

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Удосконалення конструкції широкоуніверсально фрезерного верстата для формування мікрорельєсів на поверхнях зубчастих коліс.

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МВм-61 спеціальності

133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

Керівник

(підпис)

Сеник А.А.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Кобельник В.Р.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Крупа В.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ФакультетІнженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

КафедраКонструювання верстатів, інструментів та машин

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Крупа В.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступенямагістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

студентуГурському Дмитру Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботиУдосконалення конструкції широкоуніверсально фрезерного верстата для формування мікрорельєфів на поверхнях зубчастих коліс.

Керівник роботиСеник Андрій Антонович к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «8» 11 2024 року № 4/7-1066

2. Термін подання студентом завершеної роботи20.12.2024

3. Вихідні дані до роботиІснуючі теоретичні і експериментальні результати досліджень технологічних і конструктивних методів та пристроїв по віброобробчуванні. Робочі креслення широкоуніверсального фрезерного верстата. Існуючі пристрої по формуванні регулярних мікрорельєфів.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд та аналіз стану питання постановка завдання та мети досліджень процесу формування мікрорельєфів. 2. Дослідження процесу вібраційного обкатування зубчастих коліс. 3. Конструкторсько-технологічна реалізація технології вібраційного обкатування зубчастих коліс.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Види зигзагоподібних мікрорельєфів АІ.

2. Види синусоїдальних мікрорельєфів АІ.

3. Кінематична схема АІ.

4. Огляд методів віброобробчування АІ

5. Віброобкатник (Інструмент) АІ

6. Наладка на зубодовбальну операцію АІ

7. Схема пристрою для віброобробчування. АІ

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., ст. викл. Сенік А.А.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., ст. викл. Клепчик В.М.		
Нормоконтроль	к.т.н., доц. Кобельник В.Р.		

7. Дата видачі завдання 20.11.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Гурський Д. А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Сеник А.А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Гурський Дмитро Андрійович. «Удосконалення конструкції широкоуніверсально фрезерного верстата для формування мікрорельєфів на поверхнях зубчастих коліс» 133 – Галузеве машинобудування; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; м. Тернопіль, 2024 р.

Робота присвячена удосконаленню конструкції широкоуніверсально фрезерного верстата для формування мікрорельєфів на поверхнях зубчастих коліс. Вібробробкування дозволяє створити регулярні мікрорельєфи певної конфігурації, що відрізняються низькою шорсткістю, стійкістю до корозії та здатністю утримувати мастило на поверхнях. Це покращенню зносостійкості вібробробкатаних поверхонь.

Розроблено конструкцію пристрою, який кріпиться до пінолі фрезерної бабки універсального верстата, та приводиться в дію шпинделем. Завдяки архімедовому кулачку рухома каретка виконує зворотно-поступальний рух. У каретці розташовані обкатники, які монтуються в ексцентричних втулках з можливістю налаштування під бажаний тип рельєфу.

Використання запропонованих і науково обгрунтованих технічних рішень надає можливість, реалізуючи орієнтацію втулок, підвищити якість поверзень зубчастих коліс та їх зносостійкість, що забезпечує певну економічну ефективність.

Основні положення виконаної роботи доповідались і обговорювались на науково-технічних семінарах кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин і висвітлені у тезах доповіді XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (11-12 грудня 2024 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – С. 90.

A N O T A T I O N

Gurskyi Dmytro Andriyovych. "Improvement of the design of a wide-universal milling machine for forming micro-reliefs on the surfaces of gear wheels". 133 – Branch Mechanical Engineering; Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University; Ternopil, 2024.

The work is devoted to the improvement of the design of a wide-universal milling machine for forming microreliefs on the surfaces of gear wheels. Vibrorolling allows you to create regular microreliefs of a certain configuration, characterized by low roughness, corrosion resistance and the ability to retain lubricant on the surfaces. This improves the wear resistance of vibrorolled surfaces.

The design of a device has been developed, which is attached to the quill of the milling head of a universal machine and is driven by a spindle. Thanks to the Archimedean cam, the movable carriage performs reciprocating motion. The carriage contains running-in rollers, which are mounted in eccentric bushings with the ability to adjust to the desired type of terrain.

The use of the proposed and scientifically substantiated technical solutions makes it possible, by implementing the orientation of the bushings, to improve the quality of gear surfaces and their wear resistance, which ensures a certain economic efficiency.

The main provisions of the work performed were reported and discussed at scientific and technical seminars of the Department of Design of Machine Tools, Tools and Machines and were highlighted in the abstracts of the report of the XIII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Modern Technologies" (December 11-12, 2024). – Ternopil: TNTU, 2024. – P. 90.

З М І С Т

ВСТУП	
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ТА МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ	
1.1 Види мікрорельєфів контактуючих поверхонь і аналіз їх якісних та експлуатаційних властивостей	
1.1.1 Класифікація регулярних мікрорельєфів і їх особливості	
1.2 Вплив якості поверхонь зубів зубчастих коліс на їх експлуатаційні властивості	
1.3 Показники і особливості фінішної обробки зубчастих коліс різанням	
1.4 Викінчувально-зміцнювальна обробка зубчастих коліс поверхневим пластичним деформуванням	
1.5 Висновки. Завдання і об'єкти досліджень	
2 ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ РОЗДІЛ	
2.1. Вибір діапазону регулювання виконавчих механізмів верстату	
2.2. Вибір потужності і типу двигунів	
2.3. Проектування приводу головного руху	
2.3.1. Вихідні дані для розрахунку приводу	
2.3.2. Обґрунтування принципової конструктивної схеми	
2.3.3. Кінематичний розрахунок приводу	
2.4 Розрахунок на міцність деталей і механізмів привода головного руху	
2.4.1 Розрахунок навантажень, що діють на привід	
2.4.2 Перевірочний розрахунок зубчастих передач на згин та контактну витривалість	

3. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	
3.1 Мета проведення досліджень	
3.2. Аналіз механізму деформування поверхні зубів колеса деформівними елементами евольвентного профіля	
3.3. Розробка принципової схеми пристрою із замкнутим контуром для віброобкатування зубчастих коліс	
3.4. Математичні моделі частково регулярних зигзагоподібних мікрорельєфів на плоских поверхнях	
3.5 Розробка конструкції віброобкатника	
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	
4.1. ОХОРОНА ПРАЦІ	
4.1.1. Типова інструкція для обслуговуючого персоналу на випадок виникнення аварії, пожежі	
4.2. БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	
4.2.1. Оцінка стійкості роботи промислового підприємства до впливу вражаючих факторів	
4.2.2. Оцінка стійкості роботи об'єкта до впливу ударної хвилі	
4.2.3. Оцінка стійкості об'єкта до впливу вторинних вражаючих факторів	
Основні результати та висновки	
Перелік посилань	
Додатки	

ВСТУП

Розвиток усіх галузей промисловості, що перебувають під впливом постійного науково-технічного прогресу, потребує використання високопродуктивних, точних і автоматизованих машин. Машинобудування прогресує вирішальну роль у забезпеченні науково-технічного прогресу в різних секторах економіки України. Його постійний розвиток і вдосконалення тісно взаємопов'язані з еволюцією верстатобудування, після чого металорізальні верстати разом з іншими технологічними обладнаннями сприяють створенню інноваційних видів техніки.

Ефективність функціонування деталей машин і механізмів, виключно з такими місцями компонентами, як зубчасті колеса, значною мірою залежить від якості їх робочих поверхонь, які формуються на завершальних етапах обробки.

Традиційні методи остаточної обробки зубчастих коліс, що вирізняються на різанні, вирізняються високою трудомісткістю та не завжди забезпечують належну якість.

Оптимальні результати з точки зору високої якості обробки та ефективності технологічних показників досягаються за час використання методів калібрувальної та зміцнювальної обробки зубчастих коліс, що обґрунтовуються на пластичні деформації поверхневого шару в холодному стані. Проте застосування таких підходів обмежується твердістю матеріалу зубчастих коліс (до HRC 40) .

Суттєвий потенціал для покращення експлуатаційних характеристик деталей машини досягається у вдосконаленні мікрогеометрії їхніх робочих поверхонь. Основним методом досягнення

такої регуляризації є вібраційне накатування, що базується на пластичній деформації поверхневого шару матеріалу за умов.

Дослідження в області вібраційного накатування переважно були зосереджені на обробці циліндричних деталей за допомогою одного деформуючого елемента. Комбінація його руху з рухом заготовки дозволяла досягти регуляризації та, відповідно, оптимізації процесу віброобкочування.

Обмежене знання про технологічний потенціал вібраційного накатування з його активним використанням у промислових умовах. Необхідно дослідити можливість об'єднання в одній операції процесів калібрування зубчастих коліс, регуляризації мікрорельєфу їх робочих поверхонь та зміцнення зубців. Це можна підвищити гнучкість управління процесом калібрування і, відповідно, розширити його можливість технологічні можливості.

Однією з основних цілей дослідження є розробка та теоретичне вивчення методу обробки та зміцнення циліндричних зубчастих коліс через пластичну деформацію з використанням осцилюючого інструменту. Такий підхід дозволяє об'єднати процес калібрування поверхні зубів із регуляризацією та оптимізацією їх мікрогеометрії, одночасно забезпечуючи виконання обробки процесу для низьких силових навантажень

На основі проведеного аналізу було розроблено процес обробки, в якому процес управління здійснюється через параметри схеми режиму обробки та конструкції.

1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ТА МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Види мікрорельєфів контактуючих поверхонь і аналіз їх якісних та експлуатаційних властивостей

Досвід експлуатації машин, приладів та апаратів працює про те, що якість, надійність і довговічність значною мірою залежать від особливостей контакту між спряженими деталями, а також від їх взаємодії з рідким, газоподібним чи іншим середовищем. Ці характеристики розпочалися станом поверхневого шару.

Останнім часом зростає увага до оптимізації якості контактуючих поверхонь, особливо до вдосконалення їх мікрогеометрії. Цей процес є складним і залежить від двох ключових факторів: різноманітності технічних контактів і явищ, що виявляються в місцях контакту, а також складної взаємозалежності між експлуатаційними властивостями контактів і мікрогеометрією поверхні.

У таблиці 1.1 представлені різновиди взаємодії між твердими тілами, а також їх контакт із газами, рідинами та плазмою разом із супровідними явищами. Відображено зв'язок між контактними явищами та параметрами шорсткості поверхні і регулярних мікрорельєфів. Таблиця 1.2 містить інформацію про якісне співвідношення між експлуатаційними характеристиками поверхонь і комплексу параметрів шорсткості поверхні.

Проте, крім цих загальних об'єктивних чинників, що визначають складність і трудомісткість рішення задачі оптимізації мікрогеометрії контактуючих поверхонь, є ще один чинник, що посилює ці труднощі: іррегулярний, навіть хаотичний характер мікрорельєфу поверхонь, що утворюються при застосуванні більшості традиційних способів фінішної обробки, заснованих на відділенні від загальної маси частинок оброблюваного матеріалу. До таких способів відносяться абразивна, різцева, електрофізична

обробки і деякі способи обробки тиском, наприклад, прокатка і волочіння, при яких на оброблених поверхнях мікрорельєф утворюється як негативний відбиток мікрорельєфу робочих поверхонь інструменту (відповідно прокатних валів і фільсера) після їх шліфування або абразивного доведення.

Формування мікрорельєфу з неоднорідними за формою і розмірам нерівностями є наслідком нерівномірного за своєю природою процесу пластичної деформації оброблюваного матеріалу в зоні контакту його з деформуючим елементом інструменту; гранично неоднорідний і процес відділення частинок матеріалу від загальної його маси. Такий характер мікрорельєфу викликає складність в рішенні трьох основних задач оптимізації мікрогеометрії: надійного, науково обґрунтованого нормування, технологічного забезпечення, точного вимірювання і контролю. В результаті практично неможливе нормування параметрів мікрогеометрії на основі аналітичних розрахунків, наприклад, таких, як фактична площа контакту і фактична площа спряжуваних поверхонь, тиск, сприймані навантаження, маслоємкість і ін.

Ускладнюється і розрахункове технологічне забезпечення заданої конструктором мікрогеометрії, оскільки неоднорідна пластична деформація порушує основні геометричні залежності між формою, розмірами і взаєморозташуванням нерівностей, з одного боку, і технологічними параметрами режиму обробки і геометрією інструменту — подачею і радіусом закруглення вершини різця при точінні — з іншого. Неоднорідність мікрорельєфу ускладнює також контроль геометричних параметрів якості поверхні і їх стандартизацію. Зокрема, знижується точність вимірювань як стандартизованих ДСТУ 2789-98, так і нестандартизованих параметрів шорсткості поверхні.

При стандартизації доводиться приймати як параметри мікрорельєфів середні величини, наприклад Ra — середнє арифметичне відхилення профілю; Rz — висота нерівностей профілю по десяти точках; S — середній крок нерівностей по вершинах; Sm — найбільша висота нерівностей

профілю. Це ускладнює не тільки сприйняття цих параметрів як характеристик мікрогеометрії реальної поверхні, але і їх розрахунок, відтворення, вимірювання і контроль.

Таблиця 1.1 Різні види поверхневої взаємодії твердого тіла

З твердим тілом	Параметри мікрогеометрії	З рідиною	Параметри мікрогеометрії	З газом	Параметри мікрогеометрії
Тертя кочення і ковзання	tp, r, Rz, Ra, α	Змочування	φ, α, r', Rz	Адсорбція	Ra, S, r', l, φ
	R, N, Tp, β		R, N, Tp, β		R, N, Tp
Статичне і динамічне навантаження	r, ω, Rz, tp	Віддзеркалення, заломлення електромагнітних хвиль	$Rmax, \sigma, S$	Теплопередача, передача імпульсу	$Rmax, \varphi, \alpha$
	R, N, Tp, γ, β		R, N, Tp, β		R, N, Tp, β
Теплопередача	r, Rz, ω, tp	Електропровідність гальванічні явища	φ, r, α	Віддзеркалення, заломлення електромагнітних хвиль	$Rmax, \sigma, S$
	R, N, Tp		R, N, Tp, β		R, N, Tp, β
Віддзеркалення, заломлення електромагнітних хвиль	$Rmax, tp, \sigma, S, \alpha$	Електризація	$\varphi, l, Rmax$	Емісія електронів	r, φ, S, α
	R, N, Tp, γ, β		R, N, Tp		R, N, Tp, β
Електропровідність	r, Rz, ω, tp	Корозія	Ra, r', S	Взаємодія з електронними пучками	φ, l, r, r'
	R, N, Tp				R, N, Tp
Електризація	tp, r, ω		R, r', Tp	Електризація	φ, S, l
	R, N, Tp				R, N, Tp

Позначення: Ra — середнє арифметичне відхилення профілю; Rz — висота нерівностей профілю по десяти точках; $Rmax$ — найбільша висота нерівностей профілю; S — середній крок нерівностей по вершинах; tp — відносна опорна довжина профілю; r — радіус закруглення вершин нерівностей; r' — радіус закруглення западин нерівностей; α — кут нахилу нерівностей твірних; ω — число нерівностей на одиницю площі; σ — коефіцієнт неоднорідності; φ — кут, що визначає напрям нерівностей; l — дійсна довжина профілю; R — висота елементів регулярного мікрорельєфу; N — число елементів регулярного мікрорельєфу на одиницю поверхні; α, β — напрями розташування елементів регулярного мікрорельєфу.

Таблиця 1.2 Взаємозв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь з геометричними параметрами їх мікрорельєфу

✎

Експлуатаційні характеристики	R_a	R_z	R_{max}	S	F_{on}	$k_{зап}$	β	r	$F_{ист}$	$L_{ист}$	N	$\frac{r}{R_{max}}$	Шорсткість поверхні	σ_{Rz}	r'
Зносостійкість	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Коефіцієнт тертя	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Втомна міцність	+	+	+										+	+	+
Міцність посадок	+	+	+		+	+		+			+	+			
Корозійна стійкість	+	+	+	+		+		+				+			+
Обтічність газами і рідинами	+	+	+	+			+	+							
Пиловидалення	+	+	+	+			+	+							+
Міцність і якість гальванічних покриттів	+	+	+	+			+	+				+			
Контактна жорсткість	+	+	+	+	+			+			+	+	+		
Відбивання світлових і інших променів	+	+	+	+	+	+		+			+	+	+		+
Тепловідбиття	+	+	+		+	+	+	+			+		+	+	+
Властивості тонких плівок	+	+	+	+	+	+		+			+	+			
Опір схоплюванню	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+		
Гідрогустина	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+		+	+	+
Електрична міцність	+		+			+	+	+				+		+	+
Очищення при вакуумізації	+	+	+			+	+	+				+		+	+
Тертя у вакуумі	+	+	+	+	+		+	+			+	+	+	+	+
П о з н а ч е н н я : R_a — середнє арифметичне відхилення профілю; R_z — висота нерівностей профілю по десяти точках; R_{max} — найбільша висота нерівностей профілю; S — середній крок нерівностей по вершинах; F_{on} — площа опорної поверхні; $k_{зап}$ — коефіцієнт заповнення профілю; β — кут нахилу бокової сторони нерівностей; r — радіус закруглення вершин нерівностей; $F_{ист}$ — сумарна площа реальної поверхні; $L_{ист}$ — довжина реального профілю; N — число елементів регулярного мікрорельєфу на одиницю поверхні; σ_{Rz} — коефіцієнт неоднорідності; r' — радіус закруглення западин нерівностей;															

Неоднорідність мікрорельєфу шорстких поверхонь є негативною властивістю, що виникає під час застосування більшості традиційних способів обробки. Це визначає головний напрям удосконалення фінішних операцій у виробництві деталей машин і приладів віброобробчування поверхні. Аналіз науково-технічної та патентної літератури свідчить, що у всіх високорозвинених промислових країнах приділяється значна увага

вирішенню цієї задачі, оскільки поліпшення якості поверхонь безпосередньо впливає на робочі характеристики та довговічність виробів.

У галузі мікрогеометрії поверхонь науково-технічний прогрес найвиразніше виявляється саме у створенні регулярних мікрорельєфів. Це означає, що основним напрямком удосконалення фінішних операцій обробки деталей стає цілеспрямоване формування на поверхні заданої структури (малюнка) нерівностей із чітко визначеними параметрами. Залежно від ступеня впливу на початковий (базовий) мікрорельєф, усі відомі способи формування регулярного мікрорельєфу поділяються на дві групи:

1. Способи створення частково регулярного мікрорельєфу

У цьому випадку на оброблюваній поверхні безперервно або дискретно створюються спеціальні заглиблення чи канавки, а між ними зберігається наявний (як правило, нерегулярний) мікрорельєф. Така технологія дає змогу:

- Поліпшити мастильні та триботехнічні властивості поверхні завдяки «кишеням» для мастила.
- Знизити коефіцієнт тертя та зменшити зношування в умовах тертя ковзання чи кочення.
- Локально впливати на певні робочі зони поверхні, залишаючи решту мікрорельєфу майже незмінною.

2. Способи створення повністю регулярного мікрорельєфу

Тут первинний мікрорельєф видаляється або суттєво змінюється. Унаслідок цього формується повністю новий мікрорельєф з нерівностями, однаковими за формою, висотою та взаємним розташуванням. Такий підхід дозволяє:

- Отримувати стабільні та повторювані триботехнічні властивості (зносостійкість, опір задиру тощо).
- Значно підвищувати якість поверхні за рахунок зниження шорсткості та оптимізації форми нерівностей.
- Забезпечувати високу точність сполучень і герметичність (за потреби).

Складність впровадження цих технологій у промислових масштабах тривалий час полягала у відсутності досконалих, високопродуктивних і універсальних методів для формування заглиблень необхідного розміру, форми й розташування. На сучасному етапі розвиток лазерних, електроерозійних, ультразвукових, гравірувальних та комбінованих способів обробки значно розширив можливості створення регулярного мікрорельєфу, відкриваючи шлях до ширшого використання цих рішень у промисловій практиці.

1.1.1 Класифікація регулярних мікрорельєфів і їх особливості

Схема процесу віброобробочування передбачає таку кінематику взаємодії обертової заготовки і деформуючого елемента, що створює можливість тонкого регулювання всіх параметрів режиму. Це стосується як плавної чи ступінчастої зміни частоти обертання заготовки, так і подачі деформуючого елемента. Завдяки цьому можна гнучко варіювати види регулярних мікрорельєфів та впливати на значення всіх їхніх параметрів (глибину, форму, крок нерівностей тощо).

Такий широкий діапазон можливостей зумовлює потребу в ретельній класифікації отримуваних мікрорельєфів. Автор пропонує класифікувати їх за трьома основними критеріями:

Цільове призначення включає те, для чого саме створюється регулярний мікрорельєф:

- Зниження тертя або підвищення зносостійкості;
- Поліпшення змащувальних властивостей (ефект “масляних кишень”);
- Зниження шуму чи вібрацій;
- Інші функціональні завдання.

Експлуатаційні властивості Враховують, які саме характеристики роботи деталі покращуються:

- Стійкість до задирів;
- Опір утворенню мікротріщин;
- Корозійна стійкість;
- Точність прилягання в вузлах тертя тощо.

Спосіб технологічного забезпечення утворення мікрорельєфу. Пояснює, яким чином і на якому обладнанні створюються заглиблення та нерівності:

- Тип обладнання (віброустановка, верстат з комбінованим приводом тощо);
- Вид контактної взаємодії (гребінь, ролик, кулька, інший деформуючий елемент);
- Кінематика процесу (співвідношення обертання заготовки й коливань інструмента).

Таким чином, віброобробчування дозволяє не лише отримувати високоякісні фінішні поверхні із заданою структурою, а й значно розширює діапазон можливих мікрорельєфів завдяки варіюванню ключових режимних параметрів. Звідси виникає необхідність у всеохопній і суворій класифікації, що дасть змогу систематизувати отримані результати і цілеспрямовано розробляти технологічні процеси для досягнення потрібних експлуатаційних властивостей деталей.

Класифікація, приведена на рис. 1.2 . Мікрорельєфи з елементами опуклої і увігнутої форми (рис. 1.3) відрізняються цільовим призначенням поверхонь, на яких вони утворені, експлуатаційними властивостями цих поверхонь і технологією їх утворення.

На рис. 1.3 показані профілограми елементів опуклої і увігнутої форми і зовнішній вигляд таких поверхонь. Розглянемо лише деякі особливості опуклих мікрорельєфів.

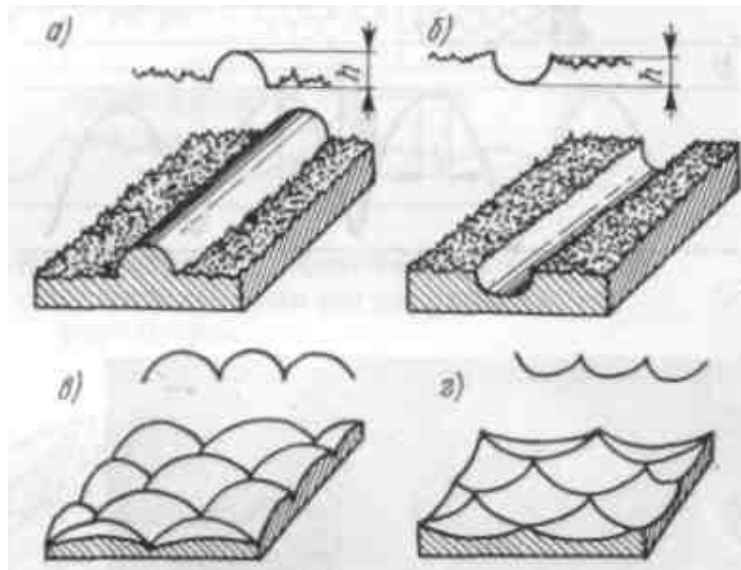


Рис. 1.2 - Класифікація регулярних мікрорельєфів

Поверхні першої групи з системами певним чином розташованих виступів, утворені прокатними валками з системами канавок, підрозділяються на три види: I—з виступами, що не дотикаються; II — з тими, що дотикаються; III — з пересіченими.

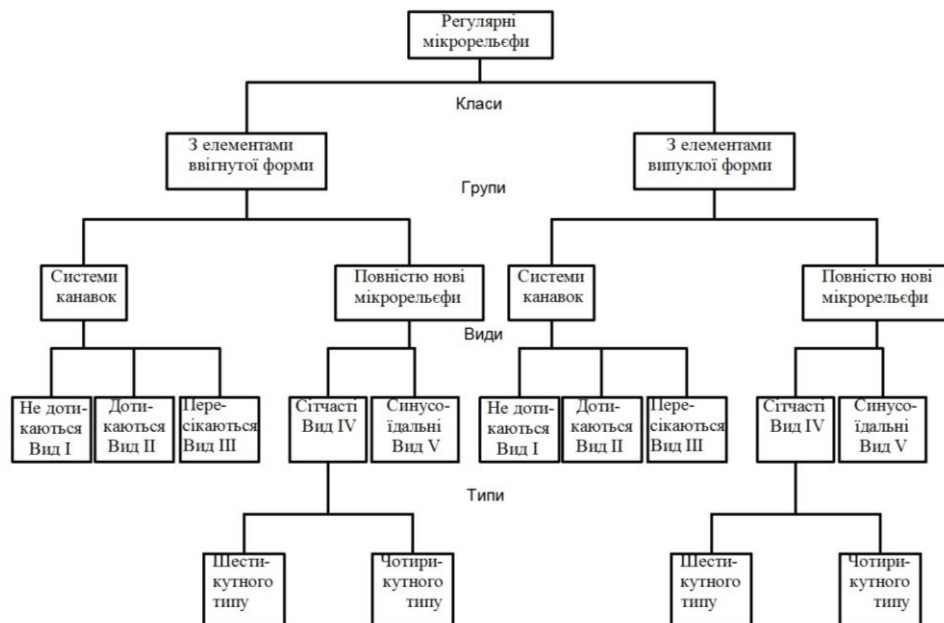


Рис. 1.3 – Профілограми і зовнішній вигляд елементів: а — опуклої і увігнутої форми; б — вид елементів в перетині; в — профілограми поверхонь з елементами опуклої і увігнутої форми; г — вид поверхонь з елементами опуклої і увігнутої форми в плані

Граничні умови формування кожного типу мікрорельєфу, регулювання параметрів цих структур, а також залежності між їх значеннями та режимами віброобробчування прокатних валків описані нижче. Радіус сферичної частини виступів визначається радіусом деформуючого елемента, який формує канавки на поверхні прокатних валків.

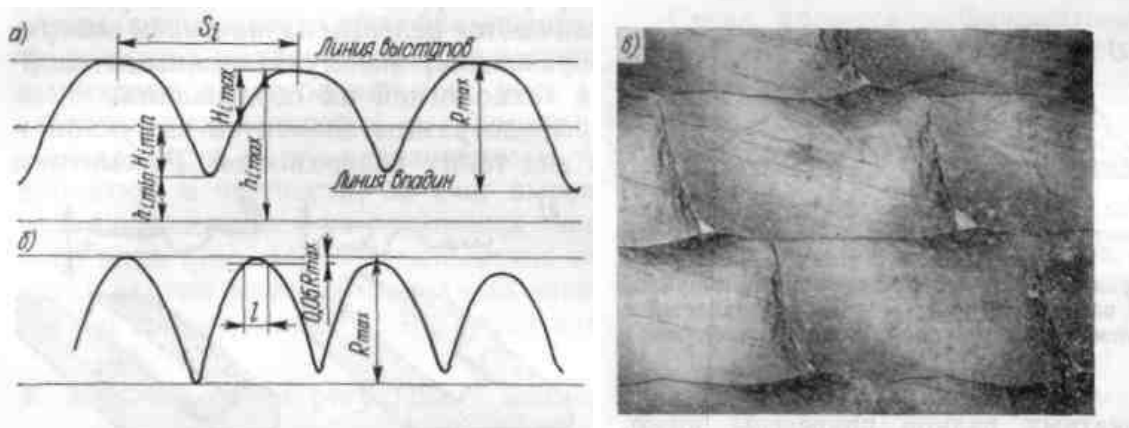


Рис. 1.4 – Профілограма поверхні з регулярним опуклим мікрорельєфом холоднокатаного листа в напрямі: а — повздовжньому; б — поперечному (вертикальне збільшення в 2000, горизонтальне, — 80); в — вид поверхні з чотирикутним опуклим мікрорельєфом

До другої групи мікрорельєфів поверхонь з опуклими елементами відносяться нові регулярні мікрорельєфи, які характеризуються великим радіусом округлення вершин нерівностей (рис. 1.4). Ці мікрорельєфи мають радіус округлення, що близький до величини радіусу деформуючого елемента, який створює канавки на прокатних валках. Наприклад, при вібронакатуванні прокатних валів сферичним алмазним наконечником із радіусом сфери 1,5 мм утворюється новий регулярний опуклий мікрорельєф, де радіус округлення вершин нерівностей трохи перевищує 1500 мкм.

Під час прокатки фольги та м'яких пластичних металів у незагартованих сталевих валках за допомогою віброобкатних куль із радіусами 4, 6, 8 та 10 мм було створено регулярні мікрорельєфи з радіусами округлення виступів нерівностей, що відповідно становили приблизно 4000, 6000, 8000 і 10 000 мкм. Жоден відомий раніше метод не дозволяв отримати такі мікрорельєфи.

Залежно від мікрорельєфу валів, ці повністю нові мікрорельєфи класифікуються як сітчасті або синусоїдальні. Сітчасті мікрорельєфи, у свою чергу, можуть мати шестикутну або чотирикутну структуру (рис. 1.4, в).

Класифікація поверхонь з елементами увігнутої форми (рис. 1.2) по групах, видах і типах ідентична класифікації поверхонь з опуклими елементами.

Регулярні мікрорельєфи підрозділяються на дві групи (рис. 1.5):

- 1) з системою регулярно розташованих канавок, між якими залишаються ділянки початкової поверхні (рис. 1.5, а—в);
- 2) повністю новий регулярний мікрорельєф (рис. 1.5, г, д).

На рис. 1.5. показаний повністю новий сітчастий мікрорельєф вигляду IV двох типів: шестикутний (рис. 1.5, г) і чотирикутний (рис. 1.5, д).

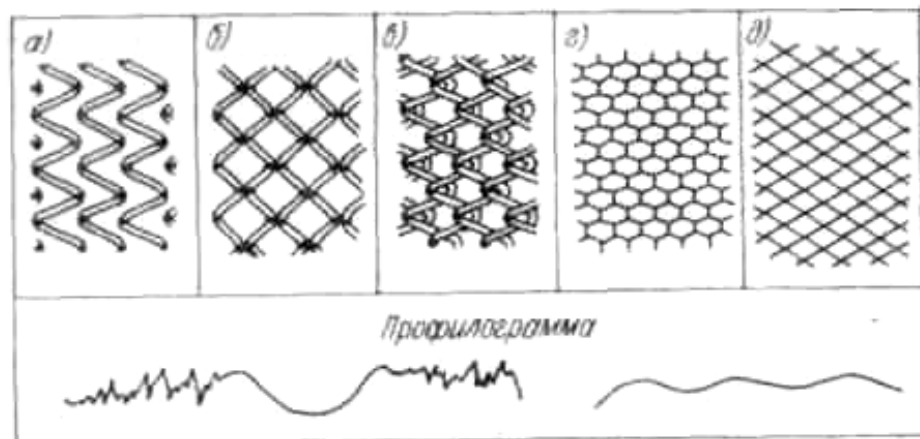


Рис. 1.5 – Схеми і профілограми поверхонь з системами канавок і з повністю новим регулярним мікрорельєфом.

1.2. Вплив якості поверхонь зубів зубчастих коліс на їх експлуатаційні властивості

Одним із ключових показників якості зубчастих коліс є стан їх робочих поверхонь, який визначається фізико-хімічними властивостями та геометричними характеристиками поверхневого шару зубів. Цей шар формується переважно на заключних етапах обробки зубчастих коліс.

Надійність і працездатність зубчастих передач значною мірою залежать від їхньої згинальної та контактної міцності, а також від зносостійкості. Основним обмежувальним фактором є виникнення втомних пошкоджень, які є найбільш характерним видом руйнування зубів під дією пульсуючих навантажень.

Вплив мікрорельєфу поверхні зубів на втомну міцність в якісному вигляді визначається залежністю :

$$\sigma_{\text{в},r} = f\left(R_{\text{max}}\left[\frac{r}{r_0}\right]\right) \cdot \text{...}$$

де R_{max} – максимальна висота нерівностей поверхні;

r – радіус округлення дна впадин нерівностей.

На втомну міцність зубів значний вплив має напрямок слідів кінцевої обробки відносно вектора швидкості взаємного ковзання профілів. Найбільш оптимальним є розташування слідів обробки по поверхні зуба в напрямку, перпендикулярному до твірної зуба.

Знос поверхонь зубів, що працюють в умовах граничного тертя, відбувається через механічне зачеплення найвищих нерівностей спряжених поверхонь. У процесі експлуатації на поверхнях зубів формується так звана експлуатаційна шорсткість, параметри якої залежать від умов роботи. З цієї причини не рекомендується без особливої потреби досягати шорсткості поверхонь зубів нижче $Ra\ 1,25 \dots 0,32\ \mu\text{м}$ [10].

Внаслідок інтенсивного тепловиділення в зонах контакту нерівностей при високих контактних тисках масляна або окисна плівка руйнується. Це сприяє адгезійному захопленню нерівностей і викиданню частинок металу з поверхні зубів, що призводить до явища заїдання [11].

Ю.Н. Дроздов зазначає, що для зниження інтенсивності адгезійного захоплення сліди обробки повинні забезпечувати перервність контакту. Напрямок слідів обробки не повинен бути паралельним вектору швидкості відносного руху тіл, що труться.

Досліджуючи вплив притирання на навантаження заїдання, А.І. Петрусевич і Ю.Р. Вітенберг встановили залежність між навантаженням заїдання та параметрами мікрогеометрії поверхні [10].

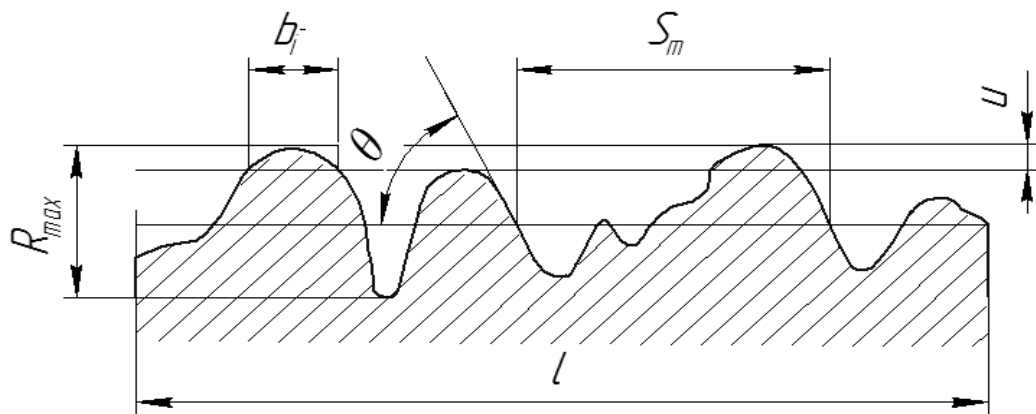
$$g_z = 550 + 350 * \frac{S_m^{0,93} * b_{0,15}^{0,3}}{R_{\max}^{0,86}}$$

де S_m , $R_{\max}$ – параметри шорсткості поверхні по ДСТУ 2789-98;

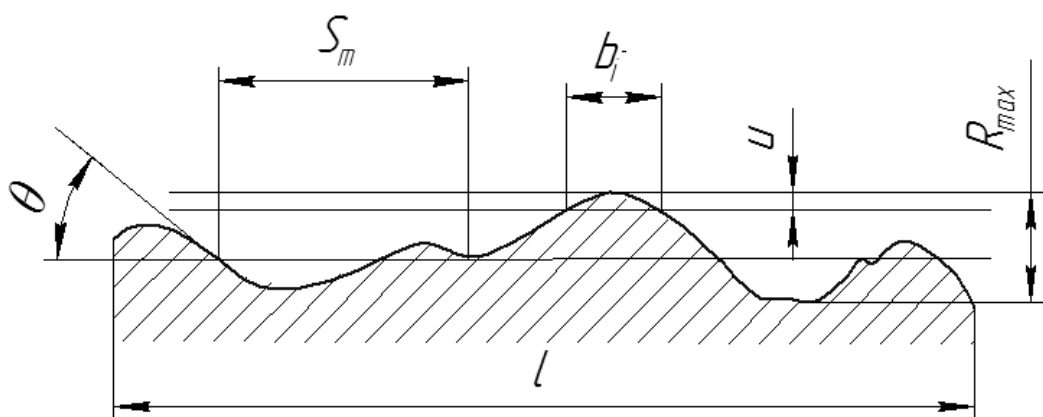
b_u – довжина контакту нерівностей в осьовому напрямку (рівень $u = 0,15$ мкм). (рис. 1.1)

Аналіз залежності дозволяє зробити висновок про визначальний вплив на заїдання параметрів шорсткості, зокрема, форми нерівностей, що характеризуються кутом Θ нахилу нерівностей в тангенціальному напрямку, який визначається відношенням параметрів S_m і $R_{\max}$ і довжиною контакту нерівностей в осьовому напрямку $b_u = \sum b_i$ (рис. 1.1).

Таким чином, для покращення експлуатаційних властивостей зубчастих коліс за допомогою технологічних методів необхідно дотримуватись таких вимог:



а – поперечна шорсткість



б – поздовжня шорсткість

Рис. 1.6. Геометричні характеристики стану поверхневого шару
в період притирки

- **Підвищення твердості та мікротвердості** поверхні зубів у результаті фінішної обробки. Це забезпечує вищу стійкість до зносу та навантажень.
- **Переривчастість поверхні зубів** і забезпечення достатньої маслоємності. Це сприяє зменшенню тертя, покращенню мастильних властивостей і зниженню ризику заїдання.
- **Формування залишкових напружень** з певним розподілом, як правило, стискуючих поблизу поверхні. Це підвищує втомну міцність і зменшує ймовірність утворення мікротріщин.

1.3. Показники і особливості фінішної обробки зубчастих коліс різанням

До найбільш поширених методів фінішної обробки зубчастих коліс різанням належать: **шевінгування, шліфування, зубохонінгування та притирка**. Ефективність цих методів з точки зору техніко-економічних показників неоднакова і залежить від багатьох факторів.

- **Шевінгування** проводиться шляхом зняття тонкої стружки зубами шевера при взаємному обкочуванні евольвентних профілів шевера і колеса. Цей метод забезпечує підвищення точності за параметрами плавності та контакту. Згідно з дослідженнями, після шевінгування хвилястість поверхні зубів зменшується з 40 мкм до 1,5 мкм, а шорсткість досягає $R_a = 0,5 \dots 0,8$ мкм. Проте мікрорельєф поверхні залишається неоднорідним через нерівномірну пластичну деформацію, характерну для процесів різання.

- **Зубошліфування** є основною завершальною операцією обробки зубчастих коліс. Цей метод забезпечує високу точність (4...6 ступінь) і низьку шорсткість поверхні зубів ($R_a = 1,2 \dots 0,32$ мкм). Однак через виділення значної кількості тепла в зоні різання (температура може досягати 1300 °C), основна частина якого передається деталі, на поверхні зубів можуть виникати структурні зміни.

Таким чином, зубошліфування, хоча й забезпечує високу точність обробки, може знижувати ефективність попередніх хіміко-термічних операцій зміцнення. Управління процесом зубошліфування зводиться до налаштування режимів, які виключають припали та тріщини. Контроль параметрів шорсткості та, у деяких випадках, точності обробки є складним завданням.

Зубохонінгування є високопродуктивним методом завершальної обробки загартованих відповідальних передач. Процес триває від 40 до 60 секунд для зубчастих коліс із діаметром до 300 мм. Особливістю

зубохонінгування є відсутність жорсткого кінематичного зв'язку між інструментом і оброблюваним колесом.

Обробка здійснюється шляхом обкатування оброблюваного зубчастого колеса інструментом — хоном, який виготовлений зі спеціальної пластичної маси із вкрапленнями абразивного порошку.

Після зубохонінгування, яке виконується для попередньо шевінгованих і термічно оброблених коліс, досягається високоякісна обробка поверхні зубів. Шорсткість поверхні після цього процесу значно зменшується, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики передач.

Шорсткість поверхні зубів після зубохонінгування попередньо шевінгованих до термообробки коліс $R_a = 1,00 \dots 0,25$ мкм [15].

Притирання зубчастих коліс відповідальних передач застосовується для зниження шуму, підвищення довговічності та плавності передачі шляхом покращення геометрії зачеплення і мікрорельєфу поверхні зубів. Процес полягає у штучному зношуванні робочих поверхонь зубів за допомогою абразивної маси.

Обробка здійснюється за схемою вільного обкатування оброблюваного колеса в зачепленні з інструментом — чавунним притиром, виготовленим відповідно до 5-го і вищих ступенів точності згідно з ДСУТ 1643-96. Для інтенсифікації процесу і виключення негативного впливу нульових швидкостей ковзання у точці зачеплення оброблюваному колесу або притиру надають зворотно-поступальний рух вздовж осі обертання. Зусилля різання створюється шляхом гальмування ведучої ланки зачеплення.

Якість обробки залежить головним чином від розміру абразивних частинок, які використовуються для притирання, та тривалості процесу, яка зазвичай становить 5–6 хвилин [13]. Збільшення тривалості притирання може призвести до спотворення профілю зубів, що негативно впливає на точність і експлуатаційні характеристики передач.

Таким чином, процеси викінчувальної обробки зубчастих коліс різанням, такі як шевінгування та шліфування, переважно спрямовані на

підвищення точності обробки та зменшення шорсткості поверхні зубів. При цьому фізико-хімічні характеристики поверхневого шару зубів у кращому випадку залишаються на рівні, досягнутому після попередньої обробки.

Однак мікрорельєф поверхні зубів після таких операцій характеризується значною неоднорідністю та несприятливою формою і напрямом нерівностей, що може негативно впливати на експлуатаційні характеристики передач.

1.4. Викінчувально-зміцнювальна обробка зубчастих коліс поверхневим пластичним деформуванням.

На даний момент в багатьох країнах широке застосування знаходять різноманітні методи викінчувально-зміцнювальної обробки деталей поверхневим пластичним деформуванням. Простота реалізації, можливість використання універсального обладнання в поєднанні з високою якістю обробки і продуктивністю зумовило розробку схем і конструкцій пристосувань для широкого класу деталей машин і пристроїв, в тому числі одного із найбільш розповсюджених – зубчастих коліс.

Із основних схем обробки пластичним деформуванням найбільш широко використовуються в промисловості калібрування зубчастих коліс еталонними накатниками при вільному накатуванні в зачепленні з оброблювальним колесом [9,32,36,38,60].

Обробка великомодульних зубчастих коліс здійснюється, головним чином, деформуючими елементами – роликами, по схемі жорсткого кінематичного зв'язку в верстатному зачепленні інструмента і оброблюваного колеса.

На рис. 1.3 представлені схеми калібрування зубчастих коліс трьома, двома і одним накатником.

Експериментальні дослідження процесу калібрування зубчастих коліс ($m = 3$ мм, $z = 45$, матеріал – сталь 40Х) трьома накатниками, які застосовували

замість шевінгування, показали, що продуктивність процесу калібрування зростає у 2...4 рази, а точність накатаних зубчастих коліс перевищує точність шевінгованих. Крім того, відзначається покращення експлуатаційних характеристик накатаних коліс [38].

Експериментальний науково-дослідний інститут металорізальних верстатів розробив і впровадив в автоматичну лінію з обробки зубчастих коліс, замість шевінгування, накатний верстат моделі 5723, що працює з трьома загартованими еталонними накатниками.

На верстаті цієї моделі зусилля деформування створюється радіальною подачею роликів за допомогою вбудованої гідросистеми з тиском 0,2...1 МПа. Частота обертання ведучого накатника становить 2,3...8,3 с⁻¹, максимальний модуль накатуваних коліс — 6 мм. За такою схемою працює більшість верстатів фірм «Болендер», «Рейнекер» та «Феллоу», де калібрування зубчастих коліс дозволяє досягати 7...6-го ступеня точності згідно з ДСТУ 1643-92.

Згідно з дослідженнями [32, 64], накатування зубчастих коліс ($m = 10$ мм, $z = 75$, матеріал – сталь 45) трьома зубчастими накатниками призвело до зниження шорсткості поверхні зубів до $Ra = 1,25$ мкм, підвищення точності до 8-го ступеня (при початковій 9-й за ДСТУ 1643-92) і збільшення мікротвердості поверхні зубів на 10%. У поверхневому шарі сформувалися залишкові напруження величиною 350...400 МПа.

Порівняно з шліфуванням, зношування поверхні зубів у період припрацювання, оброблених пластичним деформуванням, зменшилось у 1,3...1,4 рази, а втомна згинальна міцність значно зросла.

Особливості калібрування трьома накатниками:

- Цей метод потребує виготовлення складної конструкції накатної головки.
- Центрування оброблюваного колеса по зубу не дозволяє суттєво зменшити вихідне радіальне биття.

Схема накатування двома накатниками:

- Найпоширенішою є схема беззорового зачеплення з радіальним підтисканням накатників (рис. 1.2.б).

- Такий метод забезпечує осьову подачу накатників і можливість схрещування їх осей для коригування кута нахилу лінії зуба.

Переваги та недоліки методу:

- Серед основних переваг — можливість підвищення точності, зниження шорсткості і покращення експлуатаційних характеристик.

- Основним недоліком є високі зусилля деформування, що вимагає використання потужного обладнання з підвищеною жорсткістю. Це ускладнює обробку зубчастих коліс малої жорсткості, деталей з внутрішнім зубом та термічно зміцнених зубчастих коліс.

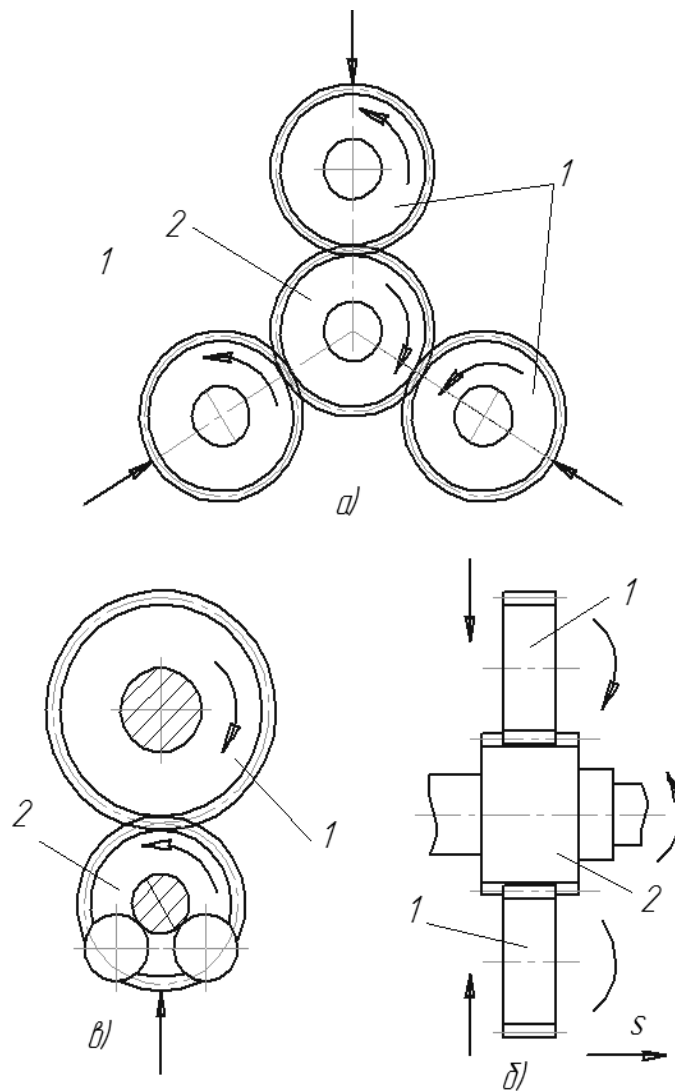


Рис. 1.2. Схеми накатування зубчастих коліс

а – трьома накатниками; б – двома накатниками; в – одним накатником.

Таким чином, зміцнювальна обробка зубчастих коліс методом поверхневого пластичного деформування забезпечує більш повне використання міцнісного ресурсу матеріалу шляхом покращення фізико-хімічних характеристик поверхневого шару зубів. Це призводить до підвищення експлуатаційних властивостей зубчастих коліс.

З підвищенням твердості матеріалу зубів спостерігається загальна тенденція більш ефективного використання міцнісних характеристик матеріалу зубчастих коліс. Водночас збільшується вплив мікрорельєфу поверхні зубів на експлуатаційні характеристики передачі, що підвищує значення контролю і управління утворенням мікрорельєфу поверхні зубів у процесі фінішної обробки.

Таблиця 1.1 – Якісний аналіз методів викінчування зубчастих коліс

Метод обробки	Технологічні особливості					Особливості якості припрацювання		
	Модуль, мм	Твердість	Продуктивність	Зусилля припрацювання	Стійкість інструменту	Точність	Фізико-мех. властивості	Мікрогеометрія
Зубошліфування	1...10	65	-	++	-	++	-	-
Шевінгування	2...10	35	+	+	-	++	+	-
Зубохонінгування	2...6	65	++	++	-	-	+	+
Притирка, припрацювання	18	60	-	++	+	+	+	+
Калібрування накатниками	3...10	40	++	-	++	+	++	+
Накатування роликами	6...12	40	+	-	+	-	++	+

Примітка: ++ – високий рівень показника

- – низький рівень показника.

Розглянуті схеми зміцнювальної обробки зубчастих коліс не забезпечують одночасного досягнення оптимального мікрорельєфу поверхні та необхідних фізико-хімічних властивостей поверхневого шару.

Характеристики методів викінчувальної обробки поверхонь зубів наведені в таблиці 1.1.

Аналіз способів зменшення зусиль деформування при зміцнювальній обробці пластичним деформуванням визначає два основних напрямки:

1. **Зменшення площі контакту** деформуючого елемента з оброблюваною деталлю.
2. **Інтенсифікація процесу** за рахунок удосконалення кінематики руху деформуючого елемента.

Лише зміною силового режиму процесу в значних межах не можна суттєво розширити можливості управління якістю обробки. Найбільший потенціал для вдосконалення процесу полягає у зменшенні силових параметрів та оптимізації кінематики процесу.

Основою нового методу обробки зубчастих коліс є аналіз вже відомих і широко застосовуваних у промисловості схем і обладнання для віброобкатування зовнішніх, внутрішніх циліндричних і фасонних поверхонь. Цей підхід дозволяє інтегрувати перевірені технології в створення більш ефективних методів обробки зубчастих коліс.

1.5 Висновки. Завдання і об'єкти досліджень

1. **Важливість мікрорельєфа і його вплив на якість поверхні:** Мікрорельєф нанесений на поверхню, яка контактує із будь-якою поверхнею, суттєво може зміцнити поверхню, та мати ключову роль у визначених експлуатаційних характеристиках, таких як зносостійкість, коефіцієнт тертя, втомна міцність тощо. Неоднорідність мікрорельєфу, що використовує при традиційних методах обробки, ускладнює нормування та контроль геометрії поверхонь, а також завершує складність технологічного забезпечення точності обробки. Водночас, регуляризація мікрорельєфів є напрямком для покращення цих властивостей.

2. Оптимізація мікрогеометрії контактуючих поверхонь:

Рішення задачі оптимізації мікрогеометрії поверхні базується на створених регулярних мікрорельєфів, що забезпечують більш контрольовані та сприятливі умови для роботи деталей. Розробка та впровадження нових методів обробки, таких як віброобкатування, дозволяє досягти значного вдосконалення мікрорельєфів, підвищуючи ефективність і якість обробки.

3. Зв'язок між мікрорельєфом і експлуатаційними властивостями зубчастих коліс: Якість обробки зубів зубчастих коліс, зокрема їх мікрорельєф, впливає на надійність і тривалість служби зубчастих передач. Важливими факторами є зносостійкість, втомна міцність, і здатність до самоочищення. Тому оптимізація мікрорельєфу поверхні зубів є важливою складовою процесу фінішної обробки зубчастих коліс.

4. Методи обробки зубчастих коліс: Різні методи фінішної обробки, такі як шевінгування, шліфування та зубохонінгування, сприяють підвищенню точності обробки та зниженню шорсткості поверхні. Проте ці методи часто не дозволяють досягти бажаних фізико-хімічних властивостей поверхневого шару, таких як висока твердість і зносостійкість.

5. Зміцнення через пластичне деформування: Використання методів поверхневого пластичного деформування для зміцнення зубчастого кола дає змогу покращити фізико-хімічні характеристики поверхневого шару, зменшити зношування та підвищити внутрішню міцність. Ці методи також допомагають підвищити ефективність роботи зубчастих передач, зокрема для покращення мікрорельєфу поверхні зубів.

Ці висновки підтверджують важливість регуляризації мікрорельєфу в технології обробки контактних поверхонь, зокрема зубчастих коліс, для підвищення їх експлуатаційних властивостей і надійності в роботі.

Предмет дослідження – процес формування регулярних мікрорельєфів на робочих поверхнях зубчастих коліс.

Об’єкти дослідження:

– процес і умови пластичної деформації нерівностей і поверхні зубів з врахуванням особливостей геометрії інструмента;

– узагальнені характеристики експлуатаційних властивостей зубчастих коліс.

– широкоуніверсальний фрезерний верстат моделі 676.

Теоретичні дослідження проводились при припущеннях:

– матеріал жорстко-пластичний

– погрішності зачеплення не враховувались

При виконання дипломної роботи вирішувались наступні **завдання**:

– розробка принципової схеми процесу вібраційного накатування циліндричних зубчастих коліс, конструкції обладнання та інструменту;

– розробка математичної моделі мікрорельєфу на поверхні зубів;

– модернізація коробки швидкостей верстату мод. 676.

2 ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ РОЗДІЛ

2.1. Вибір діапазону регулювання виконавчих механізмів верстату

Необхідно визначити діапазон частот обертання шпинделя та потужність, яку має забезпечити проектований верстат. Оскільки універсальний верстат має як горизонтальні, так і вертикальні шпинделі, розрахунок буде виконано для вертикального шпинделя (при використанні вертикальної фрезерної головки), оскільки вертикальне фрезерування здійснюється за більш складних умов, ніж горизонтальне. Крім того, загальна жорсткість і точність верстата знижуються через додаткові механізми фрезерної головки.

Найвища частота обертання шпинделя потрібна для обробки виробів з м'яких матеріалів, тоді як найменша частота застосовується для обробки твердих матеріалів. М'яким матеріалом буде вважатися звичайна вуглецева сталь, яку обробляють фрезами зі швидкоріжучої сталі. Найбільш твердим матеріалом, що підлягає фрезерній обробці, є ковкий чавун, який обробляється фрезами з твердосплавними вставними пластинами.

Визначаємо найбільший та найменший діаметри фрез за формулами

$$D_{\text{б}} = (0,2 \dots 0,3)B_{\text{с}} \quad D_{\text{м}} = (0,1 \dots 0,2)B_{\text{с}},$$

де $B_{\text{с}}$ – ширина робочої поверхні стола за паспортними даними, мм.

$$D_{\text{б}} = (0,2 \dots 0,3)260 = 80 \text{ мм}; \quad D_{\text{м}} = (0,1 \dots 0,2)260 = 25 \text{ мм}.$$

Розраховуємо найбільшу та найменшу ширину фрезерування за формулами:

$$B_{\text{б}} = (0,75 \dots 1)D_{\text{б}} = 0,75 * 80 = 60 \text{ мм};$$
$$B_{\text{м}} = (0,75 \dots 1)D_{\text{м}} = 1 * 25 = 25 \text{ мм}.$$

Визначаємо за найбільшу та найменшу глибину різання при чистовому фрезеруванні.[65, с.234, табл. 26]

$$t_{\text{б}} = 5 \text{ мм}; \quad t_{\text{м}} = 0,75 \text{ мм}.$$

Призначаємо найбільшу та найменшу подачу на зуб фрези із умови чистоти поверхні обробки для найм'якшого матеріалу заготовки (вуглецевої сталі)[4, табл. 33, с.213].

$$s_z^{\text{б}} = 0,6 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}; \quad s_z^{\text{м}} = 0,04 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}.$$

Призначаємо найбільшу та найменшу подачу на зуб фрези для твердого матеріалу заготовки.

$$s_z^{\text{б}} = 0,4 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}; \quad s_z^{\text{м}} = 0,01 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}.$$

Визначаємо найбільшу швидкість різання для м'якого матеріалу заготовки та найменшу швидкість різання твердого матеріалу заготовки за формулою

$$v = \frac{C_v D^q}{T^m t^x S_z^y B u_z^p} K_v,$$

де C_v та показники ступеня визначаються за довідниками нормувальника.

$$v_{\text{б}} = \frac{41 * 32^{0,25}}{60^{0,2} 0,75^{0,1} 0,04^{0,4} 32^{0,15} 1} * 1 = 170 \frac{\text{м}}{\text{хв}};$$

Розраховуємо найбільшу та найменшу частоту обертання шпинделя за формулою

$$n = \frac{1000 v}{\pi D},$$

$$n_{\text{б}} = \frac{1000 * 170}{3,14 * 32} = 1692 \text{ хв}^{-1}; \quad n_{\text{м}} = \frac{1000 * 52}{3,14 * 60} = 276 \text{ хв}^{-1}.$$

Кінематичні можливості приводу можна оцінити діапазон регулювання, який показує відношення максимальних і мінімальних частот обертання шпинделя.

$$D = \frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{min}}},$$

де n_{max} – максимальна частота обертання шпинделя;

n_{min} - мінімальна частота обертання шпинделя.

$$D = \frac{1692}{276} = 6$$

Обираємо значення знаменника ряду $\varphi = 1,26$ за ГОСТ 9726-89.
Визначаємо кількість ступенів коробки швидкостей z за формулою

$$z = \frac{\frac{\lg n_6}{n_m}}{\lg \varphi} + 1 = 8,8.$$

Приймаємо $z = 9$.

Визначаємо силу різання за формулою:

$$P_z = \frac{10 C_p t^x S_z^y B^u z}{D^q n^w} K_{Mp},$$

де C_p та показники ступеня визначаються за довідниками нормувальника.

$$P_z = \frac{10 * 82,5 * 2^{1,0} 0,4^{0,75} 32^{1,14}}{32^{1,3} 1692^{0,2}} = 375 \text{ Н.}$$

Визначаємо потужність різання за формулою

$$N_p = \frac{P_z v}{1020 \cdot 60} = \frac{375 * 170}{1020 \cdot 60} = 1,04 \text{ кВт.}$$

Визначаємо орієнтовну потужність двигуна за формулою

$$N_e = \frac{N_p}{k\eta} = \frac{1,04}{1 \cdot 0,75} = 1,39 \text{ кВт.}$$

2.2. Вибір потужності і типу двигунів

За максимальною частотою та орієнтовною потужністю обираємо електродвигун за каталогом.

Обираємо двигун 4A100S4У3 із частотою обертання ротора $n = 1435 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ і потужністю $N = 3,0$ кВт.

2.3. Проектування приводу головного руху

2.3.1. Вихідні дані для розрахунку приводу

Необхідно розрахувати привід головного руху фрезерного верстата із такими параметрами:

- кількість швидкостей приводу $z_n = 9$;
- знаменник ряду швидкостей $\varphi = 1,26$;
- мінімальна швидкість обертання шпинделя $n_1 = 200 \text{ хв}^{-1}$;
- частота обертання електродвигуна .

2.3.2. Обґрунтування принципової конструктивної схеми

Коробки швидкостей фрезерних верстатів характеризуються невеликими розмірами в осьовому напрямку, горизонтальним розміщенням валів, множиною структурою коробки швидкостей, невеликою кількістю швидкостей.

Дев'ятиступеневу коробку швидкостей верстата виконаємо трьохваловоюоднозв'язною із структурною формулою $z_n = 3 \times 3 = 9$.

Рух отримується від електродвигуна, через клинопасову передачу передається на перший вал коробки швидкостей. Коробка швидкостей містить два рухомих потрійних блоки циліндричних зубчастих коліс і зв'язане колесо на проміжному валу.

Горизонтальний шпиндель розміщується у рухомій шпиндельній бабці, яка здійснює прямолінійний рух в осьовому напрямку. Шпиндель поєднується із коробкою швидкості за допомогою широкої шестерні, яка постійно знаходиться у зачепленні із найбільшим колесом на останньому валу коробки швидкостей та із колесом, що закріплено на шпинделі.

Вертикальна шпиндельна головка отримує рух від горизонтального шпинделя і може повертатися навколо вісі горизонтального шпинделя на кут $\pm 45^\circ$ за рахунок конічної передачі.

Конічна та циліндрична зубчасті передачі вертикальної шпиндельної головки призначені для передачі руху із горизонтального шпинделя на вертикальний без зміни його параметрів, тому вони мають передаточні відношення рівні 1, а кінематичний розрахунок привода виконується для горизонтального шпинделя.

Враховуючи все вищесказане будуюмо кінематичну схему привода.

Кінематичну схему привода головного руху приведено на рисунку 2.1.

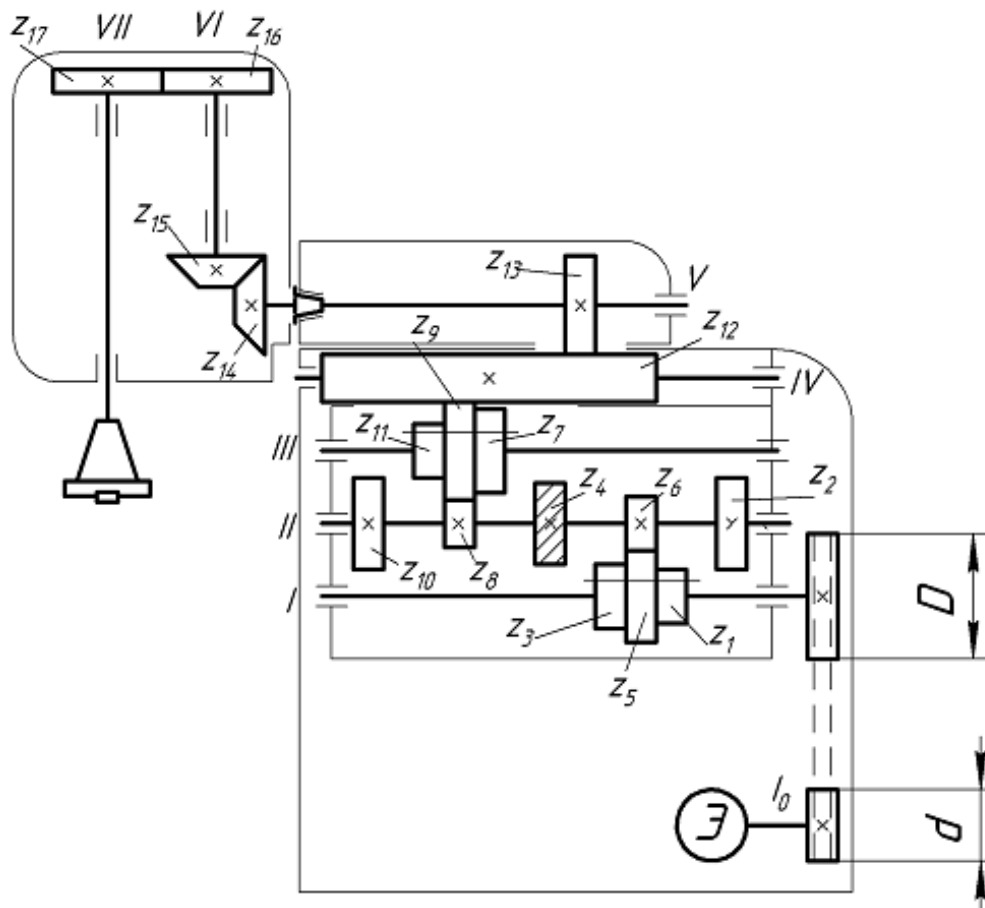


Рис. 2.1. Кінематична схема привода головного руху широко універсального фрезерного верстата

2.3.3. Кінематичний розрахунок приводу

Для заданої структурної формули можливо два варіанти включення. Два варіанти структурних сіток приведено на рисунку 4.2.

Кінематичний розрахунок приводу виконуємо для горизонтального шпинделя.

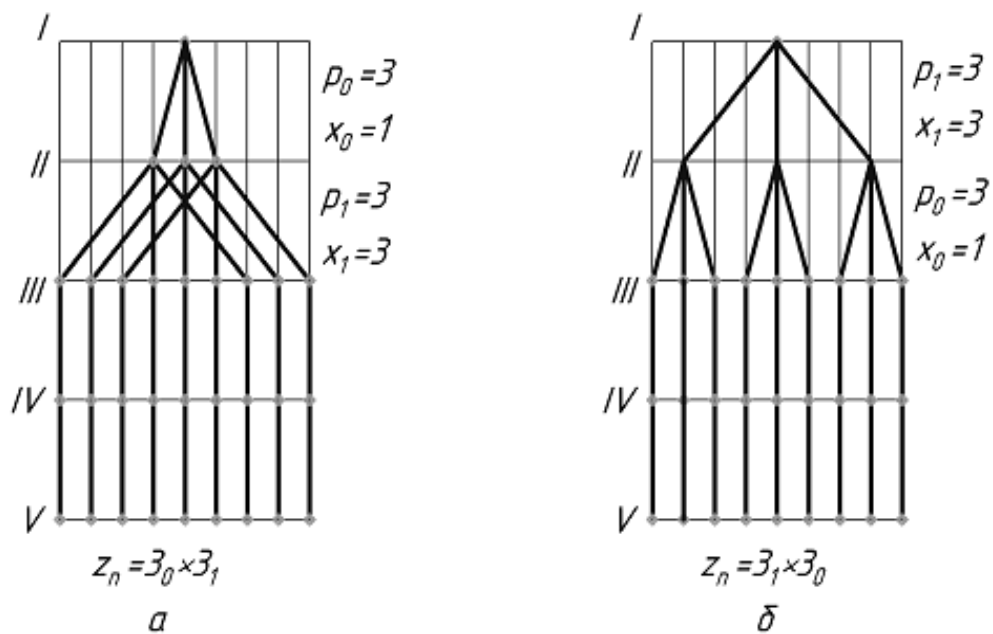


Рис. 2.2. Структурна сітка приводу головного руху

Із двох варіантів включення обираємо перший (Рис. 2.2 а), тому що він забезпечує мінімальні розміри коробки швидкостей.

Будуємо картину чисел обертання валів для цього варіанту включення і приводимо її на рисунку 2.3.

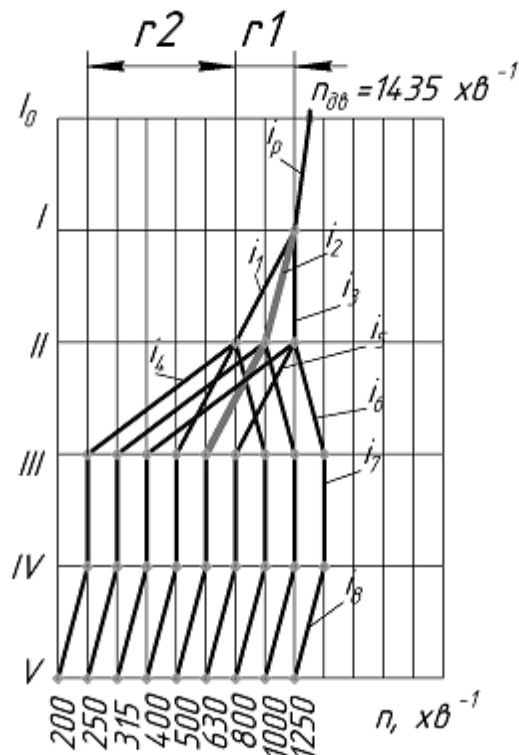


Рис. 2.3. Картина чисел обертання валів привода головного руху

Коробка швидкостей має спільну шестерню_{z4} для першої та другої блочної групи. Для оптимізації радіальних розмірів коробки швидкостей необхідно раціонально розподілити передаточні відношення на зв'язані передачі. Передаточне відношення зв'язаних передач визначаємо за формулою (2.1).

де i_x та i_y - передаточні відношення передач, до яких входить зв'язане колесо;

r_1 , r_2 – найбільші діапазони регулювання першої та другої блочних груп відповідно.

Тоді призначаємо $i_x = \varphi^{-1}$ та $i_y = \varphi^{-2}$. На графіку частот позначаємо потовщеною лінією передачі, які мають спільне колесо.

Складаємо рівняння для кінематичного розрахунку.

За картиною чисел обертів валів визначаємо передаточні відношення за наступними формулами (2.2) – (2.10).

$$i_p = \frac{d}{D} \cdot \delta = \frac{1250}{1435} = 0,87; \quad (2.2)$$

$$i_1 = \frac{z_1}{z_2} = \frac{1}{\varphi^2} = 0,63; \quad (2.3)$$

$$i_2 = \frac{z_3}{z_4} = \frac{1}{\varphi^3} = 0,79; \quad (2.4)$$

$$i_3 = \frac{z_5}{z_6} = 1; \quad (2.5)$$

$$i_4 = \frac{z_8}{z_9} = \frac{1}{\varphi^5} = 0,31; \quad (2.6)$$

$$i_5 = \frac{z_4}{z_7} = \frac{1}{\varphi^2} = 0,63; \quad (2.7)$$

$$i_6 = \frac{z_{10}}{z_{11}} = \varphi^3 = 1,26; \quad (2.8)$$

$$i_7 = \frac{z_9}{z_{12}} = 1; \quad (2.9)$$

$$i_8 = \frac{z_{12}}{z_{13}} = \frac{1}{\varphi^3} = 0,79; \quad (2.10)$$

Із умови рівності міжцентрових відстаней передач, що входять до потрійних блоків отримуємо наступні рівняння:

$$z_1 + z_2 = z_3 + z_4; \quad (2.11)$$

$$z_1 + z_2 = z_5 + z_6; \quad (2.12)$$

$$z_4 + z_7 = z_8 + z_9; \quad (2.13)$$

$$z_4 + z_7 = z_8 + z_9. \quad (2.14)$$

Задаємося кількістю зубців найменшого зубчастого колеса на I валу, враховуючи рекомендовану мінімальну кількість зубців рівною 17 та зважаючи, що колесо має бути достатньо великим, щоб надіти його на вал.

$$z_1 = 20.$$

Призначаємо діаметр ведучого шківa пасової передачі, враховуючи розміри електродвигуна $d = 100$ мм.

Визначаємо кількість зубів шестерні z_2 із формули (2.3):

$$z_2 = z_1 \varphi^2 = 20 \cdot 1,26^2 = 31,75;$$

$$\text{Приймаємо } z_2 = 32.$$

Визначаємо кількість зубів коліс z_3 та z_4 . Із формули (2.4):

$$z_4 = z_3 \cdot \varphi,$$

підставляємо в (2.11):

$$z_1 + z_2 = z_3 + z_3 \cdot \varphi;$$

$$z_3 = \frac{z_1 + z_2}{\varphi + 1} = \frac{20 + 32}{1 + 1,26} = 23;$$

$$z_4 = 23 \cdot 1,26 = 28,98.$$

Приймаємо $z_4 = 29$.

Визначаємо кількість зубів коліс z_5 та z_6 . Із формули (2.5):

$z_5 = z_6$; підставляємо в (2.12):

$$z_1 + z_2 = 2z_5;$$

$$z_5 = z_6 = \frac{z_1 + z_2}{2} = \frac{20 + 32}{2} = 26.$$

Визначаємо кількість зубів колеса z_7 із формули (2.7):

$$z_7 = z_4 \cdot \varphi^2 = 29 \cdot 1,26^2 = 46.$$

Визначаємо кількість зубів коліс z_8 та z_9 . Із формули (2.6):

$z_9 = z_8 \cdot \varphi^5$; підставляємо в (2.13):

$$z_4 + z_7 = z_8 + z_8 \cdot \varphi^5;$$

$$z_8 = \frac{z_4 + z_7}{1 + \varphi^5} = \frac{29 + 46}{1 + 1,26^5} = 17,96;$$

Приймаємо $z_8 = 18$.

$$z_9 = 18 \cdot 1,26^5 = 57,16.$$

Приймаємо $z_9 = 57$.

Визначаємо кількість зубів коліс z_{10} та z_{11} . Із формули (2.8) маємо:

$z_{10} = z_{11} \cdot \varphi$; підставляємо в (2.14):

$$z_4 + z_7 = z_{11} + z_{11} \cdot \varphi;$$

$$z_{11} = \frac{z_4 + z_7}{1 + \varphi} = \frac{29 + 46}{1 + 1,26} = 33,19;$$

Приймаємо $z_{11} = 33$.

$$z_{10} = 33 \cdot 1,26 = 42.$$

Визначаємо кількість зубів колеса z_{12} із формули (2.9):

$$z_{12} = z_9 = 57.$$

Визначаємо кількість зубів колеса z_{13} із формули (2.10):

$$z_{13} = z_{12} \cdot \varphi = 57 \cdot 1,26 = 71,82.$$

Приймаємо $z_{13} = 72$.

Розраховуємо швидкості обертання шпинделя для кожного ступеня привода.

$$n_1 = 1435 \cdot 0,87 \cdot 0,79 \cdot 0,4 \cdot 1,59 \cdot 0,79 \cdot 1 \cdot 0,4 = 198,2 \frac{\text{Об}}{\text{Хв}};$$

$$n_2 = 1435 \cdot 0,87 \cdot 1 \cdot 0,4 \cdot 1,59 \cdot 0,79 \cdot 1 \cdot 0,4 = 250,91 \frac{\text{Об}}{\text{Хв}};$$

$$n_3 = 1435 \cdot 0,87 \cdot 1,26 \cdot 0,4 \cdot 1,59 \cdot 0,79 \cdot 1 \cdot 0,4 = 316,14 \frac{\text{Об}}{\text{Хв}};$$

$$n_4 = 1435 \cdot 0,7 \cdot 0,79 \cdot 0,79 \cdot 1,59 \cdot 0,79 \cdot 1 \cdot 0,4 = 391,48 \frac{\text{Об}}{\text{Хв}};$$

$$n_5 = 1435 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 0,79 \cdot 1,59 \cdot 0,79 \cdot 1 \cdot 0,4 = 495,54 \frac{\text{Об}}{\text{Хв}};$$

$$n_6 = 1435 \cdot 0,7 \cdot 1,26 \cdot 1,59 \cdot 1,59 \cdot 0,79 \cdot 1 \cdot 0,4 = 624,39 \frac{\text{Об}}{\text{Хв}};$$

$$n_7 = 1435 \cdot 0,7 \cdot 0,79 \cdot 0,4 \cdot 1,59 \cdot 0,79 \cdot 1 \cdot 0,4 = 787,92 \frac{\text{Об}}{\text{Хв}};$$

$$n_8 = 1435 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 0,79 \cdot 1,59 \cdot 0,79 \cdot 1 \cdot 0,4 = 997,36 \frac{\text{Об}}{\text{Хв}};$$

$$n_9 = 1435 \cdot 0,7 \cdot 1,26 \cdot 1,59 \cdot 1,59 \cdot 0,79 \cdot 1 \cdot 0,4 = 1256,68 \frac{\text{Об}}{\text{Хв}}.$$

2.4 Розрахунок на міцність деталей і механізмів привода головного руху

2.4.1 Розрахунок навантажень, що діють на привод

Для розрахунку деталей привода на міцність необхідно визначити навантаження, що діють на вали, зубчасті колеса, шпонки, шліці та підшипники привода.

При розрахунках на витривалість за номінальне навантаження приймають найбільше довготривале навантаження фактичного режиму. При розрахунку верстатів загального призначення середнього розміру номінальне навантаження рекомендується визначати за номінальною потужністю верстата і деякому розрахунковому числу обертів, починаючи з якого робота може тривати з використанням повної потужності.

Визначаємо положення пересувних блоків зубчастих коліс, у яких механізм буде підвернений найбільшим навантаженням. Цим положенням

на пивід и приводимо її на рисунку 2.4.

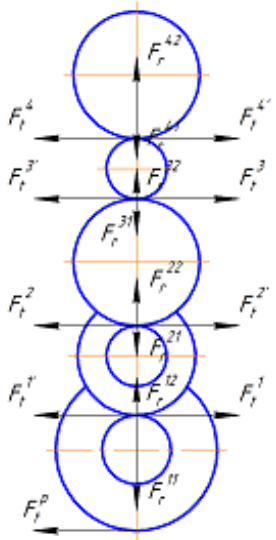


Рис. 2.4 Навантаження, що діють на привід

приведемо їх у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Навантаження, що діють на привід

№ валу	Зубчаста передача						Т, Н*М	n, хв ⁻¹
	z ₁			z ₂				
	z	F _t , Н	F _r , Н	z	F _t , Н	F _r , Н		
I	34	650	237	54	650	237	22	1250
II	21	1620	590	67	1620	590	34	800
III	67	1620	590	49	1620	590	110	250
IV	49	1620	590	62	1620	590	80	315
V	-	-	-	-	-	-	120	250
I	$F_t^p = 420\text{H}$						22	1250

2.4.2 Перевірочний розрахунок зубчатих передач на згин та контактну витривалість

Перевірочний розрахунок зубчастих передач на контактну витривалість виконується за формулою (2.16). [7, с.69]

$$\sigma_H = Z_H Z_M Z_E \sqrt{\frac{2TK_{H\alpha}K_{H\beta}K_{H\nu}}{bd_w^3} \cdot \frac{u+1}{u}} \leq [\sigma_H], \quad (2.16)$$

де T – обертовий момент на ведучому валу, Н*мм;

b – ширина зубчастого вінця, мм;

d – дільний діаметр зубчастого колеса, мм;

u – передаточне відношення;

$K_{H\alpha}$ – коефіцієнт, що враховує розподілення навантаження між зубів колеса. Для прямозубих коліс $K_{H\alpha} = 1$;

$K_{H\beta}$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілення навантаження по ширині зубчастого вінця;

$K_{H\nu}$ – коефіцієнт, що враховує динамічне навантаження, що виникає в зачепленні, для сталевих коліс із поверхнею, закаленою ТВЧ, 8 класу точності приймають $K_{H\nu} = 1,1$; [7, табл.3.16, с.72]

Z_H – коефіцієнт, що враховує форму спряжених зубів. Для прямозубих не корегованих зубчастих коліс $Z_H = 1,76$;

Z_M – коефіцієнт, що враховує механічні властивості матеріалів спряжених зубчастих коліс, для сталевих коліс $Z_M = 275$ МПа;

Z_E – коефіцієнт, що враховує сумарну довжину контактних ліній, для прямозубих зубчастих коліс $Z_E = 1,15$.

Допустиме напруження на контактну витривалість визначається за формулою :

$$[\sigma_H] = \frac{\sigma_{H \lim}}{S_H},$$

де $\sigma_{H \text{ lim}}$ - межа контактної витривалості поверхні зубів, що відповідає еквівалентному числу циклів змін напружень і обчислюється за формулою :

$$S_H = 2,5 \quad - \text{ коефіцієнт безпеки.}$$

$$\sigma_{H \text{ lim}} = \sigma_{H \text{ lim}b} K_{HL},$$

де K_{HL} – коефіцієнт довговічності, що враховує вплив строка служби і режиму навантаження передачі:

$$K_{HL} = \sqrt[6]{\frac{N_{HO}}{60nt_z}},$$

де $N_{HO} = 10^7$ - базова кількість циклів навантаження;

$t_z = 14800$ год. – сумарний строк слугування деталей механізма.

Межа контактної витривалості, що відповідає базовій кількості циклів зміни напружень $\sigma_{H \text{ lim}b}$ для коліс, із поверхнею загартованою ТВЧ складає $\sigma_{H \text{ lim}b} = 960$ МПа.[7, табл..3.17, с.74]

Оскільки колеса рухомих блоків зубчастих коліс виконані з однакових матеріалів, доцільно розраховувати лише ті передачі, що підвернені найбільшим навантаженням.

Ширина зубчастих вінців усіх коліс $b = 14$ мм, окрім колеса z_{12} , яке за своїми конструктивними особливостями має ширину 250 мм, а його зубці на контактну витривалість не розраховуємо.

- 1) Розраховуємо зубці зубчастих коліс z_1/z_2 .

Визначаємо коефіцієнт довговічності:

$$K_{HL} = \sqrt[6]{\frac{10^7}{60 \cdot 1250 \cdot 14800}} = 0,46$$

Визначаємо допустиме контактне напруження:

$$[\sigma_H] = 960 \cdot 0,46 = 440 \text{ МПа.}$$

Визначаємо контактні напруження, що виникають в зубцях:

$$\sigma_H = 1,76 \cdot 275 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot \frac{1,59 + 1}{1,59}}{14 \cdot 68^2}} = 420 \text{ МПа} < [\sigma_H]$$

2) Розраховуємо зубці зубчастих коліс z_8/z_9 .

Визначаємо коефіцієнт довговічності:

$$K_{HL} = \sqrt[6]{\frac{10^7}{60 \cdot 800 \cdot 14800}} = 0,57$$

Визначаємо допустиме контактне напруження:

$$[\sigma_H] = 960 \cdot 0,57 = 547,2 \text{ МПа.}$$

Визначаємо контактні напруження, що виникають в зубцях:

$$\sigma_H = 1,76 \cdot 275 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 34 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1}{14 \cdot 42^2} \cdot \frac{3,2 + 1}{3,2}} = 440 \text{ МПа} < [\sigma_H]$$

3) Розраховуємо зубці зубчастого колеса z_{13} .

Визначаємо коефіцієнт довговічності:

$$K_{HL} = \sqrt[6]{\frac{10^7}{60 \cdot 315 \cdot 14800}} = 0,57$$

Визначаємо допустиме контактне напруження:

$$[\sigma_H] = 960 \cdot 0,57 = 547,2 \text{ МПа.}$$

Визначаємо контактні напруження, що виникають в зубцях:

$$\sigma_H = 1,76 \cdot 275 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 80 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,1}{30 \cdot 124^2} \cdot \frac{1,27 + 1}{1,27}} = 460 \text{ МПа} < [\sigma_H]$$

Перевірочний розрахунок на витривалість при згинанні виконується наступним чином.

Визначається напруження згинання зубів коліс за формулами:

$$\sigma_{F1} = Y_{F1} Y_{\beta} \frac{W_{Ft}}{m} \leq [\sigma_{F1}], \quad \sigma_{F2} = \sigma_{F1} \frac{Y_{F2}}{Y_{F1}} \leq [\sigma_{F2}],$$

де W_{Ft} – розрахункова гранична сила при розрахунку на витривалість при згинанні, визначається за формулою:

Y_F – коефіцієнт, що враховує форму зуба, для прямозубих коліс без зсуву $Y_F = 1,0$;

W_{Ft} – гранична розрахункова окружна сила, Н/мм;

$Y_{\beta} = 1,0$ для прямозубих зубчастих коліс.

$$W_{Ft} = \frac{2T}{db} K_{F\alpha} K_{F\beta} K_{Fv},$$

де $K_{F\alpha}$ – коефіцієнт, що враховує розподілення навантаження між зубів колеса. Для прямозубих коліс $K_{F\alpha} = 1$;

$K_{F\beta}$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілення навантаження по ширині зубчатого вінця;

K_{Fv} – коефіцієнт, що враховує динамічне навантаження, що виникає в зачепленні, для сталевих коліс із поверхнею, закаленою ТВЧ, 8 класу точності приймають $K_{Fv} = 1,05$; [7, табл.3.16, с.72]

Допустиме напруження витривалості при згинанні $[\sigma_F]$ визначається за формулою :

$$[\sigma_F] = \sigma_{F \lim b} K_{FL}.$$

де $\sigma_{F \lim b} = 900$ МПа – межа витривалості зубів при згинанні, що відповідає базовому числу змін напружень; [7, табл. 3.19, с.78]

K_{FL} – коефіцієнт довговічності, розраховується за формулою:

$$K_{FL} = \sqrt[6]{\frac{N_{F0}}{N_{FE}}},$$

де $N_{F0} = 4 \cdot 10^6$ – базова кількість циклів зміни напружень;

$N_{FE} = 60 n t_z$ – еквівалентна кількість циклів зміни напружень.

Розраховуємо зубчасті колеса на витривалість при згинанні зубів.

1) Розраховуємо зуби зубчастих коліс z_1, z_2 :

Коефіцієнт довговічності

$$K_{FL} = \sqrt[6]{\frac{4 \cdot 10^6}{60 \cdot 1250 \cdot 14800}} = 0,39$$

Допустиме напруження:

$$[\sigma_F] = \sigma_{F \lim b} K_{FL} = 900 \cdot 0,39 = 351 \text{ МПа.}$$

Розрахункова окружна сила:

$$W_{Ft} = \frac{2T}{db} K_{F\alpha} K_{F\beta} K_{Fv} = \frac{2 \cdot 22 \cdot 10^3}{68 \cdot 14} 1 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 61 \frac{\text{Н}}{\text{мм}};$$

Напруження згину зубів:

$$\sigma_F = Y_F Y_\beta \frac{W_{Ft}}{m} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{61}{2,0} = 30,5 \text{ МПа} \leq [\sigma_F]$$

2) Розраховуємо зуби зубчастих коліс z_8, z_9 :

Коефіцієнт довговічності

$$K_{FL} = \sqrt[6]{\frac{4 \cdot 10^6}{60 \cdot 250 \cdot 14800}} = 0,51$$

Допустиме напруження:

$$[\sigma_F] = \sigma_{F \lim b} K_{FL} = 900 \cdot 0,51 = 460 \text{ МПа.}$$

Розрахункова окружна сила:

$$W_{Ft} = \frac{2T}{db} K_{Fa} K_{F\beta} K_{Fv} = \frac{2 \cdot 110 \cdot 10^3}{134 \cdot 14} 1 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 155 \frac{\text{Н}}{\text{мм}};$$

Напруження згину зубів:

$$\sigma_F = Y_F Y_\beta \frac{W_{Ft}}{m} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{155}{2,0} = 77,5 \text{ МПа} \leq [\sigma_F]$$

3) Розраховуємо зуби зубчастого колеса z_{13} :

Коефіцієнт довговічності:

$$K_{FL} = \sqrt[6]{\frac{4 \cdot 10^6}{60 \cdot 315 \cdot 14800}} = 0,49$$

Допустиме напруження:

$$[\sigma_F] = \sigma_{F \lim b} K_{FL} = 900 \cdot 0,49 = 440 \text{ МПа.}$$

Розрахункова окружна сила:

$$W_{Ft} = \frac{2T}{db} K_{Fa} K_{F\beta} K_{Fv} = \frac{2 \cdot 80 \cdot 10^3}{98 \cdot 14} 1 \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 154 \frac{\text{Н}}{\text{мм}};$$

Напруження згину зубів:

$$\sigma_F = Y_F Y_\beta \frac{W_{Ft}}{m} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{154}{2,0} = 77 \text{ МПа} \leq [\sigma_F]$$

Висновок. За результатами розрахунків найбільш навантажених зубчастих коліс механізму встановлено, що усі зубчасті колеса механізму витримують умову витривалості на контактні напруження та згин.

3. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Мета проведення досліджень

При розробці сучасних конкурентоспроможних верстатів, які мають попит на міжнародних ринках, ключовими вимогами стають точність і надійність. Конструкції сучасних металорізальних верстатів містять велику кількість взаємодіючих деталей, що вимагає високої точності виготовлення та складання. Водночас у ряді вузлів верстата необхідною умовою працездатності є наявність зазорів між деталями (затискні механізми, патрони, рухомі столи, супорти, гільзи, обертові елементи, зокрема шпинделі). Це унеможливорює повне усунення неточностей та випадкового спряження деталей.

Фактори, такі як зміни температури, вібрації, забруднення, знос контактних поверхонь, наявність або відсутність мастила, а також коливання характеру і величини навантажень, впливають на взаємодію деталей і спричиняють випадкові зміни умов їхнього спряження. Ці зміни є одним із головних чинників, які визначають точність технологічних машин, зокрема поліграфічного обладнання.

Метою досліджень є визначення математичних залежностей між параметрами частково регулярних мікрорельєфів та аналіз механізму деформування поверхні зубів колеса.

3.2. Аналіз механізму деформування поверхні зубів колеса деформівними елементами евольвентного профіля

На початковому етапі деформування нерівностей поверхні зубців колеса розглядається процес зміни їх форми. Відношення між розмірами деформованих ділянок та радіусом їх кривизни дозволяє моделювати

деформування виступів як осідання з переміщенням усіченого клина під дією плоского пуансона.

На цьому етапі відбувається зминання виступів нерівностей із збільшенням площі контакту, причому пластична деформація обмежується матеріалом виступів і не поширюється в западини.

Процес осідання виступів нерівностей, що мають форму клина, вирішується за допомогою симетричного поля ліній ковзання за методом Прандтля.

Метод Прандтля – це підхід до розрахунку пластичного деформування матеріалів, заснований на аналізі полів ліній ковзання. Його суть полягає в тому, що під час деформації в матеріалі виникають зони, в яких відбувається ковзання частинок відносно одна одної.

Метод дозволяє визначити розподіл напружень і форму пластичних зон, що утворюються під час осадження чи зминання виступів, таких як нерівності поверхні зубців колеса. Прандтль запропонував використовувати симетричне поле ліній ковзання для моделювання поведінки клиноподібних нерівностей під дією плоского пуансона.

Цей підхід широко застосовується в механіці деформованого твердого тіла для розрахунків процесів пластичного формоутворення, зокрема при аналізі контактної взаємодії поверхонь та обробці металів тиском.

Симетричне поле ліній ковзання Прандтля при осадці із зсувом зрізаного клина перетворюється. Типове поле, для цього випадку, показане на рисунку 3.1 а. Воно утворене трьома трикутними областями AB_3B_2 ; $AB-B$; BA_2A_3 рівномірного напруженого стану і двома секторами $AA-B_2$ і AB_1A_2 .

Враховуючи, що гідростатичний тиск в трикутнику BA_2A_3 і AB_2B_2 рівний $p_{A3} = p_{B4} = -\tau_s$, кут повороту α – лінії ковзання $\varphi_1 = \frac{3\pi}{4} - \theta - \eta$ і використовуючи співвідношення Генки для ліній ковзання, середній тиск на поверхні контакту визначиться по формулі:

$$\tau_s = \frac{HV}{6}$$

де τ_s - межі міцності на зсув матеріала зубів колеса, середньо-інтегральне значення якої в поверхневому шарі може бути визначене, з врахуванням зміцнення, по формулі:

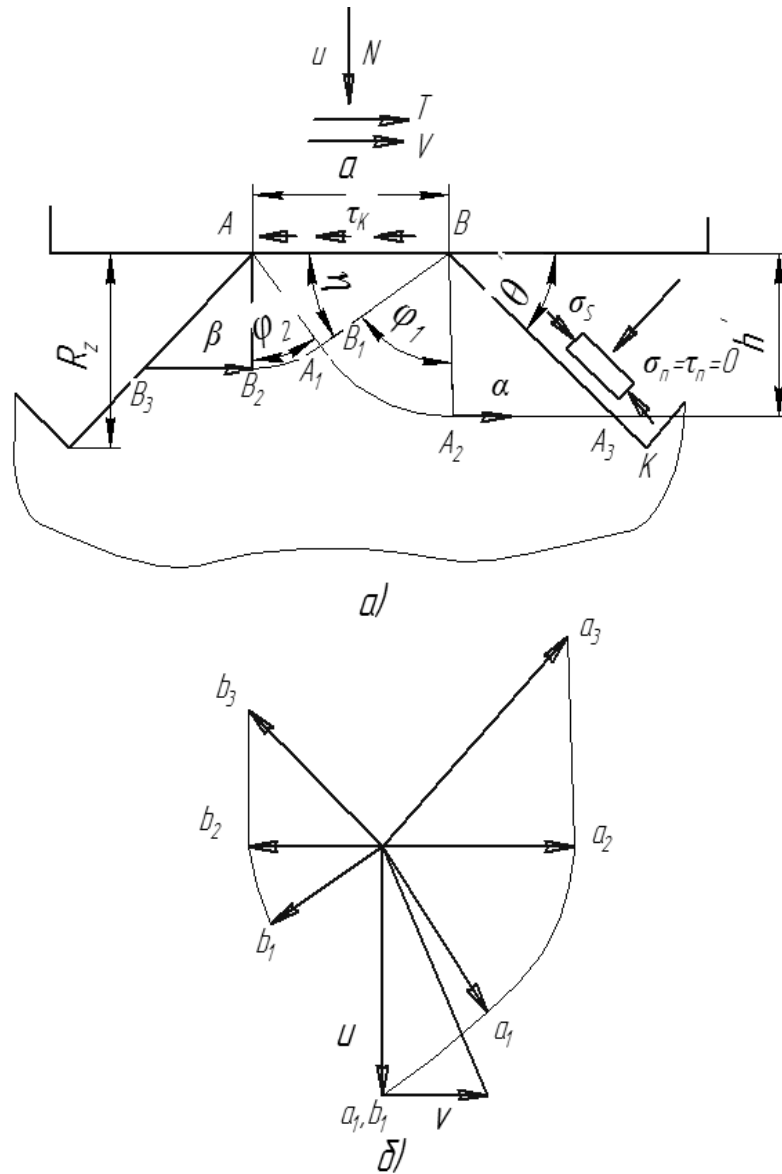


Рис. 3.1. Осадження із зсувом виступів нерівностей в вигляді зрізаного клина: а) поле ліній ковзання; б) годограф швидкостей

де HV – твердість поверхневого шару по Вікерсу після обробки на типових режимах;

θ – кут нахилу бокових поверхонь нерівностей;

η - кут нахилу β -ліній ковзання в контактній поверхні, що визначається величиною контактної тертя по відомому співвідношенню

$$\eta = 0,5 \arccos 2\mu,$$

μ – коефіцієнт пластичного тертя.

Величина $\mu = \frac{\tau_k}{2\tau_s}$ – однозначно визначається коефіцієнтом тертя ψ і використовується в розрахунках пластичної текучості для визначення контактних напружень. Залежність між μ і ψ , визначається по формулі:

$$\mu = 0,5\psi \left(\frac{2 + \sqrt{1 - 3\psi^2}}{1 + \psi^2} \right)$$

Годограф швидкостей переміщення металу в зоні деформування показаний на рисунку 5.16. Із годографа слідує, що течіння металу відбувається, головним чином, в напрямку переміщення інструмента і визначається тертям в зоні контакту.

Зусилля деформування визначається шляхом сумування тисків на поверхні контакту:

$$N = \frac{a'}{S} \cdot a \cdot b(\alpha_2) \cdot \rho \cdot n$$

де a – ширина площі контакту деформівного елемента з нерівністю в поперечному (по профілю зуба) напрямку;

$b(\alpha_2)$ - довжина поверхні контакту деформівного елемента з поверхнею зуба вздовж його твірної

a' – величина, що визначається з врахуванням того, що величина h_b є різницею $h_b = R_z^0 - R_z$

де R_z^0, R_z – висота нерівностей по десяти точкам (по ДСТУ 2789-98), відповідно вихідної і обробленої поверхні при заданому зусиллі деформування.

Відношення – середнє число нерівностей що деформуються на ділянці a' , S – крок нерівностей по вершинам, ДСТУ 2789-98.

Зі збільшенням зусиль зсуву, які виникають через тертя в зоні контакту, площа контакту між оброблюваною поверхнею та інструментом зростає, залишаючи глибину деформації сталою. Це сприяє локалізації деформації у поверхневому шарі, що створює біля поверхні стискаючі напруження. Ці напруження позитивно впливають на міцність поверхні, особливо в умовах змінних навантажень.

Контроль за якістю обробки здійснюється двома основними методами, що забезпечує гнучкість керування процесом:

- регулювання параметрів режиму обробки;
- оптимізація конструкції інструмента.

При розробці інструмента необхідно враховувати два ключові аспекти:

1. Дестабілізуючі фактори, що впливають на якість обробки і залежать від процесу та геометрії зачеплення.
2. Цілеспрямовану зміну умов обробки вздовж профілю зубців для досягнення необхідної якості поверхні, враховуючи змінні характеристики контактної взаємодії в процесі експлуатації.

Керування процесом обробки профілю зубців можливе через дослідження впливу дестабілізуючих факторів, зокрема:

- зміни зусиль деформації вздовж профілю зубця, що виникають внаслідок варіацій параметрів зачеплення (радіусів кривизни та прикладених зусиль);
- зміни умов деформації поверхневого шару поблизу вершин зубів.

Реалізація змінного зусилля деформації по профілю зуба, наприклад, через гальмівний момент, є складною задачею, що потребує високої синхронізації та врахування інерційності системи. Внаслідок цього на практиці часто застосовується менш ефективний метод – експериментальний підбір геометрії профілю зубів інструмента. Однак така корекція може порушити основні принципи евольвентного зачеплення.

Аналіз впливу кількості зубів інструмента на процес обробки показує, що:

- глибина втискання деформуючого елемента значною мірою залежить від радіуса його кривизни та варіації зусиль деформації при змінному радіусі;
- зі збільшенням кількості зубів інструмента знижується амплітуда коливань параметрів обробки вздовж профілю зубця.

Розглянемо функцію $b(\alpha_e)$, яка дозволяє мінімізувати вплив дестабілізуючого фактору, що обумовлений зміною довжини лінії зачеплення та характеризується коефіцієнтом перекриття.

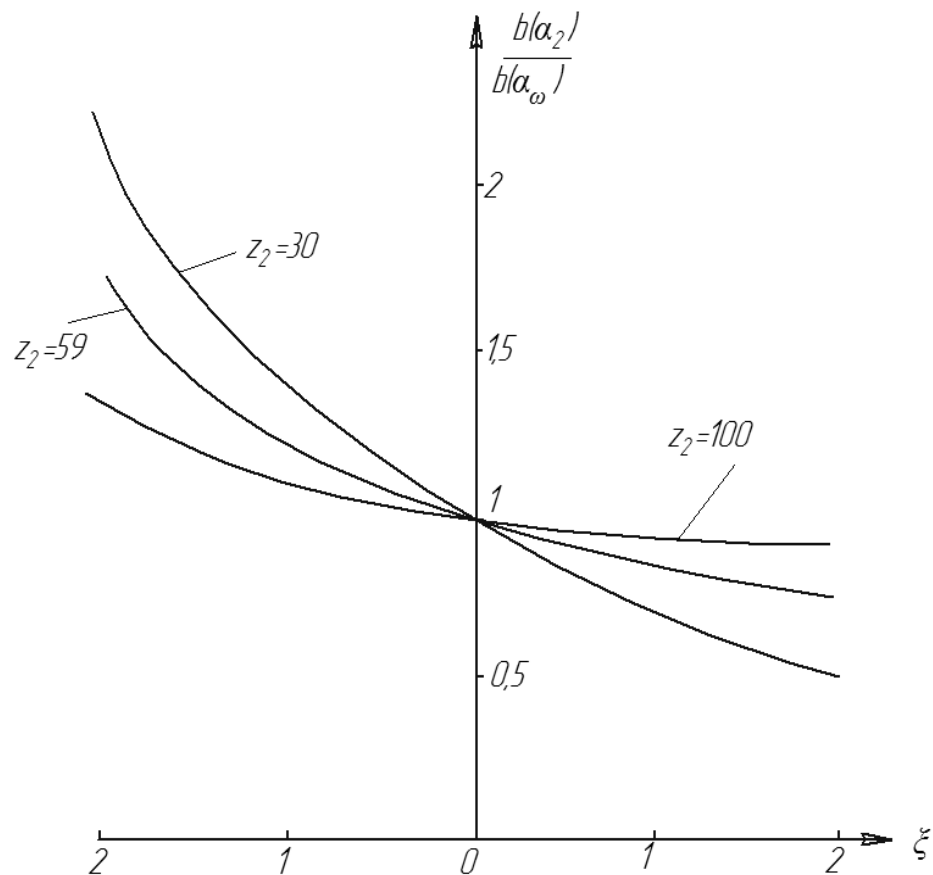


Рис. 3.2. Графік зміни відношення $\frac{b(\alpha_2)}{b(\alpha_\omega)}$ по профілю зуба інструмента в залежності від кількості зубів інструмента.

Графік потрібної зміни функції $b(\alpha_2)$ показаний на рисунку 3.2.

На відміну від попередньо розглянутого дестабілізуючого фактора, цей фактор визначається також кількістю зубів на оброблюваному колесі. Збільшення кількості зубів сприяє розширенню зони двопарного контакту.

Проте варто зазначити, що при обробці зубчастих коліс з точністю вище 7-го ступеня та наявності похибок кроку заготовки, коефіцієнт перекриття дорівнює одиниці, що призводить до зникнення зони двопарного контакту. У такому випадку функція $b(\alpha_2) = b(\alpha_w) = \text{const}$ вироджується.

Найбільший вплив на стабільність процесу фінішної обробки зубчастих коліс методом пластичного деформування за схемою вільного обкатування має неоднорідність пластичної деформації на вершинах зубів оброблюваного колеса.

3.3. Розробка принципової схеми пристрою із замкнутим контуром для віброобкатування зубчастих коліс

Проектування автономної установки обумовлене необхідністю досягнення заданих технічних характеристик приводу, які повинні відповідати вимогам режиму обробки в процесі вібраційного накатування:

- Фактори мають бути керованими, тобто повинна бути можливість налаштування та підтримки їх заданих значень під час обробки деталі.
- Повинна виконуватись умова сумісності будь-якої пари факторів, що гарантує відсутність негативного взаємного впливу, який може порушити технологічний процес.
- Фактори повинні бути незалежними, забезпечуючи можливість регулювання кожного з них окремо, незалежно від рівня інших параметрів.

Кінематична схема пристрою запропонована для реалізації схеми обробки показана на рисунку 3.3.

- два одночасно оброблюваних зубчастих колеса 2;
- віброобкатник 1;
- пружина 7
- муфти 8;
- колеса 9, які забезпечують замикання контуру.

Із шпинделя верстата через вал 11 та понижувальну ланцюгову передачу 10 обертання передається в замкнутий силовий контур.

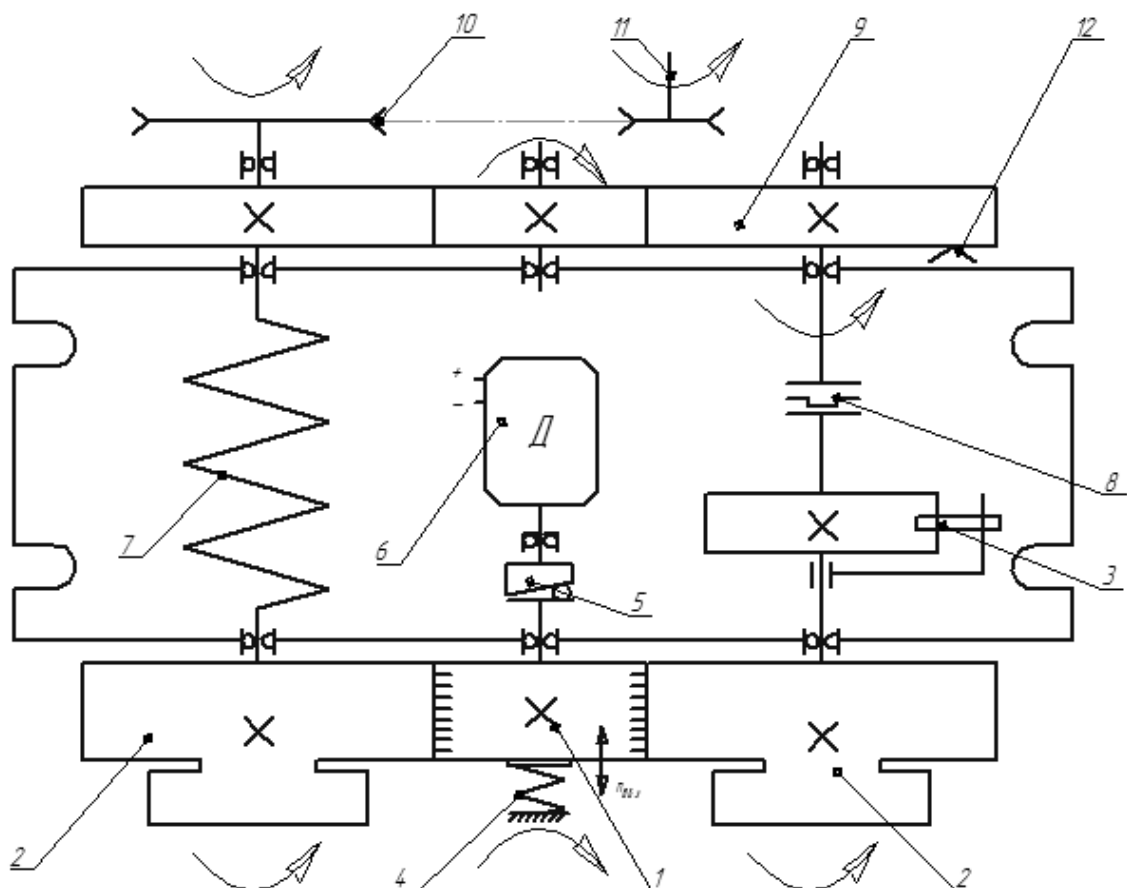


Рис. 3.3. Принципова схема пристрою із замкнутим силовим контуром

Підготовка пристрою складається з таких етапів:

- встановлюються та затискаються оброблювані зубчасті колеса 2;
- зубчасте колесо 9 фіксується за допомогою фіксатора 12;
- при відключеній муфті 8 за допомогою храпового механізму проводиться прокручування зубчастого колеса 2. Відповідно скручується пружина 7, що створює необхідне напруження в зубчастому зачепленні між інструментом і оброблюваними колесами;
- після створення натягу пружини включається муфта 8 та знімається фіксація колеса 9.
- узгоджено запускаються привід верстата та двигун 6 для проведення процесу віброобкатки.

3.4. Математичні моделі частково регулярних зигзагоподібних мікрорельєфів на плоских поверхнях

Проаналізовано існуючі класифікації видів регулярних мікрорельєфів, що розроблені науковою школою Ю.Г. Шнейдера,

Показано, що використавши в приводі осциляційного руху віброобкатника кулачок з профілем, виконаний по Архімедовій спіралі, отримаємо систему зигзагоподібних канавок. Врахувавши можливі технологічні наладки пристрою для віброобкочування евольвентиних поверхонь поверхонь, можна отримати 3 основних види ЧМР, а саме: перший – з канавками, що не дотикаються (I), другий – з канавками, що дотикаються (II) і третій – з канавками, що перетинаються (III).

Розглянемо перший вид мікрорел'єфу – із системою синфазних канавок (рис 3.4).

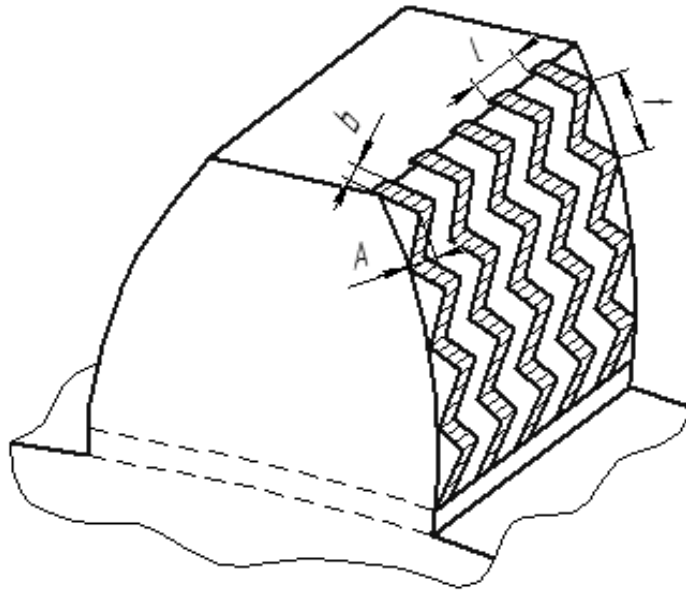


Рис. 3.4. Поверхня зуба із системою синфазних канавок до не дотикаються

Якщо розгорнути евольвентну поверхню зуба на площину, отримаємо зображення поверхні із системою канавок, які відповідають лініям контакту під час зачеплення. На цій площині можна нанести параметри мікрорельєфу, що відображають стан поверхні після обробки або в процесі експлуатації.

Таке розгортання дозволяє візуалізувати та проаналізувати характер зношування, розподіл залишкових напружень, а також оцінити ефективність процесів вібраційного накатування або інших методів фінішної обробки. Система канавок та мікронерівності на площині демонструє вплив технологічних факторів на якість обробки та точність профілю зуба.

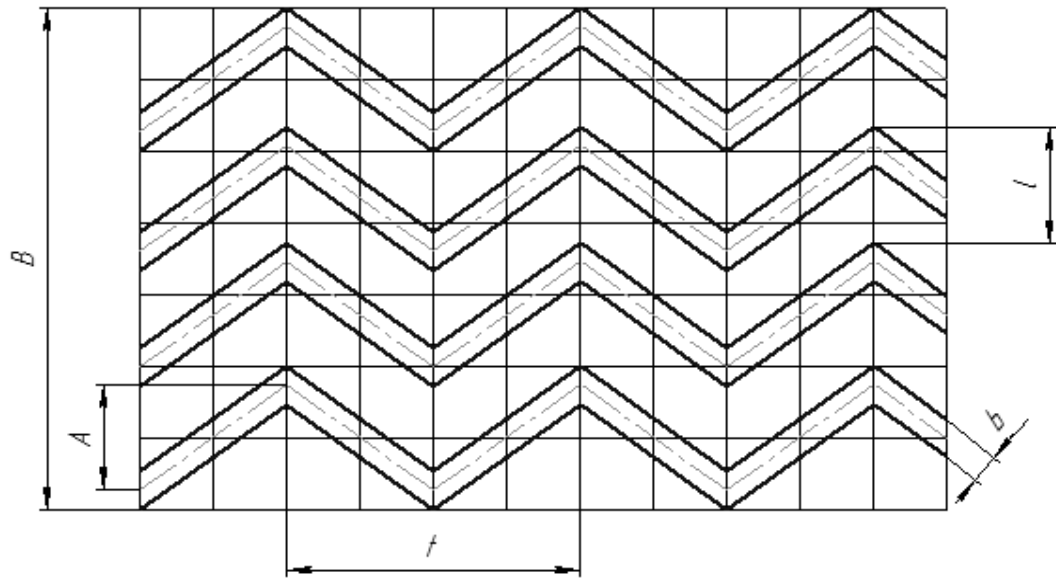


Рис. 3.5. Розгортка поверхні зуба на площину.

Запропонований ЧРМ описується створеною математичною моделлю яка являє собою систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_n = a \cdot x + (n-1)l + y_0 \\ -k \leq y_0 \leq k \\ a = 2A/t, \text{ при } 0 \leq x \leq t/2 \\ a = -2A/t, \text{ при } -t/2 \leq x < 0 \\ l = (B - A - b)/(n-1) \\ A \leq B - nb \\ n = 1, 2, 3 \dots < B/b \\ k = b / \sin[\arctg(2A/t)] \end{array} \right.$$

де A -амплітуда коливань; n -кількість накатників; l -поперечний крок; b -ширина канавки; B -ширина віброоброблюваної стрічки; t -поздовжній крок; d -відстань зміщення в поздовжньому напрямку; a -кутовий коефіцієнт прямої; y_0 -проекція ширини канавки на напрям перпендикулярний поздовжній подачі.

Ще один варіант мікрорел'єфу – із системою асинфазних канавок, що дотикаються по вершинах. Наноситься на зубчасте колесо в два проходи.

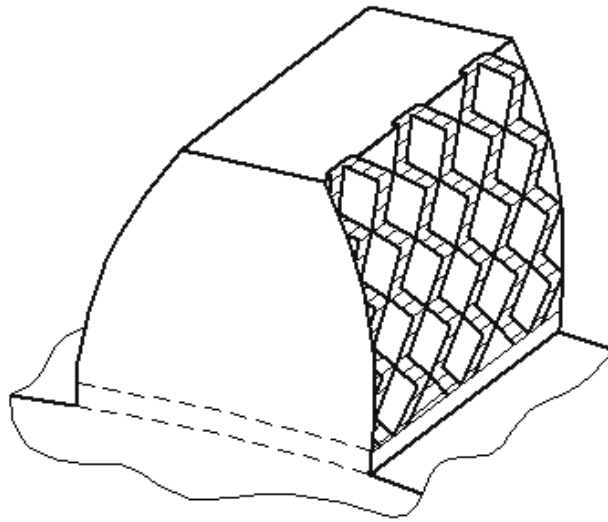


Рис. 3.6. Поверхня зуба із системою асинфазних канавок що дотикаються по вершинах

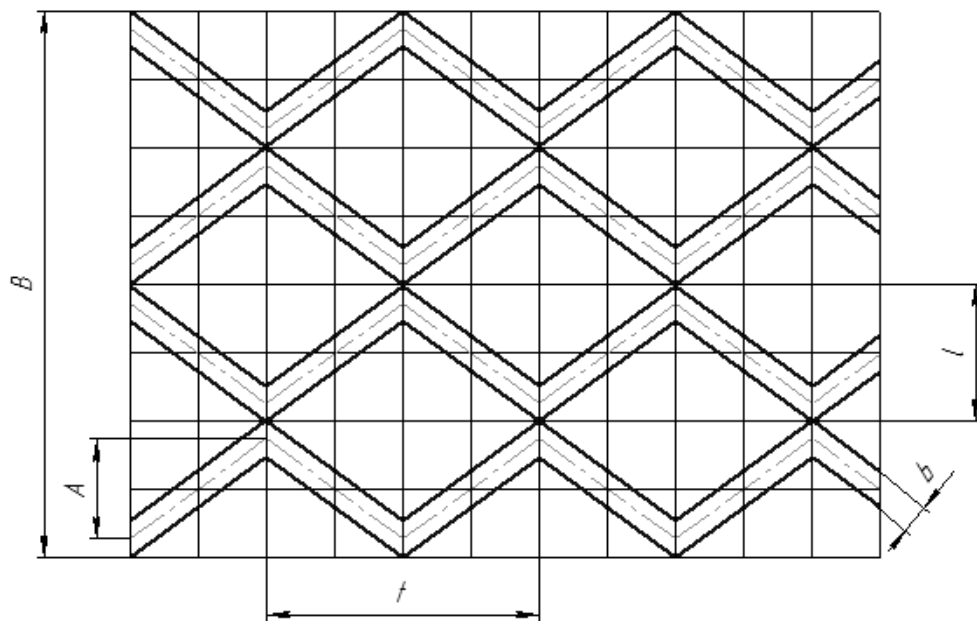


Рис. 3.7. Розгортка поверхні зуба на площину

Система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_n = a \cdot x + (n-1)d + (n-1)l + y_0 \\ -k \leq y_0 \leq k \\ a = 2A/t, \text{ при } 0 \leq x \leq t/2 \\ a = -2A/t, \text{ при } -t/2 \leq x < 0 \\ l = (B - A - b)/(n-1) \\ d = l/a - k \\ A \leq B - nb \\ n = 1, 2, 3 \dots < B/b \\ k = b / \sin[\arctg(2A/t)] \end{array} \right.$$

Наступний вид мікрорел'єфу – із системою асинфазних канавок, що перетинаються. Наноситься на зубчасте колесо в два проходи.

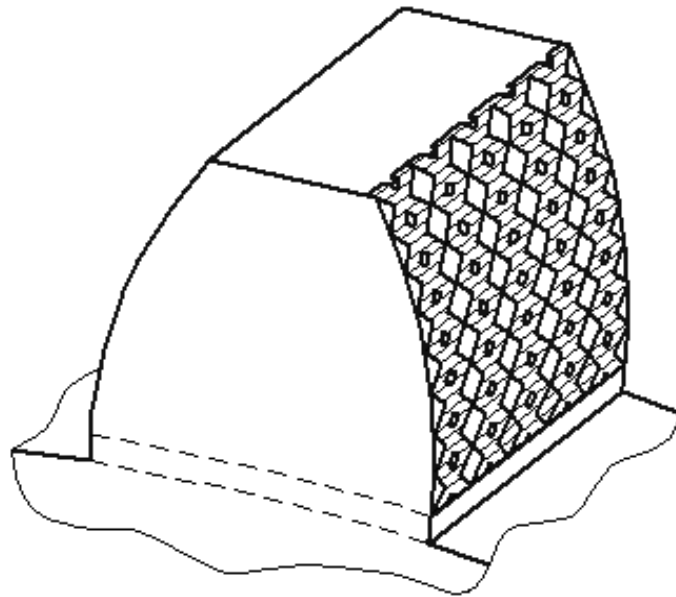


Рис. 3.8. Поверхня зуба із системою асинфазних канавок що дотикаються по вершинах

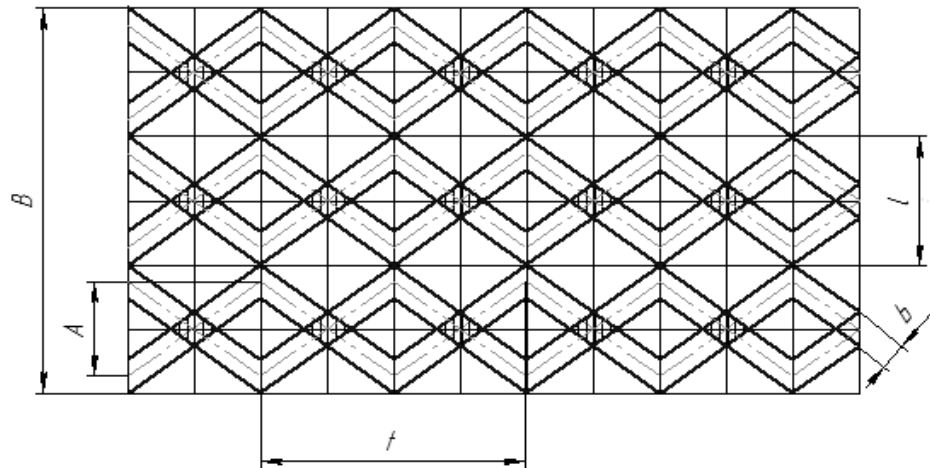


Рис. 3.9. Розгортка поверхні зуба на площину

Система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_n = a \cdot x + t / 2(n-1) + (n-1)l + y_0 \\ -k \leq y_0 \leq k \\ a = 2A/t, \text{ при } 0 \leq x \leq t/2 \\ a = -2A/t, \text{ при } -t/2 \leq x < 0 \\ b/n < l \leq (B-A-b)/(n-1) \\ A < B - (n-1)b \\ n = 1, 2, 3, \dots < B/b \\ k = b / \sin[\arctg(2A/t)] \end{array} \right.$$

3.5 Розробка конструкції віброобкатника

Прототипом для створення конструкції віброобкатного інструменту слугує шевер із прямими канавками, який застосовується для обробки косозубих коліс.

На рисунку 3.10 зображена конструкція розробленого інструменту. Він має вигляд зубчастого колеса, на робочих поверхнях зубів якого виконані поперечні канавки.

Така конструкція дозволяє ефективно реалізувати процес вібраційного накатування, забезпечуючи формування мікрорельєфу та підвищення контактної міцності оброблюваних поверхонь зубчастих коліс.

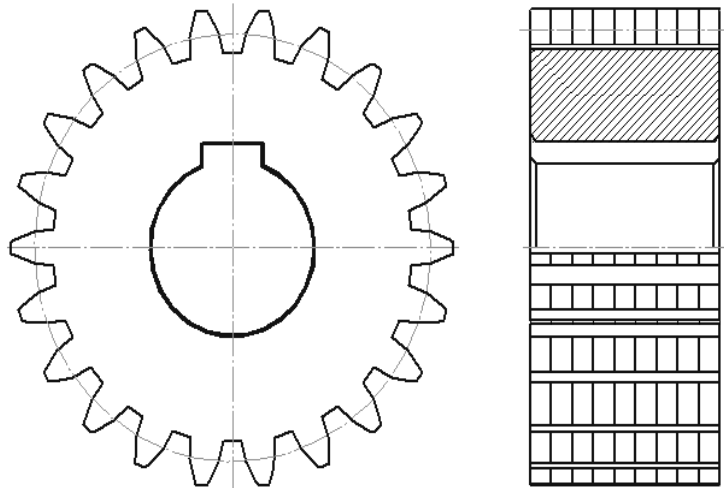


Рис. 3.10. Розроблений віброобкатник

Прямі канавки (рис 3.11) утворюються методом довбання на бокових поверхнях зубів. Процес довбання проводиться гребінками.

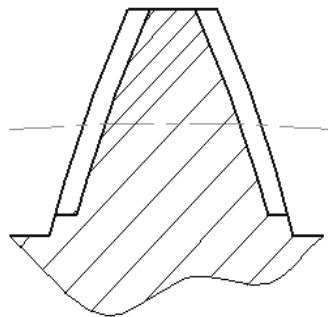


Рис. 3.11. Зуб віброобкатника із нарізаними прямими канавками

Даний інструмент може використовуватись для вібронакатування зубчастих коліс з величиною модуля 2,5 мм та шириною зубчастого вінця до 30 мм.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1.1. Типова інструкція для обслуговуючого персоналу на випадок виникнення аварії, пожежі

1. При роботі на деревообробних верстатах ситуації, які можуть привести до аварії і нещасних випадків, являються наслідком: ураження електричним струмом, вильоту заготовок та їх осколків, вильоту інструменту, відсутності захисних огорожень.

2. У разі виникнення аварійної ситуації треба негайно відключити верстат від електромережі, загородити небезпечну зону, не допускати в неї сторонніх осіб.

3. Повідомити про те, що сталося, керівника робіт.

4. Якщо є потерпілі, необхідно надавати їм першу медичну допомогу; при необхідності, викликати швидку медичну допомогу.

5. Надання першої медичної допомоги:

5.1. Надання першої медичної допомоги при ураженні електричним струмом:

У разі ураження електричним струмом необхідно негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму, відключивши електроустановку від джерела живлення, а при неможливості відключення – відтягнути його від струмоведучих частин за одяг або застосувавши підручний ізоляційний матеріал. У разі відсутності у потерпілого дихання і пульсу необхідно робити йому штучне дихання і непрямий (зовнішній) масаж серця, звернувши увагу на зіниці. Розширені зіниці свідчать про різке погіршення кровообігу мозку. При такому стані необхідно негайно приступити до оживлення потерпілого і викликати швидку медичну допомогу.

5.2. Перша допомога при пораненні:

Для надання першої допомоги при пораненні необхідно розкрити індивідуальний пакет, накласти стерильний перев'язочний матеріал, що міститься у ньому, на рану і зав'язати її бинтом. Якщо індивідуального пакету якимсь чином не буде, то для перев'язки необхідно використати чисту носову хустинку, чисту полотняну ганчірку і т. ін. На те місце ганчірки, що приходить безпосередньо на рану, бажано накапати декілька крапель настойки йоду, щоб одержати пляму розміром більше рани, а після нього накласти ганчірку на рану. Особливо важливо застосовувати настойку йоду зазначеним чином при забруднених ранах.

5.3. Перша допомога при переломах, вивихах, ударах:

При переломах і вивихах кінцівок необхідно пошкоджену кінцівку укріпити шиною, фанерною пластикою, палицею, картоном або іншим подібним предметом.

Пошкоджену руку можна також підвісити за допомогою перев'язки або хустки до шиї і прибинтувати до тулуба. При переломі черепа (несвідомий стан після удару голови, кровотеча з вух або роту) необхідно прикласти до голови холодний предмет (грілку з льодом або снігом, чи холодною водою) або зробити холодну примочку.

При підозрінні перелому хребта необхідно потерпілого покласти на дошку, не підіймаючи його, чи повернути потерпілого на живіт обличчям униз, наглядаючи при цьому, щоб тулуб не перегинався, з метою уникнення ушкодження спинного мозку.

При переломі ребер, ознакою якого є біль при диханні, кашлю, чханні, рухах, необхідно туго забинтувати груди чи стягнути їх рушником під час видиху.

5.4. Надання першої допомоги при теплових опіках:

При опіках вогнем, парою, гарячими предметами ні в якому разі не можна відкривати пухирі, які утворюються, та обв'язувати опіки бинтом.

При опіках першого ступеня (почервоніння) обпечене місце обробляють ватою, змоченою етиловим спиртом.

При опіках другого ступеня (пухирі) обпечене місце обробляють спиртом, 3%-ним марганцевим розчином або 5%-ним розчином таніну.

При опіках третього ступеня (зруйнування шкіряної тканини) накривають рану стерильною пов'язкою та викликають лікаря.

5.5. Перша допомога при кровотечі:

Для того, щоб зупинити кровотечу, необхідно:

- підняти поранену кінцівку вверх;
- кровоточиву рану закрити перев'язочним матеріалом (із пакета), складеним у клубочок, придавити 2 зверху, не торкаючись самої рани, потримати на протязі 4-5 хвилин; якщо кровотеча зупинилася, то не знімаючи накладеного матеріалу, поверх нього покласти ще одну подушечку з іншого пакета чи кусок вати і забинтувати поранене місце (з деяким натиском);
- при сильній кровотечі, яку не можна зупинити пов'язкою, застосовується здавлювання кровоносних судин, які живлять поранену область, за допомогою згинання кінцівок в суглобах, а також пальцями, джгутом або закруткою; при великій кровотечі необхідно терміново викликати лікаря.

6. У разі виникнення пожежі викликати пожежну частину та приступити до гасіння її наявними засобами пожежогасіння.

7. Виконувати всі вказівки керівника робіт по ліквідації небезпеки.

4.2. БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.2.1. Оцінка стійкості роботи промислового підприємства до впливу вражаючих факторів

Стійкість роботи об'єкта - це здатність в умовах військового часу виготовляти продукцію в запланованому об'ємі і номенклатурі, а при одержанні слабких і частково середніх руйнувань відновлювати своє виробництво в мінімальні терміни. Ціль оцінки стійкості об'єкта полягає у виявленні слабких

його елементів, щоб у подальшому провести інженерно-технічні заходи, спрямовані на підвищення стійкості об'єкта в цілому [25].

Оцінка стійкості роботи об'єкта - це всебічне вивчення підприємства з погляду спроможності його протистояти впливу вражаючих факторів ядерного вибуху, продовжувати роботу і відновлювати виробництво при одержанні слабких руйнувань.

Промислові підприємства відрізняються одне від одного як по конструктивному рішенню, так і по технологічному процесі. Відмінності об'єктів полягають в будинках і спорудах, устаткуванні і технології виробництва, комунально-енергетичних мережах і території, на якій розташований об'єкт. Тому в усіх випадках оцінка стійкості кожного об'єкта має свої особливості і вимагає конкретного підходу до рішення цього питання. У даному випадку розглянемо загальні для всіх об'єктів питання оцінки їх стійкості до впливу вражаючих факторів зброї масового знищення.

Оцінка стійкості роботи об'єкта починається з вивчення району розташування. Об'єкт може знаходитися в місті, за межею його проектної забудови і на деякій віддалі від міста. Досліджується територія району, його структура, щільність і тип забудови, сусідні об'єкти і можливість виникнення на них вторинних чинників поразки. На об'єкті визначаються щільність забудови,

розміщення основних будинків і споруджень, що впливають на характер руйнування, можливе утворення завалів і виникнення пожеж. Особлива увага приділяється ділянкам, де можливе виникнення небезпечних вторинних чинників ушкоджень. Беруться на облік усі будинки і споруди, робиться оцінка їх статичної стійкості. Вивчають кожен цех і його окремі елементи як по конструктивному рішенню, так і за матеріалами, що були використані в будівництві.

Розглядаються умови розміщення внутрішнього технологічного устаткування і визначаються види руйнувань і ушкоджень, що можуть мати місце при ядерному вибуху і заваленні огорожувальних конструкцій цехів. Особливо важливо визначити захист цінного й унікального устаткування, насиченість

виробництва автоматикою і можливість продовження виробництва у випадку виходу з ладу контрольно-вимірювальної апаратури. Обстежуються комунально-енергетичні системи об'єкта і робиться оцінка стійкості споруджень і ліній, тобто визначаються параметри вражаючих факторів, при яких комунально-енергетичні мережі одержать ті або інші руйнування.

Визначається забезпеченість працюючих захисними спорудженнями: встановлюється кількість сховищ, укриттів і оцінюються їхні захисні властивості. Вивчається система керування, зв'язку й оповіщення на основі вивчення стану захищених пунктів керування, вузлів і ліній зв'язку. Аналізується система матеріально-технічного постачання і виробничих зв'язків. Встановлюється об'єм запасів і можливих термінів продовження роботи без постачань; визначається відповідність їхньої кількості і номенклатури вимогам, запропонованим до виробництва у військовий час. Оцінюється стійкість складів сировини, комплектуючих виробів, готової продукції й інших матеріалів, а також сховища паливних матеріалів. Досліджується підготовка об'єкту до відновлення виробництва у випадку одержання слабких або середніх руйнувань. Аналіз виробничої діяльності об'єкта дозволяє виявити слабкі елементи, ділянки і підготувати план підвищення стійкості їх роботи і план відновлювальних робіт, забезпечити їх будівельно-монтажною і проектною документацією.

4.2.2. Оцінка стійкості роботи об'єкта до впливу ударної хвилі

Критерієм для визначення стійкості промислового підприємства до впливу ударної хвилі ядерного вибуху є розмір надлишкового тиску, при якому будинки і спорудження об'єкта зберуться або одержать слабкі і середні руйнування.

При оцінці стійкості об'єкта необхідно виявити найбільш уразливі елементи і ділянки, від яких залежить робота всього підприємства. Після оцінки окремих споруджень оцінюється об'єкт у цілому. При цьому стійкість об'єкта визначається по тій будівлі або спорудженню, що руйнується при найменшому надлишковому тиску. Після оцінки стійкості об'єкта намічаються заходи, що необхідно провести для підвищення стійкості об'єкта до впливу ударної хвилі

ядерного вибуху. Для цього визначають доцільні межі підвищення стійкості кожної споруди [25] режими роботи об'єкта в різних умовах радіоактивного зараження.

4.2.3. Оцінка стійкості об'єкта до впливу вторинних вражаючих факторів

До вторинних вражаючих факторів відносяться аварії, пожежі, вибухи, затоплення, зараження атмосфери і місцевості, а також завалення ушкоджених конструкцій. Масштаби вражаючої дії від вторинних вражаючих факторів в окремих випадках можуть перевершувати безпосередню вражаючу дію ядерного вибуху. Причинами виникнення вторинних вражаючих факторів є руйнування, викликані ядерним вибухом на об'єкті або на сусідніх із ним об'єктах, що виявилися в зоні безпосередньої дії ядерного вибуху, тобто внутрішні і зовнішні джерела.

При оцінці стійкості об'єкта до впливу вторинних вражаючих факторів ядерного вибуху визначаються різні джерела їхнього виникнення. У першу чергу виявляються внутрішні джерела, наявні на самому підприємстві. Це можуть бути резервуари і ємкості з легкозаймистою рідиною і газами, склади вибухових речовин, вибухонебезпечні технологічні установки і комунікації, руйнування яких викликає пожежі, вибухи або загазованість, легкозаймисті будівлі і спорудження. Зовнішніми джерелами вторинних вражаючих факторів можуть бути близько розташовані хімічні і нафтопереробні заводи, нафтові і газові промисли, холодильники, гідровузли, склади нафтопродуктів і інших пальних рідин й інші об'єкти. Одночасно з врахуванням усіх можливих джерел вторинних вражаючих факторів визначається характер їхнього впливу на даний об'єкт і встановлюється, який вид ушкоджень і руйнувань очікується, а також час і тривалість їхньої дії.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі, яка відповідає виданому завданню, було виконано всебічне дослідження процесу вібраційного обкатування зубчастих коліс. У ході роботи розроблено як конструкцію пристрою, так і інструмент, необхідний для реалізації технологічного процесу обробки.

Основні етапи виконаної роботи:

1. Аналіз проєктного завдання та огляд попередніх досліджень

На початковому етапі було детально проаналізовано умови та вимоги, поставлені у завданні на проєктування. Визначено ключові напрямки дослідження та вектор подальшої роботи. Значну увагу приділено вивченню та систематизації результатів попередніх наукових та технічних розробок, включаючи аналіз патентних джерел, технічної літератури та інших інформаційних матеріалів. Це дозволило виявити сучасні тенденції в області вібраційної обкатки та визначити недоліки існуючих методів, які потребують удосконалення.

2. Огляд схем формоутворення мікрорельєфу. Проведено огляд процесу формоутворення мікрорельєфу на поверхнях зубчастих коліс, на проєктованому верстаті. Зокрема, виконано всебічний аналіз конструктивних та технологічних особливостей зубчастих коліс, які підлягають обробці. Розглянуто ступінь технологічності деталі, визначено оптимальні методи її формоутворення та проаналізовано рухи, що здійснюються під час виконання операцій. За результатами цього етапу розроблено структурно-кінематичну схему верстата, яка забезпечує необхідні технологічні можливості.

3. Розробка компоновочної схеми верстата

Важливим кроком стало проєктування компоновочної схеми верстата. Відповідно до результатів оптимізації, було створено кілька варіантів компоновок, які систематизовано у вигляді матриць. Здійснено аналіз базових компоновок фрезерних верстатів та обґрунтовано вибір найбільш ефективної з них.

4. Розрахунок режимів різання. Для забезпечення високої продуктивності обробки проведено детальний розрахунок режимів різання, які застосовуватимуться під час виконання різних операцій технологічного процесу. Було враховано характеристики матеріалів, що підлягають обробці, а також особливості інструменту та обладнання.

5. Кінематичний розрахунок приводу головного руху. Особливу увагу приділено кінематичному розрахунку приводу головного руху верстата. У ході цього етапу визначено режими різання для обробки різних матеріалів при максимальних та мінімальних значеннях швидкостей.

6. Діапазон регулювання та структурна формула приводу. Враховано діапазон регулювання приводу головного руху, який становить $D=6$. Розроблено структурну формулу приводу, побудовано структурну сітку та графік частот обертання, що дозволяє забезпечити необхідний діапазон швидкостей обробки.

7. Вибір двигуна приводу головного руху. В якості двигуна для головного приводу обрано електродвигун типу 4A100S4Y3, який забезпечує оптимальну частоту обертання ротора та потужність, необхідну для виконання всіх технологічних операцій. Вибір двигуна ґрунтувався на аналізі вимог до потужності, енергоефективності та надійності роботи.

8. Аналіз механізму деформації зубців коліс
Важливою складовою роботи став аналіз механізму деформації поверхні зубів зубчастих коліс під впливом формуючих елементів під час вібраційної обкатки. Це дозволило розробити методи підвищення зносостійкості та якості обробки поверхні.

9. Розробка інструменту для вібраційної обкатки
У рамках роботи було створено конструкцію інструменту, що використовується для вібраційної обкатки. Розробка враховувала параметри оброблюваних деталей та вимоги до точності обробки, що забезпечує високий рівень якості отриманих виробів.

10. Питання охорони праці та безпеки життєдіяльності

Особливу увагу приділено розгляду питань охорони праці та безпеки життєдіяльності. У ході роботи розроблено заходи щодо підвищення безпеки експлуатації обладнання, зниження рівня виробничих ризиків та створення комфортних умов праці для операторів верстатів.

Ця робота спрямована на вдосконалення технологічних процесів та підвищення ефективності виробництва зубчастих коліс шляхом застосування сучасних методів вібраційної обкатки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ ГОСТ 13568:2006 (ISO 606:1994). Ланцюги приводні роликові та втулкові. Загальні технічні умови (ГОСТ 13568-97 (ИСО 606-94), IDT; ISO 606:1994, NEQ) – Чинний з 2007-10-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 31 с..
2. Пат. 90980 Україна, МПК B21D 5/10 (2006.01). Пристрій для виготовлення згортних втулок із листових заготовок / Бондаренко О.Л., Кривінський П.П.; Кривий П.Д., Сенник А.А., Шпак Р.І.; заявник і патентоотримувач Бондаренко О.Л., Кривінський П.П.; Кривий П.Д., Сенник А.А., Шпак Р.І.. – № U2014 02250; заявл. 05.03.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.
3. Пат. 78307 Україна, МПК B21D 5/00 (2013.01). Спосіб виготовлення згортної втулки / Сенник А.А., Кривий П.Д., Кобельник В.Р., Бондаренко О.Л., Кривінський П.П.; заявник і патентоотримувач Тернопільський нац. тех. ун-т. імені Івана Пулюя. – № U2012 11625; заявл. 08.10.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.
4. Analysis of the accuracy, stiffness, and stability of antennas using simulation modeling / Taras Dubynyak, Volodymyr Nevozhai, Andrii Remez, Valerriy Bukhovets, Andrii Senyk // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2024. — Vol 115. — No 3. — P. 30–43.
5. Bjørklund G.; Shanaida M.; Lysiuk R.; Antonyak H.; Klishch I.; Shanaida V.; Peana M. Selenium: An Antioxidant with a Critical oRole in Anti-Aging. *Molecules* 2022, 27(19).
6. Hevko R. B., Rozum R. I., Klendiy O. M. Development of design and investigation of operation processes of loading pipes of screw conveyors. *INMATEH: Agricultural engineering*. 2016. Vol. 50, No.3. P. 89-94.
7. Harmonic-dispersion analysis of the shape accuracy of the rolling bushings of drive roller and bushing chains / Senyk A., Kovalov V., Klymenko

G., Vasylchenko Y., Shapovalov M., Kobelnyk O. // Procedia Structural Integrity. 7th International Conference on In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction, DMDP 2023 Ternopil 18 October 2023 до 20 October 2023. 2024. Vol. 59, P. 502-507.

8. The influence of titanium as a desferoidizing element on the stability of production of magnesium cast irons with compacted graphite / A. Senuk, L. Slobodyan, V. Aulina, V. Kropivnya, O. Kuzyka, O. Lyashuk, M. Bosyia, Y. Vovk, A. Kropivna, M. Sokolc // Tribology in Industry. - Kragujevac : University of Kragujevac, 2021. - Vol. 43. - № 4. - P. 654-666.

9. New technology for the manufacturing and use of rolling kingpin bushings in the undercarriage of certain vehicles / Senyk A., Kobelnyk V., Gagaliuk A., Plavutska I., Matviyishyn A., Larochkin A., Dubyniak T. // Procedia Structural Integrity. 7th International Conference on In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction, DMDP 2023 Ternopil 18 October 2023 до 20 October 2023. 2024. Vol. 59, P. 508-515.

10. P. Kryvyi, P. Kryvinskyi, V. Bodnar, I. Sotnyk, A. Senuk. "Theoretical and Experimental Substantiation of Angle Orientation of Rolling Bushings of Roller and Bushing Chains". Paper no. MSEC 2007-31211 International Manufacturing Science and Engineering conference. October 15-18, 2007, Atlanta, Georgia, USA, pp. 623-627.

11. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.

12. Вплив орієнтації згортних втулок на підвищення точності контактних кроків привідних роликів і втулкових ланцюгів / А. А. Сенік, В. Б. Котильницький // Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ

СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ» – Тернопіль, 6-7 грудня 2023 року, с. 117.

13. Modeling of a lathe bed using the method of topological optimization / Andriy Nahalyuk, Volodymyr Krupa // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2023. — Vol 111. — No 3. — P. 67–75.

14. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Стойко І. І., Марчук Н. М., Сіправська М. Д. Техніко-економічне обґрунтування процесу механічної обробки з використанням комбінованого свердла-мітчика. *Сільськогосподарські машини*: Зб. наук. ст. Вип. 40. Луцьк, 2018. С. 21-31.

15. До питання точності форми згортних втулок за параметром відхилення від круглості / Кривий П.Д., Дзюра В.О., Тимошенко Н.М., Сенік А.А. // Збірник тез доповідей 8-мої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»: 28 – 29 вересня 2017 р.: тези доп. – Херсонська державна морська академія, 2017. – С. 434 – 435.

16. Кривий П. Д. Дослідження макрогеометрії поперечних перерізів циліндричних поверхонь на прикладі шкворневих втулок / П. Д. Кривий, А. А. Сенік, В. О. Дзюра, В. Р. Кобельник // Збірник тез доповідей 7-мої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»: 22– 23 вересня 2016 р.: тези доп. – Херсонська державна морська академія, 2016. – С. 188 – 189.

17. Кривий П. Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищеної якості згортних втулок : монографія / Кривий П. Д., Сенік А. А. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 232 с.

18. Кривий П.Д. Підвищення продуктивності процесу і якості плоскої поверхні сформованої комбінаційним торцевим фрезеруванням / Кривий П.Д., Кобельник В.Р., Крупа В.В., Мимрик Н.П.// Вісник Донбаської

державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2019. – № 3 (47).

19. Кобельник В.Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Кобельник Володимир Романович; Тернопіль, 2013 – 168 с.

20. Кузнєцов Ю. М., Новосьолов Ю. К., Луців. І. В. Теорія технічних систем: підручник. Севастополь : СевНТУ, 2011. 246 с.

21. Крупа В.В. КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА: структура, вимоги до виконання та захист: Методичні рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Галузеве машинобудування» зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування галузі знань 13 Механічна інженерія для здобувачів всіх форм здобуття освіти. Крупа В.В. та ін. Тернопіль, ТНТУ, 2023р. 66с

22. Крупа В.В. Теорія технічних систем: особливості побудови створення та розвитку: навчальний посібник / Володимир Крупа. – Тернопіль : Осадца Ю.В., 2023. – 308 с.

23. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ» / В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., –156 с..

24. Нова технологія виготовлення згортних втулок приводних роликів ланцюгів на основі імовірнісного підходу / П.Д. Кривий, А.А. Сенік, Н.М. Тимошенко, О.І. Яловий // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Обладнання і технології сучасного машинобудування»: 11–12 травня 2017 р. : тези доп. – Тернопіль: ТНТУ, 2017 р. – С. 92 – 93.

25. Підвищення ефективності ультразвукової фінішної обробки на

верстатах з ЧПУ / М.В. Федорцов, В.В. Хорошайло, А.А. Сеник, Б.Б. Яремчук. Важке машинобудування. проблеми та перспективи розвитку : МАТЕРІАЛИ XXII Міжнар. науково-технічної конференції, м. Краматорськ-Тернопіль, 28 трав. 2024 р. 2024. С. 199.

26. Паливода Ю., Дячун А., Лещук Р. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, 2019. 240 с.

27. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с.

28. Редько Р.Г., Склярів Р.А., Шанайда В.В. Порівняльно-правовий аналіз законодавства в області інтелектуальної власності в країнах ЄС та Україні. Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки». Луцьк, 2023, №75. С. 9 - 14.

29. Сеник А.А. Визначення найімовірнішої довжини заготовки для згортної втулки / Оліховський В. // Міжнародна студентська науково-технічна конференція „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 27-28 квітня 2023. — Т. : ТНТУ, 2023. — С. 248–249. — (Механічна інженерія).

30. Сеник А. А. Вплив орієнтації згортних втулок на підвищення точності контактних кроків привідних роликів втулкових ланцюгів / А. А. Сеник, В. Б. Котильницький // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 6-7 грудня 2023 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2023. — С. 117. — (Сучасні технології в будівництві, машино- та приладобудуванні)

31. Сенік А. Експериментальне дослідження впливу радіуса транспортного каналу і способу базування на відхилення від круглості згортних втулок / Атаманчук О., Дмитраш О. // Міжнародна студентська науково-технічна конференція „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 27-28 квітня 2023. — Т.: ТНТУ, 2023. — С. 208–209. — (Механічна інженерія).

32. Сенік А.А. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищення точності форми згортних втулок / Сенік А.А. // Збірник наукових праць «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем» ДДМА. – Краматорськ, 2017. – Вип. № 41, – С. 46 – 55.

33. Сенік А.А. Нова технологія формування згортної втулки підвищеної точності форми / Сенік А.А. // Збірник тез доповідей 5-тої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»: 1–3 жовтня 2014 р.: тези доп. – Херсонська державна морська академія, 2014. – С. 225 – 226.

34. Сенік А. А. Експериментальне дослідження ступеня зміцнення внутрішньої циліндричної поверхні згортних втулок сформованих поверхнево-пластичним деформуванням / А. А. Сенік, І. В. Коваль // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої пам'яті професора Гевка Богдана Матвійовича „Проблеми теорії проектування та виготовлення транспортно-технологічних машин“, 23-24 вересня 2021. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2021. — С. 40–41.

35. Сенік А.А. Технологічне забезпечення виготовлення згортних втулок підвищеної точності форми і якості: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технологія машинобудування” / А.А. Сенік. – Тернопіль, 2018. – 21 с.

36. Сенік А.А. Динамічні характеристики шпиндельного вузла з

керованим натягом токарного верстата з ЧПК / А.А. Сенник, І.Т. Ярема, В.В. Крищишин // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (11-12 грудня 2024 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – С. 197.

37. Сенник А.А. Експериментальне дослідження впливу радіуса транспортного каналу і способу базування на відхилення від круглості згортних втулок після операції згортання / А. Сенник, А. Галета, Д.Гурський // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (11-12 грудня 2024 р.). – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – С. 198.

38. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник / Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Валявський І. А., Склярів Р. А. Кіровоград, 2004. 449 с.

39. Технологія складання внутрішніх ланок приводних роликів і втулкових ланцюгів із забезпеченням кутової орієнтації згортних втулок / Н. С. Інжиєвська, П. Д. Кривий, А. А. Сенник, Н. М. Тимошенко // Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. — Т.: ТНТУ, 2020. — Том 1. — С. 69–70

ДОДАТКИ