v resurso – i ehnergoberezhenii: mat. nauchn.-tekhn. konf., 21-23 sentyabrya 2016 g.* – O.: ONPU, 2016. – S. 111 – 115.

59. Lishhenko N.V. Metody optimizatsii tekhnologicheskoy operatsii zuboshlifovaniya na stanke s CHPU / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, A.N. Koval'chuk // *Novye i netradits. tekhnologii v resurso – i ehnergoberezhenii: mat. nauchn.-tekhn. konf. 21-23 sentyabrya 2016 g.* – O.: ONPU, 2016. – S. 105 – 108.

60. Larshin V.P. Profil'noe shlifovanie vysokoporistymi krugami / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, S.V. Ryabchenko // Informatsiini tekhnologii v osviti, nautsi ta vyrobnytstvi: zb. nauk. prats – O.: AO Bakhva, 2016. – Vyp. 2(13). – S. 121 – 127.

61. Lishhenko N.V. Opredelenie pripuska na zuboshlifovanie / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Informatsiini tekhnologii v osviti, nautsi ta vyrobnytstvi: zbirnyk naukovykh prats. – O.: Nauka i tekhnika, 2016. – Vyp. 2(13). – S. 130 – 137.

62. Lishhenko N.V. Opredelenie struktury pripuska na zuboshlifovanie / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Novye i netradits. tekhnologii v resurso – i ehnergoberezhennii: Mat. nauchn.-tekhn. konf., 20-22 sentyabrya 2017 g. – O.: ONPU, 2017. – S. 92 – 95.

63. Larshin V.P. Ispytaniya vysokoporistogo shlifoval'nogo kruga / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, S.V. Ryabchenko // Novye i netradits. tekhnologii v resurso – i ehnergoberezhennii: mat. nauchn.-tekhn. konf., 20-22 sentyabrya 2017 g. – O.: ONPU, 2017. – S. 84 – 88.

64. Lishhenko N.V. Zuboshlifovanie vysokoporistymi krugami na stanke s CHPU / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, A.N. Koval'chuk, V.V. Nezhebovskij // Novye i netradits. tekhnologii v resurso – i ehnergoberezhennii: mat. nauchn.-tekhn. konf., 20-22 sentyabrya 2017 g. – O.: ONPU, 2017. – S. 88 – 92.

65. Larshin V.P. Imitatsionnoe modelirovanie pripuska / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko // Rezanie i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. – KHar'kov: NTU «KHPI», 2018. – Vyp. 88. – S. 107 – 117.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	20
1.1. Технологічні можливості існуючих методів фінішної обробки зубчастої поверхні.....	20
1.2. Визначення припуску на зубошліфування.....	29
1.3. Аналіз математичних моделей температурного поля при профільному зубошліфуванні.....	34
1.4. Аналіз параметрів ефективності процесу шліфування.....	44
1.5. Аналіз інформаційних сигналів для підсистем моніторингу і технологічної діагностики при профільному зубошліфуванні.....	52
Висновки до розділу 1.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОФІЛЬНОГО ЗУБОШЛІФУВАННЯ НА ВЕРСТАТІ З ЧПК.....	73
2.1. Методологія дослідження технологічної системи шліфування (як об'єкта керування).....	73
2.2. Розробка теорії формування припуску на зубошліфування на основі стохастичної і детермінованої моделей.....	84
2.3. Визначення структури припуску на зубошліфування.....	95
2.4. Оптимізація числа вимірів припуску.....	109
2.5. Визначення продуктивності зубошліфування.....	119
Висновки до розділу 2.....	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	135

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ

ПРИКЛАДНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ ЗУБОШЛІФУВАННЯ.....	140
3.1. Визначення температури нестационарного шліфування.....	140
3.2. Вплив обмеженості теплового джерела на температуру зубошліфування.....	145
3.3. Розробка математичної моделі температурного поля при суцільному шліфуванні без обліку примусового охолодження.....	157
3.4. Розробка математичної моделі температурного поля при суцільному шліфуванні з обліком примусового охолодження.....	163
3.5 Визначення температури макро- і мікропереривчастого шліфування	173
Висновки до розділу 3.....	189
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	195

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ

АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ.....	199
4.1. Програма і методика проведення експериментальних досліджень.....	199
4.2. Топографічний аналіз структури високопоруватих шліфувальних кругів.....	200
4.3. Порівняльні експериментальні дослідження звичайних і високопоруватих шліфувальних кругів.....	203
4.4. Вплив режимів шліфування на потужність різання, питому роботу і щільність теплового потоку з обліком пружних віджатъ.....	217
4.5 Комп'ютерне моделювання температурного поля при профільному зубошліфуванні	219
Висновки до розділу 4.....	239

	4
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	241
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ ЗУБОШЛІФУВАННЯ.....	244
5.1. Особливості створення підсистеми проектування для етапів виробництва і його технологічної підготовки.....	244
5.2. Визначення взаємозв'язку радіального і тангенціального вирахування припуску при профільному зубошліфуванні.....	251
5.3. Розрахунок теплового потоку і температури на різних ділянках евольвентного профілю при зубошліфуванні	259
5.4. Визначення режимів зубошліфування і інтервалу правки шліфувального круга.....	263
5.5. Вибір режимів зубошліфування з урахуванням охладжувальної дії МОР.....	268
Висновки до розділу 5.....	281
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	285
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ, МОНІТОРИНГУ І ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ.....	287
6.1. Теоретичні передумови для розробки убудованих системи моніторингу і технологічної діагностики.....	287
6.2. Вирівнювання припуску на зубошліфування.....	294
6.3. Розробка підсистеми проектування для визначення режимів зубошліфування.....	304
6.4. Розробка способу адаптивної правки шліфувального круга.....	307
6.5. Продуктивність і економічність профільного зубошліфування.....	319
Висновки до розділу 6.....	326
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	328
ВИСНОВКИ.....	330