

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

**КРУПА ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 621.9

**МЕТАЛОРІЗАЛЬНІ ІНСТРУМЕНТИ З АСИМЕТРИЧНИМ  
РОЗМІЩЕННЯМ ЛЕЗ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ ГЛИБОКИХ ОТВОРІВ  
ЦИЛІНДРІВ**

05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2015

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана на кафедрі конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент

**Кривий Петро Дмитрович,**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,

професор кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор

**Грицай Ігор Євгенович,**

Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри технології машинобудування

кандидат технічних наук, доцент

**Литвин Олександр Валеріанович,**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,

доцент кафедри конструювання верстатів та машин

Захист відбудеться 03 липня 2015 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.03 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корп. 2, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий 03 червня 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

А. Є. Дячун

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Інтенсивний розвиток машинобудування на основі науково-технологічного прогресу, організація нових галузей виробництва, машин і обладнання різного технологічного призначення забезпечує швидке розширення номенклатури деталей з глибокими отворами.

На даний час деталі з глибокими отворами (гребні гвинти, ротори і вали турбін та електрогенераторів, гільзи, циліндри і плунжери двигунів внутрішнього згорання та гідросистем, шпинделі верстатів, корпуси амортизаторів, підсилюючих механізмів повороту і управління автомобілів, кокілі для відцентрового литва та ін.) обробляються на підприємствах всіх основних галузей промисловості. Трудомісткість виготовлення глибоких отворів у таких деталях в деяких машинах складає 14-20% від трудомісткості всієї механічної обробки.

Існуючі технологічні процеси оброблення глибоких отворів розділяють на два класи: перший, коли заготовка є суцільним циліндром, і другий, коли заготовка – пустотілий циліндр. Одним із прогресивних технологічних процесів оброблення глибоких отворів з використанням заготовок у вигляді пустотілих циліндрів є процес, в якому використовують багатолезові металорізальні інструменти (БМІ) – зенкери, або розточувальні головки, які працюють за схемою «на розтяг». При цьому можна забезпечити високу продуктивність оброблення і низьку точність та якість обробленої поверхні або високу точність та якість при низькій продуктивності.

Розроблення конструкцій БМІ на основі нових принципів проектування, які полягають у спеціальному асиметричному розміщенні різальних лез, що дозволяє збільшити продуктивність оброблення при забезпеченні необхідних показників точності та якості оброблюваних поверхонь глибоких отворів є, безперечно, актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя і є складовою частиною плану його науково-дослідної роботи, сформованого на виконання «Державної програми розвитку машинобудування на 2006-2011 р.р.», затвердженої постановою Кабінету Міністрів України №516 від 18.04.2006 р., невід'ємною частиною держбюджетної науково-дослідної роботи на тему: "Наукові основи конструкторсько-технологічного забезпечення підвищення якісних характеристик приводних роликів ланцюгів бурових установок газонафтодобувного обладнання» (номер державної реєстрації 0110U002264), а також частиною науково-дослідної роботи на тему: "Підвищення ефективності формування якісних показників робочих поверхонь деталей машин" (номер державної реєстрації 0115U002454).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності процесу оброблення глибоких отворів циліндрів шляхом обґрунтування нових конструкцій багатолезових металорізальних інструментів з асиметричним розміщенням лез.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих проблем, методів, а також конструкцій багатолезових інструментів для розточування та зенкерування глибоких отворів циліндрів.

2. Проаналізувати вплив геометричних та конструкторських параметрів

різальних елементів і подачі на висоту нерівностей профілю обробленої поверхні при точінні, розточуванні та зенкеруванні.

3. Висунути і перевірити гіпотезу про стохастичність подач токарних верстатів різних кінематичних ланцюгів та підтвердити її експериментальними дослідженнями.

4. Запропонувати методика оцінки впливу стохастичності подач на параметр висоти нерівностей профілю за десятьма точками  $R_z$  при точінні, розточуванні та зенкеруванні.

5. Розробити методики проектування і сконструювати на їх основі багаторізцеві розточувальні головки та зенкери з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів.

6. На основі розроблених методик і технологічного спорядження провести експериментальні дослідження силових характеристик процесу оброблення глибоких отворів пустотілих циліндрів сконструйованими БМІ.

7. Здійснити в ймовірнісному аспекті оцінювання шорсткості поверхонь глибоких отворів циліндрів, оброблених запропонованими БМІ.

8. Розробити методика визначення економічної ефективності від використання у виробництві запропонованих технічних рішень.

**Об'єкт дослідження** – процес оброблення циліндричних поверхонь глибоких отворів циліндрів БМІ з асиметричним розміщенням лез.

**Предмет дослідження** – конструктивні та геометричні параметри інструментів з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів, силові характеристики процесу різання та якісні показники оброблених поверхонь.

**Методи дослідження.** Основою роботи є системний підхід до вивчення та аналізу взаємозв'язку між режимами оброблення, висотними параметрами шорсткості оброблюваних поверхонь та конструкторськими параметрами БМІ для оброблення глибоких отворів. В основу теоретичних досліджень покладено підходи і принципи фундаментальних положень технології машинобудування, теорії різання, теоретичних основ проектування металорізальних інструментів, теорії ймовірностей та математичної статистики, які базуються на математичному описі формування шорсткості обробленої поверхні БМІ. Результати експериментальних досліджень одержано з використанням сучасного стандартного та спеціально розробленого оснащення. Обробку отриманих результатів здійснювали з використанням прикладного програмного забезпечення

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Запропоновано геометрично-математичні моделі з технічними обмеженнями, які уточнюють вплив подачі, кутів у плані різців та радіусів їх вершин на висоту нерівностей профілю обробленої поверхні за десятьма точками.

2. Вперше експериментально підтверджено стохастичність подач на універсальних токарно-гвинторізних верстатах, встановлено нормальність закону їх розподілу і на цій основі, з урахуванням геометрично-математичних моделей розроблено ймовірнісно-математичні моделі, використання яких дало можливість отримати залежності для визначення характеристик розподілу висот нерівностей профілю за десятьма точками.

3. Вперше на основі розроблених геометрично-математичних та ймовірнісно-математичних моделей запропоновано принципи конструктивної побудови

інструментів з асиметричним розміщенням лез, а саме: три- та чотирирізцевих розточувальних головок і чотиризубих зенкерів, характерною особливістю яких є спеціальне розміщення різальних лез із корегованими значеннями кутів у плані.

4. Вперше на основі отриманих залежностей для визначення конструкторсько-технологічних параметрів багаторізцевих розточувальних головок та спеціальних зенкерів з асиметричним розміщенням лез сформовано оптимізаційні моделі, що встановлюють взаємозв'язок між головним та допоміжним кутами в плані різців інструментів з умови забезпечення максимальної продуктивності оброблення і заданої шорсткості оброблених поверхонь;

5. Вперше отримано емпіричні залежності впливу глибини різання та подачі на осьову силу та крутний момент при обробленні глибоких отворів циліндрів БМІ з асиметричним розміщенням лез.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Запропонована методика дослідження розсіювання подач на універсальних токарних верстатах може бути використана для аналогічних досліджень стохастичності подач інших типів верстатів як на виробництві чи при виконанні науково-дослідних робіт, так і у навчальному процесі.

2. Розроблена методика проектування БМІ з асиметричним розміщенням лез (багаторізцевих розточувальних головок, які працюють за схемою одночасного поділу припуску та подачі, і спеціальних зенкерів, що працюють за схемою поділу подачі) для оброблення глибоких отворів.

3. Розроблено конструкції чотирирізцевих розточувальних головок і спеціальних зенкерів та рекомендації щодо призначення режимів різання при роботі цими інструментами, використання яких дозволяє підвищити продуктивність та якість оброблених поверхонь.

4. Запропоновано конструкцію спеціального пристрою для оброблення глибоких отворів циліндрів із закріпленням заготовки по торцях та забезпеченням в оправі інструменту нормальних напружень розтягу, що дозволяє зменшити огранку та відхилення від прямолінійності осі оброблених отворів.

5. Подано конструкцію спеціального патрону для базування і закріплення тонкостінних циліндрів з глибокими отворами.

6. Вироблено практичні рекомендації щодо розрахунку економічної ефективності процесу оброблення глибоких отворів циліндрів запропонованими інструментами.

Конструкції розточувальної головки та спеціальних зенкерів впроваджені на ПАТ «Кам'янець-Подільськавтоагрегат» для оброблення корпусів гідروпідсилювачів рульових колонок автомобілів марки «КРАЗ».

Викладені матеріали використовуються у навчальному процесі кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя при вивченні курсів «Теорія різання», «Різальні інструменти та інструментальне забезпечення автоматизованого виробництва», «Фізичні основи різання».

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи автор отримав особисто. Роботи [3, 9] є одноосібними. Особистий внесок дисертанта у роботах, виконаних у співавторстві, полягає у розробленні та аналізі математичних моделей і залежностей [2, 6 – 8],

розробленні методик проектування [1, 4] та конструкцій БМІ [5, 10, 11, 14–18], а також технологічного спорядження [12, 13] для оброблення глибоких отворів, узагальненні отриманих наукових та експериментальних результатів дослідження. Формулювання мети, постановка задач досліджень та аналіз результатів отримані разом з керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати досліджень, подані у дисертації, автор оприлюднив на Міжнародних науково-практичних конференціях: «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (Тернопіль, 2010), «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2010), «Прогресивні напрямки розвитку машино-приладобудування та транспорту» (Севастополь, 2011), «Десятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків» (Львів, 2011), «Проблеми сучасних технологій виготовлення та надійності передач з гнучким зв'язком» (Тернопіль, 2011), «Современные проблемы создания и производства механических передач» (Москва, 2012); Всеукраїнських: «Машинобудування України очима молодих. Прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Житомир, 2011; Київ, 2012, Суми, 2014), «Прогресивні технології у машинобудуванні» (Львів-Карпати, 2015), Регіональних: XIV наукова конференція ТНТУ ім. І. Пулюя «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2010, 2011), «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті» (Тернопіль, 2011), 10-та відкрита наукова конференція Інституту прикладної математики та фундаментальних наук (Львів, 2012). Дисертація у повному обсязі доповідалась на міжкафедральному семінарі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

**Публікації.** Основні результати дисертаційного дослідження відображені у 18 наукових працях (2 одноосібні), в тому числі у 7-ми наукових статтях у фахових виданнях, одна з яких опублікована в журналі, що входить до міжнародної наукометричної бази даних SciVerse Scopus, у 7-ми тезах в збірниках матеріалів конференцій, та 4-ох патентах на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, загальним обсягом 185 сторінок, з яких на 21 розміщені рисунки і таблиці, що займають всю площу сторінки, списку використаних джерел із 219 найменувань, розміщених на 22 сторінках, 8 додатків, поданих на 69 сторінках, офіційних документів про впровадження результатів дослідження. Робота містить 34 таблиці, 199 формул та 78 рисунків. Основний текст викладено на 164 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, подана її наукова новизна і практична цінність

**У першому розділі** «Літературно-патентний огляд сучасного стану інструментального забезпечення процесу оброблення глибоких отворів» поданий аналіз існуючих проблем та методів, які мають місце при обробленні глибоких отворів розточуванням та зенкеруванням, а також відомих конструкцій БМІ. Відзначено, що значний внесок у дослідження процесу оброблення глибоких отворів циліндрів здійснили Джугурян Т. Г., Карпусь В. Е., Лінчевський П. А., Луців І. В., Маршуба В. П., Мельниченко О. А., Нагорняк С. Г., Оборський Г. О., Пермяков О. А., Пестунова В. М., Равська Н. С., Родін П. Р., Ступницький В. В. та ін. (Україна), а

також закордонні вчені Гречішніков В. А., Кацев П. Г., Кірсанов С.В., Коженіков Д. В., Схіртладз А. Г., Мінков М. А., Подураєв В.Н., Троїцький Н. Д., Уткін Н. Ф., Шендеров І. Б. (Російська Федерація), Bloch F. (Франція), Іваса Т., Окубо Т. (Японія), Stockert R., Weber U., Streicher P., Bierman D., Pflughar F., Weinert C., Shmidt H. (Німеччина), Puttman F.-J., James R., Stadelmann R. (США) та ін.

На основі здійсненого аналізу українських та закордонних літературних джерел виявлено певні характерні ознаки БМІ, а саме: схеми роботи, методи оброблення, розміщення різальних елементів, наявність адаптивного зв'язку, конструкції різальних і напрямних елементів та способи їх закріплення, методи підведення мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ (МОТС), на основі яких запропоновано класифікацію БМІ для оброблення глибоких отворів. Охарактеризовано та подано причини утворення дефектів робочих поверхонь глибоких отворів при обробленні існуючими БМІ.

Встановлено, що однією із прогресивних схем, яка забезпечує високу якість оброблюваних поверхонь розточуванням, або зенкеруванням є схема оброблення, при якій в оправах та корпусах БМІ, крім тангенціальних, виникають нормальні напруження розтягу. Відзначено, що при цьому в процесі оброблення зменшується відхилення осі від прямолінійності і параметри вібрацій.

Проаналізовано конструкції та особливості роботи класів БМІ, які працюють за схемами поділу припуску, поділу подачі й одночасного поділу припуску та подачі, а також показано недоліки кожного із цих трьох класів.

Підкреслено, що у відомих конструкціях БМІ з асиметричним розміщенням різальних лез, що працюють за схемою поділу подачі або за схемою одночасного поділу припуску і подачі, зрівноваження радіальних складових сил різання здійснюють за допомогою напрямних елементів, а при їх зношуванні виникає значне відхилення осі отвору від прямолінійності.

Відзначено, що використання БМІ з асиметричним розміщенням лез є ефективнішим порівняно з БМІ із симетричним розміщенням лез за показниками вібростійкості і якості обробленої поверхні.

Детальний огляд та аналіз значної кількості наукової літератури, авторських свідоцтв і патентів показав, що питання оптимального розміщення по колу різальних лез і корегування значень кутів в плані для БМІ з точки зору забезпечення зрівноваження радіальних складових сил різання та зменшення висоти нерівностей профілю при максимально можливій подачі науково не обґрунтоване

**У другому розділі** «Теоретичне обґрунтування розрахункових висотних параметрів шорсткості обробленої поверхні, сформованої обточуванням, розточуванням чи зенкеруванням» подано теоретичне обґрунтування висоти нерівностей профілю обробленої поверхні, що приблизно дорівнює висоті нерівностей профілю за десятьма точками  $R_z$ .

Проаналізовано існуючі геометричні моделі та математичні залежності для визначення параметрів розрахункової висоти нерівностей профілю обробленої поверхні, що формується внаслідок комбінацій контактів прямолінійної (ПД) та радіусної (РД) ділянок головної різальної кромки (ГРК) з поверхнею різання (ПР) та радіусної і прямолінійної ділянок допоміжної різальної кромки (ДРК) з обробленою поверхнею (ОП).

Запропоновано п'ять геометрично-математичних моделей, які уточнюють вплив головного  $\varphi$  та допоміжного  $\varphi'$  кутів в плані та радіусів  $r$  вершин різців, а також подачі  $s$  на параметр висоти нерівностей профілю за десятьма точками. Отримано технологічні обмеження, при виконанні яких формується той чи інший профіль (рис. 1), та математичні залежності для визначення параметрів  $H \approx Rz_p$  для кожної із них

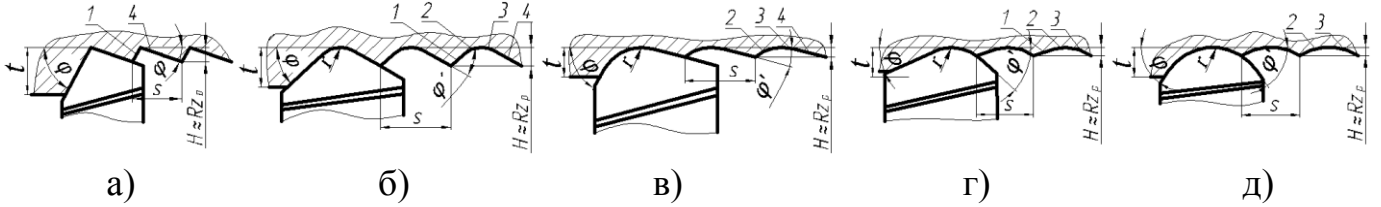


Рис. 1. Схеми формування розрахункового профілю обробленої поверхні за I-V моделями, відповідно а) – д), в результаті контактів: 1 – ПД ГРК з ПР; 2 – РД ГРК з ПР; 3 – РД ДРК з ОП; 4 – ПД ДРК з ОП

За запропонованою методикою проведено експериментальне дослідження точності подач для п'яти універсального токарно-гвинторізних верстатів (УТГВ). Встановлено, та за критерієм Пірсона доведено, що значення подач на УТГВ є випадковими величинами, що підкоряються усіченому ліворуч нормальному закону розподілу. Отримано для загального випадку залежності для визначення середнього значення, що приблизно дорівнює математичному сподіванню  $\bar{s}_i \approx M(s_i)$ , дисперсії розсіювання  $D(s_i)$  густини розподілу  $f(s_i)$  для кожної з  $i$ -тих подач  $f(s_i) = c \cdot \exp\left(\frac{-(s_i - \bar{s})^2}{2D(s_i)}\right) / \sqrt{2\pi D(s_i)}$ , де  $c$  – множник, що враховує усіченість нормального закону розподілу.

На основі стохастичності значень подач на УТГВ геометрично-математичні моделі трансформовано у ймовірнісно-математичні моделі розподілу параметру  $H \approx Rz_p$ , характеристики яких подані у табл. 1.

Таблиця 1

**Характеристики розсіювання висоти нерівностей профілю  $H \approx Rz_p$  для п'яти ймовірнісно-математичних моделей**

№ мод.	Густина розподілу	Середнє значення та дисперсія
1	2	3
I	$g(H_I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(s)} \cdot k} \cdot e^{-\frac{(H_I/k - \bar{s})^2}{2D(s)}}$	$\bar{H}_I = k \cdot \bar{s}_i$ , де $k = 1 / (\text{ctg} \varphi + \text{ctg} \varphi')$ $D(H_I) = k^2 \cdot D(s_i)$
II	$g(H_{II}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(s)} \cdot q} \cdot e^{-\frac{((H_{II}-d)/q - \bar{s})^2}{2D(s)}}$ де $q = \text{tg} \varphi \cdot \text{tg} \varphi' / (\text{tg} \varphi + \text{tg} \varphi')$ , $d = r - \left( \frac{r \cdot (\sin \varphi + \sin \varphi')}{\cos \varphi \cdot \cos \varphi'} \right) / (\text{tg} \varphi + \text{tg} \varphi')$	$\bar{H}_{II} = \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{H_{II}}{\sqrt{2\pi D(s)} \cdot q} \cdot e^{-\frac{((H_{II}-d)/q - \bar{s})^2}{2D(s)}}$ $D(H_{II}) = \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{(H_{II} - \bar{H}_{II})^2}{\sqrt{2\pi D(s)} \cdot q} \cdot e^{-\frac{((H_{II}-d)/q - \bar{s})^2}{2D(s)}}$



1	2	3
III	$g(H_{III}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(s)}} \left  \frac{\cos \varphi'}{\sin \varphi'} + \frac{r - H_{III}}{\sqrt{2rH_{III} - H_{III}^2}} \right  \times$ $\frac{\left( r \cdot \sin \varphi' + \frac{H_{III} - r(1 - \cos \varphi')}{\operatorname{tg} \varphi'} + \sqrt{2rH_{III} - H_{III}^2 - \bar{s}} \right)^2}{2D(s)}$ $\times e$	$\overline{H_{III}} = \int_{\alpha_3}^{\beta_3} \frac{H_{III}}{\sqrt{2\pi D(s)}} \left  \frac{\cos \varphi'}{\sin \varphi'} + \frac{r - H_{III}}{\sqrt{2rH_{III} - H_{III}^2}} \right  \times$ $\frac{\left( r \cdot \sin \varphi' + \frac{H_{III} - r(1 - \cos \varphi')}{\operatorname{tg} \varphi'} + \sqrt{2rH_{III} - H_{III}^2 - \bar{s}} \right)^2}{2D(s)} dH_{III}$ $\times e$ $D(H_{III}) = \int_{\alpha_3}^{\beta_3} \frac{(H_{III} - \overline{H_{III}})^2}{\sqrt{2\pi D(s)}} \left  \frac{\cos \varphi'}{\sin \varphi'} + \frac{r - H_{III}}{\sqrt{2rH_{III} - H_{III}^2}} \right  \times$ $\frac{\left( r \cdot \sin \varphi' + \frac{H_{III} - r(1 - \cos \varphi')}{\operatorname{tg} \varphi'} + \sqrt{2rH_{III} - H_{III}^2 - \bar{s}} \right)^2}{2D(s)} dH_{III}$ $\times e$
IV	$g(H_{IV}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(s)}} \left  \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} + \frac{r - H_{IV}}{\sqrt{2rH_{IV} - H_{IV}^2}} \right  \times$ $\frac{\left( r \cdot \sin \varphi + \frac{H_{IV} - r(1 - \cos \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi} + \sqrt{2rH_{IV} - H_{IV}^2 - \bar{s}} \right)^2}{2D(s)}$ $\times e$	$\overline{H_{IV}} = \int_{\alpha_4}^{\beta_4} \frac{H_{IV}}{\sqrt{2\pi D(s)}} \left  \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} + \frac{r - H_{IV}}{\sqrt{2rH_{IV} - H_{IV}^2}} \right  \times$ $\frac{\left( r \cdot \sin \varphi + \frac{H_{IV} - r(1 - \cos \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi} + \sqrt{2rH_{IV} - H_{IV}^2 - \bar{s}} \right)^2}{2D(s)} dH_{IV}$ $\times e$ $D(H_{IV}) = \int_{\alpha_4}^{\beta_4} \frac{(H_{IV} - \overline{H_{IV}})^2}{\sqrt{2\pi D(s)}} \left  \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} + \frac{r - H_{IV}}{\sqrt{2rH_{IV} - H_{IV}^2}} \right  \times$ $\frac{\left( r \cdot \sin \varphi + \frac{H_{IV} - r(1 - \cos \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi} + \sqrt{2rH_{IV} - H_{IV}^2 - \bar{s}} \right)^2}{2D(s)} dH_{IV}$ $\times e$
V	$g(H_V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(s)}} \left  \frac{r - H_V}{2\sqrt{H_V^2 - 2H_V r}} \right  \times$ $\frac{\left( 2\sqrt{2H_V r - H_V^2 - \bar{s}} \right)^2}{2D(s)}$ $e$	$\overline{H_V} = \int_{\alpha_5}^{\beta_5} \frac{H_V}{\sqrt{2\pi D(s)}} \left  \frac{r - H_V}{2\sqrt{2H_V r - H_V^2}} \right  \times$ $\frac{\left( 2\sqrt{2H_V r - H_V^2 - \bar{s}} \right)^2}{2D(s)} dH_V$ $\times e$ $D(H_V) = \int_{\alpha_5}^{\beta_5} \frac{(H_V - \overline{H_V})^2}{\sqrt{2\pi D(s)}} \left  \frac{r - H_V}{2\sqrt{2H_V r - H_V^2}} \right  \times$ $\frac{\left( 2\sqrt{2H_V r - H_V^2 - \bar{s}} \right)^2}{2D(s)} dH_V$ $\times e$

$\alpha_j, \beta_j$  – межі інтегрування

Встановлено за критерієм Колмогорова, що теоретично отримані закони розподілу для кожної  $j$ -тої моделі з достатньою точністю можна замінити кривими розподілу Гауса з параметрами  $\overline{H_j}$  та  $D(H_j)$  і густиною розподілу

$$g(H_j) = 1/\sqrt{2\pi D(H_j)} \cdot \exp\left(-\left(H_j - \overline{H_j}\right)^2 / 2D(H_j)\right) \text{ (наприклад, для V моделі – рис. 2).}$$

Запропоновано за статистичну оцінку параметру  $H \approx Rz_p$  прийняти таке

можливе значення (квантиль) випадкової величини  $H_{max}$ , при якому функція розподілу  $F(H_j) = 0,95$  (рис. 2).

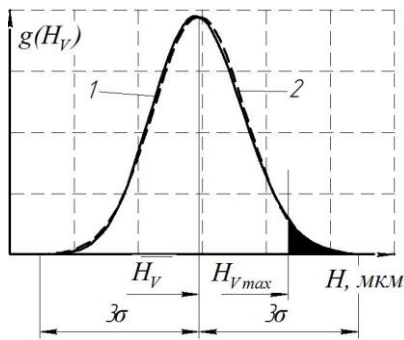


Рис. 2. Криві густин розподілу для V моделі: 1 – нормального розподілу; 2 – розрахункова

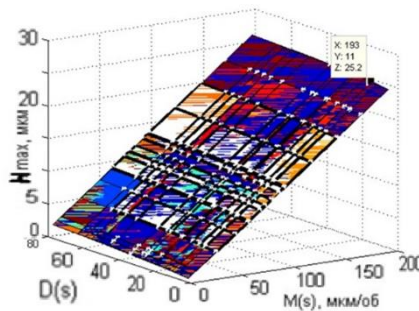


Рис. 3. Поверхня відгуку залежностей величини  $H_{max}$  від  $D(s)$  та  $M(s)$

Отримано поверхню відгуку (рис. 3), що побудовану на основі ймовірно-математичних моделей, яка дозволяє при певних розсіюваннях подач на будь-якому УТГВ, маючи характеристики їх розсіювання на одному із кінематичних ланцюгів, визначати величину  $H_{max}$ .

У **третьому розділі** «Теоретичне обґрунтування інструментального забезпечення процесу оброблення глибоких отворів циліндрів» на основі геометрично-математичних та ймовірно-математичних моделей запропоновані теоретично обґрунтовані принципи конструювання БМІ з асиметричним розміщенням лез та корегованими кутами в плані, а саме: три- (ТРРГ) та чотирирізцеві розточувальні головки (ЧРРГ) та спеціальні чотириризцеві зенкери.

Отримано залежності для визначення технологічних і конструкторських параметрів ТРРГ, в яких є один чорновий та два чистові різці з асиметричним розміщенням, а саме: значення подачі на першому чистовому різці  $s_1 = s \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi'_2 / \sin(\varphi_1 + \varphi'_2)$ , де  $s$  – подача на оберт;  $\varphi_1$  – головний кут в плані на першому чистовому різці (ПЧР);  $\varphi'_2$  – допоміжний кут в плані на другому чистовому різці (ДЧР). Значення головного кута в плані на ДЧР визначили із залежності

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{\cos \varphi_1 \cdot \sin^2 \varphi'_2}{\sqrt{\cos^2 \varphi_1 \cdot \sin^2 \varphi'_2 + \cos^2 \varphi'_2 \cdot \sin^2(\varphi_1 + \varphi'_2) - \sin 2\varphi'_2 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi'_2 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi'_2)}}$$

Відзначено, що особливістю конструкції ЧРРГ є наявність одного чорнового та трьох чистових різців, причому кожен із наступних чистових різців, починаючи з другого, розміщений в такому кутовому положенні, що його вершина суміщена з точкою перетину перпендикуляра, опущеного з вершини, що визначає максимальну висоту нерівності профілю, утворену попереднім чистовим різцем, на пряму, яка є лінією впадин профілю обробленої поверхні і паралельна до напрямку подачі, а положення чорнового різця визначається з умови забезпечення зрівноваження всіх діючих радіальних складових сил різання (рис. 4, а, б). Для забезпечення параметру  $H = \text{const}$  після проходження всіх чистових різців з урахуванням їх асиметричного розміщення по колу та умов рівності головних  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$  і допоміжних  $\varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi'_3 = \varphi'$  кутів в плані запропоновано два методи, які визначили два варіанти конструкторського виконання ЧРРГ: перший передбачає корегування  $\varphi_3$  на третьому чистовому різці (ТЧР), забезпечуючи значення  $\varphi_{3K}$ ; другий – корегування допоміжного кута в плані на ТЧР  $\varphi'_{3K}$ .

В залежності від заданого параметру  $H$  та значень  $\varphi$  і  $\varphi'$  отримано формули для визначення подачі на другому чистовому різці  $s_2 = H \cdot (\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi')$  та подачі на оберт:  $s = H \cdot \text{tg}\varphi \cdot (\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi')^2$ .

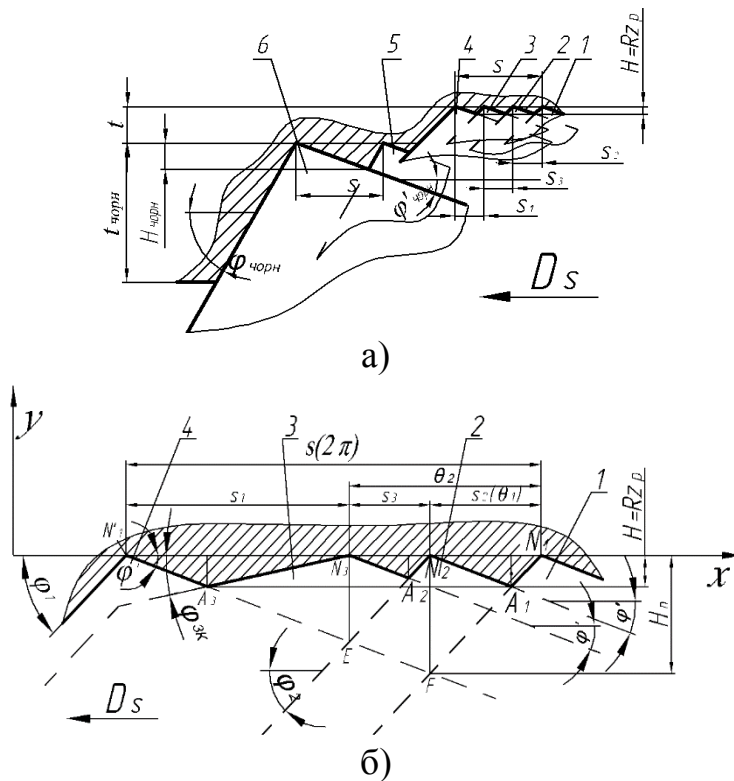


Рис. 4. Загальна схема поділу припуску та подачі ЧРРГ а), та схема формування нерівностей профілю чистовими різцями за першим б) варіантом виконання: 1, 2, 3 відповідно положення ПЧР, ДЧР та ТЧР у момент початку оберт; 4 – положення ПЧР у момент закінчення оберт; 5 та 6 – положення чорнового різця у момент початку та закінчення оберт, відповідно

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi \leq \arctg\left(\frac{\text{ctg}\varphi_{3\min} + \text{ctg}\varphi'}{(\text{ctg}\varphi')^2}\right) \\ \varphi \geq \arctg\left(2/\text{ctg}\varphi'(\sqrt{5}-1)\right) \\ \varphi \leq \arctg(3 \cdot \text{tg}\varphi') \\ \varphi \leq \arctg\left(\text{ctg}\varphi'(n-2 + \sqrt{n^2-2n})/2\right) \\ \varphi \geq \varphi_{\min} \\ \varphi \leq \varphi_{\max} \\ \varphi' \geq \varphi'_{\min} \\ \varphi' \leq \varphi'_{\max} \end{array} \right. \quad (1)$$

Для першого варіанту конструкторського виконання подачі на ПЧР та ТЧР запропоновано визначати із залежностей відповідно:

$$s_1 = H \cdot \text{tg}\varphi \cdot (\text{ctg}\varphi')^2 \quad \text{та}$$

$$s_3 = H \cdot \text{ctg}\varphi', \quad \text{а для другого} -$$

$$s_1 = H \cdot (\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi') \quad \text{та}$$

$$s_3 = H \cdot (\text{tg}\varphi \cdot \text{ctg}\varphi'^2 - \text{ctg}\varphi).$$

Отримано формули для визначення корегованих значень кутів  $\varphi_{3K}$  та  $\varphi'_{3K}$  відповідно для першого та другого варіантів:

$$\varphi_{3K} = \arctg(\text{ctg}\varphi' \text{tg}\varphi - 1) \quad \text{та}$$

$$\varphi'_{3K} = \arctg(\text{tg}\varphi \cdot \text{ctg}\varphi'^2 - 2\text{ctg}\varphi)$$

Запропоновано математичні моделі для оптимізації значень кутів в плані для першого (I) та другого (II) варіантів конструкторського виконання ЧРРГ, які являють собою відповідні системи рівнянь (1) і (2) та функцію мети, що реалізує при  $H \approx Rz_p = \text{const}$  максимальну продуктивність.

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi'_{3K} > \varphi'_{\min} \\ \varphi \geq \arctg(\text{ctg}\varphi'/2) \\ \varphi \leq \arctg(3 \cdot \text{tg}\varphi') \\ \varphi \leq \arctg((n-1) \cdot \text{tg}\varphi') \\ \varphi \geq \varphi_{\min} \\ \varphi \leq \varphi_{\max} \\ \varphi' \geq \varphi'_{\min} \\ \varphi' \leq \varphi'_{\max} \end{array} \right. \quad (2)$$

$s \rightarrow \max$  при  $H \approx Rz \approx \text{const}$

Розв'язок отриманих систем (1), (2) проілюстровано графічно (рис. 5). В системі координат  $\varphi O\varphi'$  зображені обмеження, графіки яких позначені відповідними римськими цифрами.

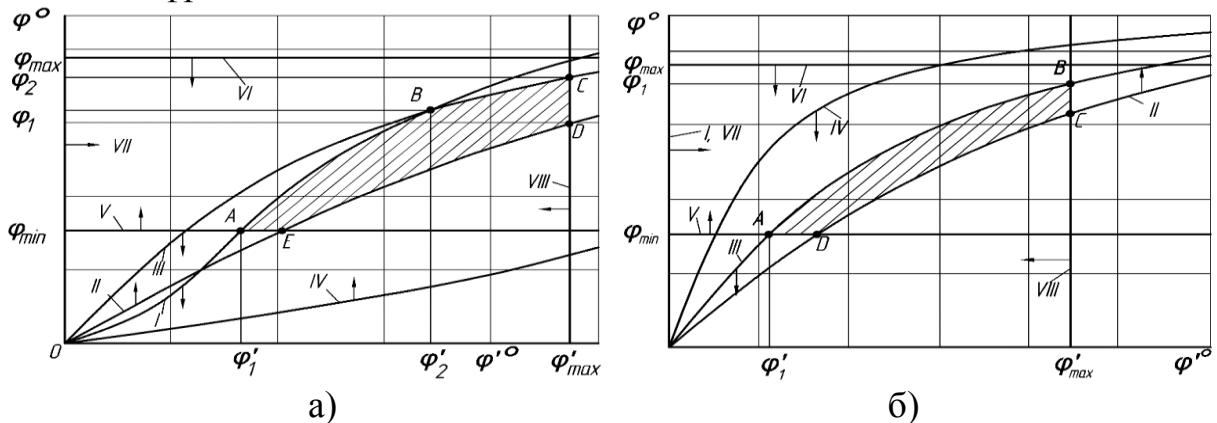


Рис. 5. Графічна ілюстрація обмежень та пошуку оптимальних значень  $\varphi$  та  $\varphi'$  для першого (а) та другого (б) варіантів конструкторського виконання ЧРРГ

Отримано рівняння для визначення оптимальних значень кутів в плані, які забезпечують максимальну продуктивність, відповідно для першого

$$\varphi_{onm} = \begin{cases} \arctg \frac{ctg \varphi_{3min} + ctg \varphi'_{onm}}{(ctg \varphi'_{onm})^2} & \text{при } \varphi'_1 \leq \varphi'_{onm} \leq \varphi'_2 \\ \arctg(3 \cdot tg \varphi'_{onm}) & \text{при } \varphi'_2 \leq \varphi'_{onm} \leq \varphi'_{max} \end{cases},$$

та для другого варіантів

$$\varphi_{onm} = \arctg(3 \cdot tg \varphi'_{onm}) \text{ при } \varphi'_1 \leq \varphi'_{onm} \leq \varphi'_{max},$$

де  $\varphi'_1 = \text{arcctg} \left( ctg \varphi_{min} \left( 1 + \sqrt{1 + 4ctg \varphi_{3min}} \right) / 2 \right)$  та  $\varphi'_2 = \text{arcctg} \frac{ctg \varphi_{3min}}{2}$ .

На основі схем розміщення чистових різців (рис. 6) для випадку коли  $r \neq 0$  і розрахунковий профіль поверхні, сформований проходом ЧРРГ спроектованих за першим (рис. 6, а) та другим (рис. 6, б) варіантами конструкторського виконання ЧРРГ, отримано залежності для визначення подач на чистових різцях, подачі на оберт, а також значень корегованих кутів в плані та ТЧР.

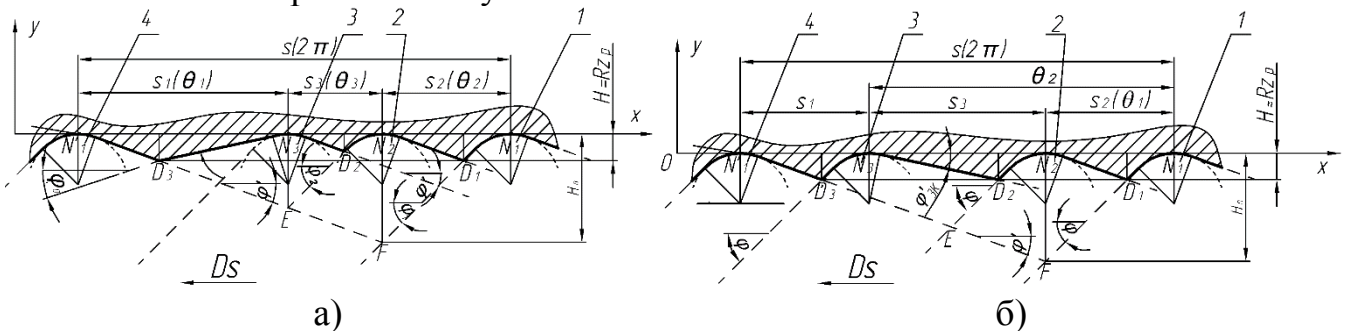


Рис. 6. Розрахунковий профіль обробленої поверхні, утворений чистовими різцями за першим (а) та другим (б) варіантом виконання ЧРРГ: 1,2,3 – відповідно положення ПЧР, ДЧР та ТЧР у момент початку здійснення оберт; 4 – положення ПЧР у момент закінчення оберт

Для прикладу подачу на ДЧР при виконанні умови  $H > r - r \cdot \cos \varphi$  визначали за формулою  $s_2 = r(\sin \varphi + \sin \varphi') + (H + r \cos \varphi - r)/tg \varphi + (H + r \cos \varphi' - r)/tg \varphi'$ .

Використавши схеми, подані на рис. 7, отримано залежності для визначення значень центральних кутів  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  які забезпечують відповідно кутове зміщення ДЧР, ТЧР та чорнового різця відносно ПЧР, відповідно  $\theta_1 = 2\pi \cdot s_2 / s$ ,  $\theta_2 = 2\pi \cdot (s_2 + s_3) / s$  та

$$\theta_3 = \pi + \arcsin \frac{\eta \cdot \sin \left( \arcsin \left( s_2^y K_{\varphi_2} \sin(\theta_2 - \theta_1) / \sqrt{\eta} \right) + \theta_1 \right)}{\sqrt{s_1^{2y} K_{\varphi_1}^2 + \eta + 2s_1^y K_{\varphi_1} \sqrt{\eta} \cos \left( \arcsin \left( s_2^y K_{\varphi_2} \sin(\theta_2 - \theta_1) / \sqrt{\eta} \right) + \theta_1 \right)}}, \text{ де}$$

$\eta = s_2^{2y} \cdot K_{\varphi_2}^2 + s_3^{2y} \cdot K_{\varphi_3}^2 + 2s_2^y s_3^y K_{\varphi_2} K_{\varphi_3} \cdot \cos \theta_2$ ,  $y$  – показник степеня, що враховує вплив  $s$  на  $P_y$ ;

$K_{\varphi_1}$ ,  $K_{\varphi_2}$ ,  $K_{\varphi_3}$  – коефіцієнти, що враховують вплив  $\varphi$  відповідно ПЧР, ДЧР і ТЧР на  $P_y$ .

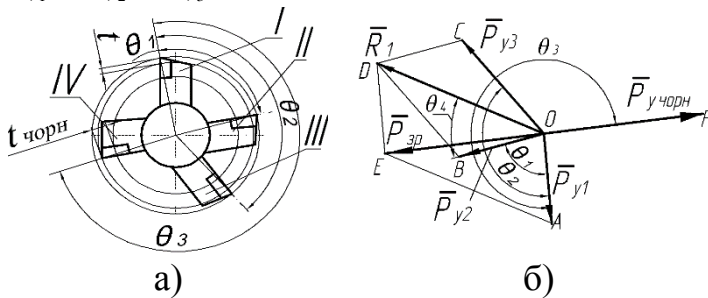


Рис. 7. Схема розміщення чорнового та чистових різців а) та розрахункова схема для визначення кутових положень різців за I варіантом виконання ЧРРГ: I, II, III і IV – відповідно ПЧР, ДЧР, ТЧР і чорновий різець  $V$  – швидкість різання на чистових різцях, отримали залежність для визначення глибини різання на чистових різцях:

Отримано залежності для визначення глибин різання на чорновому  $t_{\text{чорн}}$  та чистових  $t$  різцях з умови забезпечення зрівноваження радіальних складових сил різання від трьох чистових різців  $\bar{P}_{zp}$  з чорновим  $\bar{P}_{y\text{чорн}}$ :  $\bar{P}_{zp} = \bar{P}_{y\text{чорн}}$  (рис. 7, б), де  $P_{y\text{чорн}} = C \cdot t_{\text{чорн}}^x \cdot s^y \cdot V_4^n \cdot K_{\varphi_1}$ ,  $V_4$  – швидкість різання на чорновому різці. З урахуванням, що  $V_4 \approx V$ , де

$$t = \frac{z}{2} \left( \frac{s^y \cdot K_{\varphi_4}}{s_1^{2y} K_{\varphi_1}^2 + \eta + 2s_1^y K_{\varphi_1} \sqrt{\eta} \cos \left( \arcsin \left( s_2^y K_{\varphi_2} \sin(\theta_2 - \theta_1) / \sqrt{\eta} \right) + \theta_1 \right)} \right)^{1/x}$$

тут  $t_{\text{чорн}} = z - t$ , де  $z$  – загальний припуск на оброблення

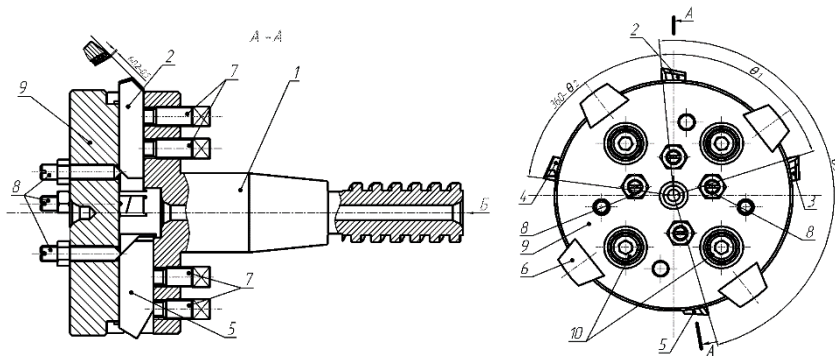


Рис. 8. Конструкція ЧРРГ для комбінованого розточування: 1 – корпус, 2, 3, 4 – відповідно ПЧР, ДЧР і ТЧР; 5 – чорновий різець; 6 – напрямні; 7 – затискні гвинти; 8 – регулювальні гвинти; 9 – задня плита; 10 – гвинти затиску задньої плити

Конструкція ЧРРГ для комбінованого розточування подана на рис. 8.

Особливістю чотиризубих зенкерів з попарно-асиметричним розміщенням зубів є те, що допоміжні кути в плані рівні між собою  $\varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi'_3 = \varphi'_4 = \varphi'$ , і їх величину запропоновано приймати в межах  $5-10^\circ$ . Така конструктивна особливість забезпечує зменшення площі контакту



допоміжних різальних лез інструмента з обробленою поверхнею, збільшуючи при цьому висоту нерівностей профілю. Для її зменшення здійснено зміщення другого зуба відносно першого та четвертого відносно третього, яке визначається центральним кутом  $\theta_{\min} = 30...60^\circ$ . Так як значення головних кутів в плані на додаткових фасках головних різальних кромки  $\varphi_{01} = \varphi_{02} = \varphi_{03} = \varphi_{04}$ , то виникає різна висота нерівностей профілю. Для забезпечення значення  $H \approx Rz_p = const$  після проходу всіх зубів зенкера запропоновано два варіанти: корегування головного кута в плані на додаткових фасках головних різальних кромки на другому ( $\varphi_{02K}$ ) та четвертому ( $\varphi_{04K}$ ) зубах (рис. 9, а) та корегування допоміжних кутів в плані на першому ( $\varphi'_{1K}$ ) та третьому ( $\varphi'_{3K}$ ) зубах.

Кореговані значення головних кутів в плані на додаткових фасках другого та четвертого зубів, а також кореговані допоміжні кути в плані на першому та третьому зубах відповідно для першого та другого варіантів виконання зенкерів запропоновано визначати із залежностей відповідно

$$\varphi_{02K} = \varphi_{04K} = \text{arcctg} \left( \frac{(\text{ctg} \varphi_0 + \text{ctg} \varphi') \cdot (\pi - \theta_{\min})}{\theta_{\min}} - \text{ctg} \varphi' \right),$$

$$\varphi'_{3K} = \varphi'_{1K} = \varphi'_K = \text{arcctg} \left( \frac{(\text{ctg} \varphi_0 + \text{ctg} \varphi') \cdot (\pi - \theta_{\min})}{\theta_{\min}} - \text{ctg} \varphi_0 \right).$$

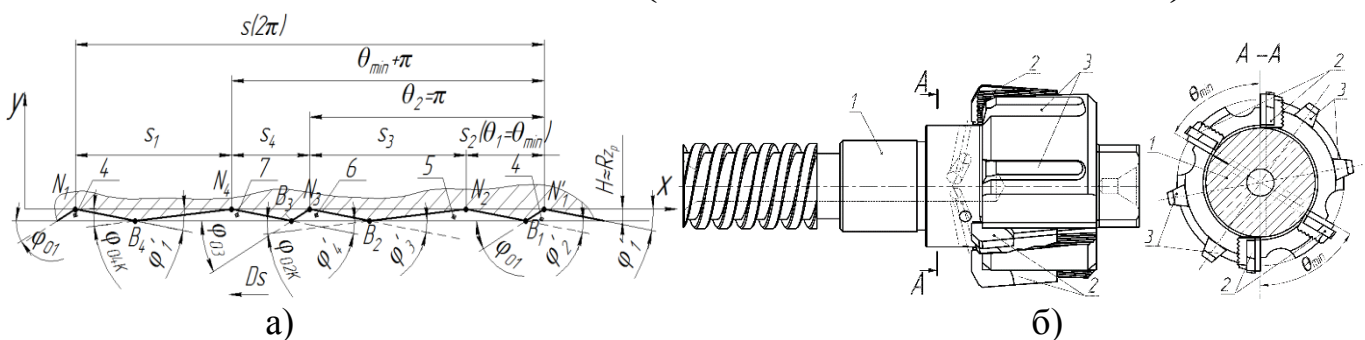


Рис. 9. Розрахунковий профіль обробленої поверхні зенкером з попарно-асиметричним розміщенням зубів за першим варіантом а) та його конструкція б):  
1 – корпус, 2 – вставні зуби 3 – напрямні елементи

Отримано залежності для визначення подач на кожному із зубів. Подачу на оберт зенкера визначили із формули  $s = (H \cdot (\text{ctg} \varphi_0 + \text{ctg} \varphi') \cdot 2\pi) / \theta_{\min}$ . Варіант конструкції зенкера з попарно-асиметричним розміщенням зубів подано на рис. 9, б.

**У четвертому розділі** «Програма та методика проведення експериментальних досліджень» проаналізовано існуючі методи дослідження та оцінки силових характеристик процесу оброблення і шорсткості обробленої поверхні глибоких отворів. Розроблено експериментальне обладнання для дослідження силових характеристик процесу оброблення глибоких отворів БМІ, зокрема спеціальний патрон для закріплення тонкостінних заготовок – пустотілих циліндрів з глибокими отворами (рис. 10 а, б), спеціальний динамометричний пристрій (рис. 11) модернізовано пристосування для проведення виробничих випробувань на токарно-гвинторізному верстаті мод. 1М63.

Отримано залежності для визначення радіуса розточування кулачків та

необхідної сили затиску, відповідно  $R_k = (32F_o(R_{mp}^2 - b_1^2)(1 - \mu) + b_1^2 \pi E R_{mp}) / b_1^2 \pi E$  та  $F_3 \geq C_4 \cdot HB^n \cdot D / 2 (t^{x_1} \cdot s^{y_1} \cdot K_{np} + t_1^{x_1} (s_1^{y_1} \cdot K_{1np} + s_2^{y_1} \cdot K_{2np} + s_3^{y_1} \cdot K_{3np})) / 2 f D_{cp} K_3$ , де  $E$  – модуль Юнга,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $b_1$  – ширина контакту кулачка з заготовкою.

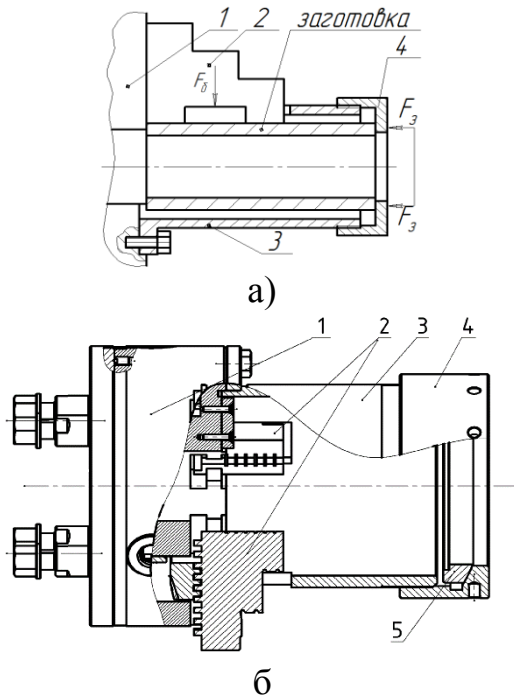


Рис. 10. Розрахункова а) та конструктивна б) схема патрона для базування та затиску циліндрів з глибокими отворами: 1 – корпус; 2 – кулачки; 3 – фланець; 4 – затискна гайка; 5 – спеціальна шайба

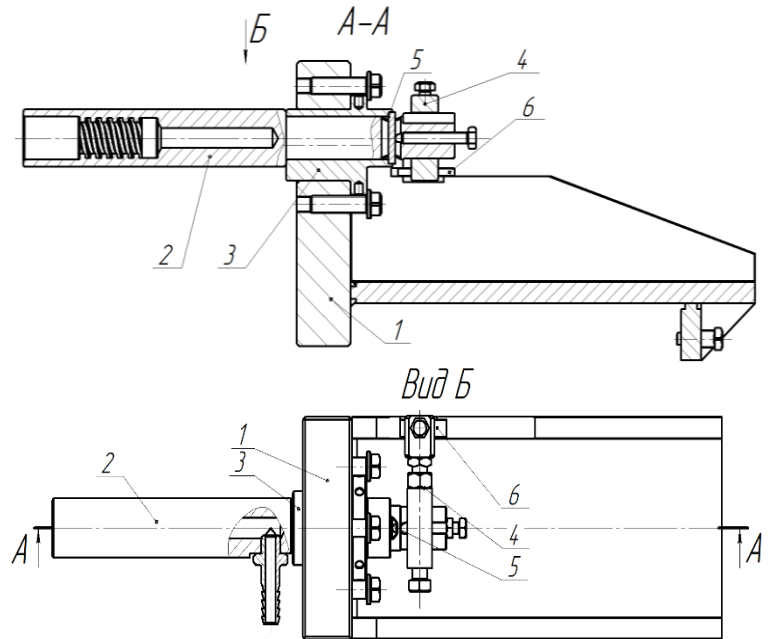


Рис. 11. Конструктивна схема спеціального динамометричного пристрою: 1 – корпус; 2 – оправка; 3 – ексцентрикова втулка; 4 – важіль; 5, 6 – тензометричні балки

Запропоновано удосконалену методику визначення впливу подачі на тангенціальну складову сили різання при зенкеруванні, яка у ймовірнісному аспекті враховує вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу на значення  $P_z$ . Подано методики проведення експериментальних досліджень в лабораторних умовах на основі теорії планування експерименту та за допомогою методу найменших квадратів. При дослідженні впливу елементів режиму різання (глибини різання та подачі) на осьову силу та крутний момент при обробленні глибоких отворів розробленими БМІ запропоновано осьову силу та крутний момент описувати залежностями  $P_o = C_p \cdot t^{x_p} \cdot s^{y_p}$  та  $M = C_M \cdot D \cdot t^{x_M} \cdot s^{y_M}$ , які логарифмуванням

Таблиця 2. Рівні факторів при плануванні експерименту

Фактори	Кодове позначення факторів	Рівні факторів	
		Верхній, +1	Нижній, -1
$t$ , мм	$x_1$	2	0,5
$s$ , мм/об	$x_2$	0,4	0,2

зводили до лінійного вигляду:  $\lg P_o = \lg C_p + x_p \cdot \lg t + y_p \cdot \lg s$  та  $\lg M = \lg(C_M \cdot D) + x_M \cdot \lg t + y_M \cdot \lg s$ . За теорією планування експерименту встановлювали рівні факторів, які подані в табл. 2.

Для реалізації повнофакторного експерименту запропоновано

конструкцію дослідного зразка (рис. 12). Для забезпечення відтворюваності результатів вибрано число повторних дослідів  $r = 2$ .

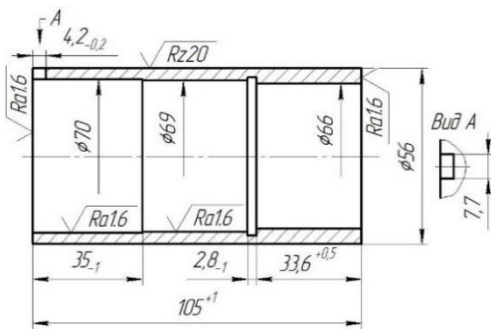


Рис. 12. Дослідний зразок для проведення повнофакторного експерименту

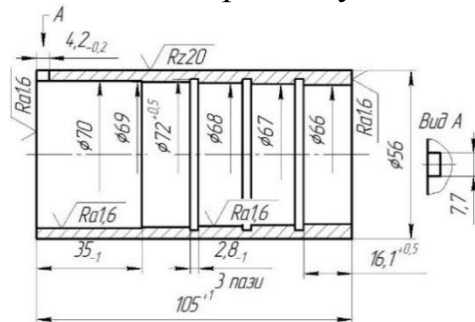
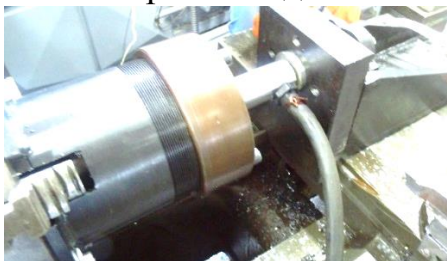


Рис. 13. Дослідний зразок для дослідження впливу глибини різання та подачі на осьову силу та крутний момент

випробувань, здійснено за запропонованими методиками дослідження впливу подачі та глибини різання на осьову силу, крутний момент та шорсткість оброблених поверхонь.

Почергово здійснювали процес оброблення підготовлених заготовок та фіксували покази міліамперметрів (рис. 14).



а)



б)



в)

Рис. 14. Фрагменти експериментальної установки: а) і б) відповідно до початку та після закінчення процесу оброблення; в) тензометрична станція та реєструючі міліамперметри

Отримано залежності для визначення кодovаних факторів  $x_1 = 3,322 \lg x_1$ ,  $x_2 = 6,6445 \lg x_2 + 3,6445$ .

Для оцінювання впливу подачі та глибини різання на осьову силу, крутний момент за методом найменших квадратів, а також на шорсткість обробленої поверхні розроблено спеціальні дослідні зразки (рис. 13). При цьому на ступенях забезпечували наступні глибини різання  $t=0,5; 1; 1,5; 2$  мм. Оброблення здійснювали на подачах  $s=0,2; 0,3; 0,35; 0,4$  мм/об. Залежності для визначення осьової сили та крутного моменту в логарифмічних координатах набули вигляду:  $y = a_1 + b_1 \cdot x_1 + c_1 \cdot x_2$  та  $z = a_2 + b_2 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2$ , де  $y = \lg P_o$ ;  $a_1 = \lg C_p$ ;  $b_1 = x_p$ ;  $c_1 = y_p$ ;  $z = \lg M$ ;  $a_2 = \lg(C_M \cdot D)$ ;  $b_2 = x_M$ ;  $c_2 = y_M$ ;  $t = x_1$ ;  $s = x_2$

Коефіцієнти  $a_1, b_1, c_1$ , а також  $a_2, b_2$  і  $c_2$  визначали методом найменших квадратів.

У п'ятому розділі «Опрацювання результатів експериментальних досліджень та їх аналіз. Економічна ефективність науково-дослідних розробок» подано результати виробничих

випробувань та їх аналіз. Економічна ефективність науково-дослідних розробок» подано результати виробничих

перетворювали покази міліамперметрів в значення осьової сили та крутного моменту в натуральні та кодovані фактори. Визначали коефіцієнти регресії і за критерієм Кохрена відкидали незначимі. Отримані моделі в кодovаних змінних набули вигляду:

$$y = 2,78 + 0,3172 \cdot x_1 + 0,062 \cdot x_2 \text{ та } \hat{z} = 1,5969 + 0,3401 \cdot x_1 + 0,123 \cdot x_2$$

За критерієм Фішера встановили, що моделі є



адекватними, так як значення  $F=4,66914$  (для осьової сили) та  $F=7,66463$  менші, ніж  $F_m=7,71$ . Отримали значення коефіцієнтів кореляції відповідно для осьової сили та крутного моменту  $R_1=0,9877$  та  $R_2=0,9846$ , які дали підстави стверджувати, що подані рівняння з достатньою достовірністю описують результати експерименту. В кінцевому результаті отримали залежності для визначення осьової сили та крутного моменту:  $P_o = 1014 \cdot t^{1,054} \cdot s^{0,412}$  і  $M = 1,585 \cdot D \cdot t^{1,129} \cdot s^{0,817}$ . З урахуванням стохастичності подач залежності для визначення максимальних значень осьової сили та крутного моменту набули вигляду:

$$P_{o \max} = 1014 \cdot t^{1,054} \cdot (\bar{s} + 3\sigma(s))^{0,412}; M_{\max} = 1,585 \cdot D \cdot t^{1,129} \cdot (\bar{s} + 3\sigma(s))^{0,817}.$$

Опрацювання результатів експериментальних досліджень, проведених з використанням дослідних зразків (рис. 13), здійснили, використавши метод найменших квадратів і за допомогою пакету MathCAD (функції Given-Find) визначили значення коефіцієнтів  $a_1, b_1, c_1$ , а також  $a_2, b_2$  і  $c_2$ . Отримали залежності для середніх значень осьової сили та крутного моменту:  $\bar{P}_o = 895,4 \cdot t^{1,045} \cdot s^{0,337}$ ,  $\bar{M} = 1,584 \cdot D \cdot t^{1,073} \cdot s^{0,794}$ , а також їх максимальних значень  $P_{o \max} = 895,4 \cdot t^{1,045} \cdot (\bar{s} + 3\sigma(s))^{0,337}$ ,  $M_{\max} = 1,584 \cdot D \cdot t^{1,073} \cdot (\bar{s} + 3\sigma(s))^{0,794}$  з урахуванням стохастичності подач.

Для наочного подання результатів експериментальних досліджень впливу  $t$  і  $s$  на  $P_o$  та  $M$  побудовано поверхні відгуку (рис. 15). Встановлено, що розбіжність між значеннями осьової сили, визначеної за отриманими емпіричними залежностями, і результатами експериментальних даних становить не більше 13%. Отримані експериментальні значення осьової сили більші в середньому на 15,2%, ніж результати, визначені для традиційних інструментів. Розбіжності між значеннями крутного моменту, визначеними за отриманими емпіричними залежностями, і результатами експериментальних вимірювань не перевищують 9%. Отримані результати експериментальних досліджень крутного моменту в середньому на 22,6% менші, ніж результати, отримані для традиційних інструментів.

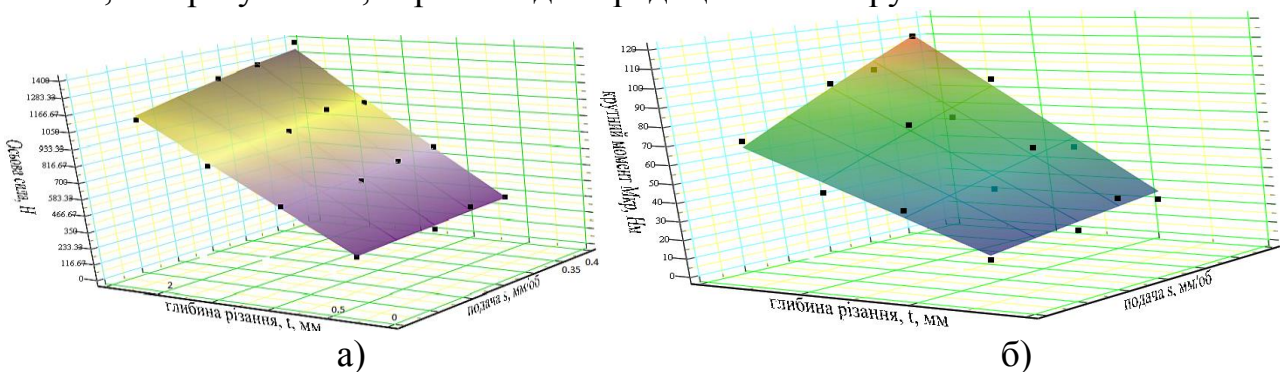


Рис. 15. Поверхні відгуку залежностей середніх значень осьової сили а) та крутного моменту б) від глибини різання та подачі

Значення параметру шорсткості  $Ra$  для оброблених внутрішніх циліндричних поверхонь визначали за шістьма рівномірно розміщеними по колу трасами і отримані значення приймали як випадкові величини з нормальним законом розподілу. За удосконаленим методом ітерації теорії малої вибірки визначали математичне сподівання  $M(Ra)$  і дисперсію розсіювання  $D(Ra)$ .

При оцінюванні впливу подачі  $s$  на величину  $Ra$  при обробленні запропонованими зенкерами з попарно-асиметричним розміщенням лез за критерієм Стюдента встановлено, що на інтервалі подач  $s=0,2-0,35$  мм/об вплив подачі на параметр  $Ra$  є неістотним, проте збільшення подачі до  $s=0,4$  мм/об спричиняє істотне зростання параметра  $Ra$ .

Розроблено методику визначення економічної ефективності оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь глибоких отворів циліндрів при використанні запропонованих технічних рішень. Позитивний результат економічної ефективності полягає у підвищеній продуктивності оброблення за рахунок використання більших подач при забезпеченні заданих значень  $Ra$ .

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача розроблення прогресивних конструкцій БМІ з асиметричним розміщенням лез, що сприяє підвищенню ефективності розточування та зенкерування глибоких отворів циліндрів із забезпеченням заданої точності та шорсткості.

1. На основі аналізу схем роботи та конструкцій інструментів для розточування та зенкерування глибоких отворів запропоновано їх класифікацію, виявлено основні фактори, що впливають на забезпечення точності, шорсткості та продуктивності оброблення. Встановлено, що питання науково обґрунтованого підходу до конструювання БМІ з асиметричним розміщенням лез в залежності від необхідних якісних параметрів поверхонь деталей з умови забезпечення максимальної продуктивності в існуючих дослідженнях обґрунтовано недостатньо.

2. Розроблено уточнені геометрично-математичні моделі формування висоти нерівностей профілю і встановлено технологічні обмеження для їх використання, що дає можливість прогнозувати теоретичний профіль обробленої поверхні, а також визначати розрахункову висоту нерівностей профілю в залежності від значень головного та допоміжного кутів в плані, радіуса вершини різців та подачі.

3. На основі проведених за запропованою методикою теоретичних та експериментальних досліджень доведено, що подачі на універсальних токарних верстатах є стохастичними величинами і підкоряються нормальному закону розподілу. Запропоновано залежності для визначення густини розподілу та характеристик розсіювання подачі, що дає можливість розглядати процеси і величини, на які впливає подача, як стохастичні.

4. На основі уточнених геометрично-математичних моделей з урахуванням стохастичності подач розроблено ймовірно-математичні моделі параметра висоти нерівностей профілю за десятьма точками. Запропоновано оцінювати висоту нерівностей профілю квантилем випадкової величини, для якого функція розподілу дорівнює 0,95, що дасть можливість на стадії проектування технологічного процесу встановлювати подачу, при якій з імовірністю 95 % параметр  $Rz_p$  буде не більший, ніж заданий.

5. Розроблено принципи конструктивного виконання та методики проектування три- та чотирирізцевих розточувальних головок з асиметричним розміщенням лез для комбінованого розточування глибоких отворів з використанням одного чорнового та двох або трьох чистових різців і спеціальних чотириризових зенкерів з попарно-асиметричним розміщенням лез. Отримано залежності для визначення значень подач

та глибин різання на кожному із різців з умови забезпечення зрівноваження радіальних складових сил різання, а також значень центральних кутів розміщення різців. Запропоновано модель оптимізації значень кутів в плані чистових різців розточувальної головки з умови забезпечення максимальної продуктивності, яка зростає більше, ніж на 30% в порівняно з використанням традиційних БМІ.

6. Отримані емпіричні формули для визначення середніх та максимальних (з урахуванням стохастичності подач) значень осьового зусилля та крутного моменту в залежності від глибини різання та подачі. Встановлено, що при обробленні запропонованими зенкерами з попарно-асиметричним розміщенням лез та корегованими кутами в плані отримують осьову силу в середньому на 15,2% більшу, а крутний момент в середньому на 22,6% менший у порівнянні з такими ж силовими характеристиками, визначеними для традиційних інструментів.

7. Встановлено, що за параметром шорсткості обробленої поверхні  $Ra$ , оброблення запропонованими зенкерами з попарно-асиметричним розміщенням лез поданих конструкцій найдоцільніше проводити з подачею  $s=0,35$  мм/об, що на 17% вища, ніж рекомендована подача для оброблення глибоких отворів традиційними інструментами.

8. Результати роботи впроваджені на ПАТ «Кам'янець-Подільськавтоагрегат». При використанні розточувальних головок збільшення продуктивності забезпечило річний економічний ефект в розмірі 73690 грн. При використанні спеціальних зенкерів отримано річний економічний ефект 29340 грн.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Кривий П. Д. Конструкторсько-технологічні передумови підвищення якості оброблення глибоких отворів тонкостінних циліндрів / П. Д. Кривий, В. В. Крупа, В. І. Продан // Вісник ТДТУ. – 2010. – Том 15. – № 1. – С. 147-156. – (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки). *(Автору належать теоретичні залежності для визначення параметрів трирізцевої розточувальної головки та спеціального патрона).*

2. Кривий П. Д. Геометричні та математичні моделі формування шорсткості циліндричних поверхонь при точінні та розточуванні / П. Д. Кривий, В. В. Крупа // Вісник ЖДТУ. – 2010. – №2. – С. 45-56. *(Автору належать геометричні моделі та теоретичні залежності для визначення висоти нерівностей профілю).*

3. Крупа В. Визначення конструкторсько-технологічних параметрів багаторізцевих розточних головок з поділом припуску та подачі / В. Крупа // Вісник ТНТУ. – 2011. – Том 16. – № 1. – С. 105-117. – (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

4. Кривий П. Д. Конструкторсько-технологічні параметри багаторізцевих розточних головок з радіусними вершинами різців / П. Д. Кривий, В. В. Крупа // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – 2011.– Вип. 33 – С. 92-99. *(Автору належать теоретичні залежності для визначення технологічних та конструкторських параметрів чотирирізцевих розточувальних головок)*

5. Кривий П. Д. Інструментальне забезпечення процесу розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів / П. Д. Кривий, В. В. Крупа // Вісник ЖДТУ. – 2012. – №2. – С. 23-34. *(Автору належить класифікація БМІ та принципи*

конструкторського виконання чотирирізцевих розточувальних головок з асиметричним розміщенням лез).

6. Вплив випадковості подачі на висоту мікронерівностей поверхні при її точінні або розточуванні / [П. Кривий, Н. Тимошенко, М. Шарик, В. Крупа] // Львів : Машинознавство. – 2013. – №9-10 (195-196). – С. 76-83 (Автору належать теоретичні залежності для визначення характеристик розсіювання подач, а також параметру висоти нерівностей профілю за десятьма точками).

7. Technological heredity and accuracy of the cross section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces / [Petro D. Kryvyi, Volodymyr O. Dzyra, Nadiia M. Tymoshenko, Volodymyr V. Krupa] // Canadian journal science, education and culture. – 2014. – №2 (6). – р. 301-309. (Частка авторів однакова).

8. Кривий П. Д. Імовірісно-статистичний підхід при дослідженні впливу точності подачі на шорсткість обробленої поверхні при точінні та розточуванні / П. Д. Кривий, В. В. Крупа // Матеріали міжнародного наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених «Прогресивні напрямки розвитку машино-приладобудування та транспорту», 16-18 травня 2011р. : тези допов. – Севастополь : Вид-во СевНТУ.– 2011. –С. 175-176. (Автору належать теоретичні залежності та обробки результатів експериментальних досліджень розсіювання подач на УТГВ)

9. Крупа В. В. Математичні моделі впливу стохастичності подач на шорсткість обробленої поверхні в імовірісному аспекті / В. В. Крупа // Десятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові, 25-27 травня 2011 р. : праці. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2011. – С. 234-236.

10. Кривий П. Конструкція спеціального зенкера для чистової обробки внутрішніх циліндричних поверхонь втулок і роликів ланцюгів / Петро Кривий, Володимир Крупа // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасних технологій виготовлення та надійності передач з гнучким зв'язком», 19-21 грудня 2011 р. : тези допов. – Тернопіль : «Крок», 2011. – С. 53-55. (Автору належить наукове обґрунтування асиметричності розміщення лез зенкера).

11. Кривий П. Д. Конструкція спеціального зенкера для обробки глибоких отворів тонкостінних циліндрів / П. Д. Кривий, В. В. Крупа // Всеукраїнська молодіжна конференція «Машинобудування України очима молодих. Прогресивні ідеї – наука – виробництво», 22-25 жовтня 2012р. : тези допов. – Київ : В-во «КПІ», 2012. – Том 1. – С. 66-68 (Частка авторів однакова).

12. Кривий П. Д. Пристрій для вимірювання силових характеристик процесу різання при обробленні внутрішніх циліндричних поверхонь / П. Д. Кривий, В. В. Крупа, В. О. Дзюра. // Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2013 р. : тези допов. – Тернопіль : ТНТУ, 2013. – С. 102-103. (Автору належить конструкція тензовузла).

13. Кривий П. Д. Конструкція спеціального трикулачкового патрона для закріплення тонкостінних заготовок циліндрів з глибокими отворами / П. Д. Кривий, В. В. Крупа // Всеукраїнська молодіжна конференція «Машинобудування України очима молодих. Прогресивні ідеї – наука – виробництво», 27-31 жовтня 2014 р. : тези допов. – Суми : В-во «СумДУ». – С. 66-67. (Автором розроблена конструкція затискного механізму та отримано залежності для визначення сил затиску).

14. Кривий П. Д. Підвищення ефективності процесу оброблення глибоких

отворів циліндрів багатолезовим різальним інструментом / П. Д. Кривий, В. В. Крупа // Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції "Прогресивні технології у машинобудуванні" присвячена 170-річчю створення Національного університету "Львівська політехніка", 2-6 лютого 2015 : праці. – Львів : В-во Львівської політехніки, 2015. – С. 45-47. (*Частка авторів однакова*).

15. Пат. 67542 Україна, МПК (2006.01) B23В 51/10. Багатолезовий різальний інструмент для витяжного розточування внутрішніх циліндричних поверхонь / Кривий П.Д., Крупа В.В., Кушпіль В.С.; заявник та патентовласник ТНТУ. – u201109467; заявл. 28.07.2011; опубл. 27.02.2012, бюл. № 4.

16. Пат. 72588 Україна, МПК (2006.01) B23В 29/03. Розточувальна головка / Кривий П. Д., Крупа В. В.; заявник та патентовласник ТНТУ. – u201200904; заявл. 30.01.12; опубл. 27.08.2012, бюл. № 16.

17. Пат. 73092 Україна, МПК (2006.01) B23В 51/10. Багатолезовий різальний інструмент для витяжного розточування внутрішніх циліндричних поверхонь / Кривий П. Д., Крупа В. В.; заявник та патентовласник ТНТУ. – u201202467; заявл. 01.03.2012; опубл. 10.09.2012, бюл. № 17.

18. Пат. 88484 Україна, МПК B23В 51/10 (2006.01) Зенкер / Островський М. І., Кушпіль В. С., Кривий П. Д., Крупа В. В.; заявник та патентовласник ТНТУ. – u201302671; заявл. 04.03.2013; опубл. 25.03.2014, бюл. № 6.

## АНОТАЦІЯ

Крупа В. В. Металорізальні інструменти з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – Тернопіль, 2015.

Розроблені геометрично-математичні та ймовірнісно-математичні моделі, які уточнюють вплив кутів в плані, радіусів вершин різальних елементів і подачі на параметр висоти нерівностей профілю обробленої поверхні за десятьма точками. Запропоновано принципи конструкторського виконання і на їх основі розроблено конструкції інструментів з асиметричним розміщенням лез, а саме: три- й чотирирізцеві розточувальні головки та спеціальні чотиризубі зенкери. Особливостями цих інструментів є науково-обґрунтовані значення центральних кутів, які визначають розміщення по колу різальних елементів, та їх оптимізовані й кореговані кути в плані, що забезпечують підвищену продуктивність оброблення при заданій шорсткості обробленої поверхні. Отримано емпіричні залежності, які визначають вплив глибини різання та подачі на осьову силу та крутний момент при обробленні цими інструментами. Здійснено оцінювання впливу подачі на параметр  $Ra$ . Запропоновано методику визначення економічної ефективності, яка базується на підвищеній продуктивності оброблення запропонованими інструментами порівняно з обробленням традиційними БМІ.

**Ключові слова:** багатолезові металорізальні інструменти, асиметричне розміщення лез, зенкер, розточувальна головка, кути в плані, різець, подача, глибина різання, шорсткість.

## АННОТАЦИЯ

Крупа В. В. Металлорежущие инструменты с асимметричным расположением лезвий для обработки глубоких отверстий цилиндров. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя. – Тернополь, 2015.

Разработаны геометрическо-математические и вероятностно-математические модели, уточняющие влияние углов в плане, радиусов вершин режущих элементов и подачи на параметр высоты неровностей профиля обработанной поверхности по десяти точкам. Предложены принципы конструкторского исполнения и на их основании разработаны конструкции инструментов с асимметричным расположением лезвий, а именно: трех- и четырехрезцовые расточные головки и специальные четырехзубые зенкеры. Особенности этих инструментов являются научно обоснованные значения центральных углов, определяющих размещение по кругу режущих элементов, и их оптимизированные и скорректированные углы в плане, обеспечивающие повышенную производительность обработки при заданной шероховатости обработанной поверхности. Получены эмпирические зависимости, определяющие влияние глубины резания и подачи на осевую силу и крутящий момент при обработке этими инструментами. Осуществлена оценка влияния подачи на параметр  $Ra$ . Предложена методика определения экономической эффективности, основанная на повышенной производительности обработки предложенными инструментами по сравнению с традиционными.

**Ключевые слова:** *многолезвийные металлорежущие инструменты, асимметричное размещение лезвий, зенкер, расточная головка, углы в плане, резец, подача, глубина резания, шероховатость.*

## ANNOTATION

Krupa V.V. Metal-cutting tools with asymmetric location of cutters for machining of cylinder deep holes. – Manuscript

Dissertation is submitted for the scientific degree of Candidate of Sciences (Engineering) in specialism 05.03.01 – machining processes, machine tools and tools. – Ternopil Ivan Puliuj National Technical University, Ternopil, 2015.

The work deals with the development of new principles of multi-cutters design of metal cutting tools with the asymmetric location of cutters, that is, three- and four cutters boring heads and special four-tooth countersinks in order to increase the efficiency of the cylinder deep holes machining by the versatile (multipurpose) screw-cutting lathes (VSCL) and horizontal boring machines.

Geometric-mathematic models, which specify the effect of cutting edge angles, cutting element edges radius and the profile roughness height feed according to ten points, have been developed. Basing on the experimentally testified feed stochasticity on the VSCL, which are subject to the normal distribution law, as well as the geometric-mathematic models of the profile roughness height parameters of the method of its estimation has been proposed. Basing on the geometric-mathematic and probability-mathematic models the

principles of the construction design of multi-cutters metal cutting tools (MMT) with the asymmetric location of cutters, that is, three- and four-cutters boring heads, which operate in simultaneous distribution of tolerance and feed mode, in which one rough and two or three finishing cutters correspondingly are used, have been developed, as well as special four-tooth countersinks with the pair-asymmetric location of cutters operating according to the feed distribution scheme.

General construction characteristic of the proposed MMT is the corrected cutting edge angles on the cutting elements. Dependences for finding their technological (feed and cutting depth on every of cutting elements and the feed on revolving) and design (central angles of mutual location of cutting elements corrected angles) parameters, have been proposed. For four-cutters boring heads the model of the angles value optimization has been presented, providing the maximum efficiency of machining. The options of these MMT designs have been presented, which had been applied at the joint venture «Kamianets-Podilskautoagregat».

The analysis of the available methods of investigation has been carried out as well as the estimation of the power characteristics of the machining process and the roughness of the machined surface deep holes. Experimental equipment for testing the power characteristics of the MMT deep holes machining has been developed, special chuck in particular, for fixing thin-walled blank – hollow cylinders with deep holes, special dynamo-metric device, and the available device for testing on the screw-cutting lathe of 1M63-type, has been improved.

The method of experimental determination of the power characteristics of the MMT deep holes machining with the asymmetric location of cutters taking advantage of the theory of the experiment planning, has been developed. Taking into account the feeds stochasticity, the empiric dependencies for average values of the axis force and the torque, as well as their maximal values have been obtained. It was found that while machining by the countersinks with the pair-asymmetric location of cutters the axis force is by 15.2% greater and the torque by 22.6% smaller as compared with those in conventional tools.

As a result of estimation of the feed effect on the  $Ra$  parameter it was found, that the optimal feed for countersinks with the pair-asymmetric location of cutters is the feed  $s=0.35$  mm/rev. The method for finding the economic effectiveness of machining the cylinder deep holes surfaces taking advantage of the proposed engineering solutions, obtained due to the increase of the machining efficiency providing the given values  $Ra$ , has been developed.

Key words: multicutters metal-cutting tools, asymmetric cutters location, countersink, boring head, cutting edge angles, cutter, feed, cutting depth, roughness.

Підписано до друку 02.06.2015  
Папір ксероксний. Times New Roman  
Обл. вид. арк. 0,9  
Наклад 120 прим. Зам. № \_\_\_\_\_

Віддруковано з готових діапозитивів СМП «Тайп»

вул. Чернівецька, 44Б, м. Тернопіль, 46000