

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Соболь Анатолій Валерійович

УДК 621.822

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Підвищення довговічності підшипників кочення маточин коліс
автотракторної техніки

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ А.А. Соболь

Керівник роботи

Борак К.В.

кандидат технічних наук

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Соболь Анатолій Валерійович. Підвищення довговічності підшипників кочення маточин коліс автотракторної техніки. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

В магістерській роботі встановлено, що під час шліфування деталей з ексцентриситетом на початку процесу з'являються значні коливання нормальної сили різання. Середнє значення початкового значення ексцентриситету не повинно перевищувати 20 мкм. Вивчення характеру зміни нормальної сили показало, що лише на 6-8 оберті деталь починає шліфуватись по всьому контуру ($P_n > 0$).

Середній радіус обробленої поверхні в перерізі площиною, перпендикулярною до осі обертання кільця, визначається сумою детермінованої складової, яка залежить від кута повороту деталі та випадкової складової. Для першого оберту деталі детермінована складова радіуса постійна, а для наступних обертів детермінована складова має періодичну та нестаціонарні перехідні частини.

Запропонований спосіб безцентрового шліфування поверхонь кочення зовнішніх кілець роликотрідшипників з регульованою нормальною силою дозволяє на 50% зменшити висотні параметри хвилястості (з 2 мкм до 1 мкм), на 20 % збільшити опорну площу поверхні кочення, що дозволить суттєво підвищити довговічність підшипників кочення.

Ключові слова: роликотрідшипники, шліфування, ексцентриситет, хвилястість, довговічність

ANNOTATION

Sable Anatoly Valeryovych. Increasing the durability of rolling bearings of the wheel hubs of tractor vehicles. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

In the master's thesis it is established that during the grinding of parts with eccentricity at the beginning of the process there are significant fluctuations in the normal cutting force. The average value of the initial value of the eccentricity should not exceed 20 μm . The study of the nature of the change in normal force showed that only at 6-8 turns the part begins to grind along the entire contour (> 0).

The average radius of the machined surface in cross section by a plane perpendicular to the axis of rotation of the ring is determined by the sum of the deterministic component, which depends on the angle of rotation of the part and the random component. For the first rotation of the part the deterministic component of the radius is constant, and for the following revolutions the deterministic component has periodic and non-stationary transition parts.

The proposed method of centerless grinding of the rolling surfaces of the outer rings of roller bearings with adjustable normal force allows to reduce by 50% the height parameters of the corrugation (from 2 μm to 1 μm), to increase the bearing surface area by 20%, which will significantly increase the durability of bearings.

Keywords: roller bearings, grinding, eccentricity, corrugation, durability

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПІДШИПНИКІВ.....	8
РОЗДІЛ 2. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ ЗОВНІШНІХ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ З РЕГУЛЬОВАНОЮ НОРМАЛЬНОЮ СИЛОЮ.....	16
РОЗДІЛ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЗОВНІШНЬОГО КІЛЬЦЯ ПІДШИПНИКА.....	21
ВИСНОВКИ.....	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	38

ВСТУП

Під якість деталей машин як і деталей підшипників розуміють сукупність властивостей, які відповідають своєму функціональному призначенню. До числа таких властивостей, що називаються експлуатаційними, відносять витривалість, зносостійкість, корозійну стійкість, міцність, надійність, контактну жорсткість, міцність посадок, вібростійкість і багато інших властивостей залежно від функціонального призначення деталі. Відповідно до призначення деталі ці властивості кількісно оцінюють за допомогою відповідних експлуатаційних показників таких, наприклад, як межа витривалості, інтенсивність зношування, корозійні витрати, податливість, довговічність, теплостійкість тощо. Довговічність деталей трибосистем залежать від початкової якості поверхонь тертя. Доведено, що поверхневі шари деталей залежно від методу їх оброблення за своїми фізико-хімічними властивостями різко відрізняються від властивостей основного матеріалу, саме воду дослідження впливу властивостей поверхневих шарів на довговічність деталей є актуальною задачею.

Мета і задачі досліджень. Підвищення довговічності підшипників кочення маточин коліс автотракторної техніки за рахунок удосконалення технології безцентрового шліфування поверхонь кочення зовнішніх кілець роликотрившипників з регульованою нормальною силою.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- Визначити вплив параметрів якості на експлуатаційні властивості робочих поверхонь деталей підшипників;
- Розробити практичні рекомендації щодо реалізація технології безцентрового шліфування зовнішніх кілець роликотрившипників з регульованою нормальною силою;
- Вдосконалити процесу шліфування робочих поверхонь зовнішнього кільця підшипника.

Об'єкт дослідження: процес шліфування поверхонь тертя елементів підшипників кочення.

Предмет дослідження: закономірності якісних показників поверхні тертя від параметрів процесу шліфування поверхонь кочення зовнішніх кілець роликотідшипників.

Методи дослідження. Дослідження виконано з використанням методів трибології, механіки, прикладної фізики та теорії ймовірності. Обробку експериментальних даних виконано за допомогою методів математичної статистики з використанням прикладних комп'ютерних програм.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Соболь А. А.** Вплив параметрів якості на експлуатаційні властивості робочих поверхонь деталей підшипників. Збірник тез V-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. 28-29 березня 2019 року м. Житомир. ЖАТК. С. 296-297.

2. **Соболь А. А.** Залежність віброакустичних та експлуатаційних характеристик роликотідшипників від виробничих дефектів робочих поверхонь. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 212-213.

3. **Соболь А. А.** Вібрації, спричинені структурною недосконалістю роликотідшипників машин і обладнання тваринницьких комплексів. IX Міжнародної науково-технічної конференції *«Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві»*, 5-24 жовтня 2020 року, смт. Глеваха Київської області, Національний науковий центр «ІМЕСГ» НААН України. м. Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Видавничий центр НУБіП України, 2020.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи можуть бути використанні при виробництві підшипників кочення для сільськогосподарських машин та автотракторної техніки.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 38 сторінок комп'ютерного тексту, містить 4 таблиці і 14 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПІДШИПНИКІВ

Під час виготовлення та експлуатація деталі на її поверхні виникають нерівності, змінюється структура, фазовий та хімічний склад. В деталі виникають залишкові напруження, змінюється міцність втомленості.

Зовнішній шар деталі зі зміненою структурою, фазовим та хімічним складом порівняно з основним металом, з якого виготовлена деталь, називається поверхневим шаром [1]. Зовнішня поверхня шару межує з навколишнім середовищем або з поверхнею спряженої деталі.

В поверхневому шарі виділяють наступні зони [2]:

- зону 1 адсорбованих з навколишнього середовища молекул та атомів органічних і неорганічних речовин (води, розчинників, миючих та мастильно охолоджуючих рідин), її товщина $1-10^2$ Нм;
- зону 2 продуктів хімічної взаємодії металу з оточуючим середовищем (як правило оксидів), товщиною приблизно $10^{-3}-1$ мкм;
- граничну зону 3 товщиною в декілька міжатомних відстаней; метал в цій зоні має інші, ніж в основному об'ємі кристалічну та електронну структури;
- зону 4 із зміненою структурою, фазовим та хімічним складом, яка виникає в процесі виготовлення та експлуатації деталі, її товщина як правило дорівнює 0,01-0,1 мм [3].

Ідеально правильну поверхню не можливо отримати за допомогою будь-якого методу оброблення. Реальна поверхня деталі недосконала: судження про рівень недосконалості залежить від масштабу розгляду. Можливо розглядати відхилення від геометричної правильності поверхні, макро-, мікро- та субмікроскопічного порядку [4].

Макрогеометричні відхилення розглядають на порівняно великих ділянках реальної поверхні деталі (вони характеризують її точність), мікрогеометричні відхилення – на малих ділянках реальної поверхні з довжиною сторони квадрату 10^{-2} - 10^1 мм. Сукупність нерівностей поверхні на цій довжині прийнято називати шорсткістю поверхні [5].

В певній мірі проблема управління якістю деталей вирішується шляхом конструкторсько-технологічного забезпечення експлуатаційних показників через, так звані, функціональні параметри якості поверхневих шарів [6].

Забезпечення експлуатаційних показників в загальному випадку можливе шляхом належного вибору матеріалу деталей з відповідними фізико-хімічними та механічними характеристиками, призначення твердості поверхневих шарів, обґрунтування мікро- та макрогеометричних параметрів поверхонь тощо. Складність такого вибору зумовлена, зокрема, багатфакторністю залежностей та зв'язків експлуатаційних показників з параметрами якості поверхневих шарів деталей та недостатнім їх вивченням [10, 11].

Перспективним і високоефективним методом оцінки якості поверхневого шару (ЯПШ) є трьохмірне моделювання мікротопографії поверхні в системі 3D з використанням автоматизованих вимірювальних комплексів типу Talyskan – 150 [3]. Методика визначення характеристик шорсткості [4] передбачає використання більше 20 параметрів та функцій й ґрунтується на принципі автоматичного сканування поверхні алмазною голкою або когерентним променем світла з наступним автоматизованим обробленням результатів. Керуюча програма дозволяє за декілька хвилин отримати аксонометричне зображення мікротопографічної карти відсканованої поверхні, провести додаткові дослідження окремих ділянок топографічної карти та отримати всі числові значення амплітудних, поверхнево-об'ємних, просторових, гібридних і функціональних параметрів. В зв'язку з цим науковий інтерес представляють дослідження параметрів шорсткості 3D і їх взаємозв'язків із профільними параметрами.

Значний вклад в розвиток і становлення методики дослідження мікротопографії (морфології) поверхні внесли роботи вчених Ліонського університету (Франція) і Бірмінгемського університету (Великобританія), які взяли участь у спільних наукових дослідженнях, присвячених оцінці нерівностей поверхні. Організатором проекту було Європейське Співтовариство в 1990-93-х роках [7].

Дослідження залежності експлуатаційних характеристик підшипників від параметрів шорсткості поверхонь кочення [8] показали, що на зносостійкість, довговічність й вібростійкість підшипника впливають не лише значення амплітудних і крокових параметрів нерівностей поверхні, а й особливості та напрямки розміщення мікронерівностей в контактуючих поверхнях. Так, найгірші експлуатаційні показники характерні для випадків, коли напрям мікронерівностей на поверхнях кочення кілець і тіл обертання перпендикулярний до напрямку кочення. Якщо напрям кочення співпадає з напрямком мікронерівностей однієї деталі, але перпендикулярний до напрямку нерівності поверхні іншої контактуючої деталі, то експлуатаційні характеристики такого підшипника дещо покращуються. Найкращі умови контактування поверхонь обертання, за яких експлуатаційні характеристики підшипника найвищі, властиві для випадків співпадання напрямків обертання та напрямків нерівностей на контактуючих поверхнях обертання.

Для підвищення зносостійкості та покращення експлуатаційних властивостей підшипників шляхом зменшення початкового зношування доцільним є виготовлення деталей підшипників із шорсткістю робочих поверхонь, що максимально наближена до шорсткі робочих поверхонь “притертих” деталей підшипників.

В таблиці 1.1 наведено результати досліджень залежності довговічності конічних роликотілопідшипників від значення параметрів шорсткості робочих поверхонь тіл обертання [7].

Таблиця 1.1 – Вплив шорсткості робочих поверхонь конічних роликотідшипників на їх довговічність

Шорсткість поверхні		Середня довговічність, % від розрахункової
кілець	роликів	
0,63 – 0,40	0,32 – 0,25	100
0,32 – 0,20	0,16 – 0,12	390
0,16 – 0,12	0,16 – 0,12	340
0,16 – 0,12	0,08 – 0,06	385
0,06 – 0,05	0,08 – 0,04	560
0,04 – 0,03	0,06 – 0,05	480

Хоча в таблиці 1.1 не враховано зміни параметру хвилястості поверхні, все ж можливо зробити висновок, що оптимальним значенням параметру шорсткості R_a для поверхні доріжок кочення кілець є 0,08-0,16 мкм, а для поверхні ролика – 0,06-0,08 мкм.

На первинне спрацьовування робочих поверхонь деталей підшипників впливають і такі фактори: форма та висота мікронерівностей, направленість нерівностей (штрихів оброблення) відносно напрямку руху ковзання. Вплив цих факторів по-різному проявляється для різних умов роботи (граничне тертя, перепади навантажень, сухе тертя, тертя зі змащенням). Гостровершинні мікронерівності зношуються швидше плосковершинних.

Великий вплив на довговічність підшипників здійснюють хвилястість та макрогеометричні похибки спряжених поверхонь. Ці дефекти зменшують площу поверхні контакту, збільшуючи разом з тим, граничні навантаження порівняно з розрахунковими. Зменшуючи макрогеометричні похибки та керуючи хвилястістю доріжок кочення кілець підшипників, можливо збільшити термін служби підшипників [2, 7, 11].

Дослідженнями проф. П. І. Ящерицина доведено, що напрямок волокон матеріалу кілець підшипників впливає на їх довговічність. Кращим варіантом є напрямок волокон концентричний робочій поверхні кілець. Із збільшенням кута

виходу волокон до поверхні бігової доріжки кільця довговічність підшипників знижується [7].

На відміну від параметрів шорсткості, параметрам хвилястості приділялася менша увага при дослідженні та стандартизації. Під хвилястістю поверхні розуміють сукупність нерівностей, які періодично повторюються та відстань, між якими, значно перевищує їх висоту. Хвилястістю поверхні вважають нерівності з кроком 1-10 мм. Висота нерівностей хвилястості та шорсткості практично однакова, проте відношення довжини кроків до висоти нерівностей істотно відрізняється. Хвилястість визначається в перпендикулярному перерізі поверхонь, виключаючи при цьому шорсткість та відхилення геометричної форми.

Найбільшу увагу для оцінки хвилястості приділено в стандарті Франції [7] E 0,5-015 (система M), який передбачає 18 параметрів для оцінки хвилястості та шорсткості.

В підшипниковій промисловості існує методика, яка визначає хвилястість, методи її вимірювання (МЗ7.006.107-80) та встановлені норми.

В усіх методиках та стандартах відмічено, що хвилястість займає проміжне місце між відхиленням від форми та шорсткістю. Крім того, хвилястість визначається як компонент структури поверхні, на якій накладена шорсткість [2, 10].

Існують числові значення параметру хвилястості (таблиця 1.2) відповідно до визначених для них класів [6].

Таблиця 1.2 – Значення максимальної висоти хвилястості W_{max} для прийнятих класів

Клас хвилястості	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Гранична висота хвилястості W_{max} , мкм	1	2	4	8	16	32	64	125	250

Важливим критерієм, що розмежує хвилястість, відхилення геометричної форми та шорсткість, є відношення кроку L_w до висоти H_w нерівностей.

Числове значення цього критерію для поздовжньої хвилястості наведено в таблиці 1.3. Аналогічний критерій для шорсткості має значно менші числові значення. Для хвилястості це відношення у більшості випадків перевищує 40 і коливається в достатньо широких межах для різних способів оброблення. Найбільші значення цього критерію характерні для чистових і вигладжувальних операцій [6].

Таблиця 1.3 – Геометричні характеристики поздовжньої хвилястості

Вид обробки	H_w , мкм	L_w , мкм	L_w/H_w
точіння	1,0-4,5	1,5-9	38-9000
розточування	5-10	7-8,2	60-135
фрезерування торцеве	1,5-6,0	1,6-7	267-4670
стругання	1,5-2,5	1,1-4,8	44-3200
шліфування циліндричне	1,5-16	2,5-13,5	156-9000
плоске	2,5-2,0	1,0-8,5	326-1629
			150-1150
полірування	1,3-3,5	1,5-6	430-4600
			2500-13600
притирання	0,75-2,0	0,6-0,8	300-1070

Процес хвилеутворення на оброблених робочих поверхнях деталей підшипників змінює якісні характеристики поверхневого шару. Наприклад, шорсткість хвилястої поверхні не однакова на виступах та западинах хвиль. Для круглого шліфування шорсткість розподіляється вздовж хвиль (таблиця 1.4) [6].

Таблиця 1.4 – Розподіл шорсткості хвилястої поверхні після круглого шліфування

Номер хвилі	1	2	3	4	5	Середнє значення висоти шорсткості, мкм
висота шорсткості в западині R_z , мкм	1,2	1,0	1,0	1,0	0,9	1,02
висота шорсткості на виступі R_z , мкм	0,9	0,7	0,9	0,7	0,8	0,8

З наведеної таблиці 1.4 видно, що в западинах висота шорсткості є більшою на 20-30%, ніж на вершинах. Це можна пояснити двома причинами. Відносні коливання інструменту та деталі призводять до збільшення глибини різання в западинах та зменшення на вершинах хвиль. Інструмент, маючи петлеподібну форму траєкторії, двічі проходить через область вершини хвилі, в результаті чого, зменшується шорсткість.

Наявність хвилястості на оброблюваній поверхні деталей підшипників призводить до нерівномірності глибини різання, цей чинник впливає на температуру в зоні контакту інструменту та деталі, разом з тим, і на величину розповсюдження пластичної деформації поверхневого шару. Температура в зоні контакту інструменту та деталі є визначним параметром для процесу різання та має суттєвий вплив на якість оброблюваної поверхні.

В утворенні нерівномірного за твердістю поверхневого шару суттєву роль відіграє структурна технологічна спадковість. Під час шліфування або суперфінішування хвилястість усувається, а якість поверхні значно покращується. Однак, це відноситься лише до геометричних властивостей поверхні. Фізико-механічні властивості в цьому випадку отримують м'які та тверді зони. Наявність хвилястості на оброблюваній поверхні впливає також на залишкові напруження. Із збільшенням висоти хвилі збільшується глибина

проникнення та абсолютна величина стискуючих абсолютних напружень, а розтягуючі напруження – знижуються.

Висновки по розділу 1

Підсумовуючи вище викладене, можна зробити висновок про те, що експлуатаційні характеристики та властивості підшипників залежать від показників фізико-механічного стану поверхні, до яких відносяться параметри мікро- та макронерівностей поверхні, а також параметри, що характеризують фізико-механічні властивості поверхневого шару – мікротвердість, поверхневі напруження тощо.

Очевидно, що проблема забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик деталей, зокрема, і підшипників в цілому, зводиться до технологічного забезпечення відповідних значень параметрів, що характеризують геометричний та фізико-механічний стан робочих поверхонь складових деталей.

РОЗДІЛ 2

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ ЗОВНІШНІХ КІЛЕЦЬ РОЛИКОПІДШИПНИКІВ З РЕГУЛЬОВАНОЮ НОРМАЛЬНОЮ СИЛОЮ

Шліфування доріжок кочення зовнішніх кілець конічних роликотішипників проводилось на внутрішньошліфувальному автоматі SIW-4B, загальний вигляд якого в складі дослідної установки показано на рис. 2.1.

Стратегія регулювання нормальної сили P_n , була комп'ютерно

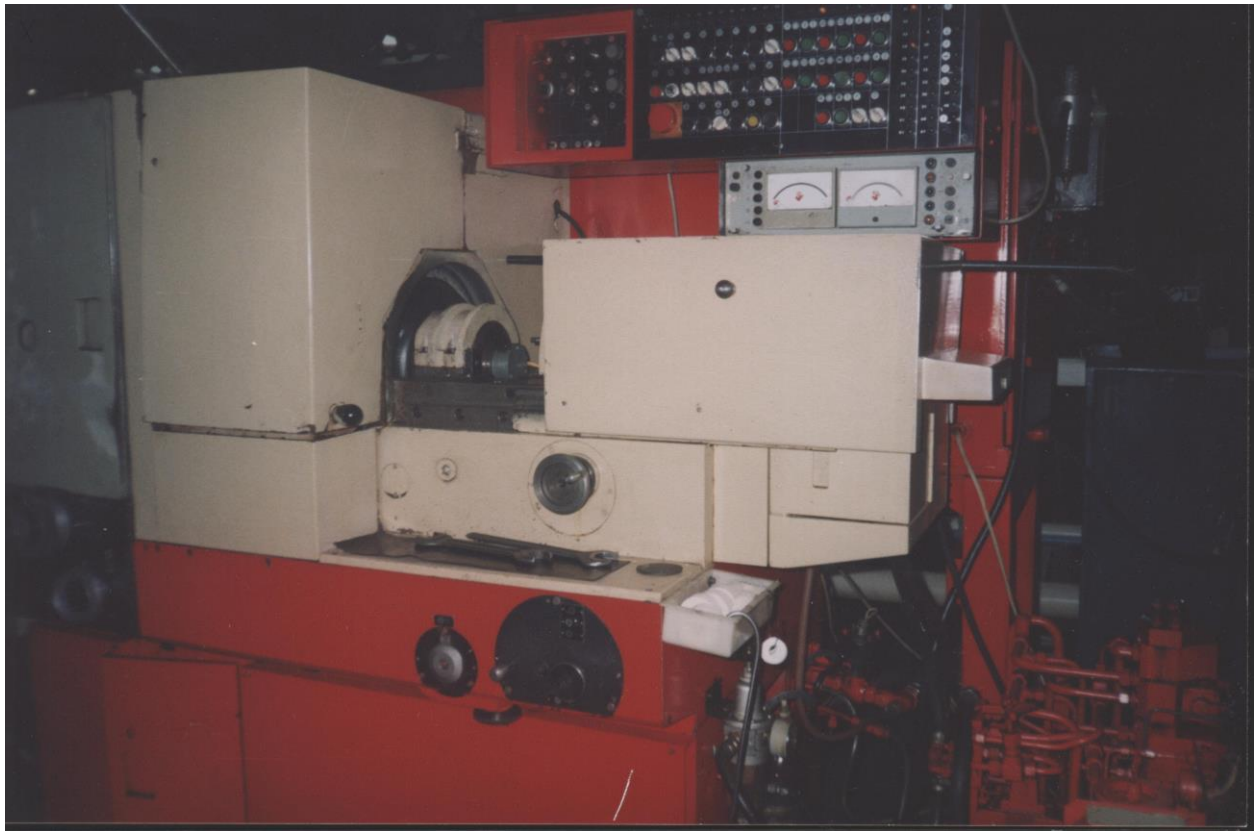


Рис. 2.1. Загальний вигляд дослідної установки в складі шліфувального автомату SIW-4B з системою активного контролю та керування процесом безцентрового шліфування доріжок кочення зовнішніх кілець роликотішипників симульована. При цьому були досліджені: по-перше, динаміка зміни сили P_n і, по-друге, вплив найбільших збурень, що часто зустрічаються на практиці, виникають в результаті ексцентричного закріплення деталі. Для порівняння цієї стратегії регулювання з традиційними способами управління процесом шліфування

проведено також симуляцію шліфування з постійною швидкістю подачі круга v_f і стабілізованою нормальною силою. Дослідження проведено для процесу, що складається з шліфування чорнового та чистового. Проведено також симуляцію процесу для визначення рівня адекватності оцінки параметрів моделі.

Алгоритм симуляції процесу шліфування з регульованою нормальною силою представлено на рис. 2.2. В якості вхідних величини введено наступні:

α - коефіцієнт пропорційності нормальної сили;

c_c - коефіцієнт сумарної (загальною) жорсткості системи ВІД;

w_{Fz} - задане значення нормальної сили для чорнового шліфування;

w_{Fw} - задане значення нормальної сили для чистового шліфування;

Δx_w - загальний радіальний припуск на оброблення;

Δx_{ww} - припуск на оброблення для чистового шліфування;

e_0 - початкова величина ексцентриситету деталі;

T_{w1} - час одного оберту деталі на етапі чорнового шліфування;

T_{w2} - час одного оберту деталі на етапі чистового шліфування;

d - кількість дефектів на один оберт виробу;

Y_R - постійна складова стохастичних збурень сили P_n ;

Y_p - змінна складова стохастичних збурень сили P_n ;

T_F - тимчасова змінна постійна для системи регулювання сили P_n .

Характер зміни сили $P_n(t)$ під час першого торкання шліфувального круга із заготовкою без врахування ексцентриситету показано на рис. 2.3. Якщо виміряна сила $P_n(t)$ досягає встановленого порогового значення w_{Fp} , то настає перемикання прискореної подачі v_{fp} на робочу. Зростання сили $P_n(t)$ безпосередньо після торкання круга із заготовкою та її урівноваження силами пружності ВІД для одного оберту заготовки наближено описано наступними рівняннями:

$$a_w(t = T_w) = v_{fp} T_w - \frac{1}{c_c} P_n(t = T_w); \quad (2.1)$$

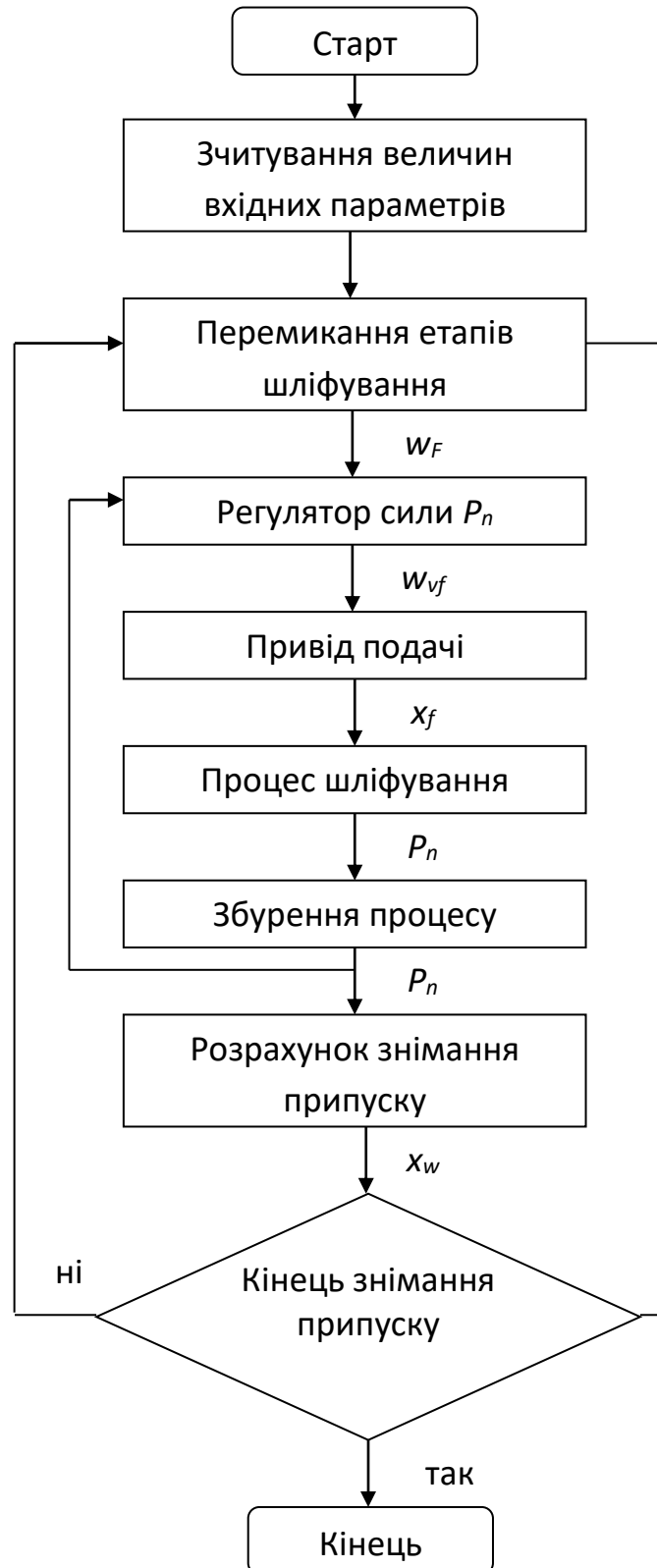


Рис. 2.2. Алгоритм симуляції процесу шліфування з регульованою нормальною силою

$$P_n = \frac{\alpha}{T_w} a_w(t = T_w); \quad (2.2)$$

$$\frac{P_n}{T_w} = \frac{v_{fp}}{\frac{1}{c_c} + \frac{T_w}{\alpha}} \quad (2.3)$$

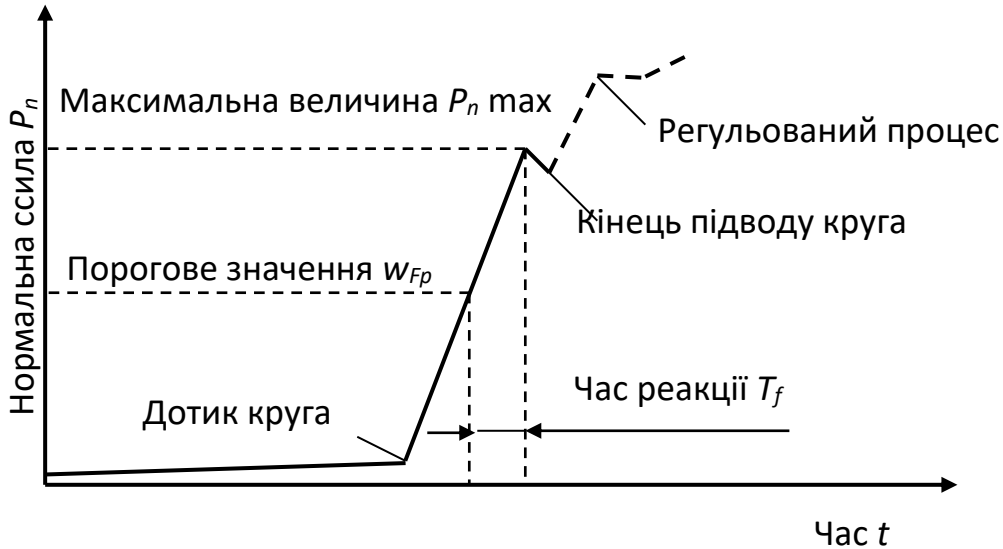


Рис. 2.3. Зміна нормальної сили під час першого контакту круга з заготовкою

На момент закінчення часу реакції T_r системи перемикання швидкості подачі v_{fp} максимальне значення сили P_{nmax} описано рівнянням:

$$P_{nmax} = w_{fp} + T_r \frac{v_{fp}}{\frac{1}{c_c} + \frac{T_w}{\alpha}} \quad (4.4)$$

У разі наявності у заготовки ексцентриситету з'являється додаткове зростання сили P_n після початку контакту із заготовкою (рис. 2.4).

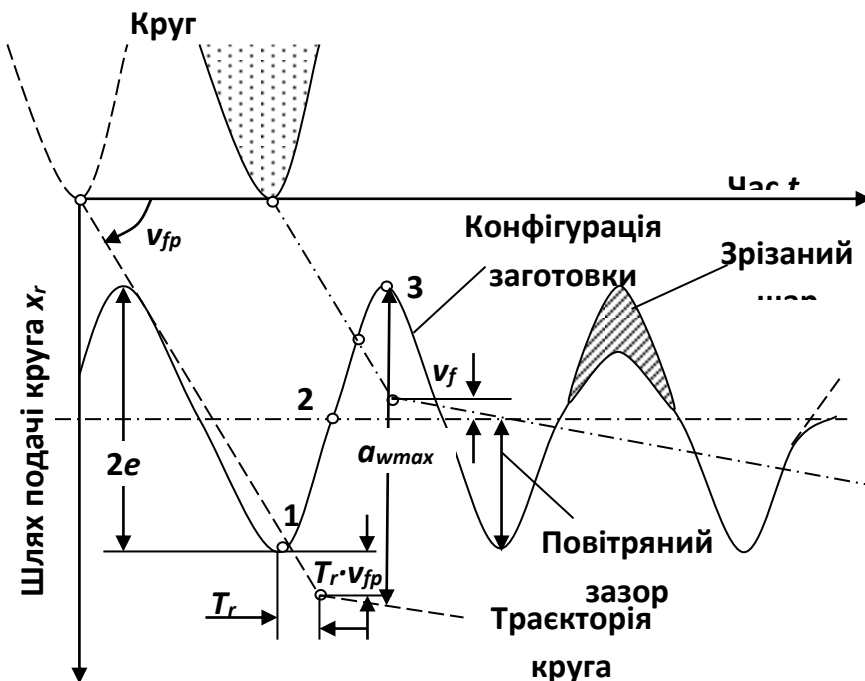


Рис. 2.4. Перший контакт круга із заготовкою з ексцентриситетом e

В результаті оберту ексцентричної e заготовки з урахуванням пружних переміщень системи ВІД визначається з рівняння:

$$\Delta P_{n \max} = \frac{\alpha \cdot 2e}{T_w + \frac{\alpha}{c_c}}. \quad (2.5)$$

Найчастіше, перше торкання круга із заготовкою настає вище за мінімум кривої розгортки профілю й приріст значення сили ΔP_n відповідно менший.

Для подальшої симуляції прийнято:

$$\Delta P_{n \max} = \frac{\alpha \cdot e_k}{T_w + \frac{\alpha}{c_c}}. \quad (2.6)$$

Періодичні збурення сили P_n , спричинені ексцентриситетом, описано рівняннями:

$$\Delta P_n(k) = \Delta P_{n \max} \sin 2\pi k T_0 / T_w; \quad (2.7)$$

$$e_k = e_{k-1} (1 - c_c T_w / \alpha), \quad (2.8)$$

де e_k - ексцентриситет заготовки в час k -того її оберту.

Стохастичні збурення n_R , що викликають зміни різальних властивостей круга, описано рівнянням:

$$n_R(k) = (Y_R + Y_P P_n(k)) Z(k), \quad (2.9)$$

де Y_R - постійна складова;

Y_P - складова, залежна від процесу (сили P_n);

Z - випадкові числа ($-1,0 < Z < 1,0$).

У програмі симуляції спочатку розраховується чистий (незбурений) сигнал сили P_n , а потім на нього накладаються періодичні збурення, що виникають в результаті ексцентриситету заготовки, і випадкові збурення, викликані зміною різальних властивостей шліфувального круга.

РОЗДІЛ 3

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЗОВНІШНЬОГО КІЛЬЦЯ ПІДШИПНИКА

Зміни в часі швидкості врізної подачі круга $v_f(t)$, нормальній сили шліфування $P_n(t)$, шляхи підведення круга $x_f(t)$ і знімання припуску на оброблення $x_w(t)$ для двоступінчастого шліфування, що складається з етапів чистового та чорнового, показано на рис. 3.1-3.3. Прийнято: загальний припуск на оброблення $\Delta x_w = 200$ мкм, припуск на чистове шліфування $\Delta x_{ww} = 50$ мкм.

На рис. 4.5 представлено перебіг процесу шліфування заготовки без похибки ексцентриситету ($e = 0$). Представлені залежності квазістаціонарного стану свідчать, що сила P_n , досягає лише в завершальних фазах окремих етапів. На етапі чорнового шліфування воно досягається через близько 13с, тоді як для шліфування чистового - після близько 15с. Тому і зміна знімання припуску на оброблення $x_w(t)$ настає із запізненням за зміною шляху підведення шліфувального круга $x_f(t)$.

Оскільки якість оброблюваної деталі залежить, в основному, від характеру зміни сили $P_n(t)$ на етапі чистового шліфування, величина припуску на оброблення чистове Δx_{ww} (точка перемикавання швидкості подачі v_{fz} на v_{fw}) повинна бути вибрана так, щоб сила $P_n(t)$ досягла квазістаціонарного стану і в цьому стані деталь зробила чималу кількість обертів. У нашому випадку загальний час процесу шліфування досягає 32с.

У разі шліфування деталей з ексцентриситетом на початку процесу виступають значні коливання сили $P_n(t)$ в результаті повороту ексцентриситету (рис. 3.2). Прийняте початкове значення ексцентриситету $e_0 = 20$ мкм. З характеру зміни сили $P_n(t)$ свідчить, що лише на 6-му оберті деталь починає шліфуватися по всьому контуру ($P_n > 0$).

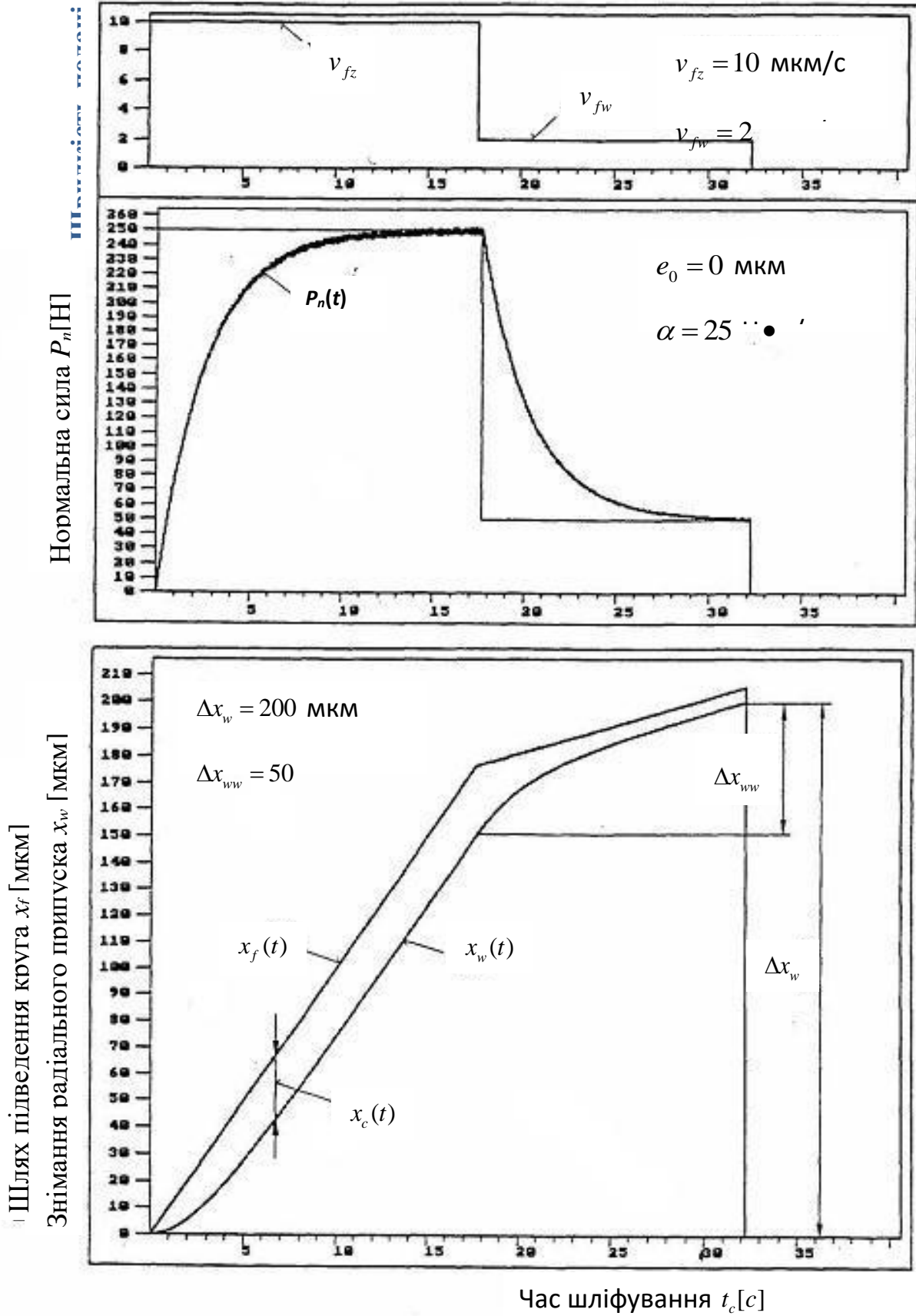


Рис 3.1. Зміна в часі характерних параметрів звичайного двоступінчастого процесу шліфування деталі за відсутності ексцентриситету ($e_0 = 0$, $\alpha = 25$ Н•с/мкм)

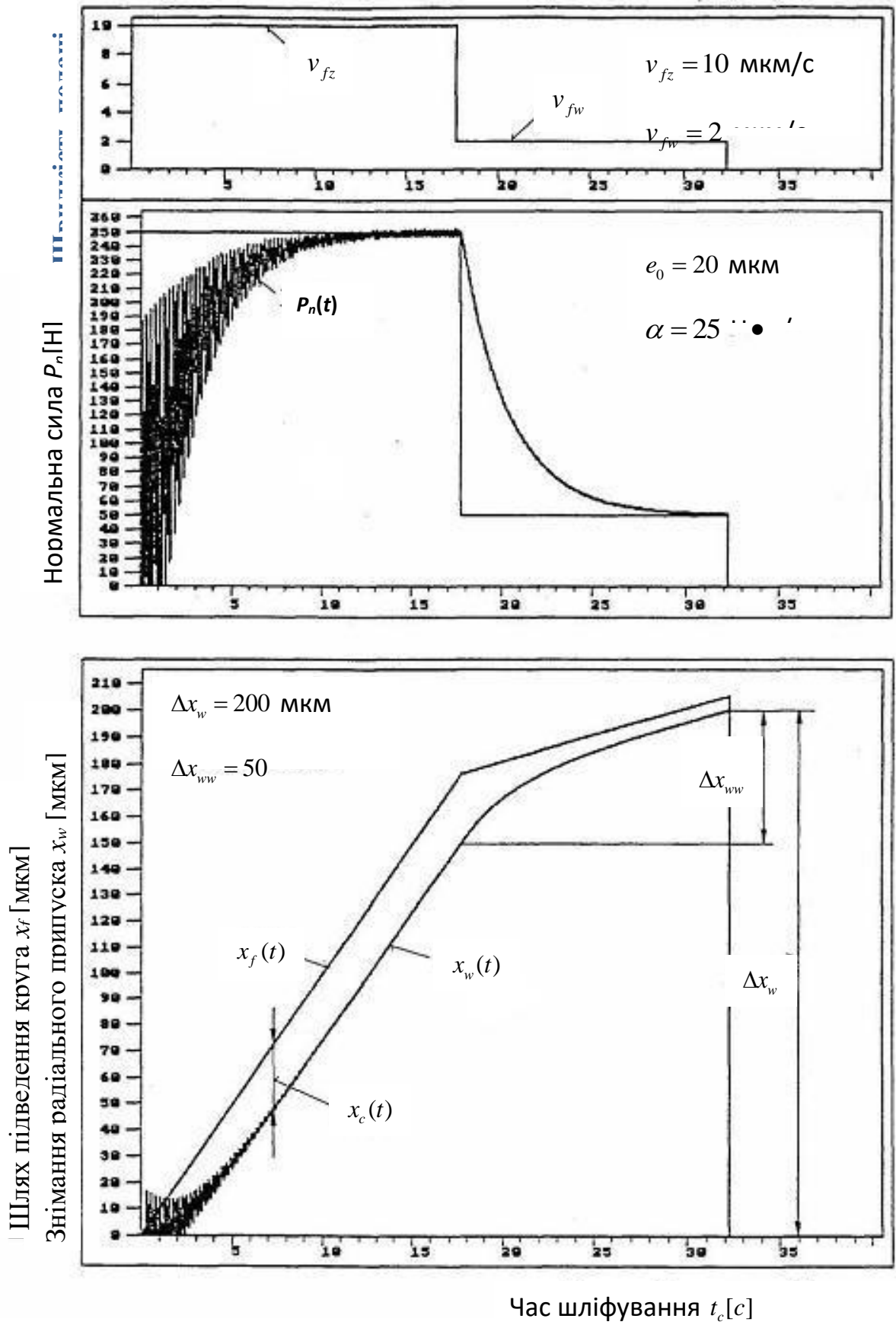


Рис 3.2. Зміна в часі характерних параметрів звичайного двоступінчастого процесу шліфування ексцентричної деталі ($e_0 = 20$ μm , $\alpha = 25$ $\text{H} \cdot \text{s}/\mu\text{m}$)

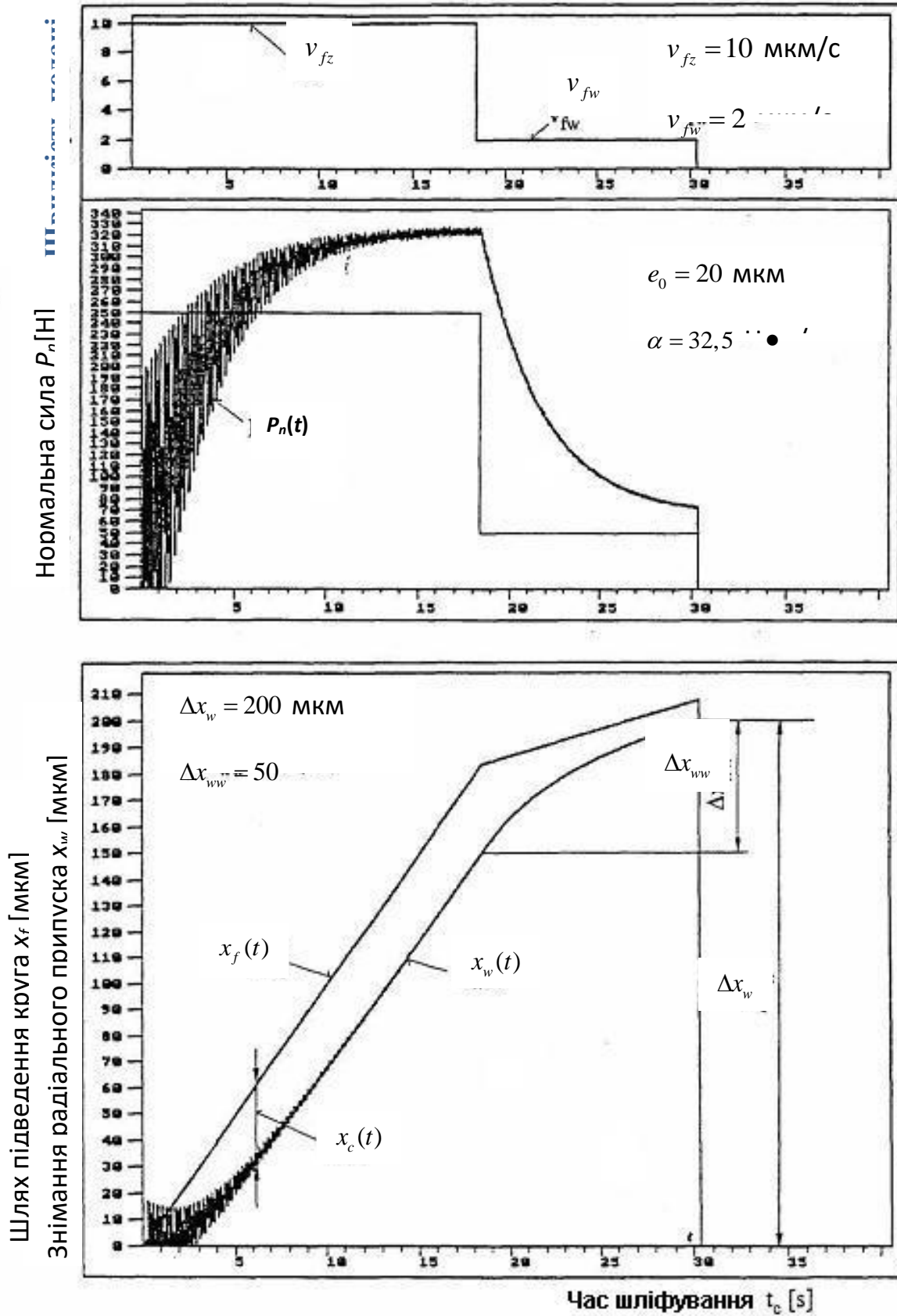


Рис 3.3. Зміна в часі характерних параметрів звичайного двоступінчастого процесу шліфування ексцентричної деталі ($e_0 = 20 \mu\text{м}$, $\alpha = 32,5 \text{ Н}\cdot\text{с}/\mu\text{м}$)

Вплив зміни різальних властивостей круга (збільшення коефіцієнта α) на характер перебігу процесу шліфування показано на рис. 3.3. Тут закладено збільшення коефіцієнта α на 30% по відношенню до початкової величини (рис. 3.2). З графіка видно зміну як нестационарних фаз, так і рівня сили $P_n(t)$. На стадії чорнового шліфування спостерігається зростання часу існування нестационарної сили $P_n(t)$, і, тим самим, часу перебігу всього етапу; в той же час, на стадії чистового шліфування спостерігається зменшення часу релаксації системи ВІД. Виникає це внаслідок збільшених пружних відтискань $x_c(t)$ системи ВІД на початковій стадії цього етапу. Звідси ж, за однакових припусків на оброблення для чистовому шліфуванні $\Delta x_{\text{шл}} = 50$ мкм, не наступає відповідне пружне відновлення (релаксація) системи ВІД і процес закінчується на нестационарній фазі зміни сили $P_n(t)$. В результаті не досягається якість обробленого виробу.

Початкова фаза шліфування. Шліфування з регулюванням нормальної сили заготовок із ексцентриситетом вимагає застосування спеціальної стратегії регулювання. Це показано на прикладі зміни нормальної сили P_n і швидкості поперечної подачі круга v_f , представленим на рис. 3.4.

Симуляція характеру зміни регулювання процесу проведено з кутовою швидкості виробу $n_w = 250$ об/хв і часу зчитування $T_0 = 20$ мс так, щоб на один оберт виробу припадало 12 вимірювань й регулювань ($d = 12$).

Виступаючи в початковій стадії після торкання шліфувального круга з виробом значні збурення, що викликаються наявністю ексцентриситету, регулятор намагається згладити шляхом зміни швидкості подачі круга v_f , при цьому для блокування відходу шліфувального круга від деталі і, тим самим, копіювання похибки ексцентриситету в алгоритмі регулювання використано обмеження зміни швидкості подачі v_f .

Якщо похибка регулювання $e_F = w_F - P_n < 0$ то $v_f = 0$, це означає, що після перевищення значення заданої сили w_F настає зупинка приводу шліфувального круга. Крім цього, під час перших декількох обертів заготовки ексцентриситет

викликає перевищення значення встановленої нормальної сили. При зміні ексцентриситету сила $P_n(k)$ зменшується значно нижче заданого значення w_F і регулятор різко збільшує швидкість подачі $v_f(k)$.

Результат може бути порівняний з нестабільністю контуру регулювання. Швидкість подачі, що значно коливається, викликає додаткове зростання збурень, спричинених ексцентриситетом.

Для запобігання виходу за задані граничні значення сили w_F під час оброблення ексцентричної заготовки повинне відбутися миттєве відведення шліфувального круга. Це, проте, привело б до часткового копіювання кругом ексцентриситету заготовки.

В результаті це збільшує час вирівнювання ексцентриситету, а тим самим, збільшення припуску на оброблення. Такий шлях суперечить прийнятним цілям регулювання сили P_n .

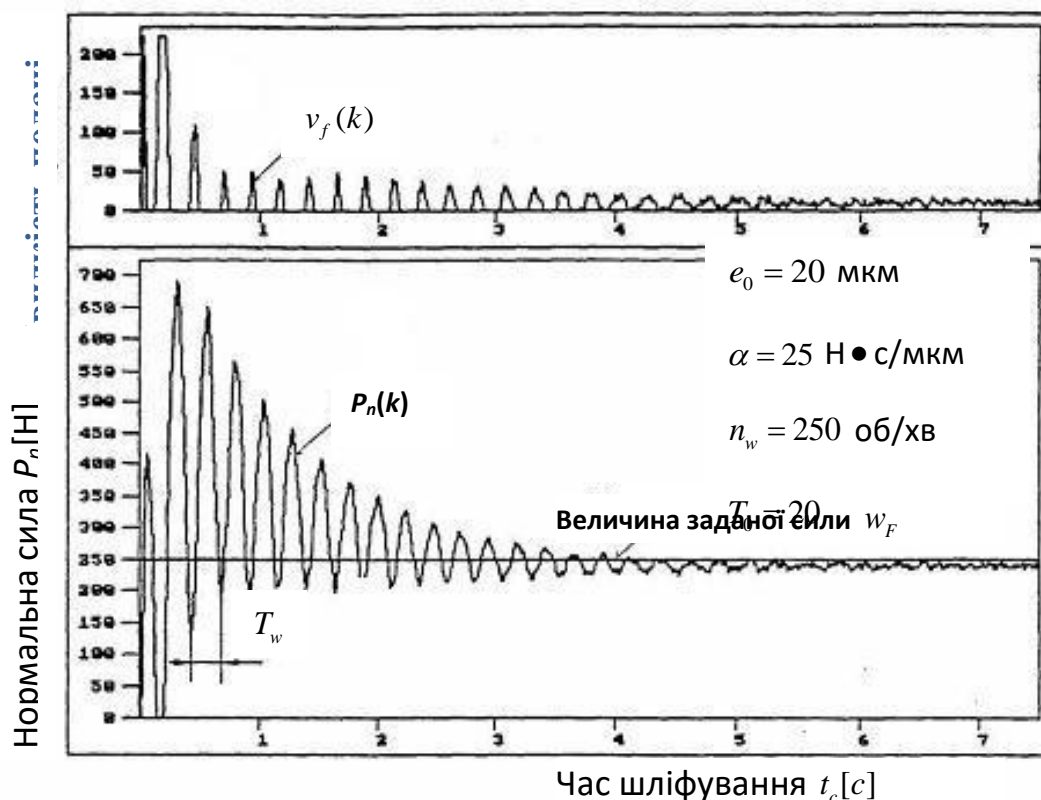


Рис. 3.4. Зміна у часі характерних параметрів в початковій фазі шліфування з потактним регулюванням процесу ($e_0 = 20$ мкм, $\alpha = 25$ Н•с/мкм, $T_0 = 20$ мс)

Такого типу небажані явища, що виникають в регульованому процесі шліфування ексцентричних деталей, а саме: перевищення значень заданої сили та часткове копіювання похибок ексцентриситету, повинні бути повністю виключені за допомогою відповідної стратегії регулювання в початковій фазі шліфування. Це досягається за умов запобігання досягненню кругом мінімального відрізка контуру заготовки (рис. 3.4). Швидкість подачі v_f повинна бути так змінена за допомогою регулятора, щоб амплітуда сили P_n навіть за максимального ексцентриситету не перевищила заданого значення w_F .

Для реалізації цих положень відпрацьовано спеціальну стратегію управління швидкістю подачі круга, алгоритм якої представлено на рис. 3.5.

Ядром стратегії є пам'ять максимальної величини вимірюваної сили P_n , яка за час одного оберту заготовки кожного разу вишукує максимальне значення на основі вимірювань $d=1-8$. Після закінчення одного оберту заготовки і виконанні $d=8$ вимірювань настає визначення максимального значення $P_{n \max}(k)$ та приведення в дію регулятора. Розрахована швидкість подачі $v_f(k)$ залишається незмінною під час подальшого оберту $(k+1)$. Одночасно починається пошук максимального значення сили $P_{n \max}(k+1)$ для подальшого оберту заготовки.

При такій стратегії, регулювання сили P_n здійснюється відповідно до частоти обертання заготовки, оскільки, регулятор встановлено на час такту $T_0=1/n_w$. Те, що частота зчитування вимірюваної сили P_n вища в 8 разів, не має значення, оскільки пам'ять максимальної величини нівелює результати вимірювань, приводячи їх до одного значення на один оберт заготовки. Але, для визначення значення $P_{n \max}(k)$ необхідно як мінімум 4 вимірювання.

З характеру зміни нормальної сили $P_n(k)$ слідує, що вже на третьому оберті заготовка шліфується по всьому контуру. Регулювання з тактом $T_0=1/n_w$ приводить до того, що максимальна амплітуда сили P_n для кожного оберту виробу не перевищує заданої величини w_F . Швидкість подачі круга $v_f(k)$

практично стабілізується на п'ятому оберті виробу. Таким чином досягається скорочення першої фази шліфування без ризику перевищення встановленої величини нормальної сили w_F .

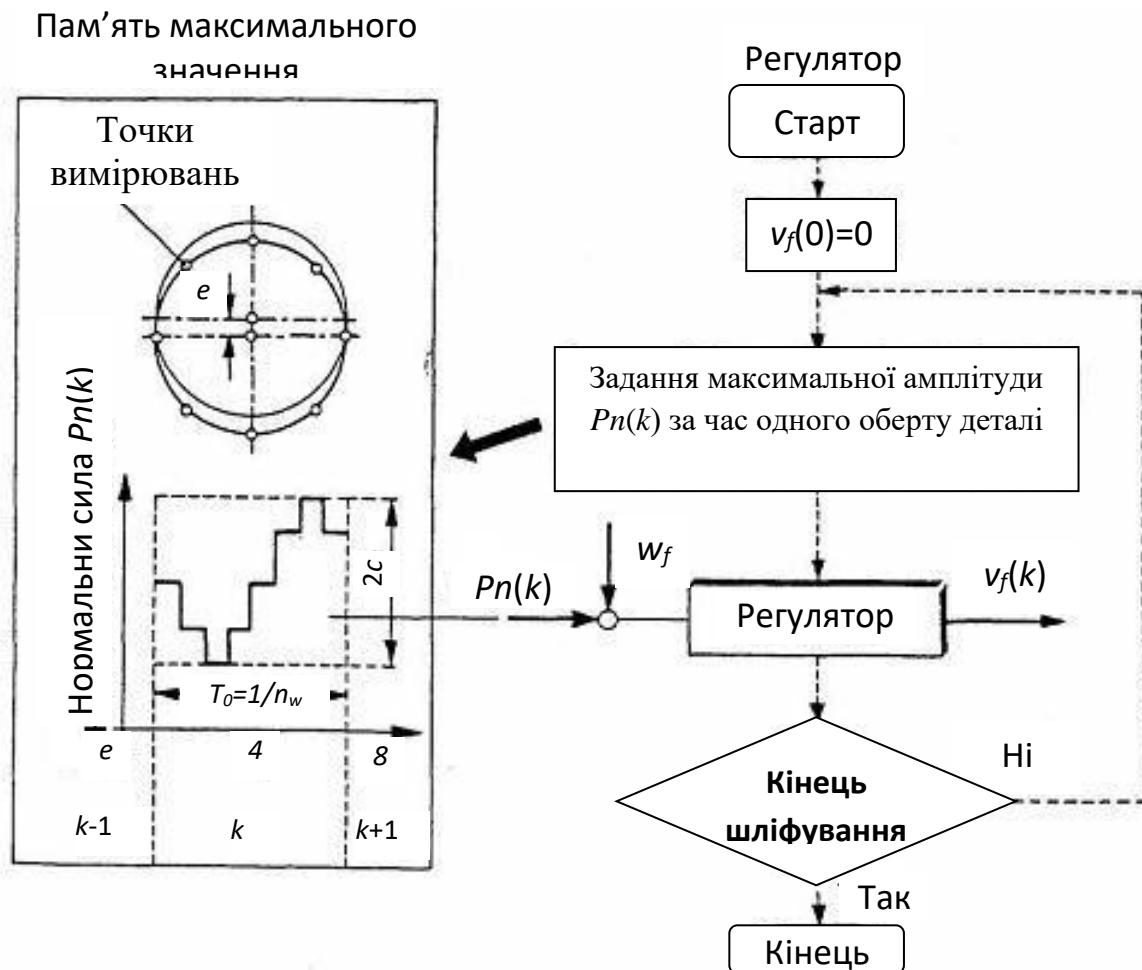


Рис. 3.5. Стратегія керування швидкістю подачі шліфувального круга в початковій фазі шліфування з пообертвовим (на 1 оберт деталі) регулюванням процесу ($T_0 = T_w = 1/n_w$)

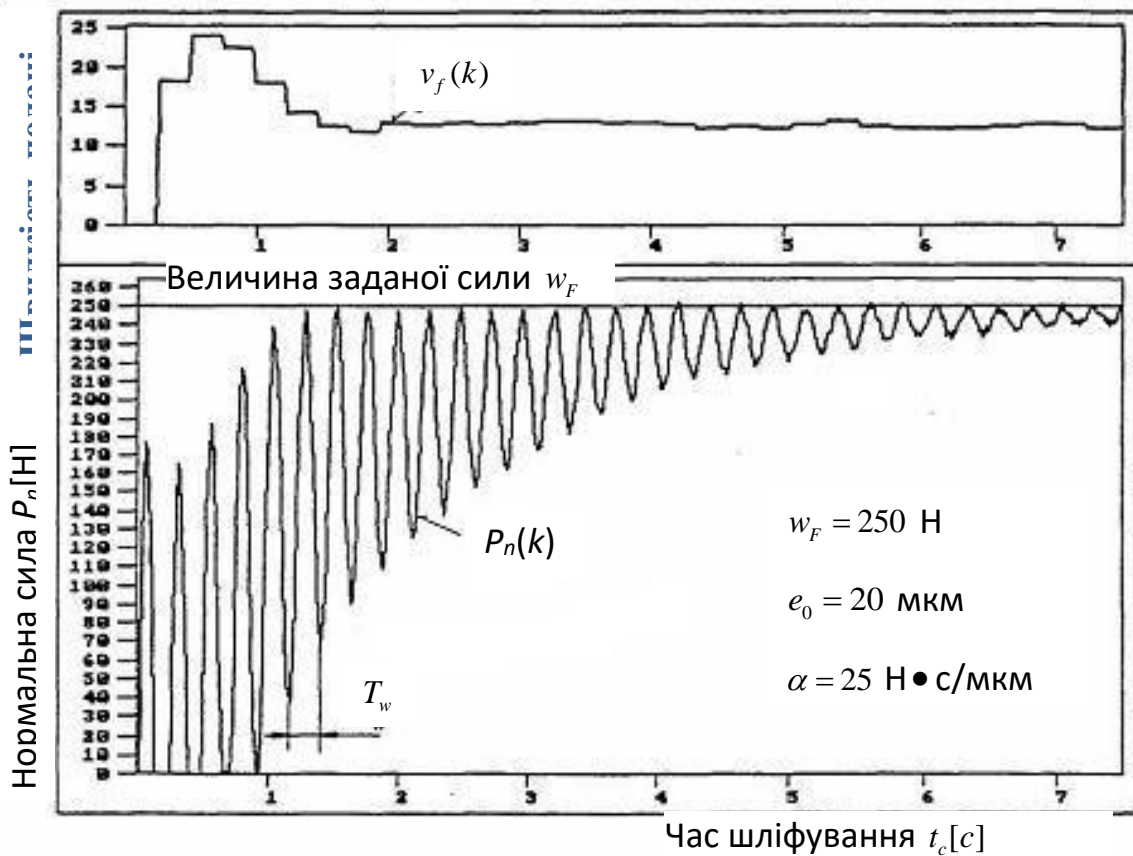


Рис 3.6. Зміна в часі характерних величин в початковій фазі шліфування з пообертвовим регулюванням процесу ($T_0 = T_w$)

Ця стратегія може застосовуватись для шліфування виробів, що мають задалегідь виконані канавки (вали з канавками шпон, шліцьові вали). Її можна також використовувати і для шліфування ідеально круглих деталей без будь-яких відхилень форми.

У разі, коли підлягаючі шліфуванню заготовки, окрім ексцентриситету мають ще й конусність, встановлення постійної заданої сили w_F для всього етапу чорнового шліфування може призвести до значних місцевих перевантажень шліфувального круга. Виникає це внаслідок того, що безпосередньо в зоні контакту шліфувального круга із заготовкою процес здійснюється з незначною шириною шліфування, що у свою чергу спричиняє появу значних одиничних сил P'_n ($P'_n = P_n / b_s$). Такого типу перевантаження можна обмежити відповідним зменшенням заданої величини безпосередньо після початку контакту круга із заготовкою (рис. 3.6).

Представлена лінійна функція заданої величини $w_F(k)$ обмежує силу P_n протягом 10 обертів заготовки. Функція ця описується трьома параметрами. Перший параметр задає зменшене початкове значення у відсотках (точка 1), по відношенню до заданого значення w_F . У представленому випадку це складає близько 65%.

Другий параметр - кількість обертів заготовки, здійснюваних із зменшенням заданої сили (точка 2). І, нарешті, третій параметр визначає кутове положення функції $w_F(k)$ (точка 3).

Перебіг процесу шліфування. Зміна в часі швидкості врізної подачі круга $v_f(t)$, нормальної сили шліфування $P_n(t)$, способи подачі шліфувального круга $x_f(t)$ і знімання припуску на оброблення $x_w(t)$ для шліфування з регулюванням сили $P_n(t)$ з різними динамічними ввідними (замінуючі тимчасові постійні T_F) і також регулювання $T_0 = T_w$ ($T_w = 0,24$ с), представлено на рис. 3.7, 3.8.

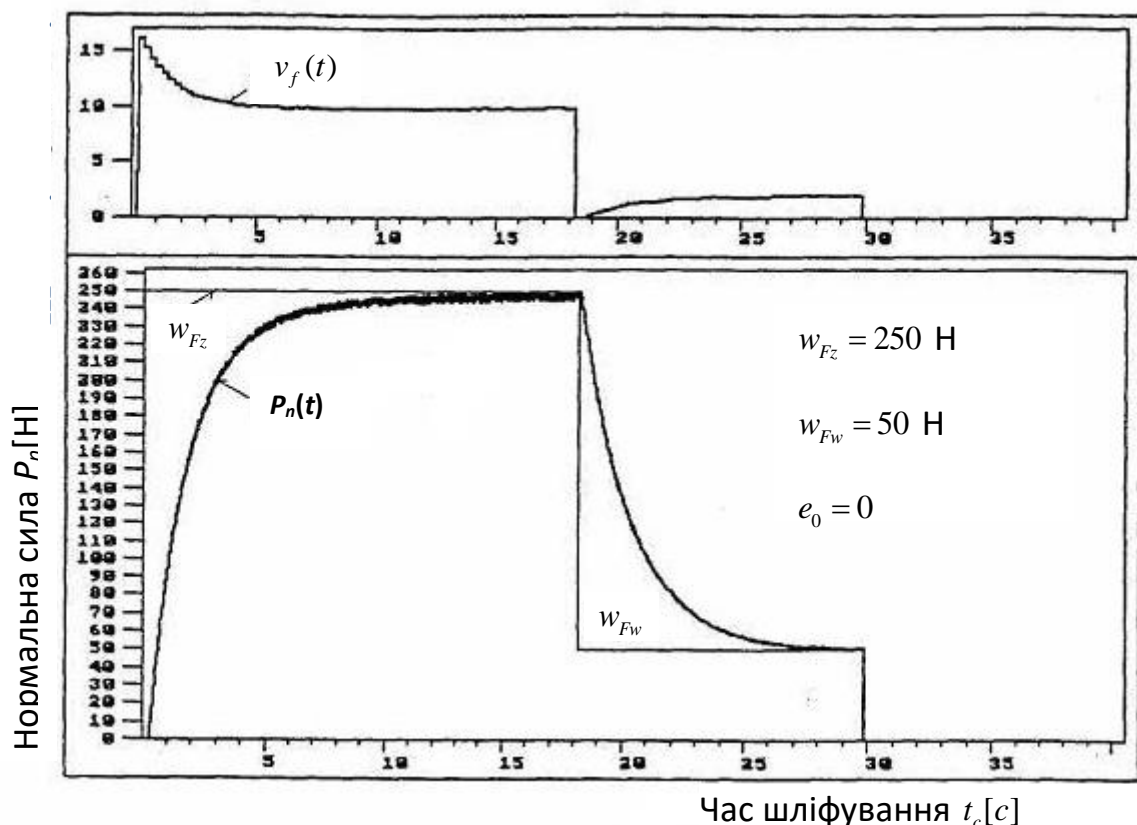


Рис. 3.7. Зміна в часі характерних величин регульованого двоступінчатого процесу шліфування із заданою динамікою ($T_F = 0,7$)

Для порівняння цих змін з традиційним шліфуванням (рис. 3.1) прийнято такі загальний припуск на обробку $\Delta r_w = 200$ мкм, припуск на

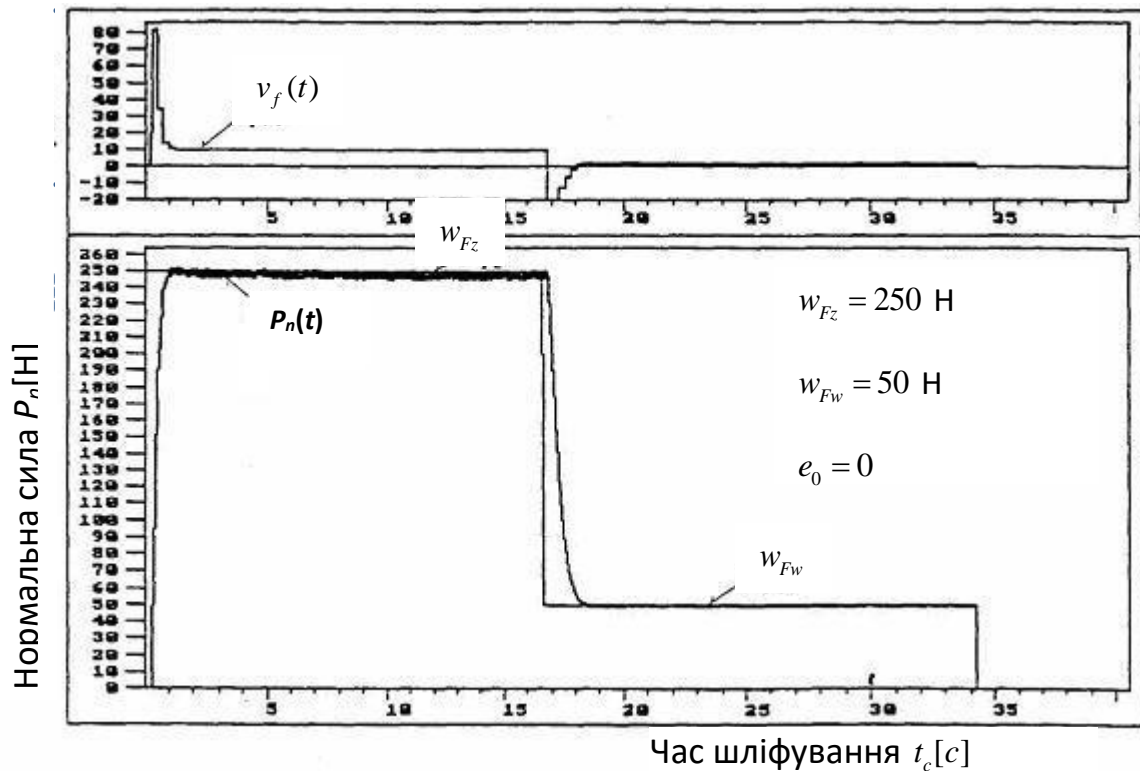


Рис. 3.8. Зміна в часі характерних величин регульованого двоступінчатого процесу шліфування із заданою динамікою ($T_F = 0,2$)

чистове шліфування $\Delta r_{ww} = 50$ мкм та ексцентриситет $e = 0$. Задані рівні сили чистового шліфування w_{Fz} та чорнового шліфування w_{Fw} відповідають квазістаціонарним значенням традиційного шліфування.

Рис. 3.7 показує характер перебігу процесу шліфування із регулюванням сили $P_n(t)$ для заміненої тимчасової постійної $T_F = 0,7$ с. У початковій фазі етапу чорнового шліфування в результаті значного відхилення e_F регулятор знижує швидкість подачі круга v_f від близько 17 мкм/с до значення близько 10 мкм/с, що відповідає заданому значенню сили w_{Fz} . На етапі чистового шліфування після короткого припинення приводу подачі круга починається плавне збільшення швидкості подачі аж до значення 2 мкм/с, яке

відповідає заданій силі w_{Fw} . Тривалість нестационарних фаз сили $P_n(t)$ в цьому випадку трохи менше, ніж у традиційному шліфуванні; в результаті тривалість процесу шліфування зменшується лише приблизно на 3 секунди.

Динаміка процесу значно покращується, коли $T_F = 0,2$ с (рис. 3.8). При цьому значенні отримуємо також краще відношення досяжної якості регулювання до витрат керування. З перебігу процесу помітно значне зменшення часу нестационарних фаз як на етапі чорнового, так і чистового шліфування.

Етап чорнового шліфування починається, із швидкістю подачі круга $v_f \cong 80$ мкм/с, тому вже після третього оберту виробу досягається задане значення сили для цього етапу. В результаті миттєвого відведення круга від деталі ($v_f < 0$), рівень заданої сили для чистового шліфування w_{Fw} досягається приблизно через 2 секунди. Це, в результаті, дозволяє призначити значно менший припуск на чистове шліфування Δx_{ww} .

У характеристиках перебігу процесу шліфування з регульованою силою, представлених на рис. 3.9 і 3.10, зменшено припуск на обробку для чистового шліфування від значення $\Delta x_{ww} = 50$ мкм до $\Delta x_{ww} = 10$ мкм порівняно з традиційним шліфуванням, показаним на рис. 3.6 і 3.7. Решта всіх величин, зокрема, загальний припуск на обробку Δx_w і початкова величина ексцентриситету e_0 , однакова як для традиційного, так і регульованого шліфування.

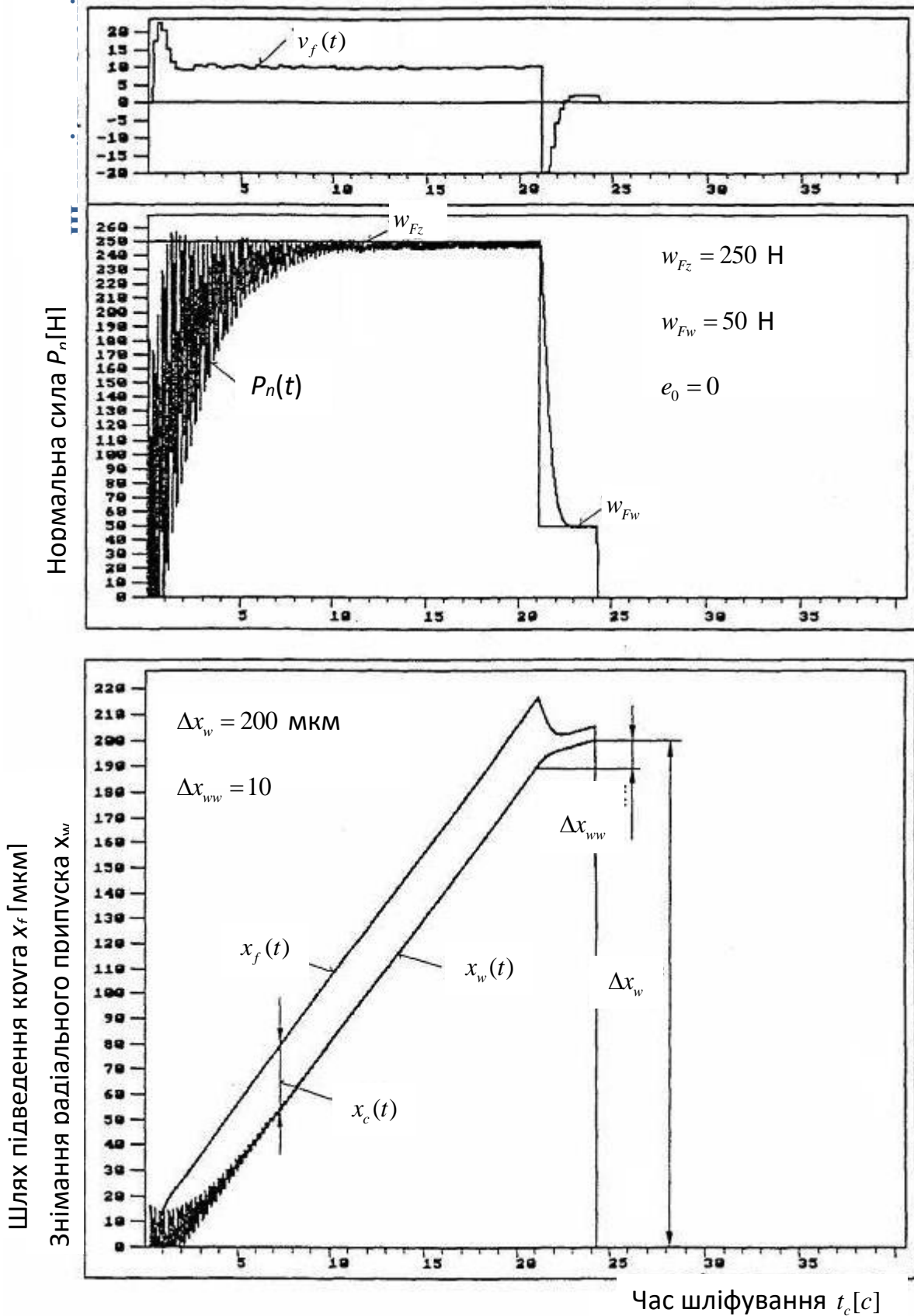


Рис. 3.9. Зміна в часі величин характеристик регульованого двоступінчастого процесу шліфування із зменшеною величиною припуску на чистове шліфування ($\Delta x_{ww} = 10 \text{ мкм}$, $\alpha = 25 \text{ Н} \cdot \text{с/мкм}$)

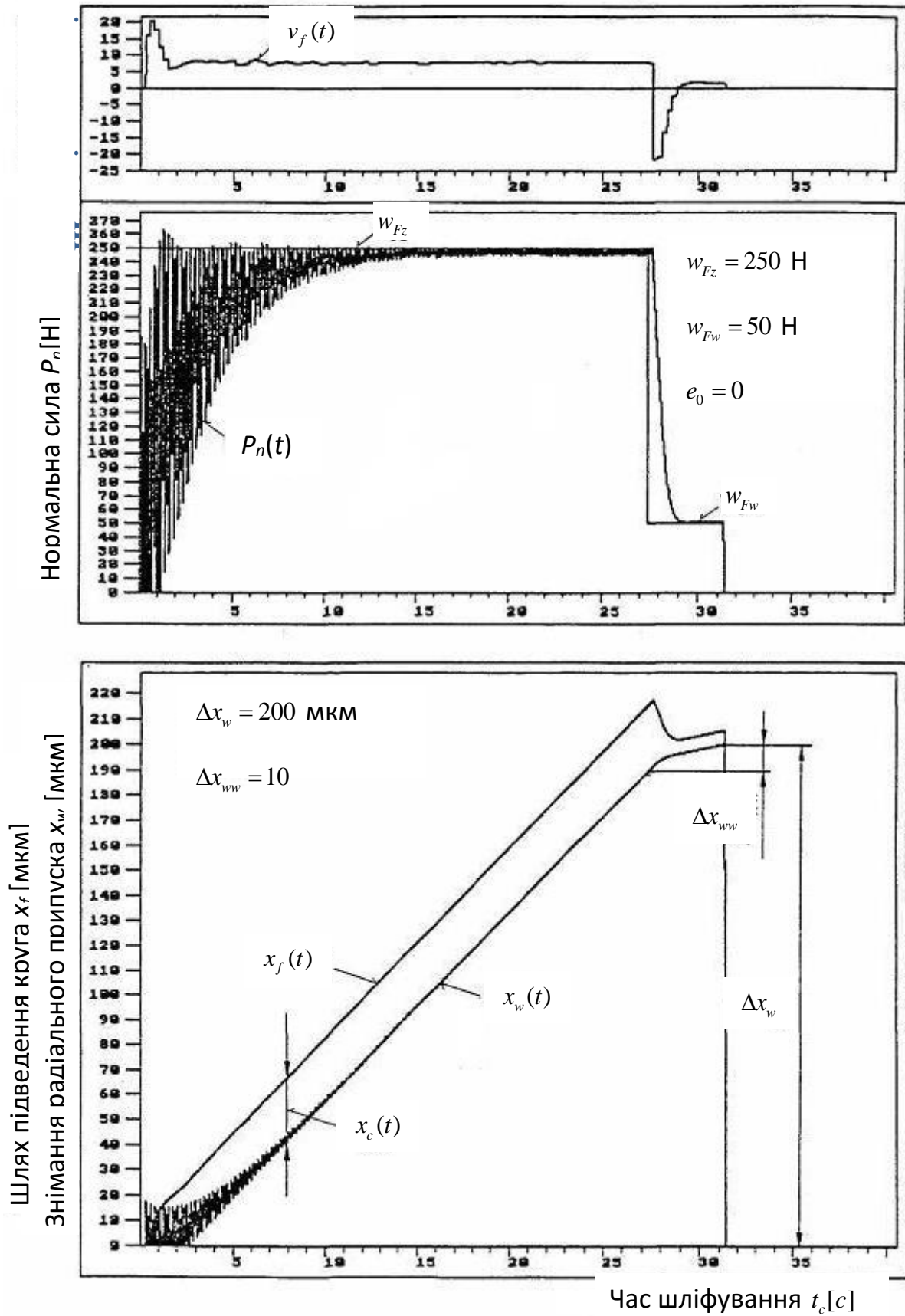


Рис. 3.10. Зміна в часі величин характеристик регульованого двоступінчастого процесу шліфування із зменшеною величиною припуску на чистове шліфування ($\Delta x_{ww} = 10$ мкм, $\alpha = 32,5$ Н·с/мкм)

Висновки по розділу 3

Можна таким чином стверджувати, що шліфування з регульованою силою P_n , навіть із значною втратою різальних властивостей круга (у нашому випадку близько 30%), не вимагає збільшення витрат часу в порівнянні з традиційним шліфуванням. В той же час, на початковій стадії періоду стійкості круга, коли він має ще високі різальні властивості, можна отримати значне зменшення часу шліфування.

ВИСНОВКИ

1. Результати дослідження перебігу процесу шліфування з регульованою подачею показали, що із значною втратою різальних властивостей круга (близько 30%) не отримується збільшення витрат часу в порівнянні з традиційним шліфуванням.

2. Встановлено, що під час шліфування деталей з ексцентриситетом на початку процесу з'являються значні коливання нормальної сили різання. Середнє значення початкового значення ексцентриситету не повинно перевищувати 20 мкм. Вивчення характеру зміни нормальної сили показало, що лише на 6-8 оберті деталь починає шліфуватись по всьому контуру ($P_n > 0$).

3. Стохастичні високочастотні коливні процеси в пружній системі верстату визначаються поперечними та крутними коливаннями підсистем шпинделів круга та деталі.

4. Середній радіус обробленої поверхні в перерізі площиною, перпендикулярною до осі обертання кільця, визначається сумою детермінованої складової, яка залежить від кута повороту деталі та випадкової складової. Для першого оберту деталі детермінована складова радіуса постійна, а для наступних обертів детермінована складова має періодичну та нестационарні перехідні частини.

5. Запропонований спосіб безцентрового шліфування поверхонь кочення зовнішніх кілець роликотідшипників з регульованою нормальною силою дозволяє на 50% зменшити висотні параметри хвилястості (з 2 мкм до 1 мкм), на 20 % збільшити опорну площу поверхні кочення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абакумов А. М. Видманов Ю. И., Михелькевич В. Н. Алгоритмизация процесса продольного точения. *Станки и инструмент*, 1972. №9. С. 29–31.
2. Бородачев Н. А. Анализ качества и точности производства. Москва : Машгиз, 1952. 252 с.
3. Бейзельман Р. Д., Ципкин Б. В., Перель Л. Я. Подшипники качения. Справочник. Изд. 6-е переработанное и дополненное. Москва : Машиностроение, 1975. 572 С.
4. Вишняков В. С. Пути повышения долговечности игольчатых подшипников карданных передач. *Вестник машиностроения*. 1996. №8. С. 25-26.
5. Воротников В. Г., Калетин С. В., Козлов М. В. Расчет подшипниковых узлов транспортных средств. Москва : Российский университет транспорта (МИИТ). 2018. 69 С.
6. Галахов М. А. Расчет подшипниковых узлов. Москва : Машиностроение, 1988. 272 С
7. Новоселов Ю. К., Гатаркин Е. Ю. обеспечение стабильности точности деталей при шлифовании. Саратов: изд-во Саратовского университета, 1988. 128с.
8. Рагульскис К. М., Юркаускас А. Ю. Вибрации подшипников. Ленинград : Машиностроение, 1985. 119 с.
9. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навч. посібник / За редакцією А.І. Грабченко. Харків, ХДПУ, 1999. 436 с.
10. Спришевский А. И. Подшипники качения. Москва : Машиностроение, 1968. 632 с.
11. Сидоров В. А. Аналіз характеру і причин несправностей підшипникових вузлів механізму хитання кристалізатора. *Наукові праці донецького національного технічного університету. Серія: машинобудування і машинознавство*. Донецьк: ДОННТУ, 2009. Вип. 6(154). С. 226-235.
12. Dong W.P., Mainsah E., Stout K.J. Some considerations for the digitisation and parametric characterization of surface roughness in three-dimensions-a viewpoint from standardisation. *Prace school of manufacturing and mechanical engineering, the university of birmingham*, 1996.

13. Oczos K. E., Burek J. Sterowanie adaptacyjne wielostopniowym cyklem szlifowania wglebnego. *Mechanik* 66, 1992, 7. P.2 37-240.
14. Burek J. Stabilizacja składowej normalnej siły szlifowania w wielostopniowym procesie szlifowania wglebnego walkow. *Praca doktorska, politechnika rzeszowska*, 1985. 185s.
15. Rowe W. Brian, *Hydrostatic, Aerostatic and Hybrid Bearing Design*. Amsterdam. Elsevier, Butterworth-Heinemann. 2012. 331 p.