

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського”

В. І. Солодкий, В. В. Вовк,
О. А. Плївак, С. О. Яцук

ПРОБЛЕМИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

Частина I

*Затверджено Вченою радою
КПІ ім. Ігоря Сікорського
як наукова монографія*

КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ – 2019

Рецензенти: В. А. Залога – д-р техн. наук, Сумський державний університет

В. Б. Струтинський – д-р техн. наук, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор О. А. Охріменко – д-р техн. наук, Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

*Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 08.04.2019 р)*

Електронне мережне видання

*Солодкий Валерій Іванович
Вовк Вячеслав Володимирович
Плівак Олександр Анатолійович
Яцук Сергій Олександрович*

ПРОБЛЕМИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ Частина I

Проблеми механічної обробки [Електронний ресурс] В. І. Солодкий, В. В. Вовк, О. А. Плівак, С. О. Яцук – Електронні текстові дані (1 файл 4,7 Мбайт). — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 202 с.

Розглянуто проблеми механічної обробки під час застосування окремих типів інструментів та результати їх вирішення. Запропонована нова конструкція розвертки для фінішної обробки, яка суміщує процеси різання та пластичного деформування приповерхневих шарів оброблюваної деталі. Детально розглянуті питання автоматизованого профілювання кінцевих сферичних фрез та вибору оптимальних геометричних параметрів для застосування на верстатах з програмним керуванням. Викладено методику вимірювання округлості різального леза, яка дозволяє прогнозувати працездатність інструмента.

Для студентів машинобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів та фахівців спеціальності 131 – “Прикладна механіка”.

© В. І. Солодкий, В. В. Вовк, О. А. Плівак,
С. О. Яцук

© КПІ ім. Ігоря Сікорського (ММІ), 2019

Зміст

1	ПРОБЛЕМИ РОЗВЕРТУВАННЯ ОТВОРІВ	9
1.1	Стан питання	9
1.2	Оброблення вигладжуванням	18
1.3	Різально-вигладжувальна розвертка	22
1.4	Параметри вигладжувальних елементів	35
1.4.1	Вигладжувальна стрічка	35
1.4.2	Кут забірного конуса	40
1.4.3	Перевищення вигладжувального елемента	43
1.5	Шорсткість поверхні після розвертування	48
1.5.1	Впливу шляху різання на шорсткість	48
1.5.2	Вплив режимів обробки на шорсткість	52
1.5.3	Математична модель шорсткості	58
1.5.4	Структура мікропрофілю поверхні	60
1.6	Точність обробки отворів	64
1.6.1	Допуск оброблення отворів	64
1.6.2	Форма отворів	69
1.6.3	Діаметр отворів	72
1.6.4	Усадка отворів	76
1.7	Стійкість розверток	77
1.7.1	Працездатність розверток	81
1.8	Рентгеноструктурний аналіз	82
1.8.1	Методика рентгеноструктурного аналізу	82
1.8.2	Роздробленість зерен приповерхневого шару	84
1.8.3	Залишкові напруження	87
1.8.4	Концентратори напружень	92
1.9	Мікротвердість приповерхневих шарів	94
1.10	Висновки	97

Список літератури	100
--------------------------	------------

2	ПРОЕКТУВАННЯ СФЕРИЧНИХ ФРЕЗ	104
2.1	Стан питання	104
2.1.1	Системи автоматизованого проектування	106
2.1.2	Проектування різального інструмента	113
2.1.3	Особливості сферичних фрез	116
2.2	Автоматизоване проектування сферичних фрез	118
2.2.1	Структура автоматизованого проектування	118
2.2.2	Геометричні параметри фрез	120

2.2.3	Аналіз геометричних параметрів	124
2.2.4	Задачі формоутворення	132
2.2.5	Алгоритм проектування фрез	136
2.2.6	Побудова твердотільної моделі	139
2.2.7	Розроблення сферичної фрези	143
2.3	Висновки	147

Список літератури 150

3 КОНТРОЛЬ МІКРОГЕОМЕТРІЇ ІНСТРУМЕНТА 155

3.1	Основи побудови комплексу	155
3.1.1	Проблеми мікрогеометрії	155
3.1.2	Методи вимірювання мікрогеометрії	158
3.2	Математичні основи визначення мікрогеометрії	161
3.3	Комплекс вимірювання мікрогеометрії	171
3.3.1	Функціональна схема	171
3.3.2	Конструктивна реалізація	173
3.3.3	Електронні компоненти	181
3.4	Програмне забезпечення комплексу	185
3.5	Практичне застосування комплексу	195
3.6	Висновки	199

Список літератури 201

Перелік ілюстрацій

1.1	Калібрувальна стрічка	11
1.2	Зворотна конусність	12
1.3	Додаткові напрямні	13
1.4	Забірний конус	15
1.5	Радіусна розвертка	15
1.6	Розвертка ступінчаста	16
1.7	Розвертка шабрувальна	17
1.8	Дорнування	19
1.9	Розкочування	20
1.10	Вигладжування	21
1.11	Різально-вигладжувальна розвертка	23
1.12	Схема різально-вигладжувальної розвертки:	24
1.13	Варіанти вигладжувального елемента	25
1.14	Наріст	30
1.15	Профіль вигладжувального елемента	31
1.16	Контрольний пристрій	33
1.17	Утворення зминаючої фаски	34
1.18	Вплив вигладжувальної стрічки на шорсткість	36
1.19	Вплив подачі на шорсткість	37
1.20	Поза-контактне деформування	38
1.21	Вплив кута забірної конуса на шорсткість:	42
1.22	Вплив перевищення на шорсткість:	45
1.23	Шорсткість від вигладжувальної розвертки	49
1.24	Шорсткість від стандартної розвертки	50
1.25	Вплив режимів на шорсткість:	52
1.26	Профілограма від стандартної розвертки	61
1.27	Профілограма від вигладжувальної розвертки	61
1.28	Наслідки утворення наросту	62
1.29	Поверхня оброблена вигладжуванням	62
1.30	Частково оброблені отвори	62
1.31	Круглограми	70
1.32	Знос інструмента	78
1.33	Розташування поверхонь	79
1.34	Дебаєграми стандартної розвертки	85
1.35	Дебаєграми вигладжуальної розвертки	86
1.36	Напруження I-го роду (перевищення)	88
1.37	Зміна напружень I-го роду (перевищення)	88
1.38	Напруження I-го роду (ріжими)	88

1.39	Напруження II-го роду (перевищення)	90
1.40	Напруження II-го роду (режими)	91
1.41	Зміна напружень II-го роду	91
1.42	Концентратори напружень	93
1.43	Мікротвердість (перевищення)	95
1.44	Мікротвердість (режими)	95
2.1	Інтегрована система проектування [43]	109
2.2	Автоматизована система проектування [43]	110
2.3	Система проектування свердла [43]	111
2.4	Структурна схема автоматизованої системи	119
2.5	Розрахункові кути	122
2.6	Розташування систем координат	124
2.7	Розташування зубця фрези в різні моменти часу	125
2.8	Значення кута τ_N в різні моменти роботи:	126
2.9	Визначення кута активної ділянки кромки	127
2.10	Значення кута τ_N в різних положеннях зубця:	129
2.11	Значення кінематичних кутів:	130
2.12	Схема формоутворення гвинтових поверхонь	133
2.13	Схема заточки задньої поверхні [45]	138
2.14	Отримання стружкової канавки	139
2.15	Отримання решти стружкових канавок	139
2.16	Отримання задньої поверхні одного зубця	140
2.17	Отримання задніх поверхонь всіх зубців	140
2.18	Побудова передньої поверхні і канавки	142
2.19	Отримання задньої поверхні всіх зубців	142
2.20	Утворення потиличних поверхонь	142
2.21	Прорізка зубців	142
2.22	Уступ на місці стику поверхонь	143
2.23	Визначення кутів побудов	144
2.24	Фреза нової конструкції	145
2.25	Усереднені значення зношення фрез	147
3.1	Форми різальних кромок	157
3.2	Визначення параметрів мікрогеометрії кромки:	162
3.3	Різальна кромки для випадку дуги кола	165
3.4	Розрахункова крива	165
3.5	Різальної кромки для випадку дуги еліпсу	170
3.6	Функціональна схема комплексу	171
3.7	Принципова схема керування двигунами	172
3.8	Принципова схема отримання сигналу з датчика	172
3.9	Схема предметного столика з двигунами	173

3.10	Схема біполярного включення двигуна	174
3.11	Підключення двигуна до контролера	175
3.12	Схема дослідження плавності ходу	175
3.13	Рух у кроковому та мікро-кроковому режимах	176
3.14	Рух у режимі синусів та косинусів	177
3.15	Корегування току в обмотках	178
3.16	Датчик переміщень для сканування поверхні	180
3.17	Недоліки алмазної голки	180
3.18	Блок підсилювачів	182
3.19	Схема RC фільтру	182
3.20	Графік амплітуди	182
3.21	Схема інвертуючого операційного підсилювача	183
3.22	Схема неінвертуючого операційного підсилювача	183
3.23	Схема суматора на операційному підсилювачі	184
3.24	Робоча зона апаратного комплексу	185
3.25	Структурна схема Windows-додатку	186
3.26	Структурна схема додатку для контролера	187
3.27	Інтерфейс закладки “Вимірювання”	188
3.28	Лінійні траєкторії	189
3.29	Лінійні траєкторії під кутом	189
3.30	Криволінійні траєкторії	190
3.31	Траєкторії вписані в рамки	190
3.32	Інтерфейс закладки “Градування”	191
3.33	Виконання градування комплексу:	192
3.34	Інтерфейс закладки “Розрахунки”	193
3.35	Інтерфейс закладки “Результат”	193
3.36	Візуалізація мікрогеометрії поверхні	196
3.37	Мікрогеометрії фасонної поверхні	197
3.38	Сканування різальних кромок:	198
3.39	Визначення радіуса округлення	199

ПЕРЕДМОВА

Аналізуючи актуальні проблеми механічної обробки слід відзначити, що серед багатьох проблем¹ і питань визначальним є стан інструмента². У представленій роботі розглянуто декілька проблем над розв'язанням яких працювали автори.

Точне розвертування отворів³ (особливо у корпусних деталях) це фінішна операція, яка у багатьох випадках є єдиною придатною. Однак якість обробленої поверхні не завжди задовільняє за точністю та шорсткістю. Запропонована та досліджена конструкція розвертки, що суміщує процеси різання та пластичного деформування і дозволяє отримати отвір з характеристиками подібними до шліфування.

Значною проблемою фрезерування складних фасонних поверхонь⁴ на верстатах з ЧПК є проектування сферичних кінцевих фрез. Запропонована методика та створена на її основі САПР дозволяє на стадії проектування отримати сферичну фрезу з оптимальними геометричними параметрами.

Різальна кромка леза є найголовнішим елементом інструмента⁵. На основі запропонованої методики вимірювання мікрогеометрії просторової поверхні, розроблено автоматизований вимірювальний комплекс, що дозволяє отримати комп'ютерну 3D модель різального леза будь-якого інструмента, або об'єкта.

¹Official website "IZAR CUTTING TOOLS" URL: <http://www.izartool.com/es//productos.html> (Дата звернення 20.03.2019)

²Инструментарий выбора рационального метода оценки риска при разработке, внедрении и улучшении интегрированной системы управления / М. Раджаб Заде [и др.] // Сучасні технології в машинобудуванні = Modern technologies in mechanical engineering : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2013. – Вип. 8. – С. 281-297.

³Брижан Т. М. Исследование точности и шероховатости при развертывании отверстий [Електронний ресурс] / Т. М. Брижан, А. С. Крепак // Высник приазовського технічного університету. – 2004. – Режим доступу до ресурсу: <http://eir.pstu.edu/bitstream/handle/%BA.pdf?sequence=1>.

⁴Кузьмин В. Ф. Проблемы высокоскоростного фрезерования криволинейных поверхностей [Електронний ресурс] / В. Ф. Кузьмин – Режим доступу до ресурсу: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3882/1/bulletin_tpu-2002-305-1-17.pdf.

⁵Основы теории резания материалов : учебник / Н. П. Мазур [и др.] ; ред. Н. П. Мазур, А. И. Грабченко ; Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". – 2-е изд., перераб. и доп. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2013. – 534 с.

Интегрированные процессы обработки материалов резанием / [А. И. Грабченко, В. А. Залога, Ю. Н. Внуков та ін.]. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.

1 ПРОБЛЕМИ РОЗВЕРТУВАННЯ ОТВОРІВ

1.1 Стан питання

У сучасному машинобудуванні однією з поширених операцій фінішної обробки точних отворів є розвертування⁶, до того ж у багатьох випадках це єдиний прийнятний спосіб. Наприклад, оброблення отворів у корпусних деталях великого розміру замість внутрішнього шліфування.

Одночасно з цим, якість поверхні обробленої розверткою краща за шліфовану через те, що на шліфованій поверхні залишаються частинки абразиву, які призводять до прискореного зношування контактних поверхонь вал/отвір.

Слід зазначити, що розвертування (як технологічний процес) має низку переваг перед такими, широко вживаними способами фінішної обробки отворі як шліфування, розточування⁷ та протягування:

- універсальність (розвертка може бути застосована на будь-якому верстаті, або ручному дрилі);
- підвищена жорсткість системи верстат/пристосування/інструмент/деталь;
- компактність інструмента зважаючи на відсутність допоміжних елементів;
- простота виготовлення інструмента;
- простота обробки отворів у деталях корпусного типу (можливе ручне застосування інструмента);
- відсутність потреби в спеціалізованому обладнанні.

У порівнянні із схожим процесом – розточуванням, розвертування має наступні переваги:

⁶Розвертка – осьовий різальний інструмент для підвищення точності форми отвору та збільшення його діаметру [ДСТУ 2233-93, – С. 12.]. Застосовують для остаточної обробки отворів. Забезпечує точність за 6...9 квалітетом та шорсткість поверхні $Ra = 0,32 \dots 1,25$ мкм.

⁷Розточування – процес механічної обробки внутрішніх поверхонь отворів розточувальними різцями в заданий розмір. В основному здійснюється на верстатах токарної групи. [Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/расточивание>].

- висока точність установки різальних кромок інструмента відносно деталі;
- взаємна компенсація радіальних зусиль;
- мікрогеометрія різальної кромки не повністю копіюється на обробленій поверхні, оскільки значною мірою зрізується наступними за нею різальними кромками.

У теперішній час існує велика кількість конструктивних виконань розвертки⁸. Проте, не зважаючи на широке застосування розвертування, точність обробки і якість обробленої поверхні отворів не завжди задовільняє вимоги сучасної промисловості. Тому поряд з великою кількістю конструктивних виконань розвертки існує не менш велика кількість методів їх вдосконалення.

Існуючі методи поліпшення технологічної операції розвертування можливо поділити на два основні напрями:

- зміна способу кріплення розвертки на верстаті;
- зміна конструкції робочої частини розвертки.

Зміна способу кріплення розвертки, в основному, зводиться до застосування “плаваючих” приєднувальних конструкцій, що забезпечують розвертці можливість самовстановлення (у певних межах). Або навпаки, до жорсткого кріплення з примусовим напрямом в оброблюваному отворі.

Проте, точність розвертування залежить від точності попередньої операції оброблення отвору. Розвертка завжди прагне слідувати за віссю раніше обробленого отвору, навіть якщо вона зігнута і застосовується кондукторна втулка.

Зміна конструкції робочої частини самої розвертки, з метою поліпшення тих або інших параметрів розвертування, є більш раціональним методом, оскільки пропонується зміна може бути використана на різних конструкціях.

Калібрувальна стрічка

Встановлено, що на точність отвору і шорсткість його поверхні великий вплив мають циліндричні стрічки (рис. 1.1) на калібрувальній

⁸Назаревич Б. І. Різальний інструмент, забезпечення автоматизованого виробництва: Конспект лекцій / Назаревич Б. І., Назаревич О. Б. – Тернопіль: ТНТУ, 2010 . – 413 с.

Швець С. В. Металорізальні інструменти: Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2007. – 185 с. ISBN 978-966-657-108-6

частині розвертки. Під час роботи розвертки вони входять в отвір і прямуючи по ньому утримують розвертку від відхилень у разі виникнення випадкових бічних зусиль.

Окрім цього, стрічка сприяє загладжуванню обробленої поверхні [34, 50], отриманню точного розміру, а також збільшенню розмірної стійкості інструмента. Проте в технічній літературі існують суперечливі рекомендації щодо параметрів калібрувальної стрічки.

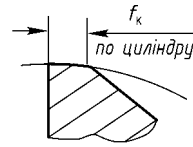


Рис. 1.1.
Калібрувальна стрічка

Більшість літературних джерел [50, 34, 16, 46, 21] рекомендує ширину стрічки від 0,05 до 0,3 мм залежно від діаметра розвертки і механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Проте на підставі ретельних досліджень [1] рекомендується з метою підвищення точності обробки виконувати калібрувальну стрічку змінної ширини – від 0,1 мм у забірній частини до 0,5 мм у напрямку до хвостовика. У той же час існують рекомендації протилежного характеру, згідно яких ширина калібрувальної стрічки є змінною, але навпаки – зменшується до хвостовика.

Отже, у сучасній літературі є три варіанти рекомендацій відносно ширини калібрувальної стрічки:

- стрічка має незмінну ширину (чим меншу тим краще), тому її досить легко виконати;
- стрічка має змінну ширину, яка зменшується від забірної конуса до хвостовика, тому сумарна площа контакту поверхонь інструмент/деталь мало змінюється;
- стрічка має змінну ширину, яка збільшується від забірної конуса до хвостовика, через що сумарна площа контакту інструмент/деталь збільшується під час заглиблення інструмента в отвір і це покращує її центрування.

Як бачимо існуючі рекомендації та обґрунтування відносно ширини калібрувальної стрічки мають взаємно унеможливлений характер. У практиці найчастіше застосовують розвертки, котрі мають калібрувальну стрічку постійної ширини.

Немає однозначної думки і щодо довжини калібрувальної частини розвертки. З однієї сторони низка дослідників [16, 25] стверджує, що чим менше довжина калібрувальної частини (калібрувальної стрічки) тим менше точність і вище шорсткість обробленої поверхні. На їх думку зменшення площі контакту інструмент/деталь

не дозволяє повноцінно калібрувати оброблювану поверхню і тому калібрувальну частину доцільно робити якнайдовшою. Проте це є досить спірним питанням, адже експериментально доведено, що збільшення площі контакту інструмент/деталь сприяє виникненню локальних зон зварювання між поверхнями, що рухаються одна відносно одної.

З іншого боку [16, 50] вважається, що подовження калібрувальної частини розвертки більше двох разів щодо оброблюваного діаметра, призводить до збільшення розбиття і нагрівання самої розвертки. Тому рекомендується застосовувати розвертки з довжиною калібрувальної частини не більше чверті від діаметра інструмента. Але в такому разі розвертка погано центрується в оброблюваному отворі.

Отже, існуючі рекомендації щодо розмірів калібрувальної частини розвертки мають унеможливлений характер.

Зворотна конусність

Переважна більшість літературних джерел [4, 16, 44, 46, 50 та ін.] рекомендує виготовляти розвертку з деякою зворотною конусністю (рис. 1.2) від 0,01...0,015 до 0,03...0,05 мм на довжині робочої частини інструмента.

У той же час, частина дослідників рекомендує виконувати розвертку з циліндричним калібрувальним пояском завдовжки 10...15 мм нехтуючи тим фактом, що реально виготовити циліндричну фаску без хоч-якогось допуску неможливо.

Є рекомендації взагалі не робити ніякого циліндричного пояска. Але розвертка без калібрувальної частини не може забезпечити необхідний розмір інструмента (отвору). Необхідно також враховувати, що ручна розвертка має калібрувальну частину довжиною від 5 до 10 діаметрів оброблюваного отвору. У такому випадку виготовити циліндричну частину розвертки без конусності взагалі неможливо.

У той же час ДСТУ ГОСТ 1532-65 указує лише на неприпустимість прямої конусності і можливість зворотної конусності в межах допуску на виготовлення розвертки. Тобто відповідно до стандарту зворотна конусність може бути, а може і ні. Неприпустима тільки пряма конусність, коли передня частина інструмента менша за задню частину.

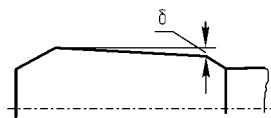


Рис. 1.2. Зворотна конусність

Додаткові напрямні

Під час оброблення точних глибоких отворів застосовують однолезові розвертки, як цілісною так і збірної конструкції. Однолезові розвертки мають значно більшу, ніж стандартні, опорну площу і завдяки цьому добре центруються в оброблюваному отворі.

Збірні конструкції таких розверток (рис. 1.3) зазвичай мають широкі твердосплавні напрямні елементи 3 розташовані по циліндричній твірній розвертки [50].

Однак, застосування напрямних елементів значної ширини та виготовлених із твердого сплаву, досить часто призводить до погіршення якості обробленої поверхні через виникнення подряпин.

Останнім часом опорні напрямні 1 за рис. 1.3 почали виконувати із пластичних матеріалів діаметром трохи більшим, ніж діаметр різальних елементів 2. Отже, напрямні елементи зазнають деформацій і процес розвертування відбувається із збільшеними зусиллями. Одночасно пластикові напрямні швидко зношуються.

Перевагою однозубих розверток є менша схильність до коливань. Однак, до недоліків однозубих розверток слід віднести їх низькою продуктивність. Застосовують однозубі розвертки здебільшого в зброярській справі під час виготовлення стволів, або для гідравлічних циліндрів.

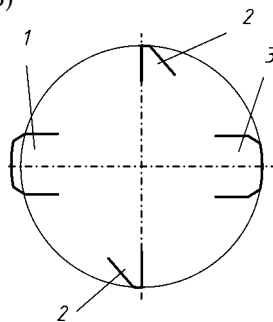


Рис. 1.3. Додаткові напрямні

Огранювання отвору

Зазвичай коливання розвертки, що виникають під час її роботи, викликають огранювання обробленого отвору.

Вважається, що коли зуби розвертки мають однаковий крок по колу то, як тільки одна з різальних кромок утворює на оброблюваній поверхні поглиблення, усі інші різальні кромки ритмічно западають у це поглиблення і отвір набуває огранки.

Існує думка, що для попередження виникнення огранювання розташованого відповідно кроку зубів розвертки і зменшення шорсткості поверхні оброблюваного отвору, необхідно крок зубів виконувати нерівномірним. Вважається (помилково), що гвинтові розвертки особливо придатні для цієї мети [4, 14, 16, 34, 46, 50].

Проте встановлено [16, 44], що гвинтові розвертки з кутом нахилу зубів $5 \dots 10^\circ$ (тобто найбільш поширені) не усувають огранювання отвору, а лише утворюють замість прямих рисок – гвинтові. Одночасно не спостерігається і зміна (зменшення) шорсткості обробленої поверхні отвору.

Щодо впливу розташування зубів розвертки по колу, на точність оброблюваного отвору експериментально доведено [4]:

- найменші похибки форми забезпечують розвертки в яких радіальні сили, що діють на окремі зуби урівноважені. У міру посилення чинників, що порушують цю рівновагу точність отвору зменшується;
- розвертки з великими кутами нахилу зубів і прямозубі, з рівномірним і нерівномірним кроком під час “нормальної” (з дотриманням необхідних умов) експлуатації забезпечують, практично однакову, точність і шорсткість поверхні обробленого отвору.

Існують і складніші конструкції розверток покликані, на думку дослідників, зменшувати коливання, а отже і огранювання. Так рекомендується [50] на звичайній розвертці, за кожним зубом, встановлювати текстолітову напрямну діаметром трохи більшими ніж діаметр розвертки. Проте, встановити таку напрямну безпосередньо на кожному зубі конструктивно неможливо, тому рекомендується чергувати різальні зуби і текстолітові напрямні. Однак, це значно зменшує продуктивність розвертування (принаймні в двічі).

Забірна частина

Зуби розвертки, як усякого металорізального інструмента оформлені так, щоб вони могли різати і в той же час забезпечувати відповідну точність отвору.

Оскільки розвертка зрізує вельми малий припуск ($0,05 \dots 0,15$ мм на сторону), то передній кут виконують рівним нулю і лише чорнові розвертки мають додатній передній кут, зазвичай 5° .

Кут у плані ϕ машинних розверток для оброблення конструкційних сталей рекомендується виконувати в межах $12 \dots 15^\circ$. Проте, вважається [4, 7, 9] за можливе застосовувати кут у плані рівний 30 або 45° . Такі розвертки мають перед розвертками з кутом у плані 15° ту перевагу, що їх забірна частина працює більш плавно.

Це можна пояснити тим, що із збільшенням кута φ в плані – зменшується осьове биття вершин різальних кромок. Як результат всі зуби навантажені більш рівномірно зважаючи на менше биття вершин різальних кромок в осьовому напрямі. Загалом, чим більше кут φ забірного конуса, тим менше осьове биття різальних вершин інструмента.

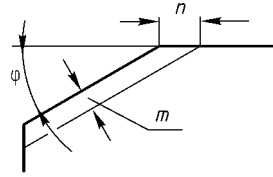


Рис. 1.4. Забірний конус

Величину осьового биття n (рис. 1.4), залежно від кута φ забірного конуса, можливо розрахувати за виразом:

$$n = \frac{m}{\sin \varphi}. \quad (1.1)$$

Так у разі биття різальної кромки на величину $m = 0,01$ мм осьове биття n буде дорівнювати:

φ , град	15	30	45	60
n , мм	0,39	0,20	0,14	0,12

Значний вплив на процес різання має і той факт, що розвертки з великими кутами в плані φ мають менше співвідношення ширини до товщини стружки, що сприятливо позначається на процесі різання.

У той же час існують так-звані "радіусні" (рис. 1.5а) розвертки [50] забірна частина 1 яких окреслена за радіусом, а калібрувальна частина 2 є циліндричною. Розвертки такої конструкції виконують "плаваючими" і застосовують для оброблення отворів діаметрів більше 50 мм.

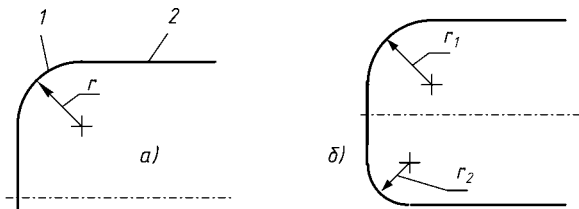


Рис. 1.5. Радіусна розвертка

Розвертки з радіусною забірною частиною забезпечують деяке зменшення шорсткості обробленої поверхні, проте заточувати кожен зуб доводиться окремо із застосуванням спеціального оснащення.

Це викликає певні труднощі виготовлення розвертки необхідного розміру, крім того через відсутність на калібрувальній частині калібрувальних стрічок, розвертка швидко втрачає свій розмір, а також схильна до коливань.

Існує конструкція “радіусної” розвертки з несиметричним заточуванням (рис. 1.5б), при якому центри дуг, що створюють різальні кромки протилежних зубів зміщені щодо один-одного уздовж осі інструмента. Вважається, що така розвертка сама встановлюється в оптимальне положення, що є вельми спірним питанням.

Останнім часом набули значної реклами розвертки із ступінчастим (рис. 1.6) заточуванням забірної частини (хоча конструкція відома ще з 30-х років 19 століття). У такої розвертки відсутній забірний конус, зуби виконані з рівномірним кроком по колу. Замість забірної конуса розвертка має низку циліндричних кілець різного діаметра ($\delta = 0,05 \dots 0,02$ мм), забірний конус виглядає, як піраміда складена із кілець.

Окремі дослідники [10, 11, 50] стверджують, що розвертка ступінчастого заточування перевершує звичайну за якістю отримуваної поверхні і має наступні переваги:

- вигідніше відношення товщини стружки до її ширини;
- більш рівномірна робота зубів, зважаючи на менше биття забірної частини.

Однак, перелічені “переваги” досить суперечливі, адже розвертка не зрізує припуск, а зминає його. Не тільки передні, але й задні кути розвертки з кільцевою забірною частиною дорівнюють нулю⁹. Отже, розвертка замість зрізування – зминає припуск на оброблення, через це їх галузь застосування обмежується обробленням пластичних матеріалів, що допускають відносно легке деформування.

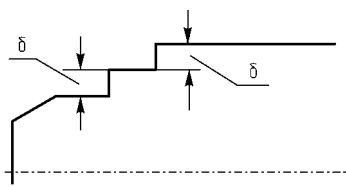


Рис. 1.6. Розвертка ступінчаста

Роботами [2, 52] доведено, що розвертки з кільцевим заточуванням не виключають появи подряпин і рисок, але мають суттєво меншу розмірну стійкість.

Різновидом розверток з кільцевим заточуванням є розвертки дискової конструкції [50]. Така розвертка є диском завтовшки 2...3 мм

⁹Задні кінематичні кути такої розвертки взагалі є від’ємними.

і зовсім не має забірного конуса. Це простий диск із зубцями. Розповсюдження така конструкція так само не отримала. Зазвичай її використовують для оброблення не дуже точних деталей.

Шабрувальні розвертки

З метою зменшення шорсткості обробленої поверхні іноді застосовують шабрувальні розвертки (рис. 1.7). Зуби такої розвертки мають від'ємний передній кут до -30° , а калібрувальна частина заточена нагостро, без будь-яких стрічок або фасок, тому такий зуб здійснює не різання, а шабрування оброблюваної поверхні.

Не дивлячись на позитивні результати (оброблена поверхня має суттєво зменшену шорсткість) така розвертка не знайшла широкого застосування.

По-перше, зовнішній діаметр інструмента утворено гострими кромками і виконати циліндричну частину розвертки заданого діаметра дуже складно.

По-друге, заточені на-гостро кромки дуже швидко затуплюються і розвертка втрачає діаметральний розмір (розмірну стійкість).

По-третє, не маючи циліндричних фасок шабрувальна розвертка схильна до коливань і дуже часто утворює отвір з поздовжніми ризками. Запобігти цьому можливо підібравши відповідні режими різання, але це значно ускладнює її застосування.

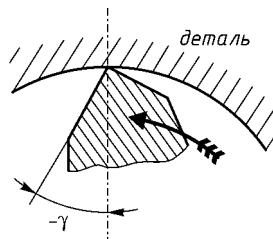


Рис. 1.7. Розвертка шабрувальна

Картриджні розвертки

Останнім часом низка провідних корпорацій (Sandvik Coromant¹⁰, TaeguTeg¹¹ та ін.) пропонує на ринку інструмента розвертки оснащені змінними картриджами. Такі розвертки мають цільний корпус, на якому можливо механічно закріпити змінні елементи (картриджі), з різними різальними пластинами виготовленими із твердого сплаву.

Безумовно, можливість зміни різального елемента та ще й виготовленого із твердого сплаву підвищує продуктивність інструмента,

¹⁰CoroReamer 830. Режим доступу : https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/reamer_830/pages/default.aspx. – Назва з екрану.

¹¹Обработка отверстий. Режим доступу : <http://taegutec.com.ua/pdf/cover/D.pdf>. – Назва з екрану.

однак усім таким конструкціям притаманні ті ж проблеми, що і звичайним розверткам.

Узагальнення

У теперішній час, існує велика кількість різних рекомендацій щодо покращення операції розвертування. У той же час якість розвертування, як правило, не задовольняє вимоги сучасної промисловості, про що красномовно свідчить велика кількість рекомендацій поліпшення процесу розвертування, що носять, як видно з огляду, досить суперечливий характер.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу стану ринку можна зробити висновок, що питання поліпшення якості розвертування в теперішній час не вирішене.

Слід зазначити, що вся різноманітність конструктивних виконань розвертки, як інструмента, що утворює поверхню отвору, неодмінно базувалась на вдосконаленні процесу різання. У той же час майже не використовуються інші методи формоутворення, зокрема пластичне деформування приповерхневих шарів оброблюваного отвору.

1.2 Оброблення вигладжуванням

Останнім часом все більшого поширення набувають комбіновані інструменти, які суміщують процеси різання і пластичного деформування і мають низку переваг перед процесами суто різання або деформування. Їм властиві:

- нижча шорсткість обробленої поверхні за однакових умов (витратах);
- зміцнення приповерхневого шару оброблюваної поверхні, що в переважній більшості випадків є позитивним чинником;
- вища розмірна стійкість інструмента;
- відносно висока економічність процесу.

У той же час, проста заміна інструмента, який утворює поверхню отвору методом різання на інструмент, що працює за методом пластичного деформування приповерхневих шарів вже готового отвору, не дозволяє повністю вирішити питання оброблення точних отворів. Точність оброблення отвору деформуванням у значній мірі залежить від точності попередньої (чорнової) операції підготовки отвору.

Дорнування

Широко відомий метод дорнування¹² отворів вимагає застосування спеціального устаткування і не є універсальним. У загальному випадку дорнування здійснюють кулькою або дорном (рис. 1.8).

Процес дорнування дуже добре виявив себе під час оброблення деталей гідравлічної апаратури, але треба враховувати, що він супроводжується значною зміною діаметра обробленої деталі.

Дорнування кулькою не забезпечує прямолінійності осі обробленого отвору. Це пояснюється тим, що кулька контактує з оброблюваною поверхнею по кільцю малої ширини і ніяк не центрується в оброблюваному отворі.

Дорнування циліндричним дорном дозволяє отримати отвір з достатньо прямою віссю, але для деталей типу труби. Дорнування деталей корпусного типу циліндричним дорном практично неможливе через значні габарити інструмента.

Додатковою проблемою дорнування є необхідність мати великогабаритне устаткування – прес або протягувальний верстат.

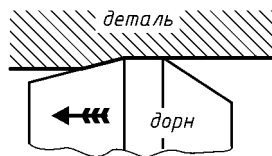


Рис. 1.8. Дорнування

Розкочування

Більш універсальним є метод розкочування роликми або кульками¹³. Проте розкочувальний інструмент (рис. 1.9) має досить складну конструкцію, а кінцевий розмір оброблюваного отвору значною мірою залежить від технологічного припуску, що вимагає ретельної підготовки отвору під оброблення розкочування.

Для утворення отвору під розкочування і саме розкочування необхідно застосовувати різні інструменти та різні верстати.

¹²Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. — М.: Машиностроение — 1987. — Том 4. С. 328.

Скворцов В. Ф., Арляпов А. Ю. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра. Монография. — Томск: Издательство ТПУ. — 2005. — С. 92.

Скворцов В. Ф., Охотин И. С., Иванова А. С., Орманов Б. К. Влияние геометрических параметров заготовок на процесс дорнования.// Обработка металлов. — 2013. — № 3. — С. 4-8.

¹³Раскатывание отверстий. Режим доступа : <http://delta-grup.ru/bibliot/6/88.htm>. — Назва з екрану.

Гжиров Р.И. Краткий справочник конструктора. Режим доступа : <https://books.google.com.ua/books?isbn=5458334221>. — Назва з екрану.

Під час розкочування сталеві ролики *1* (голки або циліндри) деформують приповерхневі шари отвору методом вдавлювання. У результаті, завдяки багаторазовому вдавлюванню, поверхневі шари матеріалу отвору отримують подрібнені зерна та підвищену твердість. Однак, сам інструмент має значні розміри та складається із багатьох конструктивних елементів, що робить його достатньо дорогим¹⁴.

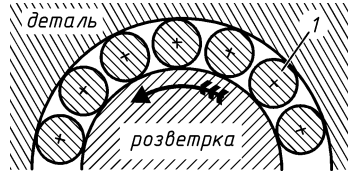


Рис. 1.9. Розкочування

Ще одним суттєвим недоліком процесу розкочування є мала точність оброблюваного отвору. За даними корпорації Heimatec–OsT¹⁵ розкочувальний інструмент забезпечує шорсткість $Ra = 0,1 \text{ мкм}$ з одночасним підвищенням твердості приповерхневих шарів обробленого отвору на 10...20%, але точність обробки не перевищує 10 квалітету, що є прийнятним тільки для гідравлічних циліндрів.

Суттєвим фактором, який обмежує застосування розкочувального інструмента є його габарити, найменший діаметр оброблюваного отвору становить 30...35 мм тому розкочування застосовують, в основному, для обробки гідроциліндрів.

Вигладжування

У даний час запропоновано низку конструкцій комбінованих розверток, що суміщують процеси різання і пластичного деформування. Розвертка різально-вигладжувальної конструкції має низку переваг перед розвертками звичайної конструкції та інструментами суто пластичного деформування:

- економічність, зважаючи на можливість отримання отворів високої точності одним інструментом, а не комплектом і як наслідок підвищена продуктивність;
- забезпечення зміцнення приповерхневих шарів отвору, що є позитивним чинником;
- підвищена зносостійкість приповерхневого шару отвору внаслідок збільшення мікротвердості на значну глибину.

¹⁴Tiefbohr Systeme “СТ Групп”, Россия. Режим доступу : <http://www.s-t-group.com>

¹⁵Heimatec–OsT. Режим доступу : <http://www.heimatec-ost.ru>

Існує декілька конструкцій розверток, котрі одночасно суміщують процеси різання та пластичного деформування¹⁶.

У більшості таких конструкцій (рис. 1.10) деформування здійснює пружний елемент 2 виконаний із твердого сплаву, який розташовано за різальним елементом 1. Їх загальним недоліком є складність конструкції і схильності до коливань через наявність значної кількості з'єднань.

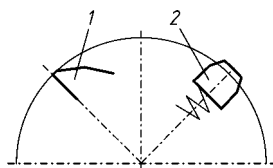


Рис. 1.10. Вигладжування

На противагу складеним конструкціям розвертка запропонована Григорьевим [6, 7, 8, 9] є цільною твердосплавною розверткою, в якій частина зубів виконує функцію різальних елементів, тобто здійснює зняття основного припуску під обробку різанням, а інша, маючи деяке діаметральне перевищення, зминає мікронерівності оброблюваної поверхні. Розвертка забезпечує середнє арифметичне відхилення профілю поверхні не більше 0,32 мкм та 7 квалітет. Проте, як стверджує сам автор, призначена тільки для обробки кольорових металів.

Запропонована [12] конструкція твердосплавної різально-вигладжувальної розвертки яка має форму "... багатогранника, що має два різальні і два ущільнюючі елементи. При такому розташуванні елементів радіальні складові, що виникають у процесі різання, сприяють виникненню контактного тиску, достатнього для пластичної деформації мікронерівностей оброблюваної поверхні. ...".

Однак, запропонована конструкція розвертки має ряд суттєвих недоліків, які обмежують галузь її застосування.

По-перше, розвертка має тільки два різальні елементи, що призводить до їх перевантаження і зниження продуктивності.

По-друге, шорсткість поверхні ($Ra = 1,0 \dots 2,5$ мкм), що досягається, можливо отримати і у випадку застосування стандартних розверток, так-що в цьому плані запропонована конструкція в разі оброблення сталей переваг не має.

¹⁶Якухин В. Г. Высокотехнологичные методы металлообработки : учебник / В. Г. Якухин. Под. ред. проф. О. В. Таратынова. – М.: МГНУ, 2011. – 362 с.

Некоторые конструктивные особенности разверток [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://libraryno.ru/3-3-3-nekotorye-konstruktivnye-osobennosti-gazvertok-rejush_instr_vis/. – Назва з екрану.

Тонконогий В. М. Повышение точности и качества обработки конических отверстий абразивно-выглаживающим развертыванием/ В. М.Тонконогий, Л. М. Перпери, В. М. Рязанцев, Ф. М. Голобородько. // Резание и инструмент в технологических системах. – 2013. – №83. – С. 264–268.

Узагальнення

Отже, у даний час не існує повноцінної працездатної конструкції різально-вигладжувальної розвертки, яка б забезпечувала істотне підвищення якості розвертування у випадку оброблення конструкційних сталей. Тому питання про створення розвертки, що суміщає в собі процеси різання і пластичного деформування, і забезпечує подальше підвищення якості розвертування конструкційних сталей залишається актуальним.

Метою подальшого дослідження є розробка розвертки, що суміщує процеси різання і пластичного деформування та забезпечує одним інструментом (при обробленні конструкційних сталей) середнє арифметичне відхилення профілю в межах $0,63 \dots 0,32$ мкм за режимами обробки, що існують у виробництві.

За основний оброблюваний матеріал під час проведення досліджень прийнята сталь 45, як найбільш поширена в машинобудуванні. Вибір стали 45 аргументувався ще й тим, що за своїми фізико-механічними властивостями вона займає проміжне положення серед таких широко вживаних сталей як сталі 40, 40Х, ШХ15. Тому можливо стверджувати, що конструкція і геометричні параметри розвертки розробленої на базі сталі 45, як основної в період проведення експериментів, будуть прийнятні під час оброблення конструкційних сталей інших марок.

1.3 Різально-вигладжувальна розвертка

Перевищення вигладжувальних елементів

Принцип роботи різально-вигладжувальної розвертки засновано на поєднанні процесів різання і пластичного деформування мікронерівностей оброблюваної поверхні. Це досягається завдяки тому, що робоча частина розвертки має як різальні так і вигладжувальні елементи.

У процесі оброблення отвору різальні елементи зрізують основний припуск на оброблення. Наступні за ними вигладжувальні елементи здійснюють пластичне деформування поверхні утвореної різальною частиною. Конструктивно це досягається збільшенням діаметра вигладжувальної частини на величину 2Δ відносно діаметра різальної частини. Основні елементи різально-вигладжувальної розвертки і їх розташування подано на рис. 1.11. На рис. 1.12 подано основні геометричні параметри різально-вигладжувальної розвертки.

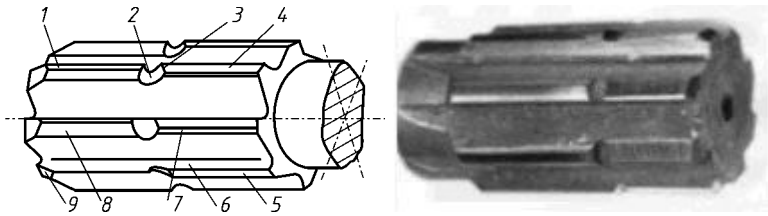


Рис. 1.11. Різально-вигладжувальна розвертка

- 1 – циліндрична фаска шириною 0,1...0,2 мм на різальних елементах;
- 2 – задня поверхня забірною конуса вигладжувального елемента, який здійснює пластичне деформування приповерхневих шарів отвору;
- 3 – перехідна кромка вигладжувального елемента утворена перетином забірною конуса та циліндричною поверхнею вигладжувального елемента;
- 4 – циліндрична поверхня вигладжувального елемента (вигладжувальна стрічка f_a);
- 5 – передня кромка вигладжувального елемента;
- 6 – передня поверхня вигладжувального елемента;
- 7 – задня (неробоча) поверхня вигладжувального елемента;
- 8 – задня (неробоча) поверхня різального елемента;
- 9 – задня поверхня забірною конуса різального елемента вигладжувальної розвертки.

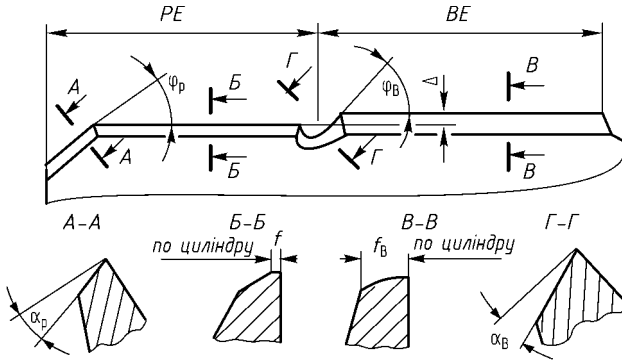


Рис. 1.12. Схема різально-вигладжувальної розвертки:

- PE – різальний елемент розвертки, котрий здійснює зрізування припуску на оброблення отвору. Він має такі ж геометричні параметри як і звичайна циліндрична розвертка;
- BE – вигладжувальний елемент, який здійснює вигладжування поверхні отвору утвореної різальними елементами. Діаметрально він більший за попередній різальний елемент PE ;
- Δ – величина перевищення вигладжувальної частини над різальною.

Зазвичай, після одинарного розвертування, поверхня отвору має середнє арифметичне відхилення профілю в межах $Ra = 2,5 \dots 5$ мкм. Така поверхня отвору має приблизно однакові висоти мікронерівностей та однакові відстані між ними [41], тобто має симетричний регулярний профіль.

Теоретично, для таких поверхонь, висота перевищення Δ вигладжувальних елементів над різальними, повинна дорівнювати половині висоти мікронерівностей поверхні обробленої різальними елементами, тобто половині Rz або $\Delta = 1/2 Rz$. Для величини середнього арифметичного відхилення профілю поверхні $Ra = 2,5 \dots 5$ мкм висота мікронерівностей складає в середньому 15 мкм [41]. Отже, величина перевищення Δ , без урахування пружних деформацій, має бути рівною приблизно 7,5 мкм.

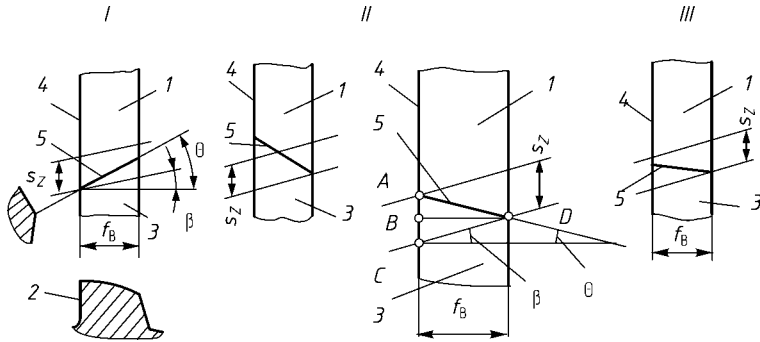


Рис. 1.13. Варіанти вигладжувального елемента

- 1 – циліндрична поверхня вигладжувального елемента;
- 2 – передня поверхня вигладжувального елемента;
- 3 – задня поверхня забірного конуса вигладжувального елемента;
- 4 – передня кромка вигладжувального елемента;
- 5 – перехідна кромка вигладжувального елемента;
- f_B – ширина вигладжувальної стрічки.

Конструктивні параметри

В якості базової конструкції різально-вигладжувальної розвертки доцільно прийняти стандартну машинну розвертку з укороченою робочою частиною. Шляхом зміни її окремих елементів можна створити таку конструкцію різально-вигладжувальної розвертки, яка б мінімально відрізнялася від вже існуючих стандартних конструкцій. Це значно спрощує, як виготовлення різально-вигладжувальних розверток, так і їх промислове застосування.

Змінюючи розвертку стандартної конструкції можливо отримати декілька варіантів різально-вигладжувального елемента.

Найбільш простими, з конструктивних міркувань, є конструкції за схемами I і II рис. 1.13. Їх загальною ознакою є відсутність будь-яких перехідних поверхонь між передньою 2 і циліндричною 1 поверхнями вигладжувального елемента розвертки.

Відрізняються ж вони кутом нахилу Θ перехідної кромки 5 (яка утворюється перетином циліндричної поверхні 1 вигладжувального елемента і задньою поверхнею 3 його забірного конуса) відносно площини перпендикулярної до осі інструмента: додатного в схемі I і від'ємного в схемі II.

Вигладжувальний елемент, виконаний за схемою I, деформує мікронерівності оброблюваної поверхні своєю передньою поверхнею¹⁷ 2 та кромкою 4, утвореною перетином передньої поверхні 2 вигладжувальної стрічки 1 з циліндричною поверхнею вигладжувальної частини.

У схемі II деформування мікронерівностей здійснюється перехідною кромкою 5, утвореною перетином вигладжувальної стрічки 1 і задньою поверхнею 3 забірного конуса.

Під час аналізу роботи вигладжувальних елементів розвертки необхідно враховувати незначну товщину припуску на вигладжування, орієнтовно 0,01 мм. Через це, процеси деформування відбуваються в зоні кромок 4 або 5, залежно від прийнятої схеми інструмента.

Конструктивно вигладжувальні елементи такого типу можна отримати на універсальних заточувальних верстатах.

Розглянемо умови деформування мікронерівностей приповерхневих шарів оброблюваної поверхні отвору вигладжувальними елементами виконаними за схемами I і II.

Деформування кромкою

Умовою існування першої схеми, коли деформування мікронерівностей здійснюється передньою поверхнею в околицях кромки 4 (рис. 1.13 схема I), є нерівність:

$$\Theta > \beta, \quad (1.2)$$

де Θ – кут нахилу перехідної кромки 4 відносно площини перпендикулярної до осі інструмента;

β – кут між напрямом результуючого руху (вектором швидкості) і торцевою площиною (площиною що є перпендикулярною до напрямку подачі).

Величину кута β можливо знайти із співвідношення

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{s}{\pi D}, \quad (1.3)$$

де s – осьова подача інструмента, мм/об;

D – діаметр інструмента (розвертки або отвору).

¹⁷Зважаючи на незначний припуск під вигладжування рівний 0,01 мм можливо стверджувати, що деформування здійснюється тільки кромкою.

Перетворюючи вирази (1.2) і (1.3) отримаємо умову деформування мікронерівностей передньою кромкою 4 вигладжувального елемента, тобто умову існування схеми I, у вигляді нерівності:

$$\operatorname{tg} \Theta > \frac{s}{\pi D}. \quad (1.4)$$

Деформування забірним конусом

Розглянемо умови існування схеми II деформування мікронерівностей оброблюваної поверхні (рис. 1.13 схема II), поверхнею 3 забірного конуса вигладжувального елемента в околиці кромки 5. Для простоти рішення, розглянемо випадок коли деформування здійснюється всією перехідною кромкою 5 (точніше в околиці кромки 5). У цьому випадку кут Θ нахилу перехідної кромки 5, щодо площини перпендикулярної осі інструмента можна знайти з виразу

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{\overline{AB}}{f_B}, \quad (1.5)$$

де f_B – ширина вигладжувальної стрічки I.

Довжину відрізка \overline{AB} можливо знайти з виразу

$$\overline{AB} = \frac{s}{Z} - \overline{BC}, \quad (1.6)$$

де s – величина подачі інструмента, мм/об;

Z – кількість зубів розвертки.

У свою чергу

$$\overline{BC} = f_B \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{s}{\pi D} \right) \right]. \quad (1.7)$$

Після підставки виразів (1.6) і (1.7) у вираз (1.5) отримаємо

$$\operatorname{tg} \Theta = \left(\frac{1}{z f_B} - \frac{1}{\pi D} \right) s. \quad (1.8)$$

На підставі отриманого виразу (1.8) можна стверджувати, що умовою деформування мікронерівностей оброблюваної поверхні перехідною кромкою 5 є нерівність:

$$\Theta \geq \operatorname{arctg} \left[s \left(\frac{1}{z f_B} - \frac{1}{\pi D} \right) \right]. \quad (1.9)$$

Окремим випадком варіантів I і II може бути випадок, коли деформування мікронерівностей здійснюється одночасно як “передньою кромкою 4”, так і “перехідною 5” (рис.1.13 схема III). Умову існування такого випадку можна визначити розглядаючи нерівності (1.4) і (1.9) з яких отримуємо наступний вираз:

$$\operatorname{arctg} \frac{s}{\pi D} \geq \Theta \geq \operatorname{arctg} \left[s \left(\frac{1}{z f_B} - \frac{1}{\pi D} \right) \right] \quad (1.10)$$

або

$$\frac{s}{\pi D} \geq \operatorname{tg} \Theta \geq \left[s \left(\frac{1}{z f_B} - \frac{1}{\pi D} \right) \right]. \quad (1.11)$$

Мінімальна величина перевищення

Вигладжувальний елемент, виконаний за схемою I, деформує мікронерівності оброблюваної поверхні своєю передньою кромкою 4 заточеної нагостро (його можливо уподібнити стругальному різцю з нульовими переднім і заднім кутами та деяким, не рівним нулю, кутом λ).

Маючи перевищення, такий елемент буде заглиблюватись в оброблювану поверхню і при переміщенні по ній деформувати мікронерівності.

Проте, через відсутність перехідних поверхонь між передньою поверхнею 2 і задньою 1 (циліндричною вигладжувальною стрічкою f_B), можливе зрізування мікронерівностей замість їх вигладжування.

Перевірку цього припущення можна провести скориставшись результатами праць Н.П. Львова [17], згідно яким мінімальна можлива (критична) товщина a_{min} шару металу, що зрізується, визначається залежністю:

$$a_{min} = 0,293 \rho, \quad (1.12)$$

де ρ – радіус округлення різальної кромки, мкм.

Для визначення радіуса округлення ρ кромки 4 можна скористатися формулою [17] за якою:

$$\rho = 35 - 0,35 (\gamma + \alpha), \quad (1.13)$$

де γ – передній кут різального леза в радіанах;

α – задній кут різального леза в радіанах.

Підставивши в формули (1.12) і (1.13) відповідні значення $\alpha = 0^\circ$ та $\gamma = 0^\circ$, отримаємо критичну товщину зрізуваного шару

$$a_{min} = 10,3 \text{ мм.}$$

Як бачимо, величина критичної товщини зрізу $a_{min} = 10,3 \text{ мкм}$ порівняна з, раніше розрахованою, орієнтовною величиною перевищення Δ рівною $7,5 \text{ мкм}$ (сторінка 24). Отже, можна стверджувати, що в процесі вигладжування можливе зрізування мікронерівностей замість їх пластичного деформування.

Разом з цим, через малу товщину шару мікронерівностей, що деформуються, сумірною з критичною товщиною шару, що зрізається, можна стверджувати, що величина кута забірного конуса φ_v вигладжувального елемента не має істотного впливу на процес вигладжування приповерхневих шарів отвору.

У той же час, збільшення кута φ_v забірного конуса сприяє зменшенню осевого биття забірної частини вигладжувального елемента, що важливе для його нормальної роботи. Тому величина кута φ_v забірного конуса прийнята рівною 45° для всіх схем виконання вигладжувального елемента.

З метою експериментальної перевірки висловленого припущення, щодо можливості зрізування мікронерівностей замість їх вигладжування, була виготовлена партія розверток згідно схемі I виконання вигладжувального елемента.

При виготовленні інструмента величина перевищення, на підставі раніше проведених розрахунків, була прийнята рівною $0,01 \text{ мм}$. Після обробки перших же отворів па передньої поверхні 2 більшості вигладжувальних елементів були виявлені сліди сходу стружки.

Таким чином, на підставі теоретичної та експериментальної перевірки висловлених припущень (відносно можливості появи процесів різання замість пластичного деформування) встановлено, що вигладжувальний елемент виконаний за схемою I не виключає можливість того, що в процесі оброблення отвору замість вигладжування буде відбуватись зрізування приповерхневих шарів оброблюваного отвору. Тому така схема інструмента в подальших дослідженнях не використовувалась.

Форма вигладжувального елемента

У вигладжувального елемента виконаного за схемою II, деформування мікронерівностей оброблюваної поверхні здійснюється в око-

лиці перехідної кромки 5, яка утворена перетином поверхні вигладжувальної стрічки f_v та задньої поверхні забірного конуса 3 вигладжувального елемента.

Теоретично, виконання вигладжувального елемента за такою схемою забезпечує пластичне деформування мікронерівностей без їх зрізування. Для цього вигладжувальний елемент виконують з від'ємним переднім кутом на забірному конусі в межах $-82 \dots -86^\circ$. Приблизно такі ж самі кути має дорн.

У цьому випадку мікронерівності оброблюваної поверхні деформуються не тільки перехідною кромкою 5, але й прилеглою до неї частиною забірного конуса 3.

Проте, у зазор між задньою поверхнею 3 забірного конуса й поверхнею отвору можливе потрапляння стружки, яка утворилась під час роботи різальних елементів.

Для перевірки цього припущення були проведені контрольні досліді. Спочатку отвір обробляли на глибину рівну довжині різальної частини розвертки. Потім інструмент виводили із оброблюваного отвору й ретельно очищали від стружки. Після цього обробка продовжувалася. Таким чином виключалася можливість попадання стружка у верхню частину оброблюваного отвору.

Поверхня таких отворів була чистою на вході й мала задири на нижній частині де вигладжувальні елементи працювали по неочищеній поверхні. Контрольні зразки оброблені за один прохід (без проміжного очищення) мали задири на всій поверхні зразка від початку до кінця.

Одночасно на зминаючий поверхні 1 леза розвертки (рис. 1.14) були присутні частки наросту 2, хоча сама вигладжувальна стрічка 3 була достатньо чистою

Проміжній схемі виконання вигладжувального елемента, коли деформування мікронерівностей здійснюється як передньою 4 так і перехідною 5 кромками, притаманні недоліки обох схем. Таким чином, на підставі проведеного аналізу працездатності різних конструкцій вигладжувального елемента,

а також експериментальної перевірки висловлених у ході експерименту припущень можна стверджувати, що для нормальної роботи

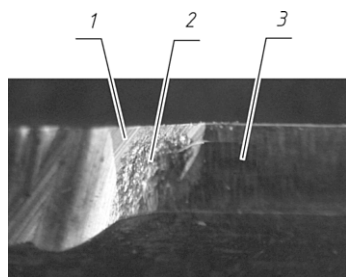


Рис. 1.14. Наріст

різально-вигладжувальної розвертки необхідна відсутність елементів різання в процесі деформування мікронерівностей оброблюваної поверхні, а також виключення можливості попадання стружки, яка утворилася під час розвертування, між деформуючою поверхнею інструмента і оброблюваною поверхнею отвору.

Конструкція вигладжувального елемента, що відповідає цим вимогам, може бути отримана при заточуванні вигладжувальної стрічки $f_{\text{в}}$ з перехідною радіусною кривою, радіусом r меншим радіуса R самої розвертки рис.1.15а.

Величину радіуса r перехідної поверхні можна визначити із наступних співвідношень:

$$r = \frac{a_1^2 + a_2^2}{2a_2}, \quad (1.14)$$

$$a_1 = (R - h) \sin \alpha,$$

$$a_2 = R - (R - h) \cos \alpha,$$

$$\sin \alpha = \frac{f_{\text{зм}}}{R}, \quad (1.15)$$

де h – заниження зминаючої фаски. Практично $h = \Delta$;

$f_{\text{зм}}$ – ширина зминаючої фаски.

Координати h_1 та h_2 центра (рис. 1.15) поверхні радіуса r відносно осі розвертки, визначаються з виразів (кут α за виразом 1.15)

$$h_1 = f_{\text{зм}}^2 (R - r) \cos \alpha, \quad (1.16)$$

$$h_2 = (R - r) \sin \alpha.$$

Однак, не зважаючи на простоту рішення, що здається, запропонована схема має істотний недолік – необхідність заточувати кожен вигладжувальний елемент окремо, здійснюючи при цьому коливальні рухи відносно центру, який не співпадає з віссю інструмента. Це важко здійснити і вимагає застосування спеціального оснащення. Одночасно зміна розміру розвертки (діаметра) вимагає повного переналаштування всього

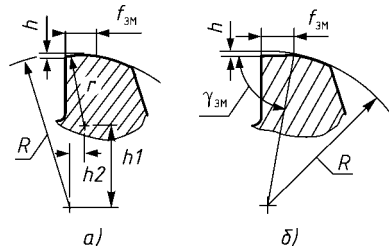


Рис. 1.15. Профіль вигладжувального елемента

оснащення. Через нетехнологічність така схема не може бути використана в промисловості.

Проте, можливо замінити перехідну радіусну поверхню прямолінійною фаскою f_{3M} за рис. 1.15б. Така фаска будучи нахиленою на деякий кут γ_{3M} до оброблюваної поверхні, здійснює пластичне деформування мікронерівностей оброблюваної поверхні. Одночасно досягається плавність процесу вигладжування.

Запропонована схема виконання вигладжувального елемента відповідає умовам необхідним для стабільної роботи інструмента, проста у виготовленні, може бути виконана на універсальному устаткуванні що існує та не вимагає висококваліфікованої праці.

Слід враховувати, що за залежністю (1.3) для стабільної роботи інструмента необхідно, щоб величина кута Θ (кут нахилу перехідної кромки до вектора швидкості) була більше деякої критичної величини Θ_{min} яка залежить від діаметра розвертки і величини подачі. Мінімальна величина критичного кута Θ_{min} може бути визначена з нерівності (1.4 на с. 27).

Необхідно також відзначити, що в запропонованій схемі виконання вигладжувального елемента із змінюючою фаскою f_{3M} величина кута змінання γ_{3M} буде різною для різних значень перевищення Δ і діаметрів D інструмента. Величина кута змінання γ_{3M} може бути розрахована за формулою

$$\sin \gamma_{3M} = \frac{D - 2\Delta}{D}, \quad (1.17)$$

де D – діаметр розвертки (оброблюваного отвору);

Δ – величина перевищення деформувальної частини над різальною.

Для розверток із перевищенням $\Delta = 0,01$ мм та діаметром D у межах 10... 50 мм кут змінання γ_{3M} становить:

D , мм	10	15	20	30	40	45	50
γ_{3M} , град.	–86,4	–87	–87,4	–88	–88,2	–88,3	–88,4

Із наведених залежностей можливо визначити, що величина кута змінання γ_{3M} знаходиться в межах $-86 \dots -88^\circ$ для діаметрів 10... 50 мм та зменшується із збільшенням діаметру D і зменшенням величини перевищення Δ .

Слід зазначити, що в схожому процесі обробки отворів методом пластичного деформування приповерхневих шарів – протягуванням

деформувальними протяжками, за дослідями О. М. Розенберга [37, 38] оптимальна величина кута зминання γ_{3M} становить $-85 \dots -87^\circ$, що підтверджує правильність вибраної конструкції вигладжувального елемента різально-вигладжувальної розвертки.

Ширина зминаючої фаски f_{3M} залежить від діаметра розвертки і величини перевищення Δ , і може бути визначена з рівняння:

$$f_{3M} = \frac{D}{2} \cos \gamma_{3M}. \quad (1.18)$$

Для розверток із перевищенням $\Delta = 0,01$ мм та діаметром D у межах $10 \dots 50$ мм зминаюча фаска f_{3M} становить:

D , мм	10	15	20	30	40	45	50
γ_{3M} , °	-86,4	-87,0	-87,4	-88,0	-88,2	-88,3	-88,4
f_{3M} , мм	0,31	0,39	0,45	0,52	0,63	0,67	0,70

Вірогідність того, що вигладжуючий елемент, який має від'ємний кут зминання γ_{3M} рівний $-86 \dots -88^\circ$ зрізатиме мікронерівності в процесі роботи замість їх пластичного деформування, занадто мала. Проте, з метою експериментальної перевірки припущення, що вигладжувальний елемент із зминаючою фаскою f_{3M} здійснює в процесі обробки отвору розверткою тільки пластичне деформування мікронерівностей без їх зрізування, було проведено низку контрольних дослідів із режимами: швидкість обробки 3,9 і 8,2 м/хв, подача 0,25 і 0,72 мм/об; номінальний діаметр інструмента 18,5 мм.

У контрольних дослідях використовували зразки заздалегідь просвердлені з одного боку так, щоб товщина зразка, що залишилася, була на 2...3 мм менше довжини різальної частини розвертки (рис. 1.16), а діаметр свердла був більше діаметра розвертки використовуваної в ході дослідів. Досліди проводили на вертикально-свердлувальному верстаті 2A135 із застосуванням в якості ЗОР Укрінолу-2.

Заздалегідь підготовлений зразок закріплювали в трикулачковому патроні, встановленому на столі свердлувального верстата. Здійснювалося свердлення, занкерування і розвертування отвору різально-вигладжувальною розверткою на глибину різальної частини (довжина якої більше глибини отвору).

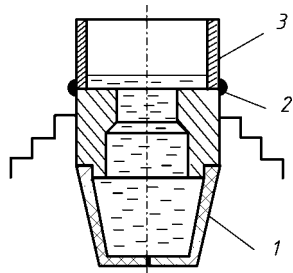


Рис. 1.16. Контрольний пристрій

Після цього розвертка виводилася з отвору. І розвертка і отвір ретельно промивались і очищались. На нижню частину зразка надівали пластикову чашку 1, а на верхній закріплювали на пластині 2 буртик 3.

Контейнер, що утворився заповнювали заздалегідь профільованою ЗОР, розвертка вводилася в отвір і здійснювалось його подальше оброблення всією розверткою напрохід.

Після остаточної обробки зразка розвертка виводилася з отвору, а вміст контейнеру фільтрувався через фільтрувальний папір.

Таким чином, у разі утворення стружки від зрізаних мікронерівностей оброблюваної поверхні вигладжувальними елементами розвертки, у контейнері повинна була залишитись зрізана стружка.

У той же час, після вивчення як інструменту безпосередньо після розвертування, так і фільтрувального паперу за допомогою мікроскопу (при 25-кратному збільшенні) стружка не була виявлена.

Узагальнення

Таким чином, можна стверджувати, що в разі виконання вигладжувального елемента із змінною фаскою $f_{зм}$ під кутом $\gamma_{зм}$ відбувається тільки пластичне деформування мікронерівностей оброблюваної поверхні без їх зрізування. Тому для проведення подальших досліджень було прийнято саме таку конструкцію різально-вигладжувальної розвертки.

Рівність величини параметру h (рис. 1.15 на с. 31) і перевищення Δ (рис. 1.12 на с. 24), необхідне для того, щоб стружка не попадала під вигладжувальні поверхні, досягається при заточуванні інструмента без застосування спеціального оснащення на універсальних верстатах загального машинобудування (рис. 1.17).

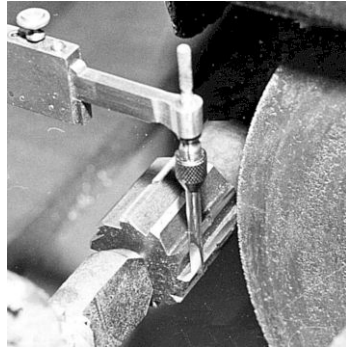


Рис. 1.17. Утворення змінної фаски

1.4 Параметри вигладжувальних елементів

1.4.1 Вигладжувальна стрічка

За часом вигладжувальна стрічка працює після калібрувальної, котра має суттєвий вплив на шорсткість поверхні обробленого отвору. Практика показала, що чим менша ширина калібрувальної стрічки, тим менша шорсткість обробленої поверхні. Із збільшенням ширини калібрувальної стрічки збільшується контактна площа інструмент/деталь. У результаті на калібрувальній стрічці виникає налипання дрібних частинок, які в підсумку утворюють на оброблюваній поверхні отвору подряпини.

Вигладжувальна стрічка різально-вигладжувальної розвертки остаточно визначає шорсткість обробленої поверхні. З метою перевірки цього твердження і вивчення впливу ширини вигладжувальної стрічки на шорсткість обробленої поверхні, була проведена низка експериментів.

Експерименти проводились із наступними режимами обробки:

- швидкість обробки 4,63 і 9,56 м/хв;
- подача 0,25; 0,43; 0,57 і 0,72 мм/об;
- номінальний діаметр обробки 22 мм;
- припуск під обробку 0,2 мм на діаметр.

Параметри різальної частини були вибрані на підставі рекомендацій “Загальномашинобудівних нормативів” [21] і становили:

- кут забірного конуса різальної частини $\varphi_p = 15^\circ$;
- передній кут $\gamma_p = 0^\circ$;
- ширина калібрувальної стрічки 0,1...0,2 мм.

Ширина вигладжувальної стрічки f_b змінювалася через 0,5 мм в інтервалі 0,5...1,5 мм. Вибір саме цього інтервалу обумовлений тим, що з одного боку на існуючих стандартних розвертках неможливо отримати більш широку стрічку, а з іншого боку при протягуванні деформувальними протяжками нижню межу ширини стрічки рекомендується виконувати не менше 0,5 мм [38].

Величина перевищення вигладжувальних елементів над різальними становила $\Delta = 0,01$ мм. Експерименти виконувались трьома серіями за незмінних умов. Шорсткість поверхні кожного зразка вимірювали в чотирьох взаємно перпендикулярних площинах, після чого отримані результати усереднювалися. Таким чином, кожне

отримане значення шорсткості є середнім з 12 вимірювань. Похибка вимірювання шорсткості Ra знаходилась в середньому в межах 17...20%. Випрямлення експериментальних кривих виконували за методом найменших квадратів [51].

У разі обробки із швидкістю 4,63 м/хв маємо:

$$\begin{aligned} 1) \quad s &= 0,25 \text{ мм/об}, & Ra &= (0,15f_b + 0,67) \pm 0,13 \text{ мкм}, \\ 2) \quad s &= 0,43 \text{ мм/об}, & Ra &= (0,23f_b + 0,65) \pm 0,12 \text{ мкм}, \\ 3) \quad s &= 0,57 \text{ мм/об}, & Ra &= (0,11f_b + 0,82) \pm 0,14 \text{ мкм}, \\ 4) \quad s &= 0,75 \text{ мм/об}, & Ra &= (0,57f_b + 0,64) \pm 0,21 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Враховуючи приблизний збіг шорсткості Ra для подач у межах 0,25...0,57 мм/об можливо отримати загальну залежність:

$$Ra = 0,16f_b + 0,71. \quad (1.20)$$

У разі обробки із швидкістю 9,55 м/хв маємо:

$$\begin{aligned} 1) \quad s &= 0,25 \text{ мм/об}, & Ra &= (0,10f_b + 1,83) \pm 0,34 \text{ мкм}, \\ 2) \quad s &= 0,43 \text{ мм/об}, & Ra &= (0,26f_b + 2,09) \pm 0,41 \text{ мкм}, \\ 3) \quad s &= 0,57 \text{ мм/об}, & Ra &= (0,55f_b + 1,60) \pm 0,32 \text{ мкм}, \\ 4) \quad s &= 0,75 \text{ мм/об}, & Ra &= (0,05f_b + 2,52) \pm 0,36 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Залежність шорсткості Ra від ширини вигладжувальної стрічки ($f_b = 0,5 \dots 1,5$ мм) отримана за результатами експериментів наведена на рис.1.18. З отриманих результатів видно, що значення шорсткості поверхні при швидкості обробки 9,55 м/хв мають більшу величину та більше розсіювання. Проте слід враховувати, що практично всі значення шорсткості лежать у зоні розсіювання.

Отвори оброблені розвертуванням із швидкістю 4,63 м/хв мають середнє арифметичне відхилення профілю в середньому не більше $1,25 \pm 0,15$ мкм для всіх комбінацій режимів обробки, а шорсткість зразків отриманих при швидкості 9,55 м/мін у середньому не більше $2,5 \pm 0,35$ мкм.

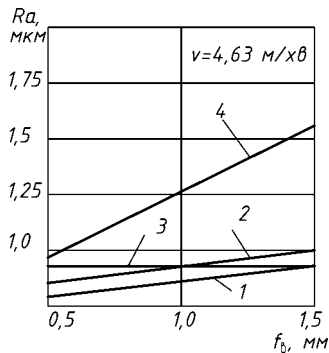


Рис. 1.18. Вплив вигладжувальної стрічки на шорсткість

Подача, мм/об: 1 – 0,25; 2 – 0,43;
3 – 0,57; 4 – 0,72

Експерименти показали, що зміна ширини вигладжувальної стрічки f_b у межах 0,5...1,5 мм викликає незначне збільшення шорсткості обробленої поверхні.

Збільшення шорсткості можливо пояснити тим, що із збільшенням ширини вигладжувальної стрічки подовжується зона взаємодії поверхні інструмента з поверхнею деталі.

Проведені досліді також показали, що із збільшенням подачі відбувається збільшення шорсткості обробленої поверхні для всіх величин ширини вигладжувальної стрічки.

Залежність шорсткості Ra від величини подачі $s = 0,25 \dots 0,72$ мм за результатами експериментів наведено на рис. 1.19 і описується наступними математичними залежностями.

У разі обробки із швидкістю 4,63 м/хв маємо:

- 1) $f_b = 0,5$ мм/об, $Ra = (0,45s + 0,66) \pm 0,16$ мкм,
- 2) $f_b = 1,0$ мм/об, $Ra = (0,81s + 0,63) \pm 0,17$ мкм, (1.22)
- 3) $f_b = 1,5$ мм/об. $Ra = (0,69 \cdot 2,65^s) \pm 0,25$ мкм.

У разі обробки із швидкістю 9,55 м/хв маємо:

- 1) $s = 0,25$ мм/об, $Ra = (1,37s + 1,48) \pm 0,38$ мкм,
- 2) $s = 0,43$ мм/об, $Ra = (1,52s + 1,39) \pm 0,41$ мкм, (1.23)
- 3) $s = 0,57$ мм/об, $Ra = (1,34s + 1,78) \pm 0,40$ мкм.

У той же час у роботах Розенберга [37, 33] показано, що при обробці отворів деформувальними протяжками (інструментом схожого типу), спостерігається зона поза-контактної деформації поверхневих шарів оброблюваного отвору (рис. 1.20).

Матеріал припуску 1 обтікає дорн 3 утворюючи зону 2 поза-контактної деформації. У цій зоні, не дивлячись на відсутність безпосереднього контакту між деталлю і інструментом, все одно відбувається пластичне деформування приповерхневих шарів отвору.

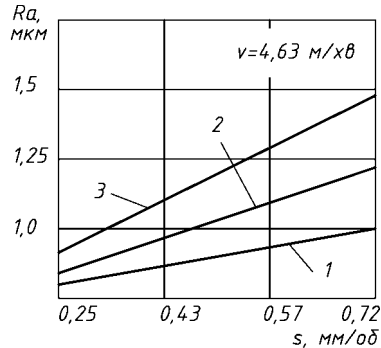


Рис. 1.19. Вплив подачі на шорсткість

Ширина стрічки f_b , мм: 1 – 0,5;
2 – 1,0; 3 – 1,5

Отже, можливо припустити, що під час обробки різально-вигладжувальними розвертками також повинна спостерігатися поза-контактна деформація. Величина зони поза-контактної деформації впливає на вибір геометричних параметрів вигладжувальних елементів, зокрема – ширину вигладжувальної стрічки f_b .

Згідно роботам [37, 38] безпосередньо за перетином змінючої площини і поверхнею вигладжувальної стрічки, повинна бути зона поза-контактної деформації¹⁸. У цій зоні немає безпосереднього контакту між поверхнями інструмент/деталь. За зоною поза-контактної деформації слідує зона безпосереднього контакту приповерхневих шарів отвору і вигладжувальної стрічки.

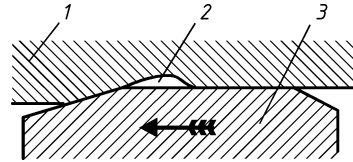


Рис. 1.20. Поза-контактне деформування

Проте в цій зоні контакт відбувається тільки за рахунок пружного відновлення (зменшення діаметра) оброблюваного отвору, тобто відбувається просте тертя за рахунок пружних деформацій. Ця частина вигладжувальної стрічки на кінцевий розмір отвору впливу не має, тому її можна видалити зробивши вигладжувальну стрічку меншої ширини, рівній довжині зони поза-контактної деформації.

З метою експериментальної перевірки висловленого припущення, відносно наявності зони поза-контактної деформації під час оброблення отворів різально-вигладжувальною розверткою, були проведені досліди за наступних умов:

- швидкість обробки 4 м/хв;
- подача $s = 1,0$ мм/об;
- перевищення $\Delta = 0,01$ мм;
- ширина вигладжувальної стрічки $f_b = 0,8$ мм;
- номінальний діаметр оброблюваного отвору 19 мм;
- товщина стінки отворів 2; 5; 10 і 15 мм;
- матеріал – сталь 45, твердість HB = 230 кг/мм² (2254 МПа).

Для виявлення зони поза-контактної деформації була використана методика розроблена Інститутом надтвердих матеріалів України. На

¹⁸Зона поза-контактної деформації – зона в якій відбуваються процеси деформування і яка розташована за межами площин поперечних січень, що проходять через крайні точки контактних поверхонь.

поверхні заздалегідь оброблених отворів, у двох діаметрально протилежних зонах розміром 3...4 мм, наносили плівку¹⁹, що містить алмазні зерна розміром 20...25 мкм.

Після нанесення плівки проводилося втискування алмазних зерен у приповерхневий шар металу. Втискування здійснювалося за допомогою різально-вигладжувальної розвертки з “натягом” 0,03 мм, в якій була відсутня різальна частина, тобто здійснювалось пластичне деформування без різання. Швидкість обробки дорівнювала 3 м/хв, подача незмінна 0,2 мм/об.

Далі, для безпосереднього проведення експерименту виготовлялась різально-вигладжувальна розвертка такого розміру, щоб з урахуванням діаметра заздалегідь обробленого отвору отримати перевищення 0,01 мм. Різальна частина в розвертки була відсутня, що необхідне для того, щоб не зрізати алмазний шар.

Під час оброблення отвору такою розверткою, на її робочих поверхнях повинні залишитися сліди у вигляді подряпин від алмазних зерен вдавнених у приповерхневий шар металу зразка. Отже, ділянки інструмента, що мають подряпини були в контакті з поверхнею деталі. Якщо ж в якій-небудь ділянці робочої частини інструмента подряпини не спостерігатимуться, це означає, що в цьому місці відбувається деформація поверхні зразка без безпосереднього контакту інструмента і деталі, тобто спостерігається поза-контактне деформування.

Слід відзначити, що проведення експериментів було пов’язане з певними труднощами оскільки зона, в якій можливо проявлення поза-контактної деформації не перевищувала 0,1...0,2 мм, що пов’язане з конструктивними особливостями інструмента.

З метою усунення деформування зразка від затиску в пристрої під час оброблення, зразок виконувався із спеціальним “кріпильним” фланцем з товщиною стінки 15 мм і відокремленим від “експериментальної” частини зразка виточкою з товщиною стінки 1,2 мм і шириною 6 мм.

Результати експерименту показали, що під час оброблення отворів у деталях з товщиною стінки 2 мм різально-вигладжувальними розвертками з перевищенням 0,01 мм, на вигладжувальній стрічці безпосередньо за зминаючою спостерігається зона поза-контактної деформації шириною 0,004...0,007 мм

¹⁹Нанесення алмазної (діамантової) плівки здійснювалось у лабораторії обробки різанням та деформуванням Київського Інституті надтвердих матеріалів Академії наук України.

Під час оброблення отвору в деталях з товщиною стінки 5 мм і більш зону поза-контактної деформації виявити не вдалось.

По-перше, із збільшенням товщини стінки ширина зони поза-контактної деформації зменшується, що підтверджено дослідями [37].

По-друге, алмазні зерна будучі абразивом, швидко зрізують поверхневий шар інструменту, а разом з ним і можливо наявну незначну зону поза-контактної деформації.

Отже, можна стверджувати, що під час оброблення різально-вигладжувальними розвертками тонкостінних деталей може спостерігатись зона поза-контактної деформації шириною 0,004...0,007 мм. Таким чином, поверхня вигладжувальної стрічки віддалена від зминаючої стрічки на відстань більше 0,004...0,007 мм здійснює тільки тертя за рахунок пружних деформацій.

Узагальнюючи результати експериментів вирішено, для підвищення розмірної стійкості інструмента прийняти ширину вигладжувальної стрічки f_b рівною 0,5 мм.

1.4.2 Кут забірного конуса

Одним з основних геометричних параметрів різальної частини розвертки, що впливають на шорсткість обробленої поверхні отвору, є кут забірного конуса.

З метою визначення впливу кута забірного конуса на шорсткість обробленої поверхні було проведено низку експериментів. Досліди проводилися при чотирьох значеннях швидкості обробки; 4,6; 6,8; 9,5 і 13,2 м/хв і при подачах 0,25; 0,43; 0,57 та 0,72 мм/об. Припуск під розвертування становив 0,3 мм на діаметр.

Різально-вигладжувальні розвертки, що використовували в ході експерименту мали наступні параметри:

- передній кут різальних елементів $\gamma_p = 0^\circ$;
- задній кут різальних елементів $\alpha_p = 8^\circ$;
- перевищення вигладжувальних елементів над різальними елементами $\Delta = 0,001$ мм;
- ширина вигладжувальної стрічки $f_b = 0,5$ мм;
- номінальний діаметр обробки 22 мм.

Вплив величини кута ϕ_p забірного конуса різальної частини на шорсткість обробленої поверхні досліджувався для значень кута ϕ_p

рівних 15; 30; 45 і 60° як найбільш поширених для машинних розверток загального машинобудування.

Вплив величини кута забірного конуса $\varphi_p = 15 \dots 60^\circ$ на шорсткість Ra поверхні отвору за результатами експериментів подано на рис. 1.21. У всіх випадках похибка визначення шорсткості не перевищувала 17...20%.

Опосередковано для швидкості оброблення 4,6 м/хв величину шорсткості Ra можливо описати залежністю²⁰

$$Ra = [(1,2 \cdot 10^{-3} \varphi_p^2 - 0,1 \varphi_p + 3,1) \pm 17\%] \text{ мкм.} \quad (1.24)$$

Проведені дослідження показали, що в умовах експерименту мінімальне значення шорсткості обробленої поверхні спостерігається у випадку, коли кут забірного конуса різальної частини $\varphi_p = 45^\circ$. Отже, для $\varphi_p = 45^\circ$ та швидкості оброблення 4,6 м/хв залежність шорсткості Ra від подачі описується наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} 1) \quad s &= 0.72 \text{ мм/об}, & Ra &= 0,2138 e^{0,1286s}, \\ 2) \quad s &= 0.57 \text{ мм/об}, & Ra &= 0,1783 e^{0,1317s}, \\ 3) \quad s &= 0.43 \text{ мм/об}, & Ra &= 0,0969 e^{0,1320s}, \\ 4) \quad s &= 0.25 \text{ мм/об}, & Ra &= 0,0596 e^{0,1203s}. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Як показали спостереження проведені в ході експерименту, процес утворення поверхні отворів супроводжується наростуванням для всіх комбінацій режимів обробки (швидкості та кута забірного конуса), незалежно від величини кута забірного конуса φ_p .

Вивчення форми наросту показало, що при величинах кута забірного конуса менш 45° вершина наросту виходить за циліндричну твірну різальних зубів розвертки, додаючи різальній частині розвертки більший діаметр.

Внаслідок цього фактична величина перевищення Δ вигладжувального елемента в процесі різання зменшується, а при значеннях кута забірного конуса $\varphi_p = 15^\circ$ стає близькою до нуля²¹. У результаті вигладжувальні елементи не мають достатньої дії на мікронерівності оброблюваної поверхні і її шорсткість виявляється збільшеною.

²⁰Кут φ в градусах.

²¹Різальна частина розвертки через наявність наросту, який виступає за межі твірної циліндру різальної частини, утворює отвір більшого ніж потрібно діаметра. У наслідок цього вигладжувальні елементи не мають достатнього припуску на пластичне деформування.

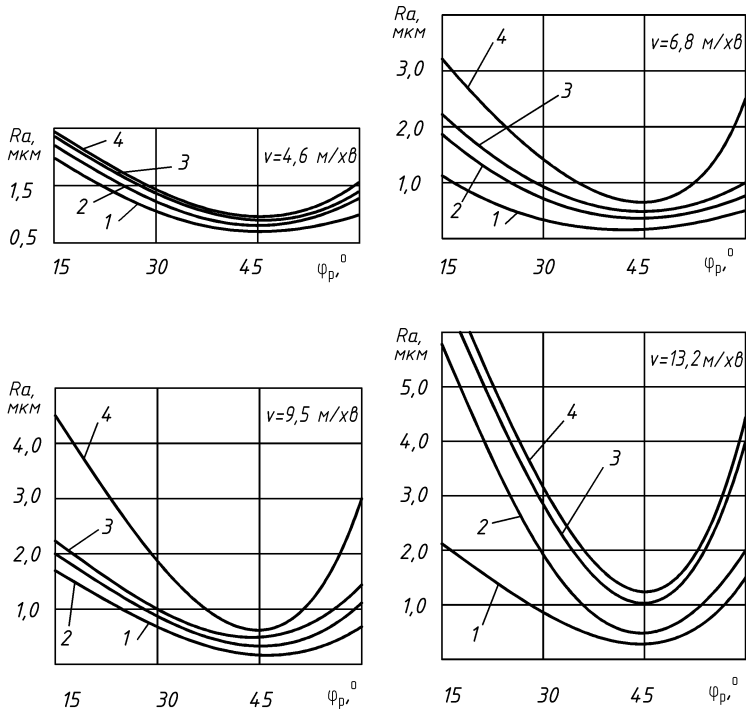


Рис. 1.21. Вплив кута забірного конуса на шорсткість:

- подача $s, \text{мм/об}$: 1 – 0,25; 2 – 0,43; 3 – 0,57; 4 – 0,72;
- перевищення $\Delta = 0,01 \text{ мм}$;
- ширина вигладжувальної стрічки $f_b = 0,5 \text{ мм}$;
- похибка вимірювання шорсткості в межах 17...20%

При значеннях забірного конуса, близьких до $\varphi_p = 60^\circ$, вершина наросту не виступає за циліндричну твірну. Проте унаслідок великої величини кута забірного конуса $\varphi_p = 60^\circ$ відбувається значне зменшення довжини активної частини різальної кромки з одночасним збільшенням товщини шару, що зрізається.

У результаті збільшується зона металу, що пластично деформується, а також товщина загальмованого шару, що разом узятє приводить до збільшення шорсткості поверхні утвореної різальними зубами. Тому, величина перевищення $\Delta = 0,001$ мм виявляється недостатньою для повного вигладжування початкової поверхні. Відбувається тільки часткове зминання мікронерівностей.

Слід відзначити, що із зменшенням кута забірного конуса спостерігається різке збільшення шорсткості поверхні при збільшенні швидкості обробки і подачі. Це особливо важливо для конструювання високопродуктивних розверток, а також у випадках чорнового розвертування коли застосовують значні швидкості.

Таким чином, на підставі проведених дослідів можна зробити висновки, що під час обробки різально-вигладжувальними розвертками "оптимальною" величиною кута забірного конуса (з погляду отримання мінімальної шорсткості обробленої поверхні) є кут забірного конуса різальної частини інструмента рівний $\varphi_p = 45^\circ$, який і був прийнятий для проведення подальших досліджень як основний.

1.4.3 Перевищення вигладжувального елемента

У попередніх розділах на підставі теоретичних розрахунків була визначена орієнтовна величина перевищення $\Delta = 0,01$ мм.

Для експериментальної перевірки теоретичних припущень, а також вивчення впливу величини перевищення Δ на шорсткість Ra поверхні отвору після розвертування, були використані дані отримані для схожого процесу формоутворення, а саме – дорнування²².

Згідно роботам Розенберга [37, 38] та Проскурякова [32, 33] під час дорнування величина перевищення доходила до 2 мм. Проте в дорна геометричні параметри деформувальних елементів інші ніж у

²²Дорнування — різновид обробки заготовок без зняття стружки. Суть процесу дорнування полягає в переміщенні жорсткого робочого інструмента (дорну) в отвір заготовки з натягом. У процесі обробки за рахунок натягу забезпечується зміцнення металу в поверхневому шарі, згладжування початкових шорсткостей, зміна форм і розмірів поперечного перетину отвору і заготовки в цілому. Розмір поперечного перетину інструмента більше розмірів поперечного перетину отвору заготовки на величину натягу.

різально-вигладжувальної розвертки. Зокрема, вигладжувальні елементи дорна ретельно закруглюються по всіх перехідних кромках та підлягають поліруванню.

Необхідно також враховувати, що під час дорнування застосовують ЗОР на маслянистій основі, яка забезпечує добре ковзання дотичних поверхонь, тоді як під час розвертування використовують ЗОР іншого типу (здебільше Укринол²³).

Попередні досліді з обробки отворів різально-вигладжувальними розвертками з перевищенням вигладжувального елемента над різальним рівним $\Delta = 0,04$ мм дали негативні результати. Під час обробки із швидкістю більше 3 м/хв на обробленій поверхні спостерігалися подряпини, хоч під час застосування меншої швидкості поверхня отворів була задовільною.

Окрім цього були випадки заклинювання інструмента в оброблюваному отворі і його поломки²⁴, що можна пояснити збільшеними зусиллями. Тому верхньою межею перевищення Δ під час проведення експериментів, було прийнято значення рівне $\Delta = 0,02$ мм, а досліджувана величина (перевищення Δ) вивчалася при наступних значеннях: 0,00; 0,01; 0,015 і 0,02 мм.

Вибір саме цих величин перевищення Δ обумовлений наступними обставинами. Величина перевищення $\Delta = 0,01$ мм є близькою до теоретично розрахованої величини, тому природна експериментальна перевірка цього значення.

У ході експерименту була поставлена мета перевірити, чи дійсно вигладжувальні елементи, маючи перевищення Δ над різальними здійснюють вигладжування поверхні, або зменшення шорсткості обробленої поверхні відбувається за рахунок інших чинників. Наприклад, кращого центрування розвертки завдяки наявності широких вигладжувальних стрічок, або через використання "оптимальної" ширини самої вигладжувальної стрічки і кута забірного конуса визначених раніше. З метою перевірки цього положення проводились досліді розвертування отворів різально-вигладжувальною розверткою, яка має нульове перевищення $\Delta = 0,00$ мм.

Дослідження процесу розвертування в діапазоні малих величин перевищення Δ від 0,00 до 0,01 мм виявилось неможливим зважаючи на технічні характеристики устаткування, використовуваного для виготовлення дослідної партії інструмента.

²³Укринол – застосовують під час оброблення металів на операціях оброблення отворів у сталях та чавунах як 3-5% водний розчин.

²⁴Хвостовик розвертки скручувало і розривало через значні крутні моменти.

Розвертування із перевищенням більшим ніж 0,02 мм обмежене зростаючими зусиллями, що супроводжують процес оброблення (у деяких випадках розвертки з перевищенням 0,03 мм ламались).

Паралельно експериментам із вивчення впливу величини перевищення різально-вигладжувальної розвертки на шорсткість обробленої поверхні, здійснювались контрольні досліди розверткою стандартної конструкції для тих самих режимів обробки.

Вивчення впливу величини перевищення Δ на шорсткість обробленої поверхні проводили із наступними режимами обробки:

- швидкість обробки 4; 5,8; 8,2 і 11,4 м/хв;
- подача 0,25; 0,43; 0,57 та 0,72 мм/об;
- припуск під обробку 0,21 мм на діаметр;
- номінальний діаметр обробки 18,6 мм.

Геометричні параметри різально-вигладжувальної розвертки:

- кут забірного конуса різальної частини $\varphi_p = 45^\circ$;
- передній кут різальної частини $\gamma_p = 0^\circ$;
- ширина вигладжувальної стрічки $f_b = 0,5$ мм;
- задній кут вигладжувального елемента $\alpha_b = 8^\circ$.

Графічне зображення залежності шорсткості поверхні від величини перевищення Δ , для крайніх величин швидкості, представлено на рис. 1.22. Для проміжних значень швидкості обробки вигляд залежностей ідентичний.

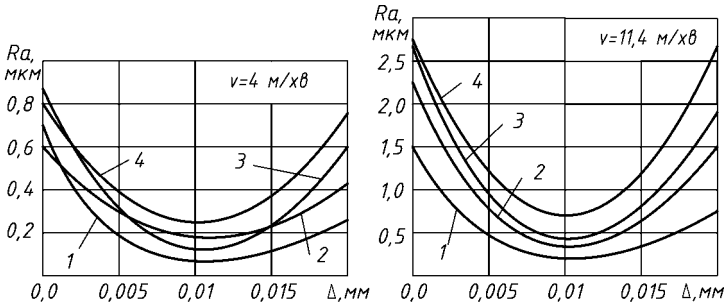


Рис. 1.22. Вплив перевищення на шорсткість:

- подача s , мм/об: 1 – 0,25; 2 – 0,43; 3 – 0,57; 4 – 0,72;
- ширина вигладжувальної стрічки $f_b = 0,5$ мм;
- похибка вимірювання шорсткості в межах 17...20%.

Дослідження показали, що залежність шорсткості обробленої поверхні від величини перевищення носить екстремальний характер. При всіх 64 комбінаціях режимів обробки, шорсткість обробленої поверхні має мінімальне значення при величині перевищення Δ рівної 0,01 мм.

Шорсткість зразків оброблених вигладжувальною розверткою з перевищенням $\Delta = 0,00$ мм є більшою, ніж шорсткість поверхні зразків отриманих для решти перевищення. Це підтверджує попереднє припущення, що саме вигладжувальні елементи, завдяки наявності перевищення Δ , здійснюють вигладжування приповерхневих шарів оброблюваної поверхні отвору.

Збільшення шорсткості поверхні під час обробки розвертками з перевищенням $\Delta = 0,00$ мм пояснюється тим, що в цьому випадку вигладжувальна стрічка діє як звичайна калібрувальна стрічка стандартної розвертки, але має збільшену ширину (0,5 мм) ніж прийнято для стандартних розверток (0,1 мм). Це призводить до простого збільшення контактних площ (деталь/інструмент) і, як наслідок, до погіршення обробленої поверхні.

Як показали роботи О.М. Розенберга²⁵ [36], збільшення шорсткості обробленої поверхні в разі збільшення величини перевищення Δ пояснюється виникненням лущення, яке пов'язано з утворенням поверхневого шару текстури, де зерна металу отримують значну витяжку в напрямі руху інструмента, значно деформуються та стоншуються, а частина їх силами тертя відривається від металу. Фактичний рівень деформації в шарі текстури в багато разів перевершує деформацію внутрішніх шарів металу і досягає критичних значень для даного напруженого стану, що призводить до руйнування і лущення під час подальшого деформування.

Шорсткість поверхні контрольних зразків оброблених стандартною розверткою, а також різально-вигладжувальною розверткою з перевищенням $\Delta = 0,00$ мм, виявилась у всіх випадках вище за шорсткість зразків отриманих різально-вигладжувальними розвертками з величинами перевищення 0,01; 0,015 та 0,02 мм.

Таким чином, підтверджено, що мінімальна шорсткість поверхні обробленої різально-вигладжувальною розверткою з величиною кута в плані $\varphi_p = 45^\circ$, спостерігається в разі застосування величини перевищення $\Delta = 0,01$ мм.

²⁵Олександр Мінейович Розенберг (1902 Іркутськ — 1989 Київ). Автор монографії "Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания", Наук. думка, 1979. — 319 с.

Отже, для перевищення $\Delta = 0.01$ мм залежність шорсткості Ra від подачі s описується наступними рівняннями:

- для швидкості оброблення 4,6 м/хв

$$Ra = 0,0469 e^{2,1848 s}, \quad (1.26)$$

- для швидкості оброблення 11,4 м/хв

$$Ra = 0,0570 e^{3,2649 s}. \quad (1.27)$$

Проте, правомірно припустити, що при інших величинах перевищення мінімальна величина шорсткості поверхні спостерігатиметься при значенні φ_p відмінних від 45° .

З метою перевірки висловленого припущення були проведені контрольні експерименти з різально-вигладжувальної розвертками, що мають перевищення 0,015 та 0,02 мм у наступних умовах:

- кут φ_p забірного конуса різальної частини приймався рівним 15; 30; 45 і 60° ;
- швидкість обробки 6,8 м/хв;
- подача 0,57 мм/об;
- змашувальна охолоджувальна рідина – Укринол-1.

Результати експериментів показали, що для усіх величин перевищення Δ (0,01; 0,015 і 0,02 мм) мінімальна шорсткість обробленої поверхні спостерігається в тому випадку, коли фактична величина перевищення Δ тобто відстань між вершиною наросту, що утворюється в процесі різання і циліндричною твірною вигладжувальних елементів, дорівнює 0,01 мм.

Слід зазначити, що при величинах кута φ_p забірного конуса різального елемента менш 45° (тобто $\varphi_p < 45^\circ$) на загальному фоні відносно чисто обробленої поверхні спостерігались сліди подряпин від наросту.

Узагальнення

На підставі проведених дослідів із вивчення впливу величини перевищення Δ на шорсткість Ra обробленої поверхні отвору після застосування різально-вигладжувальної розвертки, можна стверджувати, що з точки зору досягнення мінімальної шорсткості обробленої поверхні, оптимальним перевищенням різально-вигладжувальної розвертки є перевищення рівне $\Delta = 0,01$ мм.

Узагальнюючи результати досліджень проведених з метою визначення геометричних параметрів різально-вигладжувальної розвертки можна стверджувати, що різально-вигладжувальна розвертка є оптимальною з наступними геометричними параметрами:

- кути забірних конусів різальної та вигладжувальної частин становить 45° ;
- ширина вигладжувальної стрічки $f_b = 0,05$ мм;
- величина перевищення вигладжувальних елементів над різальними $\Delta = 0,01$ мм.

Різально-вигладжувальна розвертка такої геометрії забезпечує утворення поверхні з величиною середнього арифметичного відхилення профілю в межах 0,63 мм, при швидкості обробки 3...5 м/хв і подачах 0,25...0,72. мм/об, тобто практично у всьому діапазоні режимів обробки, які використовують під час розвертування.

1.5 Шорсткість поверхні після розвертування

1.5.1 Впливу шляху різання на шорсткість

У попередньому розділі були визначені геометричні параметри і режими обробки різально-вигладжувальною розверткою, що забезпечують отримання мінімальної шорсткості обробленої поверхні у великому діапазоні режимів обробки, при швидкості 4...12 м/мін і подачі 0,25...0,72 мм/об.

З метою визначення залежності шорсткості оброблюваних отворів від часу роботи різально-вигладжувальної розвертки, були проведені досліди із наступними режимами обробки:

- перевищення $\Delta = 0,1$ мм;
- швидкість обробки 5,65 м/мін;
- подача 0,72 мм/об;
- припуск на обробку 0,24 мм на сторону;
- номінальний діаметр обробки 18 мм;
- глибина розвертування 50 мм.

Слід зазначити, що збільшення припуску на розвертування в порівнянні з нормативним (0,1 мм на сторону) зроблено свідомо для прискорення проведення експерименту.

За результатами експерименту була побудована емпірична залежність вигляд якої дозволяє апроксимувати її прямою, що описується рівнянням

$$y = ax + b. \quad (1.28)$$

де x – кількість оброблених отворів;
 $a; b$ – коефіцієнти.

Випрямлення проводили методом найменших квадратів. Після виконання необхідних розрахунків отримуємо:

$$\begin{aligned} a &= 0,005736, \\ b &= 0,331532. \end{aligned} \quad (1.29)$$

У загальному вигляді рівняння, що характеризує залежність шорсткості Ra обробленої поверхні від кількості оброблених отворів n різально-вигладжувальною розверткою має вигляд:

$$Ra = (0,005736 n + 0,331532) \pm 17\%, \quad (1.30)$$

де n – кількість оброблених отворів.

Враховуючи величину похибки ($\pm 17\%$) отримане рівняння доцільно переписати у вигляді:

$$Ra = (0,0057 n + 0,33) \pm 17\%. \quad (1.31)$$

Графічне зображення результатів експериментів і вирівняної прямої представлені на рис. 1.23 з якого видно, що середнє арифметичне відхилення профілю оброблюваної поверхні збільшується із збільшенням кількості оброблених отворів, проте не перевищує 0,63 мм для всіх отворів отриманих у ході експерименту.

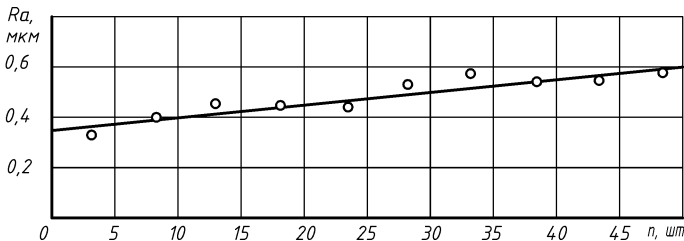


Рис. 1.23. Шорсткість від вигладжувальної розвертки
 (Похибка вимірювання шорсткості $\pm 17\%$)

Збільшення шорсткості обробленої поверхні за кількістю оброблених отворів, можна пояснити різною швидкістю зносу різальних і вигладжувальних елементів, внаслідок чого відбуваються збільшення фактичної величини перевищення. Збільшення перевищення більше 0,01 мм, як показали проведені раніше досліді, веде до збільшення шорсткості обробленої поверхні.

Для порівняння характеру зміни шорсткості поверхні отворів оброблених різально-вигладжувальними розвертками порівняно із отворами обробленими стандартними розвертками, було проведено низку додаткових дослідів (за умов ідентичних дослідів з різально-вигладжувальною розверткою).

У ході проведення експерименту передбачалося, що залежність шорсткості поверхні отворів оброблених стандартною розверткою матиме лінійний характер, як і для випадку різально-вигладжувальної розвертки. Проте, побудована за експериментальними точками залежність шорсткості від кількості оброблених отворів, має екстремальний характер (рис. 1.24).

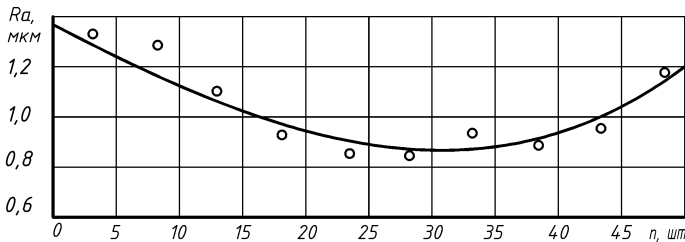


Рис. 1.24. Шорсткість від стандартної розвертки
(Похибка вимірювання шорсткості 17%)

Підбір математичних виразів для опису знайденої залежності показав, що вона може бути апроксимована кривою другого порядку і має вигляд

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (1.32)$$

Для визначення коефіцієнтів рівняння можна скористатися методом найменших квадратів. Суть методу полягає в тому, що величина коефіцієнтів визначається з вимоги найменших квадратів

$$f = \sum (y - a_0 - a_1x - a_2x^2)^2 \rightarrow \min, \quad (1.33)$$

звідки

$$\frac{\partial f}{\partial a_0} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial a_1} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial a_2} = 0. \quad (1.34)$$

Після диференціювання отримаємо робочу систему рівнянь

$$\begin{cases} \sum y = na_0 + a_1 \sum x + a_2 \sum x^2 \\ x \sum y = a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 + a_2 \sum x^3 \\ x^2 \sum y = a_0 \sum x^2 + a_1 \sum x^3 + a_2 \sum x^4 \end{cases} \quad (1.35)$$

вирішення якої дозволяє знайти значення коефіцієнтів. Після вирішення системи рівнянь (1.35) отримаємо значення шуканих коефіцієнтів рівняння (1.32):

$$\begin{aligned} a_0 &= 1,345063, \\ a_1 &= -0,018425, \\ a_2 &= 1,50 \cdot 10^{-4}. \end{aligned} \quad (1.36)$$

Таким чином, рівняння залежності шорсткості Ra поверхні отворів від кількості n отворів оброблених стандартною розверткою, прийме вигляд

$$Ra = 1,345 - 0,0184n + 1,5 \cdot 10^{-4}n^2 \quad (1.37)$$

де n – кількість оброблених отворів.

Графічне зображення залежності шорсткості від кількості оброблених отворів для стандартної розвертки наведено на рис. 1.24.

Результати експериментів показали, що на початку роботи шорсткість поверхні отворі оброблених стандартною розверткою дещо зменшується, проте після обробки 30...35 отворів їх шорсткість починає збільшуватися.

Досліджену залежність шорсткості поверхні від кількості оброблених отворів можна пояснити таким чином. У початковий період роботи відбувається прироблення робочих поверхонь стандартної розвертки, що проявляється в округленні калібрувальних стрічок, а також ділянки переходу від задньої поверхні забірного конуса до калібрувальної стрічки. У результаті шорсткість оброблюваної поверхні декілька зменшується. Проте в міру подальшої роботи інструмента починає превалювати процес його зносу, унаслідок чого відбувається зміна геометричних параметрів робочих частин інструмента і, як результат цього, збільшення шорсткості обробленої поверхні.

Одночасно, загальна величина середнього арифметичного відхилення профілю отворів за весь період роботи інструмента лежить у межах 0,8...1,5 мкм.

У той же час, за тих же умов шорсткість поверхні отворів оброблених різально-вигладжувальною розверткою змінюється тільки в діапазоні 0,32...0,63 мкм.

Отже, у разі обробки різально-вигладжувальними розвертками шорсткість поверхні збільшується із збільшенням кількості оброблених отворів, тоді як для стандартної розвертки спостерігається деяке зменшення шорсткості поверхні в початковий період. Однак, загальне збільшення шорсткості для різально-вигладжувальною розвертки в 2 рази менше ніж для стандартної. Це дає підставу стверджувати, що різально-вигладжувальна розвертка забезпечує не тільки нижчу шорсткість поверхні, у порівнянні із стандартною, але і її меншу зміну залежно від кількості оброблених отворів (часу роботи).

1.5.2 Вплив режимів обробки на шорсткість

Графічне зображення впливу швидкості обробки і подачі на шорсткість обробленої поверхні представлено на рис. 1.25.

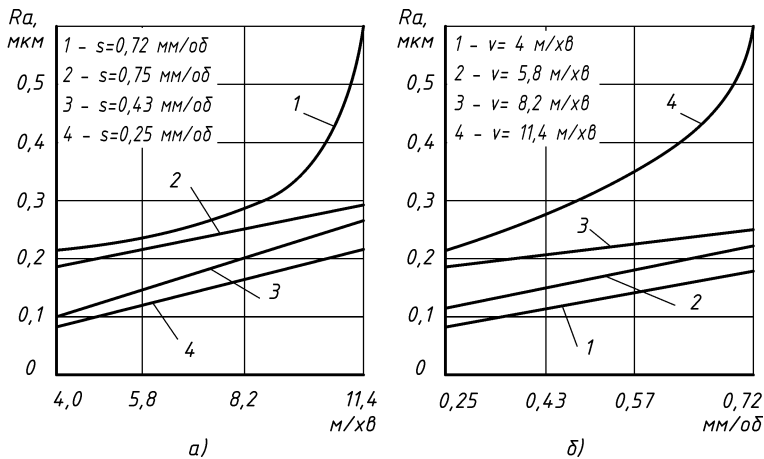


Рис. 1.25. Вплив режимів на шорсткість:

- a* – вплив швидкості на шорсткість поверхні отворів;
- б* – вплив подачі на шорсткість поверхні отворів.

Результати проведених експериментів показали, що із збільшенням величини подачі відбувається збільшення шорсткості обробленої поверхні. Спостережувана залежність повністю співпадає з відомими закономірностями зміни шорсткості в разі зміні подачі.

Різкіше збільшення шорсткості для швидкості 11,4 м/хв можна пояснити наростоутворенням, що інтенсивно розвивається при даній швидкості обробки. Розвиток наросту, як відомо, збільшує шорсткість поверхні. Таким чином і ці результати не суперечать відомим закономірностям.

У той же час, вплив швидкості обробки на шорсткість обробленої поверхні декілька суперечить відомим положенням. За наслідками експериментів збільшення швидкості обробки приводить до збільшення шорсткості обробленої поверхні, тоді як у звичайних умовах спостерігається зменшення шорсткості.

Виявлена суперечність пояснюється принциповою відмінністю процесів формоутворення отворів, що протікають у разі обробки стандартними і різально-вигладжувальними розвертками.

У разі роботи стандартною розверткою збільшення швидкості обробки викликає зменшення об'єму пластичної деформації, що в разі відсутності наростоутворення, як правило, сприяє зниженню шорсткості оброблюваної поверхні [2, 24].

Проте, у даному випадку в разі роботи різально-вигладжувальною розверткою формування поверхні здійснюється вигладжувальними елементами, тобто шляхом пластичного деформування. Збільшення ж швидкості пластичної деформації поверхневих шарів вигладжувальними елементами, як показано в роботі Суворова [56], викликає збільшення шорсткості обробленої поверхні. У результаті спостерігається загальне збільшення шорсткості поверхні обробленої різально-вигладжувальною розверткою в разі збільшення швидкості обробки. Різке збільшення шорсткості в разі швидкості обробки 11,4 м/хв і подачі 0,72 мм/об пояснюється, як вже наголошувалося вище, появою наростоутворення.

Вивчення впливу глибини різання (припуску на обробку) на шорсткість поверхні обробленої різально-вигладжувальною розверткою проводилося за зразками отриманими за наступних режимах:

- швидкість обробки 4,0; 5,8; 8,2 і 11,4 м/хв;
- подача 0,25; 0,43; 0,57 і 0,72 мм/об.

Геометричні параметри різально-вигладжувальної розвертки наступні:

- кут забірнього конуса різальної частини розвертки $\varphi = 45^\circ$;
- передній кут $\gamma = 0^\circ$;
- задній кут $\alpha = 8^\circ$;
- перевищення вигладувальних елементів над різальними елементами $\Delta = 0,1$ мм;
- номінальний діаметр обробки 19,00 мм.

Досліджувана величина – припуск на обробку, вивчалася при значеннях 0,1; 0,15 і 0,25 мм на сторону. Вибір саме цих величин обумовлений наступними причинами. Припуск на обробку рівний 0,1 мм на сторону прийнятий, як нормативний для чистового розвертування отворів.

З метою вивчення можливості обробки отворів різально-вигладжувальними розвертками безпосередньо після свердлення, без проміжного зенкерування, вивчався стан поверхні, зокрема шорсткість, після обробки з припуском на розвертування 0,25 мм на сторону.

За результатами математичної обробки експериментальних даних були отримані наступні залежності, котрі описують характер зміни шорсткості Ra поверхні отворів залежно від величину припуску t після застосування різально-вигладжувальної розвертки:

- швидкість обробки 4,0 м/хв:

припуск t , мм	s , мм/об	$Ra = f(t)$ мкм
0,1 ... 0,25	0,25	$0,2071 + 0,0539 \ln t$
	0,43	$0,4329 t^{0,5577}$
	0,57	$0,6185 + 0,2069 \ln t$
	0,72	$0,1677 e^{3,1668 t}$

- швидкість обробки 5,8 м/хв:

припуск t , мм	s , мм/об	$Ra = f(t)$ мкм
0,1 ... 0,25	0,25	$0,0710 e^{4,67 t}$
	0,43	$0,8368 + 0,2955 \ln t$
	0,57	$0,8263 + 0,2737 \ln t$
	0,72	$0,8169 + 0,2382 \ln t$

– швидкість обробки 8,2 м/хв:

припуск t , мм	s , мм/об	$Ra = f(t)$ мкм
0,1 ... 0,25	0,25	$0,4259 + 0,1070 \ln t$
	0,43	$1,1066 + 0,3920 \ln t$
	0,57	$1,2261 + 0,4141 \ln t$
	0,72	$1,2814 + 0,4250 \ln t$

– швидкість обробки 11,4 м/хв:

припуск t , мм	s , мм/об	$Ra = f(t)$ мкм
0,1 ... 0,25	0,25	$0,1312 e^{4,7601 t}$
	0,43	$1,3553 + 0,4451 \ln t$
	0,57	$1,6356 + 0,5633 \ln t$
	0,72	$0,4514 e^{2,7385 t}$

Математичні залежності, котрі описують характер зміни шорсткості Ra поверхні отворів залежно від величину припуску t для різних величин подачі, мають такий вигляд:

– подача 0,25 мм/об:

припуск t , мм	v , м/хв	$Ra = f(t)$ мкм
0,1 ... 0,25	4,0	$0,2027 + 0,0426 \ln t$
	5,8	$0,1040 e^{3,4699 t}$
	8,2	$0,4584 + 0,1191 \ln t$
	11,4	$0,6706 t^{0,4271}$

– подача 0,43 мм/об:

припуск t , мм	v , м/хв	$Ra = f(t)$ мкм
0,1 ... 0,25	4,0	$0,5523 t^{0,6599}$
	5,8	$0,8525 + 0,2994 \ln t$
	8,2	$1,1570 + 0,4137 \ln t$
	11,4	$1,7806 t^{0,6981}$

– подача 0,57 мм/об:

припуск t , мм	v , м/хв	$Ra = f(t)$ мкм
0,1...0,25	4,0	$0,5842 + 0,1956 \ln t$
	5,8	$0,8175 + 0,2616 \ln t$
	8,2	$1,2070 + 0,4137 \ln t$
	11,4	$1,5304 + 0,5085 \ln t$

– подача 0,72 мм/об:

припуск t , мм	v , м/хв	$Ra = f(t)$ мкм
0,1...0,25	4,0	$5,333 t^2 - 1,133 t + 0,275$
	5,8	$0,8330 + 0,2487 \ln t$
	8,2	$2,6486 t + 0,0429$
	11,4	$0,4443 e^{2,7506t}$

Результати дослідів показали, що у всіх комбінаціях режимів обробки спостерігається збільшення шорсткості поверхні із збільшенням припуску на обробку. Це пояснюється тим, що із збільшенням припуску на обробку відбувається збільшення об'єму металу, що пластично деформується та зростання зусиль різання.

Збільшення зони пластичної деформації приводить до її глибшого проникнення в оброблювану поверхню. Загальмований елемент стружки (що має збільшений об'єм), переміщаючись по поверхні залишає на ній глибокі подряпини [2]. Одночасно, під дією збільшених зусиль, відбувається збільшення інтенсивності захоплення і взаємного проникнення контактних поверхонь, внаслідок чого умови тертя на контактних поверхнях погіршуються [24]. Зрештою, це призводить до збільшення шорсткості поверхні обробленої різальними елементами розвертки [2].

Наступні за ними вигладжувальні елементи не в змозі деформувати, у достатній мірі, мікронерівності оброблюваної поверхні. У результаті відбувається збільшення шорсткості поверхні обробленої вигладжувальними елементами.

Середнє арифметичне відхилення профілю поверхні, обробленої різально-вигладжувальними розвертками із припуском 0,1...0,15 мм, коливається в межах 0,16...0,63 мкм у разі прийнятих значеннях швидкості і подачі.

Встановлено, що різально-вігладжувальна розвертка здатна забезпечити шорсткість поверхні із середнім арифметичним відхилення профілю не більше 1,25 мкм у разі величини припуску 0,25 мм на сторону. Тобто була встановлена можливість обробки отворів різально-вігладжувальними розвертками безпосередньо після свердлення, без попереднього зенкерування.

У зв'язку з цим були проведені досліді з розвертками, що мають додатній передній кут рівний 5 і 10° на різальній частині. Експерименти показали, що для величини припуску до 0,15 мм на сторону, різально-вігладжувальні розвертки з вказаними додатними передніми кутами та ті, що мають передній кут рівний нулю, забезпечують однакову шорсткість обробленої поверхні отворів.

Проте, у разі припуску 0,25 мм на сторону, різально-вігладжувальні розвертки з додатними передніми кутами забезпечують зниження шорсткості обробленої поверхні в порівнянні з розвертками, що мають нульовий передній кут.

Розвертки, котрі мають передній кут на різальній частині рівний 5° забезпечують зниження середнього арифметичного відхилення профілю в середньому на 15...20%, а розвертки з переднім кутом 10° – на 20...25%.

Таким чином, у разі застосування різально-вігладжувальних розверток безпосередньо після свердлення, доцільно, з метою зменшення шорсткості обробленої поверхні, передній кут на різальній частині виконувати додатним у межах 5...10°.

Оскільки в реальних умовах доводиться обробляти деталі різної конфігурації і з різною товщиною стінки, представляє інтерес визначити характер впливу товщини стінки на величину середньоарифметичного відхилення профілю обробленої поверхні отворів.

З цією метою були проведені експерименти за наступних умов:

- швидкість обробки 6,1 і 12 м/хв;
- подача 0,25 і 0,72 мм/об;
- припуск на обробку 0,21 мм на діаметр;
- номінальний розмір обробки 20 мм;
- товщина стінки зразка складала 2,5; 5; 10 і 15 мм.

Результати експерименту показали, що середнє арифметичне відхилення профілю поверхні отворів, що мають різну товщину стінки (від 2,5 до 15 мм) однакові за інших рівних умов, що пояснюється багатократною дією вігладжувальних елементів на мікронерівності.

Таким чином, можна стверджувати, що збільшення товщини стінки оброблюваного отвору від 2,5 мм і більш, на шорсткість обробленої поверхні не впливає.

Узагальнення

На підставі проведених дослідів можна зробити висновок, що з погляду отримання мінімальної шорсткості обробленої поверхні, доцільно призначати припуск на розвертування різально-вигладжувальними розвертками в межах 0,1...0,15 мм на сторону.

Слід також відзначити, що для випадків, коли допускається середнє арифметичне відхилення профілю поверхні отворів до 1,25 мкм, можливе застосування різально-вигладжувальних розверток безпосередньо після свердлення, виключаючи зенкерування. У такому випадку передній кут на різальній частині доцільно виконувати додатним, величиною 5...10°.

Одночасно була проведена низка експериментів, за мету яких ставилася перевірка працездатності різально-вигладжувальної розвертки із зменшеною, у порівнянні із стандартною, кількістю різальних, а відповідно і вигладжувальних елементів.

Для цього на різально-вигладжувальній розвертці із "стандартною" кількістю зубів віддалялися діаметрально протилежні зуби. Експерименти показали, що різально-вигладжувальні розвертки із зменшеною кількістю зубів дають грубішу поверхню.

Окрім цього, було перевірено припущення, як змінюватиметься шорсткість обробленої поверхні отворів для різних номінальних діаметрах, за інших рівних умов.

З цієї метою були проведені експерименти з обробки отворів діаметром 10; 40 і 70 мм. Вибір саме цих величин обумовлений наступним. Виготовлення різально-вигладжувальної розвертки діаметром менше 10 мм пов'язано з технологічними труднощами. Отвори більші ніж 70 мм, як правило, розточують, а не розвертають. Діаметр 40 мм узятий як проміжний.

Результати проведених експериментів показали, що в вказаному діапазоні розмірів різально-вигладжувальні розвертки забезпечують практично однакову шорсткість обробленої поверхні.

1.5.3 Математична модель шорсткості

Для побудови математичної моделі залежності шорсткості Ra поверхні отвір оброблених різально-вигладжувальною розверткою, від

швидкості обробки v і величини подачі s були використані результати отримані в попередньому розділі під час вивчення залежності шорсткості поверхні від глибини різання.

Графічні побудови за результатами експериментів дозволяють говорити про можливість апроксимації поверхнею другого порядку

$$y = a_1 x_1^2 + b_1 x_1 + a_2 x_2^2 + b_2 x_2 + c. \quad (1.38)$$

Для визначення коефіцієнтів рівняння (1.38) був використаний метод найменших квадратів. Система рівнянь, необхідна для знаходження коефіцієнтів (1.38) має вигляд:

$$\begin{cases} \sum y = F_1 \\ \sum x_1^2 y = F_2 \\ \sum x_1 y = F_3 \\ \sum x_2^2 y = F_4 \\ \sum x_2 y = F_5 \end{cases} \quad (1.39)$$

де праві частини системи рівнянь:

$$F_1 = a_1 \sum x_1^2 + b_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2^2 + b_2 \sum x_2 + cn, \quad (1.40)$$

$$F_2 = a_1 \sum x_1^4 + b_1 \sum x_1^3 + a_2 \sum x_2^2 x_1^2 + \\ + b_2 \sum x_2 x_1^2 + c \sum x_1^2, \quad (1.41)$$

$$F_3 = a_1 \sum x_1^3 + b_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_2^2 x_1 + \\ + b_2 \sum x_2 x_1 + c \sum x_1, \quad (1.42)$$

$$F_4 = a_1 \sum x_1^2 x_2^2 + b_1 \sum x_1 x_2^2 + a_2 \sum x_2^4 + \\ + b_2 \sum x_2^3 + c \sum x_2^2, \quad (1.43)$$

$$F_5 = a_1 \sum x_1^2 x_2 + b_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^3 + \\ + b_2 \sum x_2^2 + c \sum x_2. \quad (1.44)$$

Слід мати на увазі, що за x_1 прийнято відповідне значення швидкості обробки, а за x_2 – значення подача. Величина шорсткості позначалася через y . Після вирішення системи рівнянь (1.39) отримаємо шукані значення коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,00316, & a_2 &= 0,09319, \\ a_3 &= -0,02919, & a_4 &= 0,38150, \\ a_5 &= -0,01465. \end{aligned} \quad (1.45)$$

Перевірка адекватності моделі показала, що розрахункове значення критерію Пірсона дорівнює $\chi^2 = 6,27$. Критичне (найбільше допустиме) значення критерію становить $\chi_{0,05}^2 = 25,00$ (для 5% рівні ймовірності). Оскільки,

$$(\chi^2 = 6,25) \ll (\chi_{0,05}^2 = 25,00) \quad (1.46)$$

можна стверджувати, що модель повністю адекватна.

Таким чином, рівняння поверхні відгуку, котра описує залежність шорсткості Ra від швидкості v та подачі s (для різально-вигладжувальної розвертки) має вигляд:

$$Ra = 0,0032v^2 - 0,0226v + 0,0922s^2 + 0,3815s + 0,0147. \quad (1.47)$$

Із отриманого рівняння витікає, що шорсткість поверхні збільшується із збільшенням швидкості оброблення і подачі, а поверхня відгуку є поверхнею другого порядку.

Узагальнення

Отримані дані не суперечать відомим результатам для інших випадків лезової обробки. Збільшення шорсткості в разі збільшення подачі спостерігається практично для всіх інструментів [2].

Збільшення шорсткості поверхні, обробленої різально-вигладжувальною розверткою, у разі збільшення швидкості обробки пояснюється процесами, що протікають під час формування поверхні отвору при деформування приповерхневих шарів.

1.5.4 Структура мікропрофілю поверхні

Дослідження структури мікропрофілю поверхні отворів, оброблених різально-вигладжувальною розверткою, проводилося за профілограмами знятими на профілографі-профілометрі ВАП “Калібр”.

Вивчення профілограм показало, що структура мікропрофілю поверхонь утворених стандартною розверткою (рис. 1.26) і різально-вигладжувальною з перевищенням 0,01 мм (рис. 1.27) істотно відрізняються одна від одної.



Рис. 1.26. Профілограма від стандартної розвертки



Рис. 1.27. Профілограма від вигладжувальної розвертки

Представлені профілограми отримані за однакових умов:

- вертикальне збільшення $4 \cdot 10^4$ разів;
- горизонтальне збільшення $4 \cdot 10^3$ разів;
- швидкість обробки 4,6 м/хв;
- подача 0,25 мм/об.

З профілограм видно, що поверхня оброблена стандартною розверткою має глибокі западини, а загальний вигляд профілю виражений хаотичним розташуванням гострих виступів. Профіль поверхні оброблений різально-вигладжувальною розверткою плавніший, відсутні глибокі западини, поверхня виступів згладжена, а самі виступи досить широкі.

Представляє інтерес профілограма на рис. 1.28 отримана із зразка обробленого стандартною розверткою, яка працювала тільки одним зубом. Дана поверхня отримана із зразка обробленого із подачею 0,72 мм/об та швидкістю обробки 4,6 м/хв, крок повторення западин становить 0,72 мм, тобто дорівнює величині подачі. Профіль поверхні складається з великої кількості загострених виступів.

Дослідження із великими збільшеннями поверхні обробленої різально-вигладжувальною розверткою показали, що профіль поверхні не має різких западин і є хвилястим, з відносно плавними переходами між окремими виступами.

На рас. 1.29 представлені профілограми окремих ділянок профілю поверхні обробленої різально-вигладжувальними розвертками.



Рис. 1.28. Наслідки утворення наросту
Збільшення: вертикальне $4 \cdot 10^3$;
горизонтальне 20



Рис. 1.29. Поверхня оброблена вигладжуванням
Збільшення: вертикальне $40 \cdot 10^3$;
горизонтальне $4 \cdot 10^3$

З метою вивчення, чи дійсно вигладжувальні елементи різально-вигладжувальної розвертки згладжують мікронерівності оброблюваної поверхні або вирівнювання профілю відбувається за рахунок кращих умов обробки, ніж у разі роботи стандартної розвертки, були отримані профілограми з поверхні частково оброблених отворів. Типові профілограми наведені на рис. 1.30.

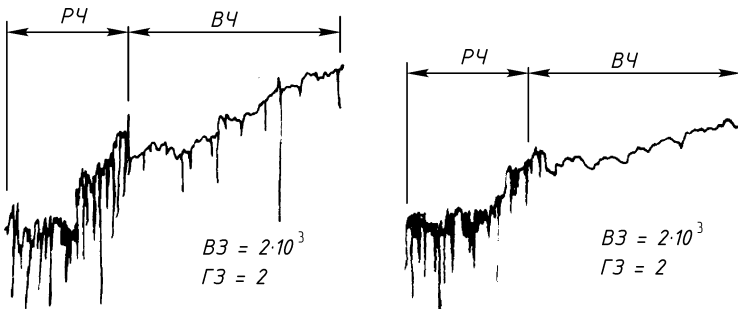


Рис. 1.30. Частково оброблені отвори

PЧ – поверхня утворена різальною частиною;

ВЧ – поверхня утворена вигладжувальною частиною.

На профілограмах зображені ділянки профілю поверхні частково обробленої різальними та вигладжувальними елементами (частинами розвертки). Обидві профілограми отримані від зразків оброблених із швидкістю обробки 4,6 м/хв і подачі 0,72 мм/об.

Вивчення профілограм показало, що профіль поверхні обробленої різальними зубами розчленований частими западинами, настільки глибокими, що їх швидше можна назвати тріщинами ніж западинами. Зовнішня поверхня профілю складається із загострених піків.

Загальна картина профілю повністю співпадає з характером профілю поверхні обробленої стандартною розверткою.

На ділянці профілю поверхні утвореної вигладжувальними елементами тріщини практично відсутні, більшість западин завальцьовано, а виступи мають плоскі вершини.

Отже, отримані профілограми дозволили встановити, що вирівнювання мікропрофілю здійснюється саме вигладжувальними елементами, а не викликано іншими чинниками.

На підставі дослідження профілограмам, отриманих з різних ділянок поверхні зразків оброблених стандартними і різально-вигладжувальними розвертками, можна зробити ряд висновків щодо структури мікропрофілю поверхні отворі.

Отримані профілограми показали, що між профілями утвореними розвертками різної конструкції є суттєві відмінності.

Профіль поверхні зразків, утворених стандартною розверткою складається з глибоких западин і тріщин, які чергуються із загостреними виступами. На відміну від їх, профіль поверхні утвореної різально-вигладжувальними розвертками носить хвилястий характер, з відносно плавними переходами між западинами і виступами.

Вивчення профілограмам отриманих з частково оброблених отворів підтвердило припущення, що саме вигладжувальні елементи здійснюють вигладжування мікронерівностей і загладжування вершин та тріщин профілю.

Отже, побічно підтверджені результати проведених раніше дослідів за визначенням оптимальної величини перевищення. Зокрема ті результати, що були отримані під час обробки отворів різально-вигладжувальними розвертками з нульовим перевищенням, на підставі яких був зроблений висновок, що саме вигладжувальні елементи здійснюють формування мікропрофілю.

Узагальнення

На підставі аналізу експериментальних результатів встановлено, що із збільшенням кількості оброблених отворів відбувається зміна величини шорсткості їх поверхні, як у разі застосування стандартної так і різально-вигладжувальної розвертки.

Проте характер і величина зміни шорсткості, залежно від кількості оброблених отворів, для різних конструкцій розверток різна.

Із збільшенням кількості отворів оброблених різально-вигладжувальною розверткою, відбувається безперервне збільшення шорсткості оброблюваної поверхні. У цьому разі функціональна залежність но-

сить прямолінійний характер, а зміна величини середнього арифметичного відхилення профілю в умовах експерименту, коливається в межах 0,32...0,63 мкм.

У той же час, залежність середнього арифметичного відхилення профілю поверхні отворів оброблених стандартною розверткою носить сідлоподібний характер і коливається в умовах експерименту, у межах 0,8...1,5 мкм.

Таким чином, не дивлячись на те, що в разі використання стандартної розвертки шорсткість поверхні оброблюваних отворів у початковий період роботи інструмента зменшується, а для різально-вигладжувальної розвертки безперервно збільшується, можна стверджувати, що різально-вигладжувальна розвертка забезпечує зміну шорсткості поверхні за часом у 2 рази меншу ніж стандартна.

Зміна величини припуску на обробку в межах нормативного, тобто 0,1...0,15 мм на сторону, не має істотного впливу на шорсткість поверхні утворених отворів.

У тих випадках, коли допускається середнє арифметичне відхилення профілю поверхні до 1,25 мкм, можливе застосування різально-вигладжувальної розвертки безпосередньо після свердлення, без попереднього зенкерування.

Встановлено, що зміна товщини стінки оброблюваних отворів від 2 до 15 мм, а також їх діаметра від 10 до 70 мм на шорсткість обробленої поверхні не впливає.

Встановлено, що різально-вигладжувальна розвертка утворює поверхню з мінімальною кількістю западин і виступів. Одночасно підтверджено припущення, що саме вигладжувальні елементи здійснюють вигладжування мікропрофілю, тобто утворюють поверхню із сприятливішими характеристиками ніж стандартна розвертка.

1.6 Точність обробки отворів

1.6.1 Допуск оброблення отворів

Для порівняльного вивчення характеристик точності різально-вигладжувальної і стандартної розвертки були виготовлені розвертки із однієї партії постачання та оброблено 6 партій дослідних зразків. Щоб уникнути вплив небажаних чинників всі експерименти виконували на одному устаткуванні з наступними режимами:

- швидкість обробки 5,65 м/хв;
- подача 0,72 мм/об;

- припуск на розвертування 0,24 мм на сторону;
- номінальний діаметр обробки 18,00 мм.

У якості інструмента використовували 3 різально-вигладжувальні і 3 стандартні розвертки. Відповідно було отримано 6 вибірок по 50 отворів у кожній. Вибірki 1...3 для отворів оброблених різально-вигладжувальними та вибірки 4...6 для отворів оброблених стандартними розвертками.

Діаметр кожного отвору вимірювався індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм у двох площинах, віддалених від торців на 5...7 мм і в двох взаємно перпендикулярних напрямках, після чого отримані результати усереднювалися.

Для отворів оброблених різально-вигладжувальними розвертками емпіричні середні x_i інтервалів і частість m_i в інтервалі наступні:

Вибірka 1		Вибірka 2		Вибірka 3	
x_i , мм	m_i	x_i , мм	m_i	x_i , мм	m_i
21,105	4	42,105	2	34,55	4
23,32	9	44,820	4	35,65	8
25,535	13	47,540	11	36,75	9
27,75	13	50,255	14	37,85	11
29,965	5	52,965	9	38,95	9
32,18	5	55,680	6	40,05	6
34,395	2	58,395	3	41,15	6

Для отворів оброблених стандартними розвертками емпіричні середні x_i інтервалів і частість m_i в інтервалі наступні:

Вибірka 4		Вибірka 5		Вибірka 6	
x_i , мм	m_i	x_i , мм	m_i	x_i , мм	m_i
17,27	7	13,34	8	5,0	10
19,805	6	16,525	4	7,5	5
22,34	8	19,705	9	10,2	8
24,87	13	22,875	8	12,8	4
27,41	8	26,05	8	15,4	11
29,96	4	29,23	9	18,0	7
32,48	4	32,41	5	20,6	4

Емпіричне середнє \bar{x} значення для кожної вибірки, а також середнє арифметичне відхилення S за результатами обчислень для всіх вибірок наступні:

Розвертка	Вибірка	\bar{x} , мкм	S , мкм
різ.-виг.	1	27,75	3,77
	2	50,25	3,53
	3	37,23	2,13
станд.	4	24,87	4,75
	5	22,88	6,10
	6	12,27	5,47

Достатність кількості спостережень у кожній вибірці перевірялася за допомогою коефіцієнта варіації v . Умовою достатності спостережень є нерівність:

$$v < v_t, \quad (1.48)$$

де v – значення емпіричного коефіцієнта варіації;
 v_t – табличне (критичне) значення коефіцієнта варіації.

Значення емпіричних v і критичних v_t коефіцієнтів варіації, а також межі довірчих інтервалів Δ для всіх вибірок наступні:

Розвертка	Вибірка	v	v_t	Δ , мкм
різ.виг.	1	0,1293	0,53	20,74...34,75
	2	0,0703	0,53	41,70...57,20
	3	0,0572	0,53	33,06...41,40
станд.	4	0,1909	0,88	14,93...35,55
	5	0,2667	0,88	10,92...34,83
	6	0,7730	0,88	1,54...22,99

Як видно з отриманих результатів кількість спостережень є достатньою для статистичної обробки результатів експериментів, а значення спостережень не виходять за межі довірчих інтервалів.

Перевірка відповідності експериментальних кривих нормальному закону розподілу за критерієм Пірсона χ^2 показала, що в всіх вибірках експериментальні і теоретичні криві узгоджуються.

Оскільки визначення відповідності експериментальних кривих нормальному закону розподілу є проміжною операцією, то розрахунок критерію не наводиться, а наведено лише розрахункові χ^2 і критичні $\chi_{0,05}^2$ значення коефіцієнтів:

Розвертка	Вибірка	χ^2	$\chi_{0,05}^2$
різ. виг.	1	7,42	9,5
	2	7,44	9,5
	3	4,79	5,99
станд.	4	3,84	5,99
	5	4,59	5,99
	6	9,09	5,9

Для подальшої статистичної обробки визначимо, чи належать одній сукупності вибірки отримані різально-вигладжувальним інструментом. Для цього скористаємося методом Бартлета заснованому на розгляді величини

$$G_{max} = \frac{S_i^2}{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_k^2}. \quad (1.49)$$

Таким чином, критерій G_{max} дорівнює

$$G_{max} = 0,4295. \quad (1.50)$$

Табличне значення критерію рівне $G_{0,05} = 0,4748$. Оскільки,

$$G_{max} < G_{0,05} \quad (1.51)$$

можна стверджувати, що вибірки отримані різально-вигладжувальними розвертками належать до однієї генеральної сукупності.

Аналогічні розрахунки, із таким самим результатом, були проведені для стандартних розверток.

Таким чином, для порівняння характеристик точності оброблення різально-вигладжувальними і стандартними розвертками, розглянуті вище проміжні результати можливо об'єднати в одну вибірку²⁶.

Результати статистичної обробки вибірки, за законом нормального розподілу, для усереднених вибірок отриманих від різально-вигладжувальних розверток такі:

²⁶Розуміється для кожного інструмента окрему.

N_0	x_i	m_i	$z = \frac{x_i - \bar{x}}{S}$	$\varphi(Z)$	m'_i
1	1,0	3,0	-21,86	0,0707	2,02
2	3,01	7,0	-1,24	0,1849	5,28
3	5,02	8,7	-0,62	0,3292	3,4
4	4,03	10,3	0,0	0,3989	11,4
5	9,04	8,7	0,62	0,3292	9,4
6	11,05	5,7	1,24	0,1849	5,3
7	13,06	2,7	1,85	0,0707	2,02
$\bar{x} = 4,03 \text{ мкм}$				$S = 3,236 \text{ мкм}$	
$v = 0,46$				$v_t = 0,53$	
$\chi^2 = 1,5$				$\chi^2_{0,05} = 12,5$	

Результати статистичної обробки вибірки, за законом нормально-го розподілу для усереднених вибірок отриманих від стандартних розверток такі:

N_0	x_i	m_i	$z = \frac{x_i - \bar{x}}{S}$	$\varphi(Z)$	m'_i
1	4,14	7,0	-1,63	0,1057	2,8
2	7,3	5,0	-1,08	0,2227	5,8
3	10,4	8,3	-0,55	0,3429	9,0
4	13,6	8,3	0,0	0,3989	10,5
5	16,7	8,7	0,54	0,3448	9,5
6	19,9	6,7	1,1	0,2396	6,29
7	22,9	4,0	1,62	0,1074	2,8
$\bar{x} = 13,56 \text{ мкм}$				$S = 5,78 \text{ мкм}$	
$v = 0,67$				$v_t = 0,88$	
$\chi^2 = 2,158$				$\chi^2_{0,05} = 12,06$	

Перевірка відповідності експериментальних усереднених кривих, з прийнятим нормальним законом розподілу, для теоретичної кривої за критерієм Пірсона χ^2 показала, що криві співпадають.

Розрахунок величини поля допуску показав, що різально-вигладжувальні розвертки забезпечують обробку отворів у межах 8 квалітету, тоді як стандартні розвертки тільки в межах 9 квалітету.

Узагальнення

Результати статистичної обробки даних вимірювань точності отворів наступні:

Розвертка	Допуск, мкм	Квалітет
різально-вигладжувальна	24,1	8
стандартна	42,38	9

Таким чином, на підставі статистичної обробки результатів експериментів можна стверджувати, що різально-вигладжувальна розвертка забезпечує підвищення точності обробки на один квалітет у порівнянні із стандартною розверткою.

1.6.2 Форма отворів

Для порівняння точності та характеру геометричної форми отворів оброблених стандартною або різально-вигладжувальною розверткою, була проведена низка дослідів за наступних умов:

- швидкість обробки 4...6 м/хв;
- подача 0,25...0,72 мм/об;
- припуск 0,2 мм на діаметр;
- перевищення $\Delta = 0,01$ мм (для різально-вигладжувальної розвертки).

Вибір такого малого діапазону швидкостей (4...6 м/хв) обумовлений тим, що за більшої швидкості зважаючи на значну різницю шорсткості оброблених поверхонь, отвори оброблені стандартною розверткою неможливо порівняти з отворами обробленими різально-вигладжувальною розверткою, .

Так за швидкості обробки 8...10 м/хв середнє арифметичне відхилення профілю поверхні, обробленої різально-вигладжувальною розверткою, знаходиться в межах 0,16...2,5 мкм, тоді як для стандартної розвертки цей параметр знаходиться в межах 2,5...10 мкм, що є неприйнятним для розвертування.

Вивчення форми оброблених отворів проводилося за круглограмми отриманими на кругломірі фірми Rank Taylor Hobson. Якість оброблених отворів оцінювалася за геометричною формою та за величиною відхилення від круглості.

Результати експериментів показали, що точність отворів оброблених різально-вигладжувальною розверткою вище за точність отворів оброблених стандартною розверткою. Так, середня, в умовах експерименту, величина відхилення від круглості для різально-вигладжувальної розвертки складає 2,55 мкм, у той час як для стандартної

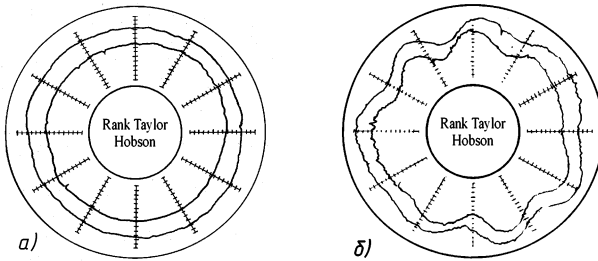


Рис. 1.31. Круглограми
Швидкість $v = 5,6$ м/хв, подача $s = 0,57$ мм/об

- a* – різально-вигладжувальна розвертка $\Delta = 0,01$ мм;
б – стандартна розвертка.

розвертки цей параметр становить 5,44 мкм (більше майже в 2 рази), що дорівнює відповідно V і VI ступеням точності.

На рис. 1.31 представлені круглограми отримані оброблених різними розвертками за однакових умов обробки. Внутрішнє кільце відповідає профілю отвору в перетині розташованому на відстаней 5 мм від верхнього торця (відповідає входу розвертки в отвір), а зовнішнє – перетину розташованому на відстані 5 мм від нижнього торця (відповідає виходу розвертки).

Слід зазначити, що як для стандартної так і для різально-вигладжувальної розвертки відхилення від круглості верхніх перетинів отворів рівне, або дещо більше ніж для перетинів на виході інструмента.

Подібне явище можна пояснити тим, що під час входу розвертки в оброблюваний отвір її центрування в ньому, зважаючи на малу опорну площу, незадовільне. У міру поглиблення інструмента в оброблюваний отвір опорна площа збільшується, поліпшується центрування розвертки і, як наслідок, відбувається зменшення некруглості отвору.

Одночасно з цим слід зазначити, що в разі обробки розвертками стандартної конструкції більшість отворів мала явно виражене ограновування, тоді як отвори оброблені різально-вигладжувальною розверткою практично не мали ограновування.

Причину цього явища можна пояснити наступним чином. У початковий момент розвертування, коли в роботу ще не вступили вигладжувальні елементи, як різально-вигладжувальна так і стандартна

розвертки працюють однаково утворюючи однакове (якщо таке є) ограновування отвору.

Проте, у той момент коли в роботу вступають вигладжувальні елементи, опорна площа робочої частини різально-вигладжувальної розвертки різко зростає.

Окрім цього слід зважати на те, що радіус кривизни циліндричної вигладжувальної стрічки значно більше за радіус кривизни рисок котрі утворюють ограновування отвори. Тому вигладжувальні елементи не можуть повністю западати в риси утворені різальними елементами робочої частини розвертки. Завдяки цьому зменшується коливання розвертки в радіальному напрямі, поліпшується центрування інструмента, а отвір виходить з меншим ограновуванням.

Підтвердженням висловленого припущення може служити той факт, що за наявності ограновування на вході отвору, на виході ограновування не спостерігається.

Узагальнення

Таким чином, на підставі аналізу круглограм можна стверджувати, що величина відхилення від круглості отворів оброблених різально-вигладжувальною розверткою в 2 рази менша за відхилення від круглості отворів оброблених стандартною розверткою і складає (у умовах експерименту) 2,85 мкм для різально-вигладжувальної конструкції. Застосування розверток різально-вигладжувальної конструкції дозволяє значною мірою зменшити ограновування отвору.

Розвертки вигладжувальної конструкції забезпечують отримання точніших отворів у порівнянні із стандартними розвертками. Можна стверджувати, що за рівних умов різально-вигладжувальні розвертки забезпечують підвищення точності на 1 квалітет у порівнянні із стандартними.

У міру збільшення кількості оброблених отворів їх розмір зменшується, як у разі використання різально-вигладжувальної, так і стандартної розверток. Зміна діаметрального розміру оброблюваних отворів у часі носить прямолінійний характер. Проте, зменшення розміру отворів оброблюваних різально-вигладжувальної розверткою відбувається повільніше, ніж у разі використанні стандартної розвертки. Розмірна стійкість різально-вигладжувальних розверток вища за розмірну стійкість стандартних розверток.

1.6.3 Діаметр отворів

Для роботи чистового розмірного інструмента, яким є розвертка, важливе значення має стабільність отримання розміру оброблюваних отворів у часі (розмірна стійкість).

Вивчення характеру зміни розміру отворів, оброблюваних різально-вигладжувальною розверткою, залежно від кількості оброблених отворів проводилося за наступних умов:

- швидкість обробки 5,65 м/хв;
- подача 0,72 мм/об;
- припуск на обробку 0,24 мм на сторону.

Побудована, за експериментальними даними, залежність зміни діаметра Δ_D оброблюваних отворів від їх кількості n допускає її заміну прямою. Випрямлення експериментальної кривої для різально-вигладжувальної розвертки дозволило отримати рівняння:

$$\Delta_D^B = -0,0908n + 14,7166, \quad (1.52)$$

де Δ_D^B – відхилення діаметрального розміру від номінальної величини;

n – кількість оброблених отворів.

Результати проведених експериментів показали, що із збільшенням кількості оброблених отворів відбувається зменшення їх діаметрального розміру, що пояснюється наступними причинами.

У процесі роботи різально-вигладжувальної розвертки її резальні елементи, здійснюючи зрізування припуску на обробку, зношуються як по задній поверхні так і по калібрувальній стрічці. Знос по задній поверхні має вплив на величину сил різання, шорсткість обробленої поверхні, зміну діаметрального розміру оброблюваного отвору.

Знос різальних елементів викликано тим, що під час тертя поверхонь розвертки об оброблювану поверхню деталі, відбувається здряпування мікрокомпонентів поверхневих шарів інструмента. Особливо інтенсивно зношуються поверхні різальних елементів і калібрувальної стрічки. У результаті зносу калібрувальних стрічок діаметральний розмір різальної частини розвертки зменшується. Можна припустити, що одночасно з цим калібруванні стрічки розвертки мають адгезійний знос, прояв дифузного зносу маловірогідний.

Вигладжувальні елементи, наступні за різальними, деформують поверхню із підвищеною мікротвердістю приповерхневих шарів, які

в умовах значних зусиль, що викликані пластичною деформацією, сприяють посиленому абразивному зносу деформуючих поверхонь вигладжувального елемента.

Одночасно з цим, не дивлячись на наявність мастила, зважаючи на значний питомий тиск, відбувається періодичне схоплювання окремих ділянок деталі і вигладжуючих поверхонь вигладжувального елемента. У процесі роботи розвертки відбувається безперервне виникнення і руйнування точок схоплювання. Руйнування відбувається в металі деталі, як менш міцному ніж інструмент. Підтвердженням цього є наявність окремих налипов на вигладжувальних поверхнях.

На думку Зорева²⁷ періодичне виникнення і руйнування адгезійних з'єднань, викликає циклічне навантаження поверхневих шарів вигладжувальних елементів у точках схоплювання. Оскільки матеріал вигладжувальних елементів (інструментальна сталь) більш крихкий ніж матеріал деталі, то під дією періодичного навантаження відбувається локальне руйнування поверхонь вигладжувальних елементів, що також приводить до зменшення діаметрального розміру вигладжувальної частини різально-вигладжувальної розвертки.

Таким чином, у процесі роботи відбувається зменшення діаметрального розміру всіх елементів різально-вигладжувальної розвертки, що приводить до зменшення розміру оброблюваного отвору.

Спрямлення експериментальної кривої для стандартної розвертки дозволило отримати наступне рівняння:

$$\Delta_D^C = -0,3515n + 21,2283, \quad (1.53)$$

де Δ_D^C – відхилення діаметрального розміру від номінальної величини;

n – кількість оброблених отворів.

Результати проведених експериментів показали, що розмір отворів оброблених стандартною розверткою зменшується із збільшенням кількості оброблених отворів, що повністю співпадає з результатами отриманими іншими авторами [1, 50]. Теоретично зменшення розміру отворів у міру збільшення загальної кількості оброблених отворів пояснюється розмірним зносом розвертки.

²⁷Зорев Н.Н. Обработка резанием тугоплавких металлов / Н.Н. Зорев. – М.: Машиностроение, 1966. – 162 с.

Порівняння результатів, отриманих для стандартних і різально-вигладжувальних розверток, показало наступне.

Під час статистичної обробки результатів експериментів були обчислені середні квадратичні відхилення для серії отворів, оброблених різально-вигладжувальними S_B або стандартними S_C розвертками:

$$\begin{aligned} S_B &= 3,236 \text{ мкм}, \\ S_C &= 5,78 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (1.54)$$

Видно, що різально-вигладжувальна розвертка забезпечує вищу точність обробки отворів ніж стандартна, адже $S_B < S_C$.

Перевірка однорідності дисперсій вибірок, отриманих шляхом вимірювання діаметрів отворів оброблених різально-вигладжувальними і стандартними розвертками, за методом Бартлета показала, що між дисперсіями вибірок (стандартна та вигладжувальна) є істотні відмінності на користь вибірки, отриманої для отворів оброблених різально-вигладжувальною розверткою.

Окрім цього, коефіцієнти варіації для різних вибірок становлять:

$$\begin{aligned} v_B &= 0,45, \\ v_C &= 0,57. \end{aligned} \quad (1.55)$$

Як бачимо і за коефіцієнтами варіації $v_B < v_C$ різально-вигладжувальні розвертки забезпечують точніше оброблення отворів ніж стандартні (приблизно на 25%).

Перевірка за критерієм Пірсона χ^2 однорідності розподілу генеральних сукупностей для порівнюваних вибірок показала, що між вибірками існує суттєва різниця:

$$\chi^2 = n_B n_C \sum \frac{1}{m_i^B + m_i^C} \left(\frac{m_i^B}{n_B} + \frac{m_i^C}{n_C} \right), \quad (1.56)$$

де n_B – кількість отворів оброблених різально-вигладжувальною розверткою;

n_C – кількість отворів оброблених стандартною розверткою;

m^B – частість у діапазоні для різально-вигладжувальної розвертки;

m^C – частість у діапазоні для стандартної розвертки.

Отже, за (1.56) маємо

$$\chi^2 = 92,87, \quad (1.57)$$

тоді як критичне значення критерію Пірсона становить

$$\chi_{0,05}^2 = 12,6 \quad \text{тобто} \quad \chi^2 > \chi_{0,05}^2. \quad (1.58)$$

Отже, вибірки для стандартної та різально-вигладжувальної розверток не належать до однієї генеральної сукупності.

Узагальнення

Проведені порівняльні розрахунки переконливо довели, що за точністю обробки отворів вигладжувальні розвертки перевершують стандартні.

При знаходженні математичного опису залежності розміру отворів від часу роботи різально-вигладжувальних і стандартних розверток були визначені тангенси кутів нахилу функціональних прямих, котрі становлять $5^\circ 36'$ для різально-вигладжувальної розвертки і $19^\circ 22'$ для стандартної розвертки. Отже, стандартна розвертка швидше втрачає свій розмір ніж різально-вигладжувальна.

Одночасно з цим, випробування стандартної розвертки були припинені після обробки 50 отворів, оскільки розмір отворів зменшився на 0,023 мм у порівнянні з первинним. За цей же період розмір отворів оброблених різально-вигладжувальною розверткою зменшився приблизно на 0,007...0,01 мм, тобто всього на половину допуску.

Отже, зміна розміру отворів викликана розмірним зносом інструмента в стандартних розверток відбувається швидше, ніж у різально-вигладжувальних.

Різна інтенсивність розмірного зносу різально-вигладжувальної і стандартної розвертки, може бути пояснена різною інтенсивністю зносу калібрувальних стрічок стандартної розвертки і вигладжувальних стрічок різально-вигладжувальної розвертки.

Проведені досліді показали, що в разі обробки високоточних отворів перевагу мають різально-вигладжувальні розвертки, які забезпечують вищу точність.

Отримані характеристики зміни розміру отворів у часі для досліджуваних інструментів дозволяють стверджувати, що розмірна стійкість різально-вигладжувальної розвертки більше розмірної стійкості стандартної розвертки приблизно в 1,8...2 рази. Цей висновок можна зробити з розгляду величини зміни діаметра отворів отриманих в умовах дослідів.

1.6.4 Усадка отворів

Для визначення величини розбиття/усадки отворів під час обробки різально-вигладжувальною розверткою було проведено низку окремих дослідів, які проводилися як у лабораторних умовах, так і в цехових (Київські завод верстатів-автоматів) за наступних умов:

- матеріал зразків сталь 45;
- швидкість обробки 4.6 м/хв;
- подача 0,5...0,63 мм/об;
- змащувально-охолоджувальна рідина Укрінол-2.

Розбиття Δ_p отворів визначалося як різниця діаметрів вигладжувальної частини d_p розвертки і обробленого нею отвору D_o . Опосередковані результати вимірювань $\Delta_p = d_p - D_o$ такі:

d_p , мм	D_o , мм	Δ_p , мм	d_p , мм	D_o , мм	Δ_p , мм
18,0476	18,0379	-0,0097	30,0172	30,0265	-0,0093

Аналіз результатів експериментів показав, що в разі обробки різально-вигладжувальними розвертками сталі 45 із застосуванням ЗОР типу Укрінола-2, відбувається усадка отворів на 0,007...0,009 мм на діаметр, для номінальних діаметрів обробки від 10 до 30 мм.

Для визначення розбиття в разі використання інших рідин, що охолоджують, були проведені скорочені досліди з використанням рідин: ОСМ-3, Аквол-10, Аквол-11. Оброблялися партії зразків з 10 штук. Номінальний діаметр обробки 30 мм.

Проведені досліди показали, що під час розвертування із використанням вищеперелічених рідин, спостерігається усадка отворів на величину 0,012...0,015 мм.

Збільшення усадки в порівнянні із застосуванням Укрінола-2 викликано ймовірно тим, що рідини ОСМ-3, Аквол-10, Аквол-11 виготовлені на маслянистій основі, що приводить до збільшення усадки обробленого отвору.

Слід зазначити, що на величину усадки отворів під час обробки розвертками має вплив не тільки СОЖ, але і режими обробки, геометричні параметри інструмента, якість його виготовлення і спосіб кріплення, властивості оброблюваного матеріалу, технічний стан використовуваного устаткування. Тому до питання величини усадки потрібно підходити з певною обережністю.

1.7 Стійкість розверток

У попередніх розділах розглядалася зміна розміру отворів, оброблених стандартною або різально-вигладжувальною розверткою, залежно від часу роботи інструмента. За результатами дослідів були знайдені математичні залежності що описують їх. Експеримент припинявся в момент виходу розміру оброблюваних отворів за поле допуску відповідне 7 квалітету для даного розміру.

Проте, слід враховувати, що визначена таким чином стійкість отримана непрямым шляхом (безпосереднього вимірювання інструмента не проводилося), а вимірювався тільки діаметр обробленого отвору.

З метою встановити дійсну картину зміни розмірів і розмірної стійкості інструмента, була проведена додаткова серія дослідів в яких контролювався безпосередньо розмір робочих частин інструмента.

Досліди проводилися за наступних умов:

- швидкість обробки 3,9 м/хв;
- подача 0,63 мм/об;
- припуск на обробку 0,2 мм на діаметр;
- глибина розвертування (довжина отвору) 60 мм;
- ЗОР – Укріол-1;
- номінальний діаметр обробки 15,5 мм.

Геометричні параметри інструментів наступні:

- ширина калібрувальної стрічки в стандартної і різальних елементів різально-вигладжувальної розвертки 0,2...0,3 мм;
- ширина вигладжувальних стрічок 0,5 мм;
- кут забірного конуса стандартних і резально-вигладжувальних розверток $\varphi = 45^\circ$;
- задній кут для всіх розверток $\alpha = 6^\circ$,
- передній кут $\gamma = 9^\circ$.

Експерименти повторювали 6 разів для різально-вигладжувальних розверток і 5 – для стандартних, кожного разу новим інструментом. Критерієм припинення дослідів служив вихід розміру отворів за поле допуску відповідне 6 квалітету.

Досліди проводилися на радіальному свердлувальному верстаті 2А55. Вимірювання досліджуваного інструмента здійснювалося важільною скобою з ціною поділки 0,001 мм.

Відхилення Δd розміру від початкового діаметра розвертки стандартної конструкції, контролювалось на калібрувальній частині на відстані 5 мм від забірного конуса. Розвертки різально-вигладжувальної конструкції контролювали на різальній і вигладжувальній стрічках. Графічне зображення результатів експериментів представлено на рис. 1.32.

Математичні залежності, котрі описують криві графіків на рис. 1.32 наступні:

– для розвертки стандартної конструкції:

$$\Delta d = 4,2 \cdot 10^{-4} n^2 + 0,21n - 0,53, \quad (1.59)$$

– для розвертки різально-вигладжувальної конструкції:

$$\Delta d = 4,3 \cdot 10^{-4} n^2 + 0,06n - 0,16. \quad (1.60)$$

Аналіз результатів дослідів показав, що інтенсивність зміни розміру стандартної розвертки і різальної частини різально-вигладжувальної розвертки – практично однакові. Це можна пояснити схожістю виконуваних функцій і геометричних параметрів.

Досліди показали, що діаметральний розмір стандартної розвертки виходить за межі поля допуску 6 квалітету після обробки приблизно 65 отворів, за тих же умов діаметр вигладжувальної частини різально-вигладжувальної розвертки виходить за поле допуску після обробки 120 отворів.

Таким чином, на підставі аналізу результатів експериментів із вивчення зміни діаметрального розміру робочих елементів різально-вигладжувальної і стандартної розверток у процесі роботи, а також враховуючи тотожні результати дослідів у разі визначення зміни діаметрального розміру отворів за часом, можна стверджувати, що розмірна стійкість різально-вигладжувальної розвертки більше розмірної стійкості стандартної розвертки в 1,8...2 рази.

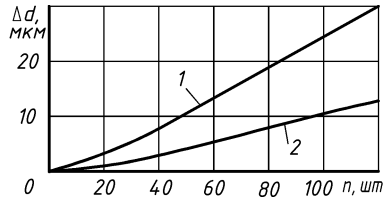


Рис. 1.32. Знос інструмента
1 – стандартна розвертка;
2 – вигладжувальна розвертка

З метою вивчення характеру зносу, у процесі роботи вигладжувальних елементів різально-вигладжувальної розвертки були проведені досліді, в яких періодично проводилося фотографування робочих поверхонь вигладжувальних елементів. Експерименти проводилися за наступних режимів:

- швидкість обробки 5,65 м/х;
- подача 0,72 мм/об.

Для прискорення експериментів припуск на обробку був збільшений до 0,24 мм на сторону. Критерієм припинення дослідів є вихід діаметра оброблених отворів за поле допуску 7 квалітету. У середньому однією розверткою оброблялося 50...60 отворів. Фотографування вигладжувальних елементів здійснювалося через великий інструментальний мікроскоп.

Схема, що пояснює розташування робочих поверхонь на фотографіях представлена на рис. 1.33 на якому:

- 1 – задня поверхня забірного конуса вигладжувального елемента;
- 2 – зминаюча стрічка;
- 3 – вигладжувальна стрічка;
- 4 – задня поверхня вигладжувального елемента.

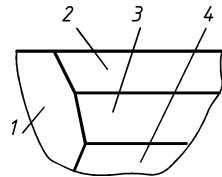
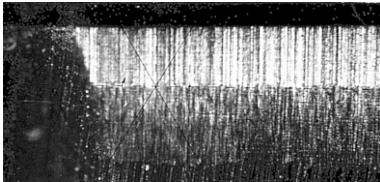


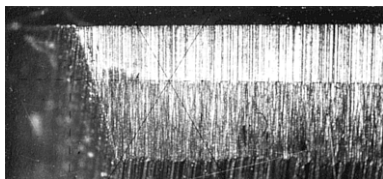
Рис. 1.33.
Розташування
поверхонь

Типові фотографії поверхонь²⁸ вигладжувального елемента, за різною кількістю оброблених отворів, мають такий вигляд:

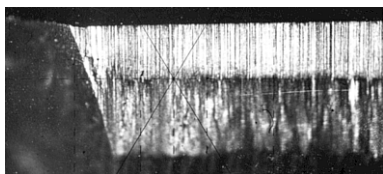


інструмент не
працював

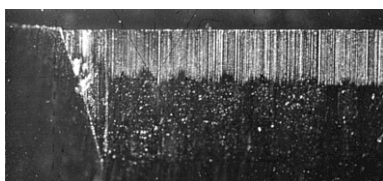
²⁸ Для решти випадків отримані схожі фотографії.



оброблено
1 отвір



оброблено 20
отворів



оброблено 43
отвори

З приведених фотографій видно, що знос робочих поверхонь вигладжувальних елементів відбувається, головним чином, по кромці утвореній перетином зминаючої стрічки і поверхнею забірного конуса. Мало помітний знос починається після обробки 10. . . 15 отворів.

Результати вивчення фотографій показали, що за умов експерименту починаючи з 30. . . 40 отвору на поверхні вигладжувальної стрічки з'являються незначні наліпи. Проте, перевірка шорсткості цих поверхонь на профілометри-профілографі показала, що середнє арифметичне відхилення їх профілю не більш 0,02 мм, тоді як початкова величина середнього арифметичного відхилення становила 0,04. . . 0,06 мкм. Отже, можна стверджувати, що в процесі роботи відбувається згладжування мікронерівностей не тільки оброблюваної поверхні, але і робочих поверхонь інструмента.

Узагальнення

Аналіз текстури рисок, утворених шліфувальним кругом на зминаючій стрічці в різні періоди роботи інструмента дозволив встановити, що поверхня зминаючих стрічок піддається вельми незначному зносу²⁹.

Таким чином, вивчення фотографій робочих поверхонь вигладжувальних елементів у різні періоди роботи різально-вигладжувальної

²⁹Розмитість окремих ділянок викликана похибкою налаштування фотоапаратури.

розвертки дозволило стверджувати, що зміна геометрії і форми вигладжуючих елементів практично не відбувається.

1.7.1 Працездатність розверток

З метою вивчення працездатності різально-вигладжувальних розверток, виготовлених із різних марок інструментальної сталі, було проведено додаткові досліді оброблення конструкційної сталі 45 розвертками виготовленими із сталей Р9 і Р6М5. Для порівняння проводилася обробка розвертками виготовленими із сталі Р18.

Досліді проводилися в виробничих умовах із наступними режимами:

- швидкість обробки 4 м/хв;
- подача 0,63 мм/об;
- припуск на обробку 0,24 мм на діаметр;
- номінальний діаметр обробки 30 мм.

Оскільки експерименти проводилися у виробничих умовах, контролювати параметри кожного отвору не представлялося можливим. Тому шорсткість поверхні отворів контролювалася з інтервалом у 10 отворі, а розмір отворів – робочим калібром.

За результатами вимірювання середнього арифметичного відхилення профілю поверхні отворів оброблених розвертками з різних інструментальних сталей отримано такі математичні залежності:

Р9	$Ra = 8,46 \cdot 10^{-4}n + 0,3048$	вийшла за поле допуску після оброблення 90 отворів.
Р6М5	$Ra = 1,06 \cdot 10^{-3}n + 0,2567$	вийшла за поле допуску після оброблення 80 отворів.
Р18	$Ra = 1,44 \cdot 10^{-3}n + 0,2542$	вийшла за поле допуску після оброблення 120 отворів.

Експерименти показали, що величина середнього арифметичного відхилення профілю практично однакова для всіх інструментів і коливається в межах 0,25. . . 0,40 мкм.

Розмірна стійкість випробовуваних розверток коливається в межах 80. . . 100 отворів, тобто в межах 20 відсотків, що для обробки металів різанням не істотно. Розвертки із сталей Р9 і Р6М5 показали меншу стійкість ніж розвертки із сталі Р18, що і слід було очікувати враховуючи механічні властивості випробовуваних сталей.

Узагальнення

Таким чином, на підставі проведених дослідів, можна зробити низку висновків щодо працездатності різально-вигладжувальних розверток із різних марок інструментальної сталі: середнє арифметичне відхилення профілю поверхні отворів не залежить від марки сталі з якої виготовлена розвертка; розмірна стійкість різально-вигладжувальних розверток із сталей Р9 і Р6М5 дещо нижча за розмірну стійкість розверток виготовлених із сталі Р18.

Можна стверджувати, що розмірна стійкість різально-вигладжувальної розвертки вище розмірної стійкості стандартної розвертки в 1,8... 2 рази.

1.8 Рентгеноструктурний аналіз

1.8.1 Методика рентгеноструктурного аналізу

Сталь 45 є середньо-вуглецевою сталлю, що має після відпалу структуру, яка складається з фериту і перліту. У термічно обробленій сталі структура складається з продуктів розпаду мартенситу. Структура сталі 45 не змінюється під час деформування, тому вона зручна для проведення рентгеноструктурного дослідження обробленої поверхні,

Механічні властивості поверхневих шарів деталей із сталі 45 залежать від температури гарту, часу і температури відпалу, величини та розподілу за глибиною залишкових напружень, наявності дефектів кристалічної будови на поверхні і в приповерхневому шарі.

Метою рентгеноструктурного аналізу є:

- дослідження зміни фізико-механічних властивостей приповерхневих шарів металу залежно від режимів обробки для різально-вигладжувальної розвертки з перевищенням $\Delta = 0,01$ мм;
- вивчення характеру:
 - роздрібленості зерен приповерхневих шарів;
 - залишкових напружень I-го і II-го роду;
 - концентраторів напружень та мікротвердості за глибиною приповерхневого шару.

Вивчення впливу величини перевищення Δ вигладжувальних елементів над різальними на фізико-механічні властивості приповерхневих шарів металу, досліджувалось за зразками обробленими стан-

дартною або різально-вигладжувальною розверткою, які мали такі параметри:

- величина перевищення Δ вигладжувальних елементів над різальними 0,01, 0,015 і 0,02 мм;
- швидкість обробки 4 м/хв;
- подача 0,26 мм/об.

Вибір саме цих параметрів обумовлений тим, що для вказаних режимів обробки шорсткість обробленої поверхні приблизно однакова для всіх досліджуваних інструментів. Зміна режимів обробки різко збільшує різницю шорсткості оброблених поверхонь деталей, що унеможливило подальше порівняння зразків.

Вивчення зміни фізико-механічних властивостей приповерхневого шару отворів, оброблених різально-вигладжувальною розверткою з перевищенням $\Delta = 0,01$ мм, залежно від швидкості обробки і подачі досліджувалося за умов:

- швидкість обробки 4 і 11,4 м/хв;
- подача 0,26 і 0,72 мм/об;
- матеріал заготовки – сталь 45 у стані постачання;
- номінальний діаметр обробки 13,6 мм;
- припуск під оброблення 0,21 мм на діаметр.

Перед розвертуванням, після свердлення і зенкерування отвору, зразки не відпалювали. Тому на характер розподілу напружень можливий вплив результатів попередньої обробки (свердління та зенкерування).

Видалення поверхневих шарів досліджуваних зразків, під час вивчення їх фізико-механічних властивостей, здійснювали травленням у суміші кислот наступного складу:

- сірчана 33,3 % від загальної ваги розчину;
- соляна 33,3 % від загальної ваги розчину;
- азотна 33,3 % від загальної ваги розчину.

Величину видаленого приповерхневого шару визначали за різницею ваги досліджуваного зразка до, та після травлення в суміші кислот.

Для характеристики дійсної величини зміни параметрів поверхні обробленої різально-вигладжувальною розверткою в порівнянні з

поверхнею, обробленою стандартною розверткою використовувався спосіб відповідно до якого:

$$J = h - h_e, \quad (1.61)$$

де J – величина зміни досліджуваного параметра в порівнянні з еталонним;

h – досліджувана величина порівнюваного параметра;

h_e – еталонна досліджувана величина.

Вивчення дійсної величини зміни досліджуваного параметра дозволяє характеризувати зміну процесів, що відбуваються безпосередньо в тих параметрах і розмірностях, в яких вони виражаються, а не безрозмірною величиною, як у разі методу відносної зміни досліджуваного параметру³⁰.

1.8.2 Роздробленість зерен приповерхневого шару

Загальне текстування вивчалось по дебаєграмам, отриманим у камері РКД у хромовому випромінюванні. Відносно роздрібленості зерен судили за наявністю окремих плям-рефлексів і їх угрупованню на лініях.

Рентгенограми знімали від шліфа методом зворотної зйомки. Площина дотична до ділянки поверхні розгортання була перпендикулярна рентгенівському променю, таким чином, знімки були отримані на великих кутах дифракції.

Параметри отримання дебаєграм³¹ такі: випромінювання хромове; досліджувана поверхня розташована під кутом 90° до променя.

Підписи біля дебаєграм (рис. 1.34) позначають:

- Δ – величина перевищення вигладжувальних елементів над різальними;
- x – товщина знятого шару.

³⁰Вимірювання викладені в розділі були проведені в лабораторіях Київського Державного університету ім. Т.Г. Шевченка.

³¹Загалом дебаєграми були отримані від зразків з кроком 20...30 мкм товщини видаленого шару.

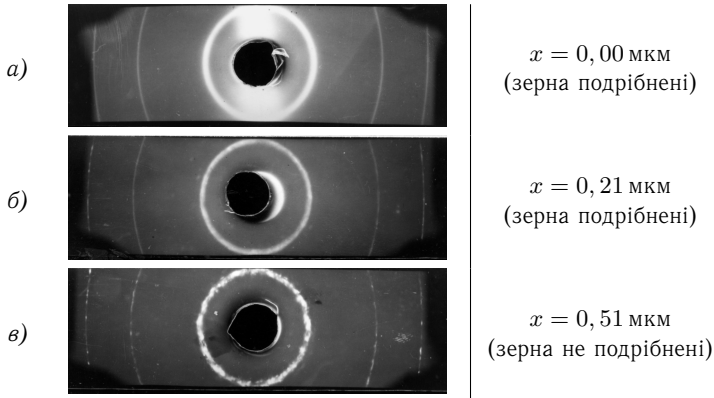


Рис. 1.34. Дебаєграми стандартної розвертки

З приведених дебаєграм видно, що лінії зняті від поверхневих шарів суцільні, тоді як лінії відповідні глибинним приповерхневим шарам металу носять точковий характер.

Це пояснюється тим, що під час зйомки рентгенограми віддзеркалення на плівку дає кожен кристал, що задовольняє умові Вульфа-Бреггов [5, 29, 39]:

$$2d \sin \Theta = k\lambda, \quad (1.62)$$

де d – відстань між атомними площинами;

λ – довжина хвилі випромінювання;

Θ – кут дифракції;

k – коефіцієнт кратності.

Якщо кількість кристалів, що бере участь у віддзеркаленні достатньо велика (тобто розмір кристалів малий), то практично точкові рефлекси утворюють на рентгенограмі суцільні інтерференційні кільця. Якщо ж у створенні кільця бере участь мала кількість кристалів, то воно виходить пунктирним (розміри кристалів зазвичай більше 2...5 мкм).

Таким чином, на підставі вивчення рентгенограм можна зробити висновок, що процес розвертування значно подрібнює зерна початкового матеріалу³² у приповерхневих шарах.

На отриманих дебаєграмах є відмінності властиві різним типам розверток. Так для стандартної розвертки лінії зняті з шарів, що

³²Матеріалу деталі в її початковому стані, до оброблення розвертуванням

лежать під поверхнею на глибині 21 мкм ще суцільні (рис. 1.34б), тобто матеріал дрібнозернистий³³. Однак на рис. 1.35а, що відповідає різально-вигладжувальній розвертці з величиною перевищення 0,01 мм, суцільні лінії спостерігаються для шару, що досягає глибини приблизно 50 мкм.

Для різально-вигладжувальної розвертки з перевищенням 0,01 мм подрібнення зерен досягає глибини 100 мкм (рис. 1.35б). Аналогічно для розвертки з перевищенням $\Delta = 0,015$ мм (рис. 1.35в) товщина подрібненого шару становить $x = 101$ мкм.

Розвертка, що має $\Delta = 0,02$ мм забезпечує подрібнення на глибині $x = 103$ мкм. Однак, на глибині $x = 290$ мкм подрібнення зарен вже не виявлено (рис. 1.35г).

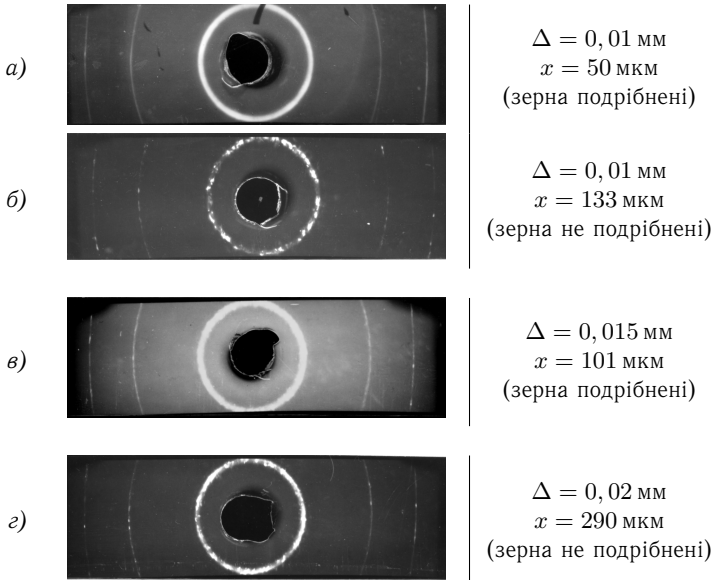


Рис. 1.35. Дебаєграми вигладжувальної розвертки

Отже, на підставі експериментальних даних, можна зробити висновок, що товщина шару роздрібнених зерен збільшується із збільшенням перевищення. Одночасно слід зазначити, що різниця в товщині шару роздрібнених зерен у разі обробки різально-вигладжу-

³³Треба враховувати, що товщини видаленого шару має певну дискретність та невизначеність, адже видалення здійснювалось травленням, яке не дозволяє достатньо точно контролювати товщину видаленого шару.

вальними розвертками з перевищенням 0,015 і 0,02 мм складає всього 3 мкм, тобто близько 3%. Аналіз проведених дослідів дозволяє отримати такі результати:

Тип розвертки	Перевищення Δ , мм	Товщина дрібнозернистої зони, мкм
Стандартна	–	20
Різ.-виг. {	0,010	50
	0,015	100
	0,020	103

Узагальнення

На підстави результатів рентгеноструктурного аналізу та вивчення роздрібленості зерен можна зробити висновок, що обробка різально-вигладжувальними розвертками має позитивний вплив на приповерхневий шар деталі, що полягає в подрібненні зерен оброблюваного виробу в поверхневому шарі на значну глибину.

1.8.3 Залишкові напруження

Напруження першого роду

Напруження I-го роду визначались по зсуву ліній на дифрактограмах отриманих іонізаційним методом на установці УРС-50И. Якщо відомо кут зсуву лінії $\Delta\Theta$, то залишкові напруження визначається за формулою [5, 16, 29, 35]

$$\sigma_I = \Delta\Theta \frac{E}{\mu} \operatorname{ctg} \Theta, \quad (1.63)$$

де σ_I – напруження першого роду;

E – модуль Юнга $E = 2,3 \cdot 10^4$ кгс/мм² ($2,26 \cdot 10^5$ МПа);

μ – коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,31$.

На рис. 1.36 показано розподіл напружень I-го роду для зразків, оброблених стандартною або різально-вигладжувальною розверткою з різною величиною перевищення за однакових умов оброблення.

На рис. 1.37 наведено істинну зміну напружень I-го роду, обчислену за формулою 1.61 на с. 84.

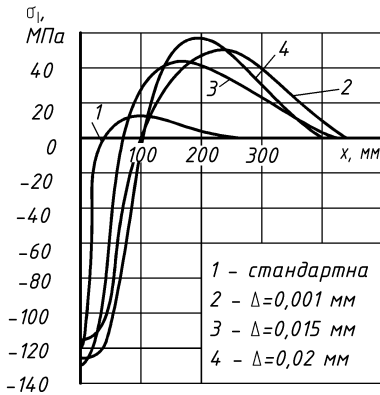


Рис. 1.36. Напруження I-го роду (перевищення)

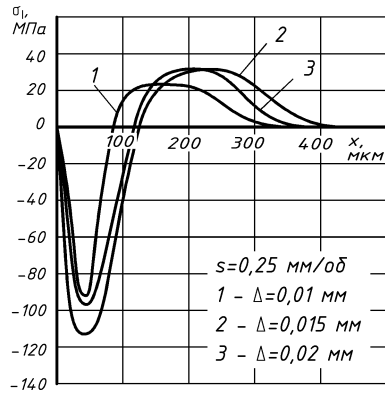


Рис. 1.37. Зміна напружень I-го роду (перевищення)

Величина залишкових напружень I-го роду в приповерхневих шарах однакова для всіх типів розверток і становить $12 \dots 14$ кгс/мм² (120...140 МПа).

Одночасно з цим, напруження в поверхневих шарах є від'ємні, тобто матеріал знаходиться під дією стискаючих напружень, у той час як глибші шари металу знаходяться під дією додатних напружень – тобто таких, котрі розтягують.

У той же час, глибина проникнення додатних і від'ємних залишкових напружень у товщину зразків для різально-вигладжувальної розвертки більша ніж для стандартної і складає 400...450 мкм. Відповідно для стандартної маємо 250 мкм.

Глибина проникнення від'ємних напружень у приповерхневі шари зразків, оброблених різально-вигладжувальними розвертками, пропорційна зміні величини перевищення і становить

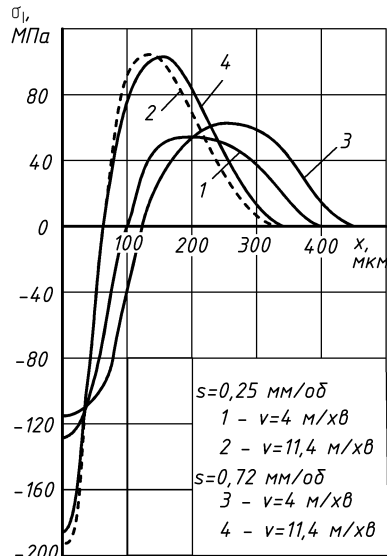


Рис. 1.38. Напруження I-го роду (ріжими)

70...120 мкм у разі зміни перевищення від 0,01 до 0,02 мм. За тих же умов стандартна розвертка створює від'ємні напруження на глибину приблизно 30 мкм.

Характер розподілу напружень I-го роду для різально-вигладжувальної розвертки з перевищенням 0,01 мм, залежно від режимів обробки, представлений на рис. 1.38. З наведеного рисунку видно, що напруження I-го роду збільшується із збільшенням швидкості обробки, проте глибина їх проникнення у товщу приповерхневого шару зменшується.

У той же, час зміна подачі від 0,25 до 0,72 мм/об практично не має помітного впливу на характер розподілу напружень I-го роду.

Узагальнення

Збільшення напружень з одночасним зменшенням глибини їх проникнення пояснюється тим [13, 23], що із збільшенням швидкості обробки відбувається збільшення різниці фаз пружної і пластичної деформацій. Пластична деформація не встигає розповсюдитися на велику глибину і локалізується в приповерхневому шарі. Окрім цього, вона не тільки локалізується в приповерхневих шарах, але й одночасно набуває більшої інтенсивності.

Одночасно з цим, відбувається збільшення швидкості деформації, що призводить до збільшення напруження та сприяє збільшенню залишкових напружень.

Отже, для практичного застосування (з погляду розподілу залишкових напружень I-го роду) доцільно застосовувати різально-вигладжувальну розвертку з більшими швидкостями роботи.

Напруження другого роду

Як видно з наведених вище рентгенограм лінії відповідні великим кутам, тим більше розмиті, чим ближче шари металу, від яких отримана рентгенограма, до поверхні обробки. Це розширення обумовлене мікронапруженнями.

Мікронапруження вивчалися по рентгенограмах, знятих на іонізаційному дифрактометрі УРС-50И. Лінії записувалися автоматично для швидкості лічильника 0,5 град/хв. Діафрагми перед зразком 1 і 0,5 мм. На самому лічильнику діафрагма шириною 0,5 мм. Висота пучка 15...17 мм, ширина 1 мм. Анодний струм трубки 4 мА, напруга 15...20 квт.

Розширення лінії обумовлене як мікронапруженнями, так і роздрібненням кристалічних блоків до розміру приблизно 10^{-4} мм [45].

Проте, на підставі ретельних виконаних робіт [33], вважається, що найчастіше розширення лінії обумовлене наявністю мікронапружень. Це справедливо принаймні для заліза. Розрахунок інтерференційних ліній проводився за формулою:

$$\sigma_{II} = E \frac{b - B}{4 \operatorname{tg} \Theta}, \quad (1.64)$$

де σ_{II} – мікронапруження другого роду;
 E – модуль Юнга;
 b – половина ширини лінії (виміряна в радіанах) для дослідного зразка;
 B – половина ширини лінії (виміряна в радіанах) для еталонного зразка;
 Θ – дифракційний кут.

Розподіл напружень другого роду за глибиною приповерхневого шару залежно від типу розвертки подано на рис. 1.39. З рисунка видно, що на поверхні зразка напруження II-го роду від'ємні і збільшуються із збільшенням величини перевищення. У міру проникнення в товщу зразки їх знак змінюється на додатний, а величина змінюється пропорційно зміні величини перевищення.

Спостережуваний характер розподілу напружень II-го роду пояснюється збільшенням об'єму і глибини проникнення зони пластичного деформування металу, яке відбуваються із збільшенням перевищення, що повністю узгоджується з теорією холодної обробки металів тиском [43].

Розподіл напружень II-го роду, залежно від режимів обробки для вигладжувальної розвертки з перевищенням 0,01 мм, представлено на рис. 1.40.

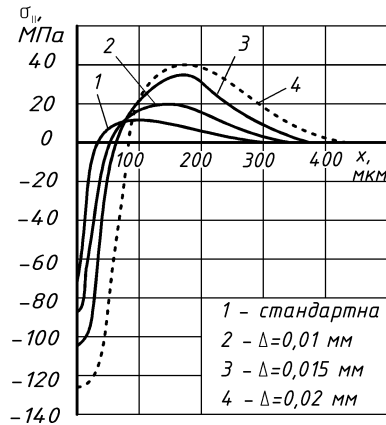


Рис. 1.39. Напруження II-го роду (перевищення)

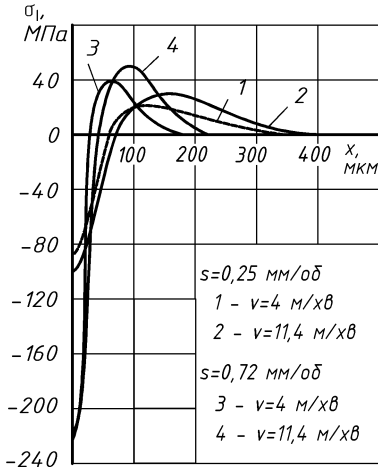


Рис. 1.40. Напруження II-го роду (режими)

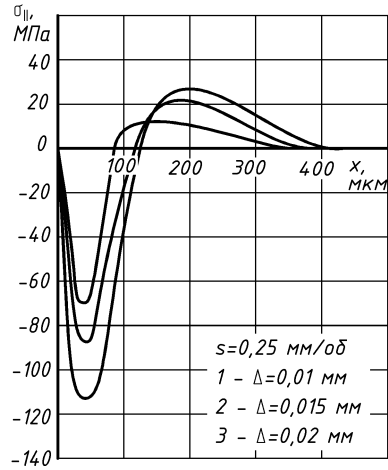


Рис. 1.41. Зміна напружень II-го роду

На рис. 1.41 наведена істинна зміна напружень II-го роду обчислена за формулою 1.61 на с. 84.

З приведенного рисунку видно, що величина напружень II-го роду зростає із збільшенням швидкості обробки, одночасно глибина їх проникнення зменшується. У той же час, зміна подачі мало впливає на величину залишкових напружень другого роду. Подібний розподіл залишкових напружень другого роду викликано тими ж чинниками, що і для випадку залишкових напружень першого роду. Тобто, збільшенням швидкості деформування і як наслідок цього – локалізацією пластичної деформації в поверхневому шарі обробленого отвору, з одночасним збільшенням залишкових напружень.

Узагальнення

Таким чином, на підставі проведеного аналізу розподілу залишкових напружень другого роду залежно від режимів обробки можна зробити висновок, що величина залишкових напружень II-го роду збільшується із збільшенням швидкості обробки і не залежить від величини подачі. У той же час, глибина проникнення залишкових напружень II-го роду в приповерхневі шари обробленого отвору зменшується із збільшенням швидкості обробки.

1.8.4 Концентратори напружень

З практики електроерозійної обробки металів відомо, що під час електролітичного травлення ділянки оброблюваного зразка, які мають внутрішні напруження, руйнуються швидше ніж ділянки, котрі не мають напружень³⁴.

Це явище спостерігається у вигляді лунок на досліджуваних поверхні деталі. Властивість напружених ділянок руйнуватися швидше за основну масу зразка, була використана під час проведення нижчевикладених досліджень.

Виявлення концентраторів напруження здійснювалось методом електрополірування, з подальшим підрахуванням кількості лунок на одиницю площі через металографічний мікроскоп МИМ-6.

Процес електрополірування відбувався з підтриманням наступних параметрів:

- електролітичний розчин:
 - сірчана кислота 33% від загального об'єму;
 - ортофосфорна кислота 67% від загального об'єму;
- щільність струму $1,5 \text{ А/мм}^2$;
- напруга 10 В;
- температура електроліту в зоні зразка $50 \dots 60^\circ$;
- швидкість електрополірування 4 мкм/хв.

Під час пластичного деформування полікристалічних тіл (якими є метали) зміна їх форми складається з відносних переміщень зерен, тобто унаслідок виникнення і переміщення дислокацій.

У цей час площини ковзання, в окремих зернах полікристала, орієнтовані в просторі довільно. Це приводить до того, що під дією прикладеного навантаження, пластична деформація (зсув по площині ковзання) починається не в всіх зерен одразу, а поступово. У першу чергу розповсюдження дислокацій відбувається в зернах із сприятливим орієнтуванням площин ковзання.

³⁴Волосевич П. Ю. Концентраторы напряжений и их роль в формировании механических свойств поликристаллов с наноразмерными элементами структуры / П. Ю. Волосевич. // Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины. – 2011. – №12. – С. 367–382.

Рыбин В. В. Границы зёрен в металлах / В. В. Рыбин, А. Н. Орлов, В. Н. Переверзенцев. – М.: Металлургия, 1980. – 286 с.

У міру збільшення деформуючого зусилля відбувається зсув по площині ковзання і в менш "сприятливих" зернах. Нарешті, досягши деякої величини напруження (межі текучості), у пластичній деформації бере участь більшість зерен металу [40, 43].

Розташування зерен із "сприятливою" орієнтацією площин ковзання і "несприятливою", у полікристалі рівномірно за всім об'ємом. Отже, найбільша кількість зрушень (дислокацій) спостерігається на ділянках із сприятливим найбільшим деформуючим зусиллям.

Різна спрямованість площин ковзання, а отже і різна спрямованість зрушень у сусідніх зернах, приводить до "натискання" одного зерна на інше. Одночасно, на окремих ділянках поверхні зерен підвищується рівень діючих напружень, тобто виникає концентрація напруження. Ділянки поверхні зерен з підвищеним рівнем напружень, під час деформацій полікристала, стають додатковим джерелом дислокацій.

Під час обробки розвертками різально-вигладжувальної конструкції (що аналогічне навантаженню товстостінного циліндра зусиллями прикладеними до внутрішньої сторони) деформуючі напруження максимальні на самій поверхні приповерхневого шару. У міру поглиблення вони зменшуються [26], що підтверджується результатами викладеними в попередніх розділах роботи.

Отже, розподіл дислокації за глибиною приповерхневого шару повинен бути безперервний. Розподіл мікротвердості за глибиною приповерхневого шару (обумовлений в основному, наявністю дислокацій) підтверджує це.

Узагальнюючи вищевикладене можна стверджувати, що в приповерхневих шарах отворів оброблених різально-вигладжувальною розверткою, на самій поверхні досліджуваного шару кількість концентраторів напружень досягає максимально можливої, для даного полікристала, величини. Поступово їх кількість зменшується із збільшенням глибини до певного рівня, відповідного кількості дис-

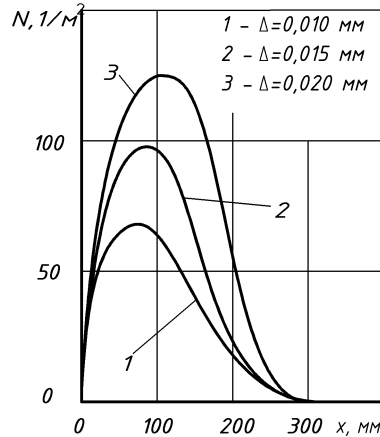


Рис. 1.42. Концентратори напружень

локацій в глибинних, неторкнутих пластичною деформацією приповерхневих шарах металу.

Під час аналізу рис. 1.42 може здатися, що на самій поверхні концентратори напружень повністю відсутні. Проте це не так. Отримані результати пояснюються таким чином.

Як наголошувалося вище, під час електролітичного травлення ділянки з підвищеною напруженістю (концентратори напружень) розчиняються швидше за основну масу зразка. У нашому випадку, зважаючи на велику щільність дислокацій на поверхні досліджуваних зразків, що досягає своєї максимальної величини – "швидкорозчинні" ділянки з'єднуються між собою, утворюючи однорідний фон нерозрізнимий під мікроскопом.

Після травлення глибших ділянок приповерхневого шару, що мають меншу щільність концентраторів, серед загальної наявності дислокацій можна розрізнити найбільш великі, з величиною напруження більшою ніж у довколишніх ділянках приповерхневого шару.

Таким чином, із поглибленням у товщу досліджуваного шару ми спостерігаємо як-би збільшення кількості концентраторів напруження. Таке уявне збільшення кількості концентраторів напруження відбувається до деякої величини, яка відповідає на наведених рисунках максимальній (найвищій) ділянці кривих.

Після досягнення максимуму, криві відображають дійсний розподіл концентраторів напружень за глибиною приповерхневого шару.

Таким чином, можна зробити наступні висновки, щодо графічного зображення отриманих результатів. Ділянки графіків, що лежать правіше за зоною максимуму, відображають дійсний характер розподілу концентраторів напружень за глибиною приповерхневого шару.

1.9 Мікротвердість приповерхневих шарів

У металі, що деформується, із збільшенням ступеня деформації збільшуються всі показники опору деформації: межі пружності, пропорційності, текучості і міцності. Збільшується також твердість металу. Одночасно з цим спостерігається зменшення показників пластичності – подовження та звуження, ударна в'язкість.

Сукупність цих явищ, пов'язана із зміною механічних і фізичних властивостей металу в процесі пластичної деформації, називається зміцненням (наклéпанням поверхні).

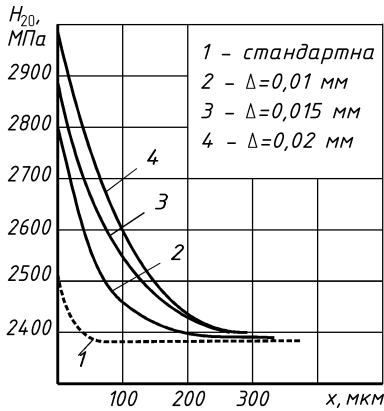


Рис. 1.43. Мікротвердість (перевищення)

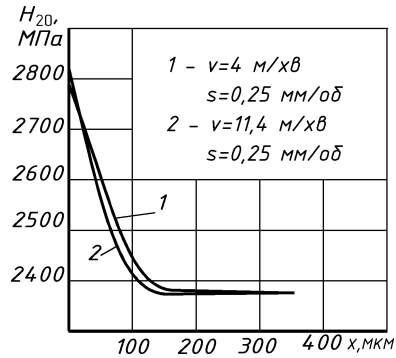


Рис. 1.44. Мікротвердість (режими)

Зміна механічних властивостей металу і зокрема збільшення його міцності в значній мірі пояснюється збільшенням, у міру деформацій, опором зсуву дислокацій. Все разом і викликає зміцнення металу в разі наклепання. Рентгенографічно наклепання виявляється як розмиті лінії, що є сумарним наслідком придбаних кристалом спотворень. Розмитість ліній рентгенограм добре видно на приведених вище рисунках.

Вимірювання мікротвердості³⁵ проводили на приладі ПМТ-3 під навантаженням 20 г. Менші навантаження дають малий відбиток, тому зростає похибка вимірювань. Великі – небажані, оскільки “продавлюють” дуже велику товщину матеріалу і, таким чином, спотворюються результати визначення мікротвердості з пошаровим зняттям.

Графічне зображення результатів досліджень мікротвердості при поверхневого шару, залежно від параметрів інструмента, подано на рис. 1.43. З рисунку видно, що найбільше значення мікротвердості спостерігається на поверхні отвору обробленого розверткою з перевищенням $\Delta = 0,02$ мм.

³⁵ Мікротвердість (англ. *microhardness*) твердість окремих ділянок мікроструктури матеріалу. Мікротвердість визначається ідентуванням при навантаженні на індентор не більше 2 Н (при більшому навантаженні отримані характеристики матеріалу відносяться до макромасштабних) і при вдавлюванні індентора не менше, чим на 200 нм (при випробуваннях з меншим впровадженням мова йде вже про нанотвердість).

Проте, розподіл мікротвердості за глибиною, у зразків оброблених за допомогою різально-вигладжувальної розвертки, більший у 5...10 разів (у залежності від величини перевищення), ніж у зразків оброблених стандартною розверткою.

Результати досліджень залежності мікротвердості від режимів обробки, у разі використання вигладжувальної розвертки з перевищенням $\Delta = 0,01$ мм, представлені на рис. 1.44.

З рисунка видно, що мікротвердість поверхневих шарів у всіх зразків приблизно однакова в межах розсіювання. Проте, вона трохи збільшується із збільшенням швидкості, що можна пояснити локалізацією деформаційних процесів у приповерхневих шарах.

Підвищення мікротвердості приповерхневих шарів у разі швидкості 4 м/хв проникає на більшу глибину, ніж у разі швидкості обробки 11,4 м/хв, що пояснюється локалізацією пластичної деформації в поверхневому шарі в разі збільшенні швидкості деформації.

Величина подачі, як показали результати експериментів, на зміну мікротвердості помітного впливу не має, що можна пояснити незалежності швидкості деформування від подачі. Адже, величина подачі буде впливати тільки на об'єм зони деформування, а не на швидкість розповсюдження деформації.

Узагальнення

Збільшення товщини зміцненого шару, у разі обробки різально-вигладжувальними розвертками, має важливе практичне значення.

У разі використання розвертки стандартної конструкції, товщина зміцненого шару становить всього біля 10 мкм, що сумірно з висотою мікронерівностей обробленої поверхні. Отже, значна частина шару підвищеної мікротвердості припадає на приповерхневі мікронерівності. Тому, після періоду прироблення такої поверхні в рухомому з'єднанні, зміцнений шар (через абразивний знос) буде практично весь знищений.

На противагу цьому в разі використання різально-вигладжувальної розвертки це не відбудеться через значно більшу глибину проникнення наклепання, яка досягає приблизно 100 мкм

Таким чином, на підставі проведених експериментів можна стверджувати, що різально-вигладжувальні розвертки забезпечують більше збільшення мікротвердості за глибиною, ніж розвертки стандартної конструкції. Проте, із збільшенням швидкості обробки, товщина шару підвищеної мікротвердості зменшується.

1.10 Висновки

Не підставі аналізу стану приповерхневих шарів зразків оброблених стандартною або різально-вигладжувальною розверткою, можна зробити низку висновків, щодо фізико-механічних характеристик приповерхневого шару розвернутого отвору.

Дослідженнями встановлено, що різально-вигладжувальна розвертка викликає збільшення напружень першого і другого роду в порівнянні із стандартною розверткою.

Всі досліджувані конструкції розверток здійснюють подрібнення зерен приповерхневого шару, товщина якого пропорційна величині перевищення і досягає 100 мкм для різально-вигладжувальної розвертки з величиною перевищення $\Delta = 0,02$ мм, тоді як стандартна розвертка забезпечує подрібнення тільки на глибину до 20 мкм.

Застосування розверток різально-вигладжувальної конструкції дозволяє отримати приповерхневі шари з більш рівномірним розподілом концентратів напружень, ніж у разі застосування стандартної розвертки.

Досліди показали, що мікротвердість приповерхневого шару підвищується для усіх типів розверток і є максимальною в разі використанні різально-вигладжувальної розвертки з величиною перевищення $\Delta = 0,02$ мм.

Встановлено, що із збільшення швидкості обробки товщина шару з підвищеною мікротвердістю зменшується і навпаки. Одночасно встановлено, що величина подачі істотного впливу не має.

Слід відзначити, що зміни в приповерхневих шарах отворів, після обробки різально-вигладжувальними розвертками, позитивно впливають на експлуатаційні якості виробу. Так у роботах [13, 10] встановлено, що подрібнення зерен приповерхневого шару, а також наявність у приповерхневих шарах стискуючих залишкових напружень, сприяє підвищенню втомної міцності деталей машин.

Дослідження проведені Прейсом [30, 31], Крагельським³⁶ [13], Хрущовим і Бабічевим [47, 48, 49] із вивчення зносостійкості сталей (зокрема сталі 45), що піддавалася обкатуванню роликми (підвищення мікротвердості приповерхневих шарів) дозволяють говорити про збільшення відносної зносостійкості сталі 45 на 15. . . 20%, а після обробки вигладжувальним інструментом загартованих сталей – до 50%.

³⁶Крагельський Ігор Вікторович (1908–1989) радянський фізик, автор молекулярної механічної теорії тертя і втомної теорії зношування твердих тіл.

Роботами Кудрявцева³⁷ [15], Нанеса [20] і низкою інших авторів [24, 27, 28, 36, 41 та ін.] також підтверджується підвищення міцності і довговічності деталей, що піддалися механічному вигладжуванню.

У роботах Одінга [23] і Ваніберга [10] наголошується, що підвищення однорідності розподілу дислокацій в приповерхневому шарі, а також наявність у ньому стискаючих залишкових напружень, сприяє підвищенню його міцності з одночасним збільшенням твердості.

Таким чином, на підставі аналізу результатів викладених досліджень можна стверджувати, що обробка отворів різально-вигладжувальними розвертками сприяє поліпшенню експлуатаційних якостей деталей.

1. На підставі аналізу літературних джерел та результатів проведених досліджень, розроблена розвертка різально-вигладжувальної конструкції, що поєднує процеси різання з пластичним деформуванням приповерхневих шарів.

2. Оптимальна ширина вигладжувальної стрічки, з урахуванням зони поза-контактної деформації, а також розмірної стійкості інструмента становить 0,5 мм. У разі зміни кута φ_p забірного конуса різальної частини розвертки від 15 до 60°, крива шорсткості носить сідоподібний характер з мінімальним значенням для $\varphi_p = 45^\circ$.

3. Досліджена залежність шорсткості обробленої поверхні від величини перевищення вигладжувальних елементів над різальними в межах від 0,00 до 0,02 мм. Теоретично розраховано і експериментально підтверджено, що мінімальна шорсткість обробленої поверхні спостерігається для величини перевищення $\Delta = 0,01$ мм.

4. Встановлено, що в разі швидкості обробки 4...12 м/хв і подачі 0,25...0,72 мм/об різально-вигладжувальна розвертка забезпечує середнє арифметичне відхилення профілю в межах 0,1...0,25 мкм, тоді як стандартна в межах 0,2...2 мкм.

5. Встановлено, що розвертування супроводжується подрібненням зерен приповерхневого шару на глибину тим більшу, чим більше перевищення і рівну: для стандартної розвертки 20 мкм і 100 мкм

³⁷Кудрявцев Іван Васильович (1921—1975) організатор військової промисловості, військовий вчений, засновник і перший директор НДІ «Квант». Лауреат ряду Державних премій (СРСР і УРСР). Перший в СРСР розробив і реалізував комп'ютеризовані корабельні радіоелектронні комплекси. До наших днів на пострадянському просторі ім'я ученого залишилося маловідомим у зв'язку з тим, що велика частина робіт ученого і деталі його біографії засекречені і до наших днів (правда, за кордоном учений широко відомий).

для різально-вигладжувальної з перевищенням 0,02 мм. Одночасно з цим, у приповерхневих шарах (незалежно від конструкції інструмента) існують від'ємні залишкові напруження I і II роду величиною 12...15 кгс/мм² (118...147 МПа), які змінюються на додатні в міру поглиблення в товщину металу.

6. Мікротвердість приповерхневих шарів отворів, оброблених різально-вигладжувальними розвертками із величиною радіального перевищення 0,02 мм, досягає 3000 МПа.

Список літератури

1. Белоус Ю. П. Точность отверстий при развертывании / Ю. П. Белоус. // Станки и инструмент. – 1974. – №4.
2. Воробьев В. Н. Высокопроизводительные инструменты для точной обработки, отверстий / В. Н. Воробьев. – М.: ЦБТИ, 1938. – 84 с.
3. Галей М. Л. Развертки / М. Л. Галей. – М.: Машиностроение, 1960. – 64 с.
4. Горанский Г. К. Высокопроизводительный инструмент. Инструмент для обработка отверстий / Г. К. Горанский. – Минск: Вишэйша школа, 1986. – 106 с
5. Горелик С. О. Рентгенографический и электроиннооптический анализ / С. О. Горелик. – М.: НАУКА, 1970. – 168 с.
6. Григорьев В. П. Режуще-выглаживавише развертки для обработки точных отверстий / В. П. Григорьев. // Станки и режущие инструменты. – 1969. – С. 12–24.
7. Григорьев В. П. Точность при обработке режуще-выглаживающими развертками / В. П. Григорьев. // Резание и инструмент. – 1971. – №3. – С. 16–21.
8. Григорьев В. П. Развертка для обработки подшипников гидронасоса / В. П. Григорьев. // Технология и организация производства. – 1970. – №7. – С. 24–32.
9. Григорьев В. П. Влияние геометрических параметров режущих зубьев режуще-шпгтжиающих разверток на точность обработки отверстий / В. П. Григорьев. // Резание и инструмент. – 1970. – №2. – С. 12–22
10. Ваннибер Ю. С. Сверление, развертывание и зенкерование / Ю. С. Ваннибер. – Л.: Машиностроение, 1984. – 84 с.
11. Ланнибер Ю. К. Развертывание и зенкерование / Ю. К. Ланнибер. – Л.: Машиностроение, 1985. – 64 с.
12. Елихин Ю. М. Режуще-уплотняющая развертка / Ю. М. Елихин, А. Н. Левченко. // Синтетические алмазы. – 1972. – №6. – С. 24–31.
13. Крагельский Г. П. Трение и износ / Г. П. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1963. – 254 с.
14. Кривоухов В. А. Резаше конструкционшх металлов, режущие инструменты и станки / В. А. Кривоухов. – М.: Машиностроение, 1967. – 204 с.
15. Кудрявцев И. В. Повышение прочности и долговечности деталей машин поверхностным наклепом / И. В. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1970. – 186 с.

16. Ларин М. Н. Высокопроизводительная конструкция зенкеров и разверток и их рациональная эксплуатация / М. Н. Ларин. – М.: Машгиз, 1960. – 122 с.
17. Львов Н. П. Определение минимально возможной толщины срезаемого слоя. / Н. П. Львов. // Станки и инструмент. – 1960. – №4. – С. 1–12.
18. Мастеров В. А. Теория пластической деформации и обработки металлов давлением / В. А. Мастеров. – М.: Машиностроение, 1970. – 206 с.
19. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов / Л. И. Миркин. – Л.: Физматиздат, 1960. – 186 с.
20. Нанес М. Я. Лекции по структурному анализу / М. Я. Нанес. – М.: Физматгиз, 1967. – 108 с.
21. Новиков А. А. Новые режущие инструменты и прогрессивные процессы резания / А. А. Новиков. // Резание и инструмент. – 1968. – №6. – С. 12–36.
22. Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на сверлильных станках в серийном производстве, 1979. – 604 с.
23. Одинг Г. С. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / Г. С. Одинг. – М.: Физматгиз, 1980. – 280 с.
24. Островский В. М. Теория резания металлов / В. М. Островский. – Л.: Машгиз, 1985. – 184 с.
25. Петрухин С. С. Основы проектирования режущей части металлорежущих инструментов. Кинематическая теория / С. С. Петрухин. – М.: Машгиз, 1960. – 184 с.
26. Писаренко Г. С. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко. – Киев: Вища школа, 1963. – 198 с.
27. Подураев В. Н. Обработка жаропрочных и нержавеющей металлов давлением / В. Н. Подураев. – М.: Машгиз, 1970. – 284 с.
28. Поликарпов А. Л. Резание металлов / А. Л. Поликарпов. – Л.: Лениздат, 1961. – 164 с.
29. Порай-Коший М. А. Практический курс рентгеноструктурного анализа. / М. А. Порай-Коший. – М.: МГУ, 1960. – 164 с.
30. Прейс Г. А. Влияние технологических параметров на чистоту и упрочнение поверхностного слоя стали при обкатке роликами / Г. А. Прайс, Б. М. Зинко. // Труды КТИПП. – 1956. – №14. – С. 32–56.

31. Прейс Г. А. Износостойкость металлов / Г. А. Прейс, В. К. Лазаренко. – М.: Машиностроение, 1960. – 184 с.
32. Проскуряков Ю. Г. Дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков. – М.: Машгиз, 1961. – 158 с.
33. Проскуряков Ю. Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов / Ю. Г. Проскуряков. – М.: Машиностроение, 1971. – 204 с.
34. Работин А. Н. Зепкерование и развертывание / А. Н. Работин. – Москва-Свердловск: Машиностроение, 1959. – 82 с.
35. Рид В. Т. Дислокация в металлах / В. Т. Рид. – М.: Металургиздат, 1957. – 202 с.
36. Рассохин В. Я. Качество поверхности и точность формы при отделочной обработке выглаживанием / В. Я. Рассохин. – Свердловск: Машиностроение, 1968. – 176 с.
37. Розенберг А. М. Качество поверхности обработанной деформирующими протяжками / А. М. Розенберг. – К.: Вища школа, 1977. – 218 с.
38. Розенберг А. М. Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек / А. М. Розенберг. – К.: Вища школа, 1978. – 196 с.
39. Рудаков А. А. Рентгенография металлов / А. А. Рудаков. – М.: МИФИ, 1965. – 68 с.
40. Смирнов-Алиев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. / Г. А. Смирнов-Алиев. – М-Л.: Машгиз, 1961. – 224 с.
41. Смирнов В. С. Теория обработки металлов давлением / В. С. Смирнов. – Л.: Машгиз, 1965. – 256 с.
42. Сутай А. К. Справочник по производственному контролю в машиностроении / А. К. Сутай. – Л.: Машгиз, 1974. – 468 с.
43. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев. – Л.: Машгиз, 1971. – 236 с.
44. Стрельцов В. А. Повышение эффективности точности обработки в машиностроении / В. А. Стрельцов. – Фрунзе: Камуш, 1970. – 178 с.
45. Уманский Я. С. Рентгенография металлов и полупроводников / Я. С. Уманский. – М.: Наука, 1969. – 244 с.
46. Филоненко С. Н. Резание металлов / С. Н. Филоненко. – К.: Вища школа, 1969. – 266 с.
47. Хрушев М. М. Классификация условий и видов изнашивания деталей машин / М. М. Хрушев. // Трение и износ в машинах. Сб. АН СССР. – 1953. – №8. – С. 18–35.

48. Хрущев М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию наклепанных металлов и сплавов / М. М. Хрущев. // Вестник машиностроения. – 1953. – №3. – С. 15–24.
49. Хрущев М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию и твердость металлов / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев. // Докл. АН СССР. – 1958. – №88. – С. 25–54.
50. Четвериков С. С. Металлорежущие инструменты / С. С. Четвериков. – М.: Машиностроение, 1965. – 456 с.
51. Чкалова О. Н. Обработка результатов экспериментов. Методические указания для студентов специальности 0501 / О. Н. Чкалова. – К.: Политехника, 1980. – 102 с
52. Ярцев Г. А. Опыты применения разверток с большими углами подъема спирали. / Г. А. Ярцев. // Станки и инструмент. – 1975. – №6. – С. 23–31.
53. De Chiffre L. A reaming test for cutting fluid evaluation / L. De Chiffre, S. Lassen, K. B. Pedersen, S. Skade. // Journal of Synthetic Lubrication. – 2004. – Vol.11. – pp. 17–34.
54. Belluco W. Testing of vegetable-based cutting fluids by hole making operations / W. Belluco, L. De Chiffre. // Lubrication Engineering. – 2001. – Vol.57. – pp. 12–16.
55. Dry machining and Minimum Quantity Lubrication / K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland, T. Wakabayashi. // Annals of CIRP. – 2004. Vol.53/2 – pp. 511–537.
56. Kalpakjian S. Manufacturing Processes for Engineering Materials / S. Kalpakjian, S. R. Schmid. – Singapore: Publ. Prentice Hall, 2008. – 212 pp
57. Klocke F. Dry Cutting / F. Klocke, G. Eisenblätter. // Annals of CIRP. – 2017. – Vol.46. – pp. 519–526.
58. Shaw M. C. Metal cutting principles / Shaw. // Oxford series on advanced manufacturing, Publ. Oxford University Press, New York (USA). – 2005.
59. Todd, Robert H.; Allen, Dell K.; Altling, Leo (1994), Manufacturing Processes Reference Guide, Industrial Press Inc., ISBN 0-8311-3049-0.
60. Zemnukhov V. T. The Hole Reaming Features in Hydraulics Parts [Электронный ресурс] / V. T. Zemnukhov, A. E. Dreval, A. S. Vinogradov // Mechanical Engineering and Computer Science. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <https://doi.org/10.24108/0917.0001304>.

2 ПРОЕКТУВАННЯ СФЕРИЧНИХ ФРЕЗ

2.1 Стан питання

Задачі проектування та виготовлення високоякісного різального інструмента на сучасному етапі розвитку можуть бути вирішені тільки на базі CAD³⁸/CAM³⁹/CAE⁴⁰ технологій.

Проте, практично відсутні системи автоматизованого проектування різального інструмента, які на стадії проектування враховували б не тільки задані вихідні умови роботи інструмента, а і їхню зміну в процесі різання, що є суттєвим резервом підвищення працездатності інструмента.

Під час оброблення складнопрофільних поверхонь на верстатах з ЧПК знайшли широке використання сферичні кінцеві фрези [1, 6, 7, 33, 37, 41, 42]. Аналіз роботи цих інструментів показує, що основною частиною, яка контактує з оброблюваним металом є її сферична різальна частина. Саме її конструкція, режими різання та особливості умов експлуатації визначають, перш за все, працездатність цього інструмента, продуктивність обробки та надійність роботи будь якого верстата з ЧПК та автоматизованого комплексу.

Конструкція різальної частини сферичних кінцевих фрез характеризується формами передньої, задньої поверхонь та їх розташуванням, які визначають геометричні параметри інструмента та їх зміну вздовж різальних кромки. Формами передніх і задніх поверхонь можуть служити площини, конічні та гвинтові поверхні. Різальні кромки такого інструмента, які є лініями перетину передніх і задніх поверхонь обов'язково повинні розташовуватись на сферичній вихідній інструментальній поверхні [38].

³⁸CAD – Система автоматизованого проектування (САП або САПР) призначена для автоматизації технологічного процесу проектування виробу, результатом якого є комплект проектно-конструкторської документації, достатньої для виготовлення та подальшої експлуатації об'єкта проектування.

³⁹CAM – автоматизоване виробництво. Термін використовується для позначення програмного забезпечення, основною метою якого є створення програм для керування верстатами зі ЧПК (числове програмне керування).

⁴⁰CAE – автоматизоване конструювання, використання спеціального програмного забезпечення для проведення інженерного аналізу міцності та інших технічних характеристик компонентів, виконаних у системах автоматизованого проектування.

Сучасна теорія визначення геометричних параметрів передбачає знаходження їх зміни вздовж кромки, що покладено в основу розробки конструкції інструментів з мінімальними відхиленнями значень геометричних параметрів вздовж різальної кромки. А оскільки ця теорія розроблена в інструментальній системі координат, то відповідно до ДСТУ 2249-93 [10] вона не може відображати зміну геометричних параметрів вздовж різальної кромки в процесі роботи інструмента.

Зміна геометричних параметрів різальної частини інструмента може бути визначена в процесі різання тільки на основі розробки теорії визначення геометричних параметрів у кінематичній системі координат.

Відомі роботи з визначення кінематичних та статичних геометричних параметрів для свердел, мітчиків, різців, дискових фрез та пил [11, 13-19, 21-28, 30-32, 39].

У роботах [32, 48-51] наведені у загальному вигляді інтерпретація загальних положень стандарту ISO 3002-1:1982, на основі якого розроблений стандарт ДСТУ 2249-93.

Аналіз існуючої теорії визначення геометричних параметрів для різних видів інструмента показує, що першочерговою проблемою підвищення якості проектування сферичних кінцевих фрез⁴¹ є задача розробки теорії визначення геометричних параметрів у кінематичній системі координат, яка дає змогу враховувати не тільки їх зміну вздовж різальної кромки, а і в процесі роботи цього інструмента.

Для її розробки необхідно розглянути особливості умов експлуатації сферичних кінцевих фрез при їх використанні на верстаті з ЧПК для обробки складнопрофільних поверхонь.

Проте, навіть при наявності такої теорії, якість проектування таких фрез на сучасному рівні може бути забезпечено тільки на основі розробки САПР різальної частини та спеціального математичного апарату, як складової математичного забезпечення цієї системи, і з позицій теорії проектування різального інструмента ця складова може розглядатись як геометричне забезпечення САПР різальної частини сферичних кінцевих фрез.

Тому створення САПР різальної частини цього інструмента, яка б на стадії проектування визначала раціональні геометричні параметри залежно від умов обробки з врахуванням допустимих меж їх

⁴¹Фреза кінцева використовується для обробки пазів, уступів із взаємно перпендикулярними поверхнями, та для контурної обробки заготовок.

зміни у процесі роботи інструмента, будувала 3D моделі, які можуть бути адаптовані до сучасних САМ систем їх виготовлення, є одним із шляхів підвищення якості сучасного проектування цих інструментів та розробки конструкцій фрез підвищеної працездатності. Розробка такої САПР, крім того, потребує розгляду існуючих САПР різального інструмента (САПР РІ) з метою аналізу їх структури та можливості застосування цих структур при створенні САПР сферичних кінцевих фрез.

2.1.1 Системи автоматизованого проектування

Різним етапам розвитку САПР різальних інструментів присвячені роботи Гречишнікова В. А., Таратинова О. В., Ящерицина П. І. [2, 44, 47]. У цих роботах САПР у загальному випадку розглядається як сукупність взаємозв'язаних підсистем різного функціонального призначення, які забезпечують автоматизоване проектування у відповідності до установлених технічних вимог і критеріїв якості.

Підсистеми САПР за призначенням підрозділяються на проектуючі і обслуговуючі. Проектуючі підсистеми використовуються для виконання проектних процедур і операцій, наприклад проектування конструкцій інструмента або тільки його різальної частини, тоді як обслуговуючі – для забезпечення працездатності проектуючих підсистем, наприклад інформаційного пошуку, документування і т. д., і в цілому забезпечують роботу всієї САПР.

У свою чергу, кожна з підсистем складається з ряду компонентів, що об'єднані загальним для даної підсистеми цільовим завданням і забезпечують функціонування кожної підсистеми. Компонентами є елементи забезпечення, призначені для виконання певної функції і підрозділяється вони на методичне, математичне, лінгвістичне, інформаційне, програмне, технічне і організаційне забезпечення.

Одним з найважливіших забезпечень функціонування САПР є інформаційне, призначене для надання відомостей у вигляді початкових даних для виконання передбачених операцій і процедур. Однією з найважливіших функцій підсистеми інформаційного забезпечення є організація пошуку необхідних типових рішень і довідкових даних, а також поповнення, запис і вибір даних за типовими рішеннями. Інформаційне забезпечення формується з урахуванням типу інструмента і специфіки САПР конкретного призначення та ієрархії рівнів проектування.

Будь-яка САПР характеризується і розвивається з урахуванням

трьох основних компонентів [2]:

- організаційної – інтелектуальна складова САПР;
- інформаційного середовища – сукупність всіх видів і форм інформації САПР, до складу якої входять методичне, організаційне, програмне і інформаційне забезпечення;
- комплексу технічних засобів – апаратні засоби обчислювально-го і організаційного зв'язку, а також систем зв'язку, що беруть участь у перетворенні інформації.

Кожен з вказаних компонентів САПР має конкретний зміст з урахуванням задач, що вирішуються.

Рішення кожної з задач здійснюється за наявності вказаних вище компонент, що знаходяться в тісному взаємозв'язку і відображають рівень розвитку систем автоматизованого проектування в певний період розвитку науки і техніки.

Задачі автоматизованого конструювання інструмента повинні вирішуватись на базі принципів системного аналізу. У відповідності до цього підходу в розробці САПР реалізуються наступні принципи:

- блочно-модульний;
- принцип інформаційного поєднання;
- принцип адаптації та розвитку ієрархії ітерацій.

У відповідності до цих принципів, сучасна система автоматизованого проектування складається з окремих частин і формується окремими блоками, модулями. Всі потоки інформації в системі повинні бути сумісними. Моделі, задачі, критерії і т.д. у системі повинні мати ієрархічну будову. Система повинна працювати по методу ітерації – послідовному наближенню до оптимального варіанту.

На всіх етапах проектування необхідно проводити розробку та аналіз різноманітних варіантів з метою вибору найдоцільнішого. Автоматизоване проектування інструмента не виключає участі людини в цьому процесі. Людина приймає рішення, вибирає альтернативи, розроблені за допомогою комп'ютера.

Основою системи проектування металорізальних інструментів є поелементний принцип, при якому інструмент розглядається як складений з цілого ряду елементів, які мають своє функціональне призначення. В якості елемента беруть модуль, за допомогою якого вирішується вузькоспеціалізована задача по визначенню окремих елементів конструкції інструмента. Проектно-програмний модуль вхо-

дить складовою частиною до бібліотеки модулів, з котрих і складається загальний алгоритм проектування інструмента. Приклад типової інтегрованої системи САПР РІ наведений на рис. 2.1.

Дана типова структура САПР РІ [43] являє собою набір проектно-програмних модулів (ППМ), систем баз даних (СБД) і баз даних (БД) з функціональними зв'язками між ними. Зв'язки $f_1 \dots f_5$ характеризують взаємодію елементів інформаційного середовища у вигляді баз даних (БД) на конструювання, технологію і проектування виробничих ділянок (організацію виробництва). Зв'язок f_6 характеризує прямий вплив вихідних параметрів технологічного процесу на формування ділянки по виготовленню.

Аналіз зв'язків $f_1 \dots f_6$ показує, що функціональні зв'язки взаємопов'язані між собою і впливають один на одного, маючи зворотній зв'язок. Проте цей зворотній зв'язок в існуючих системах САПР РІ не має місця і проводиться конструкторами безпосередньо на основі досвіду або обмежень, прийнятих при конструюванні.

Аналіз існуючих на ринку САПР різальних інструментів і їх структури показує, що вони не включають зв'язки з конструюванням і технологією виготовлення. Це викликано тим, що в якості інформаційного забезпечення існуючих САПР РІ слугують статичні бази даних конструкцій різального інструмента, елементів конструкцій і геометричних параметрів різальної частини, що об'єднані в систему баз даних.

Представлена на рис. 2.1 структура інтегрованої САПР складається з трьох автономних блоків:

- блоку конструювання;
- технологічного блоку;
- та організаційного.

Тому для більш глибокого розкриття структури проектування розглянемо структуру автономної САПР конструювання різального інструмента, наведену на рис. 2.2.

Дана схема САПР РІ в загальному вигляді містить два програмно-проектні модулі, а саме, ППМ цільного і збірного різального інструмента, кожен з яких підтримується своїми системами баз даних.

Системи проектування збірного різального інструмента охоплюють вузли та деталі збірного різального інструмента (блок 5). Збірний різальний інструмент має різноманітні можливості для регулювання, що відображено різними ППМ (блоки 6-9). Кожний ППМ

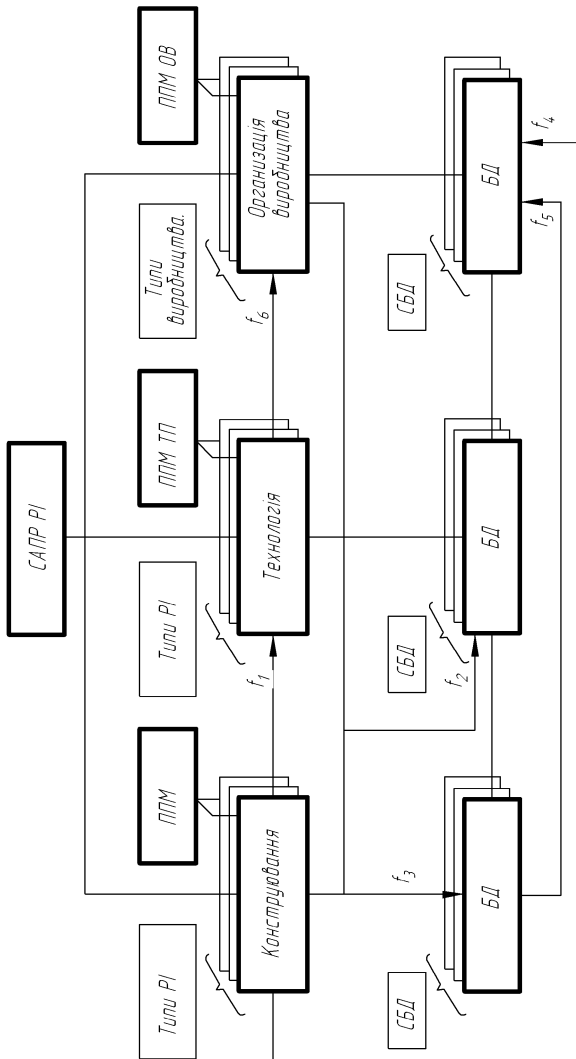


Рис. 2.1. Інтегрована система проектування [43]

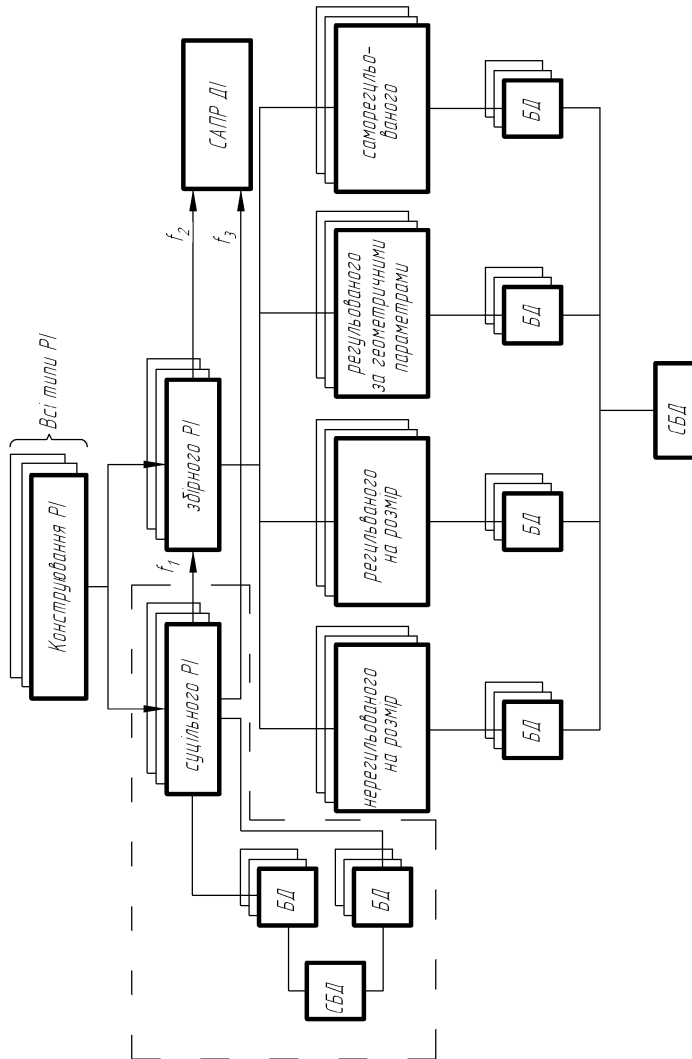


Рис. 2.2. Автоматизована система проектування [43]

підтримується своєю базою даних (блоки 10-13), які об'єднані в СБД (блок 14).

Так як розглядаються суцільні сферичні кінцеві фрези, то проведемо аналіз існуючих ППМ для автоматизованого проектування суцільних інструментів.

Аналіз показав, що для сферичних кінцевих фрез існують спеціальні блоки окремих фірм, що виготовляють цей інструмент. Ці ППМ розроблені фірмами-постачальниками і базуються на даних досвіду кожної окремої фірми і носять накопичувальний характер.

Із-за конкуренції ці бази даних обслуговують тільки конкретні виробництва. Слід відзначити, що бази даних окремих фірм та рекомендації по їх створенню відсутні.

Аналіз робіт [2, 43, 44, 47] показує, що для суцільного кінцевого інструмента, до якого відноситься кінцева фреза, у літературних джерелах наведені тільки САПР спірального свердла [43], що може служити прототипом розробки САПР сферичної кінцевої фрези.

На рис. 2.3 зображено структурну схему автономної САПР свердла і показано склад основних модулів.

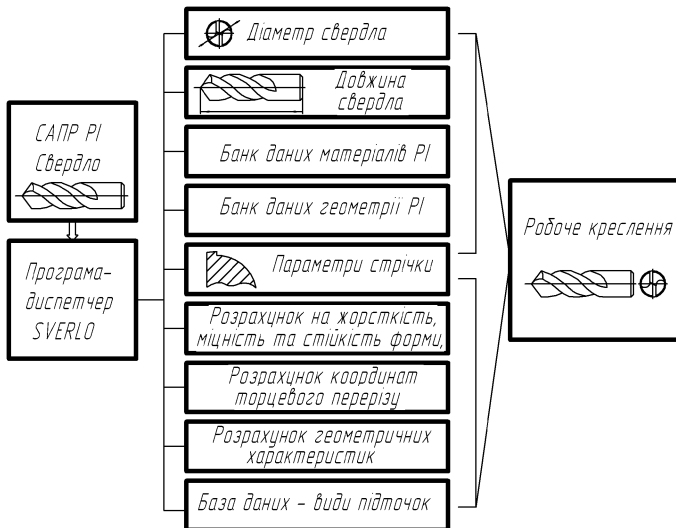


Рис. 2.3. Система проектування свердла [43]

Аналіз структури САПР свердла показує, що вибір матеріалів, геометричних параметрів і проточок підтримуються базами даних, в

основу яких покладені практичні дані, які являють собою таблиці відповідностей або так звані таблиці прийняття рішень.

Створюються ці бази даних залежно від номенклатури, що випускається тим чи іншим підприємством, фірмою, а також особливостей призначення інструмента.

Проектні модулі з 1 по 5 включно (рис. 2.3) являють собою вихідні дані для проектування свердла.

У таблицях кожному типорозміру свердел, що виготовлені з того чи іншого інструментального матеріалу, відповідають певні умови їх використання.

Використовуючи дані цих модулів, у САПР свердла передбачений модуль розрахунку свердла на жорсткість, міцність та стійкість як інструмента, так і його форми. Для використання цих залежностей існує база даних коефіцієнтів, що входять у залежність.

Таким чином, при проектуванні свердел, а по аналогії і інших інструментів, у системах автоматизованого проектування інструмента основними критеріями служать характеристики, що визначають недопустимість відказу інструмента за рахунок поломки його елементів чи зниження стійкості інструмента.

У той же час, розрахунок критеріїв у цих системах ведеться за умови жорстко заданих значень геометричних параметрів.

Сферичні фрези, призначені для фрезерування різноманітних фасонних поверхонь, характеризуються постійною зміною геометричних параметрів у процесі різання. Тому однією з головних задач, яка повинна вирішуватись при проектуванні сферичних кінцевих фрез – це задача визначення та аналізу геометричних параметрів інструмента, викликана тим, що геометричні параметри можуть виходити за межі допустимих, які при зазначених інших вхідних даних завідома призводять до негативних результатів. Так, наприклад, якщо в процесі роботи залежно від положення задньої поверхні відносно поверхні різання спостерігається від'ємний задній кут, такий інструмент не зможе працювати.

Таким чином, виникає першочергова задача визначення геометричних параметрів у процесі роботи інструмента вздовж його різальних кромek і на цій основі розробки критеріїв (допустимих кутів) для різних елементів різальної частини.

Після проведення розрахунків на відповідність допустимому значенню конструктор у діалоговому режимі вводить корективи в бази вхідних даних. При задоволенні допустимих значень (критеріїв), далі, за теорією проектування свердел, здійснюються розрахунки ко-

ординат торцевого перерізу, призначення геометричних характеристик різальної, розрахункової робочої та кріпильної частин інструмента. Одним із елементів робочої частини свердла є різні види підточок передньої поверхні, дані про які містяться у відповідних базах даних. Склад цих модулів достатній, щоб в автоматичному режимі створити робоче креслення в залежності від прийнятої геометрії того чи іншого типорозміру спірального свердла.

На етапі розробки креслення використовуються нормалі та вимоги до креслення, які служать додатковими базами даних для оформлення креслень у відповідності до ЄСКД.

Система призначена для виготовлення креслень, за якими можуть бути створені їх 3D моделі, які є основою для розробки програмного забезпечення виготовлення інструмента на верстатах з ЧПК та можуть служити електронним еталоном для вимірювальних машин.

При проектуванні свердел у даній САПР розраховані координати торцевого перетину використовуються для визначення профілю інструмента другого порядку, яким буде проводитись формоутворення поверхонь свердла. При проектуванні сферичних кінцевих фрез необхідно враховувати те, що виготовлення цього інструмента проводиться на верстатах з ЧПК шліфувальними кругами з вже заданою їх формою та розмірами.

Аналіз існуючого прототипу САПР свердла показав також, що така структура не придатна для кінцевого інструмента при побудові 3D моделей їх робочої частини, так як не враховує особливостей виготовлення і контролю сучасного автоматизованого виробництва.

Аналіз САПР РІ показує, що розробка САПР сферичних кінцевих фрез вимагає розробки теорії визначення геометричних параметрів інструмента з урахуванням умов їх експлуатації, яка служила б основою створення такої САПР. Також при розробці САПР необхідно проаналізувати питання, пов'язані з особливостями як конструкції такого інструмента, так і проектування та виготовлення.

2.1.2 Проектування різального інструмента

При проектуванні різальних інструментів згідно робіт [2, 3, 7, 11, 37, 44] необхідно вирішити ряд задач від вибору інструментального матеріалу до розробки робочого креслення інструмента. Більшість із цих задач вирішується на підставі практичних рекомендацій. Так завдання вибору інструментального матеріалу проводиться за допомогою таблиць відповідності, складених на підставі багаторічного

досвіду експлуатації РІ. Після вибору інструментального матеріалу необхідно вирішити одну з основних задач – призначення геометричних параметрів інструмента. Як правило, вирішення цієї задачі також проводять на підставі експериментальних даних, наведених у літературних джерелах. Такий підхід не зовсім коректний, оскільки геометричні параметри призначаються в інструментальній системі координат, котра є зручнішою для виготовлення інструмента і його контролю, у той час як протікання процесу різання найповніше визначають кінематичні параметри. При цьому значення цих параметрів не співпадають з інструментальними. Крім того, при проектуванні не враховуються зміна цих параметрів уздовж різальної кромки і особливості умов роботи інструмента. До того ж, з геометричними параметрами безпосередньо пов'язаний вибір переточуваних і непереточуваних поверхонь інструмента, оскільки після переточування ми повинні отримати необхідні геометричні параметри і звести до мінімуму похибки форми різальної частини інструмента.

У наявних САПР бази даних містять інформацію про геометрію її різальної частини в інструментальній системі координат без урахування її зміни в процесі роботи інструмента в різних точках контакту інструмента із заготовкою, що обумовлено відсутністю теорії визначення геометричних параметрів кінцевих сферичних фрез уздовж різальної кромки в процесі роботи інструмента.

Проаналізуємо особливості конструкції та геометрії різальної частини сферичних кінцевих фрез, які необхідно враховувати при їх проектуванні.

Сферичні кінцеві фрези за конструкцією підрозділяються на сфероциліндричні та сфероконічні, і мають сферичну вихідну інструментальну поверхню (ВІП) різальної частини, та відповідно циліндричну або конічну ВІП робочої частини.

Різальні кромки фрез є лінією перетину зі сферичною ВІП передньої та задньої поверхонь, розташованих під заданими інструментальними параметрами. Одним із основним критеріїв, крім забезпечення необхідних геометричних параметрів, при виборі форм передніх та задніх поверхонь є те, що лінія перетину передніх і задніх поверхонь обов'язково повинна знаходитись на сферичній ВІП.

Передня поверхня різальних кромок, розташованих на циліндричній або конічній частині фрези виконується плоскою для прямих стружкових канавок, або гвинтовою в разі гвинтових стружкових канавок. Серцевина може збільшуватися від вершини фрези до хвостовика з метою підвищення міцності і жорсткості. Зовнішній ді-

аметр фрез також з цією метою може бути виконаний таким, що збільшується в напрямку до хвостовика, якщо з технологічної точки зору допустиме застосування такої конструкції інструмента при обробці заданої поверхні деталі.

Великий вплив на працездатність різального інструмента мають геометричні параметри його різальної частини особливо параметри різальних кромок [4, 8, 9, 32, 34-36, 38, 40].

До теперішнього часу проектування інструментів велося, в основному, в інструментальній системі координат, значення геометричних параметрів в якій не відповідають фактичним, що спостерігаються в процесі різання. Найбільшою мірою значення геометричних параметрів інструмента в процесі різання відображаються в кінематичній або статичній системах координат.

Аналіз креслень фасонних кінцевих фрез показав, що задані інструментальні геометричні параметри такого інструмента визначають геометрію різальної частини тільки в одній точці і не дають уявлення про зміну геометричних параметрів уздовж різальної кромки.

Залежно від форми поверхні та її розташування характер зміни геометричних параметрів уздовж різальної кромки може бути різним.

Геометричні параметри кінцевих фрез призначаються залежно від матеріалів інструмента та деталі, що оброблюється, причому наявні рекомендації стосуються тільки звичайного фрезерування, і вибір параметрів для високошвидкісного фрезерування є відкритим. Внаслідок цього, при високошвидкісній обробці користуються тими ж геометричними параметрами.

Так у роботі [32], розглядаючи кінематичну схему різання на багатокординатних верстатах, отримані залежності для визначення геометричних параметрів різального інструмента. Автор дотримується думки, що передній і задній кут необхідно визначати в січній площині сходу стружки між площиною, перпендикулярною до вектора швидкості різання і дотичною площиною до передньої поверхні. Відхилення напрямку сходу стружки від нормалі до різальної кромки визначається виходячи з експериментально отриманих даних і залежить від безлічі факторів (кута нахилу різальної кромки, коефіцієнта тертя між оброблюваним і інструментальним матеріалом, зусиль різання і т.д.). При проектуванні ж інструментів, а особливо тих, при роботі яких різання буде невилітним, що спостерігається при обробленні сферичними кінцевими фрезами, визначити точне

положення січної площини сходу стружки неможливо, і геометричні параметри слід визначати в головній січній площині, положення якої однозначно визначається напрямком вектора швидкості різання (головного або результуючого руху) і розташуванням різальної кромки в даний момент часу, або в нормальній січній площині, про що свідчать роботи [15-17, 23, 24, 27, 29, 30, 38].

Тому при розробці САПР ставиться задача визначення геометричних параметрів фрез при різних способах заточування інструмента, що дозволить проводити аналіз їх зміни уздовж різальної кромки і забезпечить вибір раціональної геометрії.

До того ж необхідно враховувати трансформацію кутів різальної частини таких фрез у процесі обробки. При визначенні геометричних параметрів у кінематичній системі координат необхідно враховувати не тільки величину подачі, але і її напрям, який може змінюватися в процесі обробки, що викликано особливостями їх експлуатації. Крім того, на етапі проектування слід визначати можливість виготовлення інструмента з потрібною, отриманою в результаті аналізу, геометрією фрез на відповідному устаткуванні.

2.1.3 Особливості сферичних фрез

Оброблення фасонних поверхонь сферичними кінцевими фрезами в авіа- і машинобудівній промисловості проводиться на 3-х або 5-ти координатних верстатах з ЧПК. У разі 5-ти координатної обробки можливе надання інструмента кутів випередження і нахилу.

Кут нахилу

Це кут між віссю фрези і нормаллю до оброблюваної поверхні, що визначається в площині, перпендикулярній вектору швидкості подачі і зазвичай задається для запобігання зіткнення інструмента, наприклад, з уступом, або для безпосередньої обробки самих уступів і сходинок укороченим інструментом.

Кут випередження

Це кут між віссю фрези і нормаллю до оброблюваної поверхні, що визначається в площині, яка проходить через цю нормаль і вектор швидкості подачі.

Кут випередження задається для запобігання різання на горизонтальних ділянках оброблюваної заготовки вершинною ділянкою

сферичного інструмента, де швидкість різання практично рівна нулю. Значення кута випередження, з яким працюють на виробництві, знаходиться в межах $10^{\circ} \dots 15^{\circ}$ і обґрунтування вибору оптимального значення цього кута залежно від умов обробки в літературі не наводиться.

До особливостей сферичних фрез можна також віднести те, що як правило, виготовлення їх проводиться на верстатах з ЧПК вишліфовкою поверхонь набором з двох або трьох конічних шліфувальних кругів. При цьому реальна форма отримуваних поверхонь фрез та її геометричні параметри визначаються кінематичними рухами шліфувальних кругів і відповідним розташуванням кругів щодо інструмента.

Одним з найбільш складних формоутворюючих рухів при їх виготовленні є отримання з необхідною геометрією гвинтових стружкових канавок, передніх та задніх поверхонь різальних кромek, розташованих на сферичній ВІП.

Внаслідок конусності серцевини стружкові канавки мають форму конічної гвинтової поверхні. У роботі [20] наведено випадок отримання гвинтової канавки на циліндричній деталі, який можна розглядати як окремий випадок формоутворення конічної гвинтової поверхні.

У зв'язку з цим виникає задача визначення установчих параметрів кругів для отримання при виготовленні фрез необхідних геометричних і конструктивних параметрів, яка може бути вирішена знаходженням характеристики контакту круга із заготовкою і пов'язаної з нею форми поверхні фрези.

У результаті цього, вже при проектуванні є змога проводити аналіз можливості виготовлення даної фрези і впливу різних параметрів на форму поверхонь інструмента, а порівняння виготовленої на верстаті фрези з її розрахованою формою дозволить виявити похибки, які вносять динаміка шліфування, точність установки заготовки і круга, їх відхилення від номінальних значень, зношення кругів.

Узагальнюючи, аналіз проблем підвищення якості проектування та автоматизації процесу проектування сферичних кінцевих фрез можливо стверджувати:

- підвищення якості проектування, перш за все, може бути досягнуто за рахунок урахування максимальної кількості чинників, які визначають працездатність інструмента, що найбільш ефективно може бути враховано тільки під час автоматизованого проектування;

- наявні теорії визначення геометричних параметрів інструмента не враховують особливостей конструкції та умов експлуатації сферичних кінцевих фрез;
- наявні САПР РІ реалізовані на основі статичних баз даних, що не дає можливості забезпечити розробку інструментів з урахуванням як умов експлуатації, так і технології їх виготовлення;
- створення САПР різальної частини сферичних кінцевих фрез потребує відповідного геометричного забезпечення, створення якого неможливе без розробки теорії визначення геометричних параметрів інструмента;
- вирішення задач формоутворення дозволяє при побудові моделей отримати форми цих поверхонь з урахуванням кінематики формоутворення, а побудовані в результаті такого підходу твердотільні моделі можуть використовуватися як електронний еталон при проведенні контролю фасонних кінцевих фрез після їх виготовлення.

2.2 Автоматизоване проектування сферичних фрез

2.2.1 Структура автоматизованого проектування

Система складається з трьох взаємозв'язаних програмно-проектних модулів: проектування, аналізу і контролю (рис. 2.4). Основною підсистемою є підсистема проектування різальної частини сферичних кінцевих фрез, розробка якої виконується на основі теорії визначення геометричних параметрів інструмента та дозволяє отримати 3D модель інструмента.

Підсистема аналізу повинна включати блоки аналізу геометричних параметрів, завантаження різальних кромок, та розрахунок фрези на міцність.

Реалізація проектно-програмних модулів аналізу завантаження та розрахунку на міцність можлива на основі теоретичних розробок [48], однак задача їх створення в даній роботі не ставилась. Контроль фрез після виготовлення повинен відбуватися на координатно-вимірювальних машинах з відповідним програмним забезпеченням, на які передається 3D модель фрези в якості електронного еталону.

Вихідними даними для проектування є марка оброблюваного матеріалу, режими оброблення та діаметр фрези. У процесі розробки нової конструкції фрези та вдосконаленні наявних, задіяні усі три підсистеми проектування.

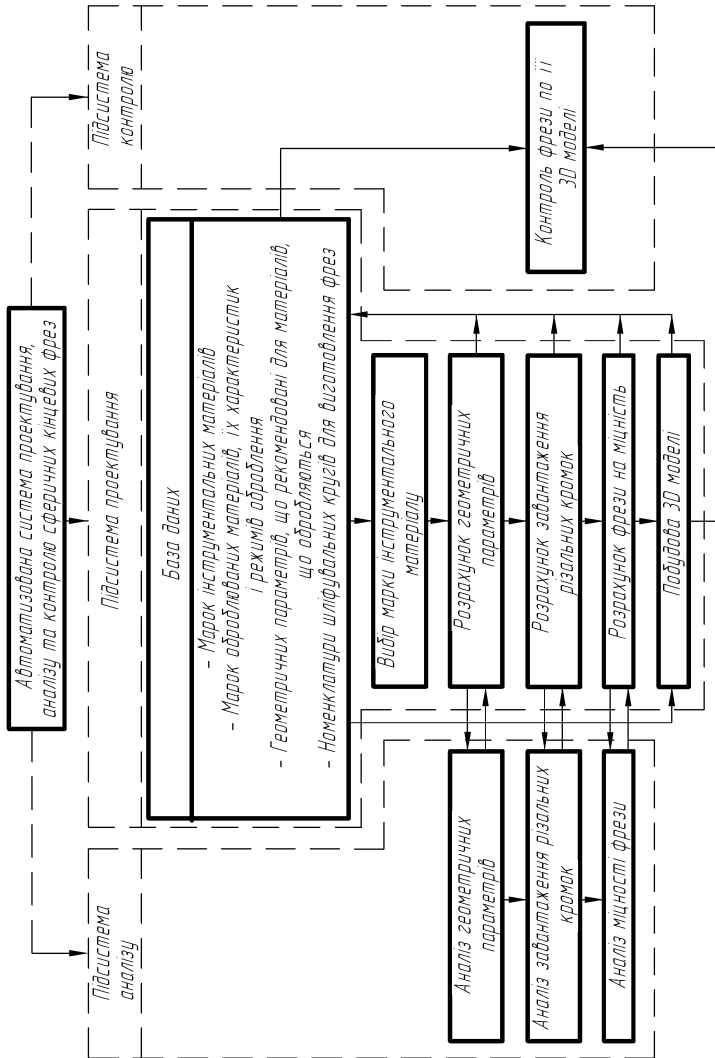


Рис. 2.4. Структурна схема автоматизованої системи

Отримані в результаті цього параметри і відповідна їм твердотільна модель можуть бути збережені в базі даних з метою подальшого їх використання, тобто база даних є відкритою і може бути розширена.

2.2.2 Геометричні параметри фрез

Для розрахунку геометричних параметрів сферичних кінцевих фрез розроблено теорію визначення геометричних параметрів цього інструмента з різними формами передніх і задніх поверхонь у статичній та кінематичній системах координат [5].

Першочергово знаходиться форма різальної кромки в площині, перпендикулярній осі фрези, на яку вектори швидкості головного руху різання проектується в натуральну величину.

Для плоскої передньої поверхні отримані залежності для визначення координат точок різальної кромки фрез мають вигляд:

$$\begin{aligned} X_i &= R \cos \epsilon [(1 - \cos t_j) \sin \epsilon \cos \gamma_n - \sin t_j \sin \gamma_n], \\ Y_i &= R \cos \epsilon [\sin t_j \cos \gamma_n + (1 - \cos t_j) \sin \epsilon \sin \gamma_n], \\ Z_i &= R \cos \epsilon [\cos t_j \cos \epsilon + \operatorname{tg} \epsilon \sin \epsilon]. \end{aligned} \quad (2.1)$$

- де R – радіус сферичної частини фрези;
 t_j – кутовий параметр, що визначає розташування точки на різальній кромці;
 ϵ – кут між передньою поверхнею та віссю фрези:
 $\operatorname{tg} \epsilon = \operatorname{tg} \gamma_i \cos \gamma_n$;
 γ_n – передній кут у перерізі, перпендикулярному осі:
 $\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_i (1 - \sin \delta) / \cos \delta$;
 γ_i – інструментальний передній кут;
 δ – кут, що визначає розташування січної площини, в якій задається кут γ_i .

Для конічної передньої поверхні отримані залежності для визначення координат точок різальної кромки фрез мають вигляд:

$$\begin{aligned} X_j &= R \cos \epsilon_k [(1 - \cos t_j) \sin \epsilon_k \cos \Theta_n - \sin t_j \sin \Theta_n], \\ Y_j &= R \cos \epsilon_k [\sin t_j \cos \Theta_n + (1 - \cos t_j) \sin \epsilon_k \sin \Theta_n], \\ Z_j &= R \cos \epsilon_k [\cos t_j \cos \epsilon_k + \operatorname{tg} \epsilon_k \sin \epsilon_k]. \end{aligned} \quad (2.2)$$

де ϵ_k – кут між площиною, в якій розташована різальна кромка, та віссю фрези $\operatorname{tg} \epsilon_k = \operatorname{tg} \Theta_{nb} \cos \Theta_n$;

Θ та Θ_n – кути, що задаються в перерізах, перпендикулярному та паралельному осі фрези, та визначають розташування площини, в якій розташована різальна кромка.

Для гвинтової передньої поверхні отримані залежності для визначення координат точок різальної кромки фрез мають вигляд:

$$\begin{aligned} X_j &= -R \cos \xi_j \sin(\operatorname{tg} \omega \sin \xi_j), \\ Y_j &= R \cos \xi_j \cos(\operatorname{tg} \omega \sin \xi_j), \\ Z_j &= R \sin \xi_j, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де ξ_j – кутовий параметр, що визначає розташування точки на різальній кромці;

ω – кут нахилу гвинтової лінії передньої поверхні на радіусі R .

У сферичних фрез різальна кромка знаходиться на сферичній різальній частині, тому форма задньої поверхні визначалась з умови спряження з різальною кромкою лінії перетину задньої і сферичної вихідної інструментальної поверхонь. Для визначення геометричних параметрів у головній січній площині вздовж різальної кромки отримані залежності для визначення кутів ρ та φ_i розташування вектора \vec{P} (рис. 2.5), дотичного до різальної кромки.

Для фрез з плоскою передньою поверхнею матимемо:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \rho_j &= (\sin \epsilon - \operatorname{ctg} t_j \operatorname{tg} \gamma_n) / (\operatorname{ctg} t_j + \sin \epsilon \operatorname{tg} \gamma_n), \\ \operatorname{tg} \varphi_{ij} &= (\cos \epsilon) / (\operatorname{ctg} t_j \cos \gamma_n + \sin \epsilon \sin \gamma_n). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для фрез з конічною передньою поверхнею матимемо:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \rho_j &= (\sin \epsilon_k - \operatorname{ctg} t_j \operatorname{tg} \Theta_n) / (\operatorname{ctg} t_j + \sin \epsilon_k \operatorname{tg} \Theta_n), \\ \operatorname{tg} \varphi_{ij} &= (\cos \epsilon_k) / (\operatorname{ctg} t_j \cos \Theta_n + \sin \epsilon_k \sin \Theta_n). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Для фрез з гвинтовою передньою поверхнею матимемо:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \rho_j &= \frac{\sin \xi_j \sin(\operatorname{tg} \omega \sin \xi_j) - \cos^2 \xi_j \operatorname{tg} \omega \cos(\operatorname{tg} \omega \sin \xi_j)}{-\sin \xi_j \cos(\operatorname{tg} \omega \sin \xi_j) - \cos^2 \xi_j \operatorname{tg} \omega \sin(\operatorname{tg} \omega \sin \xi_j)}, \\ \operatorname{tg} \varphi_{ij} &= \frac{1}{[\operatorname{tg} \xi_j \cos(\operatorname{tg} \omega \sin \xi_j) + \cos \xi_j \operatorname{tg} \omega \sin(\operatorname{tg} \omega \sin \xi_j)]}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Тоді вектор \vec{P} , дотичний до різальної кромки запишеться:

$$\vec{P} = (\operatorname{tg} \rho; 1; -\operatorname{tg} \varphi_i). \quad (2.7)$$

Напрямок вектора \vec{V} швидкості головного руху різання в кожній точці криволінійної різальної кромки визначається кутом μ (рис. 2.5), який розраховується через координати X та Y точок кромки:

$$\operatorname{tg} \mu_j = -X_j/Y_j. \quad (2.8)$$

Вектор \vec{V} швидкості головного руху різання буде:

$$\vec{V} = (-\cos \mu; -\sin \mu; 0). \quad (2.9)$$

Розрахунки статичного переднього кута в нормальній січній площині показали, що для всіх трьох розглянутих форм передніх поверхонь цей кут є постійним вздовж кромки і дорівнює відповідно: $\gamma_{\text{nc}} = \epsilon$ - для плоскої передньої поверхні; $\gamma_{\text{nc}} = \gamma_i$ - для конічної та гвинтової передніх поверхонь.

У роботі [5] розглянуто різноманітні форми задньої поверхні сферичних кінцевих фрез і показано, що нормальний задній кут фрез з конічною та гвинтовою формами рівний інструментальному задньому куту $\alpha_{\text{nc}} = \alpha_i$ і також є постійним вздовж кромки. Фасонна циліндрична поверхня не рекомендується як форма задньої поверхні такого інструмента через значну зміну вздовж кромки заднього кута.

Для визначення кінематичних геометричних параметрів потрібно знайти величину кута τ_N між кінематичною і статичною площинами різання, який показує наскільки відрізняються кінематичні та статичні кути при їх вимірюванні в нормальній січній площині. Кут між цими площинами може бути знайдено як кут між їх нормальми.

Нормаль до статичної площини різання \vec{N}_{pc} буде

$$\vec{N}_{pc} = \vec{P} \times \vec{V}. \quad (2.10)$$

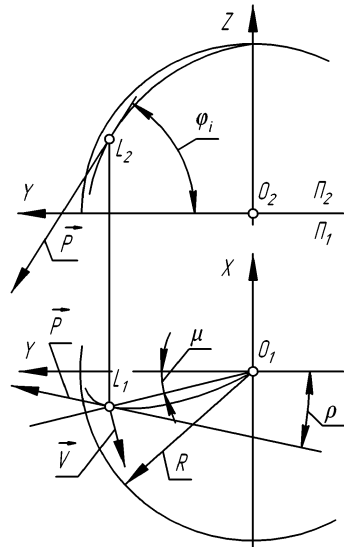


Рис. 2.5. Розрахункові кути

Нормаль до кінематичної площини різання \vec{N}_{pk} буде

$$\vec{N}_{pk} = \vec{P} \times \vec{V}_e, \quad (2.11)$$

де \vec{V}_e – вектор швидкості результуючого руху різання.

Тоді кут τ_N між нормальми до статичної \vec{N}_{pc} та кінематичної \vec{N}_{pk} площин різання буде

$$\cos \tau_N = \frac{\vec{N}_{pc} \cdot \vec{N}_{pk}}{|\vec{N}_{pc}| \cdot |\vec{N}_{pk}|}. \quad (2.12)$$

Кінематичні передній $\gamma_{нк}$ та задній кути $\alpha_{нк}$ у нормальному до різальної кромки перерізі при визначених статичних нормальних передньому $\gamma_{нс}$ та задньому $\alpha_{нс}$ кутах будуть:

$$\begin{aligned} \gamma_{нк} &= \gamma_{нс} + \tau_N, \\ \alpha_{нк} &= \alpha_{нс} + \tau_N. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Кінематичні головні передній та задній кути знаходяться за залежностями:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma_k &= \operatorname{tg} \gamma_{нк} / \cos \lambda_k, \\ \operatorname{tg} \alpha_k &= \operatorname{tg} \alpha_{нк} \cos \lambda_k \end{aligned} \quad (2.14)$$

де λ_k – кінематичний кут нахилу різальної кромки, для будь-якої форми передньої поверхні в загальному вигляді визначається залежністю

$$\sin \lambda_k = \frac{\vec{P} \cdot \vec{V}_e}{|\vec{P}| \cdot |\vec{V}_e|}. \quad (2.15)$$

У процесі різання положення різальної кромки, векторів \vec{P} та \vec{V} , визначених у пов'язаній з фрезою системі XYZ , у нерухомій системі координат $X_0Y_0Z_0$, зорієнтованій відносно напрямку вектора подачі V_s (рис. 2.6), визначаються трьома кутовими параметрами: кутом розташування різальної кромки на дузі контакту з заготовкою $t_{об}$ при обертанні фрези навколо своєї осі, кутами нахилу $t_{нах}$ та випередження $t_{вип}$ осі фрези відносно напрямку вектора подачі \vec{V}_s . Для

переходу від системи XYZ до $X_0Y_0Z_0$ отримані залежності:

$$\begin{aligned} X_0 &= (X \cos t_{06} - Y \sin t_{06}) \cos t_{\text{нах}} - Z \sin t_{\text{нах}}, \\ Y_0 &= (Y \cos t_{06} + X \sin t_{06}) \cos t_{\text{вип}} - \\ &\quad - [Z \cos t_{\text{нах}} + (X \cos t_{06} - Y \sin t_{06}) \sin t_{\text{нах}}] \sin t_{\text{вип}}, \\ Z_0 &= (Y \cos t_{06} + X \sin t_{06}) \sin t_{\text{вип}} + \\ &\quad + [Z \cos t_{\text{нах}} + (X \cos t_{06} - Y \sin t_{06}) \sin t_{\text{нах}}] \cos t_{\text{вип}}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Вектор результуючого руху різання \vec{V}_e у системі $X_0Y_0Z_0$ знаходимо як суму векторів $\vec{V} + \vec{V}_s$, при цьому враховуємо, що довжини їх у кожній точці кромки пов'язані залежністю:

$$|\vec{V}_s| / |\vec{V}| = S_o / 2\pi r \quad (2.17)$$

де S_o – величина подачі, мм/об;

r – відстань точки різальної кромки до осі фрези, мм.

Після підстановки отриманих у системі $X_0Y_0Z_0$ векторів \vec{P} , \vec{V} та \vec{V}_e у залежності (2.10...2.12) по розрахованим τ_N та λ_k визначаються величини кінематичних головних передніх і задніх кутів у процесі різання за залежностями (2.13...2.15).

За наведеними аналітичними залежностями проводиться розрахунок (підсистема проектування) та аналіз (підсистема аналізу) геометричних параметрів інструмента.

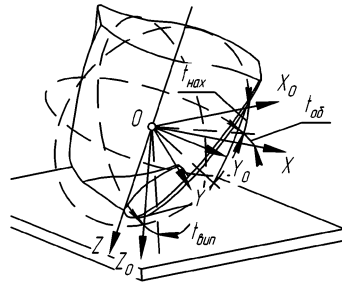


Рис. 2.6. Розташування систем координат

2.2.3 Аналіз геометричних параметрів

Для визначення кінематичних нормальних передніх і задніх кутів знаходять величину кута τ_N (2.12) між статичною і кінематичною площинами різання, що показує наскільки зміняться нормальні кінематичні передній і задній кути в порівнянні із нормальними статичними.

Значення цього кута залежить від кута між векторами швидкості головного \vec{V} та результуючого руху різання \vec{V}_e та від їх розташування відносно дотичного до різальної кромки вектора \vec{P} .

Визначимо, як змінюється величина кута τ_N вздовж різальної кромки в різні моменти контакту із заготовкою в положеннях зубця фрези, яке визначатимемо кутом $t_{об}$. У загальному випадку при різних кутах випередження та нахилу цей кут може змінюватись у межах від -90° до $+90^\circ$, що відповідає моменту врізання та моменту виходу зуба фрези із зони різання (рис. 2.7).

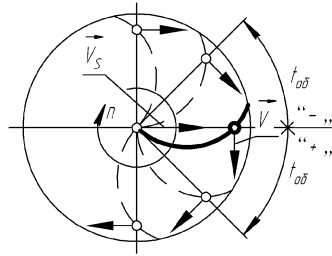


Рис. 2.7. Розташування зубця фрези в різні моменти часу

Кут нахилу не впливає на величину кута τ_N , оскільки поворот осі фрези відбувається в площині, перпендикулярній напрямку вектора подачі, і в результаті цього повороту взаємне розташування векторів \vec{P} , \vec{V} та \vec{V}_s залишається незмінним.

Зміна кута τ_N залежить від кута випередження $t_{вип}$ та положення різальної кромки сферичної фрези в процесі різання, що визначається кутом $t_{об}$, оскільки при незмінному напрямку вектора швидкості головного руху різання \vec{V} відносно дотичного вектора \vec{P} , буде змінюватись напрямок вектора \vec{V}_e .

Значення кута τ_N вздовж різальної кромки при різних $t_{об}$ та $t_{вип}$ для фрез $\varnothing 3$ та $\varnothing 10$ мм з плоскою передньою поверхнею при $z = 2$, $\gamma_i = 5^\circ$, $\delta = 90^\circ$, $S_z = 0,1$ мм/зуб показано на рис. 2.8.

Максимальне значення кута τ_N спостерігається при $t_{об} = 0$ у самій периферійній точці, де нормальна січна площина практично співпадає з площиною векторів \vec{V} та \vec{V}_s , а величина кута між цими векторами рівна куту τ_N .

$$\operatorname{tg} \tau_N = \frac{\vec{V}_s}{\vec{V}} \cos t_{вип} = \frac{S_z z}{2 \pi R} \cos t_{вип}. \quad (2.18)$$

Для фрез $\varnothing 3$ та $\varnothing 10$ при $S_z = 0,1$ мм/зуб та $z = 2$ на периферії матимемо відповідно $\tau_N = 1^\circ 13'$ та $\tau_N = 0^\circ 22'$, що відповідають значенням, показаним на рис. 2.8.

Максимальне значення кута τ_N при $t_{об} = 0$ буде зменшуватись при збільшенні діаметра фрези і зростати при збільшенні S_z та z , тобто подачі на оборот S_0 .

При кутах $t_{об} > 0$, коли кут між векторами \vec{V} і \vec{V}_s стане більше 90° , спостерігається інтенсивне зменшення кута τ_N до значень, близьких до -180° у вершинних точках кромки фрези.

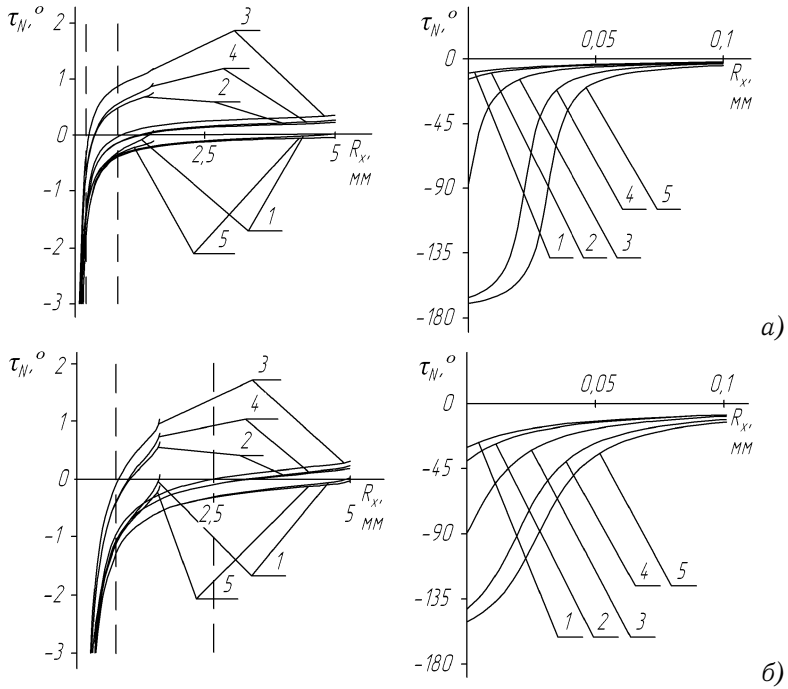


Рис. 2.8. Значення кута τ_N в різні моменти роботи:

$a - t_{\text{вип}} = 10^\circ$; $б - t_{\text{вип}} = 30^\circ$;
 $1 - t_{06} = -90^\circ$; $2 - t_{06} = -45^\circ$; $3 - t_{06} = 0$; $4 - t_{06} = 45^\circ$;
 $5 - t_{06} = 90^\circ$

Надання осі фрези кута випередження призводить до того, що змінюється напрям вектора результуючого руху різання, і цей вектор вже не буде лежати в площині, перпендикулярній осі фрези. За рахунок такого повороту осі фрези нормаль до кінематичної площини різання по відношенню до вектора нормалі статичної площини різання нахилиється в бік передньої поверхні фрези і кути τ_N на вершинній ділянці різальної кромки стають від'ємними.

Різде зменшення кута τ_N спричинено тим, що при наближенні до осі фрези збільшується кут між вектором швидкості результуючого руху різання \vec{V}_e та вектором \vec{V} . У точках різальної кромки, де цей кут досягає значення 90° , кінематична площина різання стає перпендикулярною до статичної площини різання, у результаті чого кут τ_N стає рівним -90° . Подальше збільшення кута між векторами \vec{V} та \vec{V}_e призводить до того, що кінематична площина різання співпадає зі статичною, а напрямки нормалей до цих площин стають вже протилежними, а тому і кут τ_N між ними стане наближеним до -180° .

Надання осі інструмента кута випередження призводить з однієї сторони до зміни величини τ_N , а з іншої сторони до того, що ділянка різальної кромки поблизу вершинної точки фрези не буде приймати участі в різанні. Найменша довжина цієї ділянки кромки буде у випадку, коли напрямок швидкості головного руху різання в цих точках буде перпендикулярним напрямку подачі. Визначимо найбільш близьку до осі фрези точку, яка буде приймати участь у різанні.

Для цього зобразимо різальну частину фрези радіусом R у момент різання з довільним кутом випередження і в наступний момент оброблення, який відповідає величині зміщення фрези в напрямку подачі на величину S_z (рис. 2.9). Кут ψ буде визначати крайню точку на різальній кромці, яка зрізає припуск.

Відповідно до графічної побудови, величина кута ψ може бути знайдена через величини $t_{\text{вип}}$ і β

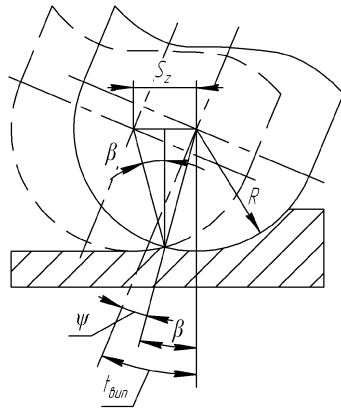


Рис. 2.9. Визначення кута активної ділянки кромки

$$\psi = t_{\text{вип}} - \beta, \quad (2.19)$$

Величина кута β знаходиться за залежністю

$$\sin \beta = \frac{S_z}{2R}, \quad (2.20)$$

Тоді кут ψ рівний:

$$\psi = t_{\text{вип}} - \arctg \frac{S_z}{2R}. \quad (2.21)$$

Знаючи кут ψ , можна визначити відстань A даної точки до осі при її обертанні, яка буде:

$$A = R \sin s\psi. \quad (2.22)$$

За наведеною залежністю визначається відстань найближчої до осі точки різальної кромки, яка буде приймати участь у різанні.

На рис. 2.8 через такі точки проведено вертикальні пунктирні лінії, які обмежують ділянки різальної кромки, що не будуть приймати участь у різанні.

Аналіз отриманих графіків (рис. 2.8) показав також, що кут τ_N при роботі з кутом випередження в процесі роботи буде приймати найбільше значення в точках кромки, що приймають участь у різанні при $t_{o6} = 0$, а найменше – при $t_{o6} = 90^\circ$. Тому розрахуємо величину кута τ_N у найближчій до осі точці, що приймає участь у різанні при $t_{o6} = 90^\circ$ і в самій периферійній точці різальної кромки при $t_{o6} = 0$ у залежності від кута випередження для фрез різного діаметра (рис. 2.10). Приймемо при розрахунках $\gamma_i = 5^\circ$, $\delta = 90^\circ$, а величини подач – найбільші з тих, які застосовуються при фрезеруванні таким інструментом.

Виходячи з аналізу побудованих графіків (рис. 2.10) можна зробити висновок, що чим більшою буде величина кута випередження, тим меншими будуть межі зміни кута τ_N .

Якщо прийняти відхилення кута τ_N рівними граничним відхиленням $\pm 1^\circ$, які задають на кресленнях на кути леза, то кут випередження для фрез діаметром до 2 мм повинен бути не менше 16° , у той час як для фрез $\varnothing 5$ та $\varnothing 10$ він повинен бути не менше 6° та 4° відповідно. Для отримання менших меж зміни кута τ_N вздовж різальної кромки величину кута випередження необхідно задавати по можливості найбільшим з врахуванням того, що при збільшенні

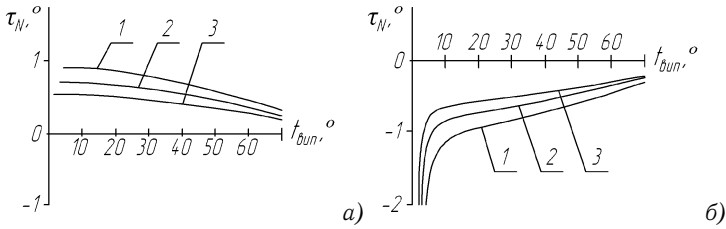


Рис. 2.10. Значення кута τ_N в різних положеннях зубця:

а – на периферії при $t_{об} = 0$; б – у найближчій до осі точці, що приймає участь в різанні, при $t_{об} = 90^\circ$:

1 – $\varnothing 2$ мм, $S_z = 0,05$ мм/зуб, 2 – $\varnothing 5$ мм, $S_z = 0,1$ мм/зуб; 3 – $\varnothing 10$ мм, $S_z = 0,15$ мм/зуб

кута випередження зменшується довжина різальної кромки, що буде приймати участь у різанні. Так при куті $t_{вип} = 30^\circ$ приймати участь у різанні буде периферійна ділянка кромки починаючи з точки, що знаходиться на відстані $0,5R$ від осі фрези.

Зміну кінематичних головних переднього γ_K та заднього α_K кутів двозубих фрез $\varnothing 3$ та $\varnothing 10$ мм вздовж різальних кромки у різних положеннях зуба фрез для кута випередження 15° та $z = 2$; $\gamma_i = 5^\circ$; $\alpha_i = 15^\circ$; $\delta = 90^\circ$; $S_z = 0,1$ мм/зуб показано на рис. 2.11.

Як показав аналіз, кінематичні геометричні параметри вершинної ділянки різальної кромки в значній мірі відрізняються від статичних, що викликано тим, що кути τ_N та λ_K у цих точках кромки мають максимальні значення.

У результаті цього значення кінематичних геометричних параметрів приймають неприйнятні для різання значення. Враховуючи, що осі фрези надано кут випередження 15° , для заданого інструментального переднього кута $\gamma_i = 5^\circ$ кінематичний головний передній кут γ_K змінюється в процесі обертання фрези на периферії від $4^\circ 50'$ до $6^\circ 15'$ для фрези $\varnothing 3$ та від $4^\circ 55'$ до $5^\circ 20'$ для фрези $\varnothing 10$ мм, а в найближчій до осі фрези точці, що приймає участь у різанні – від $3^\circ 40'$ до $4^\circ 55'$ та від $4^\circ 35'$ до 5° для фрез $\varnothing 3$ та $\varnothing 10$ відповідно.

Для заданого значення інструментального заднього кута $\alpha_i = 15^\circ$ кінематичний головний задній кут α_K змінюється в процесі обертання фрези на периферії від $13^\circ 50'$ до $15^\circ 10'$ для фрези $\varnothing 3$ та від $14^\circ 40'$ до 15° для фрези $\varnothing 10$ мм, а в найближчій до осі фрези точці, що приймає участь у різанні – від $15^\circ 10'$ до $16^\circ 30'$ та від 15° до $15^\circ 25'$ для фрез $\varnothing 3$ та $\varnothing 10$ відповідно.

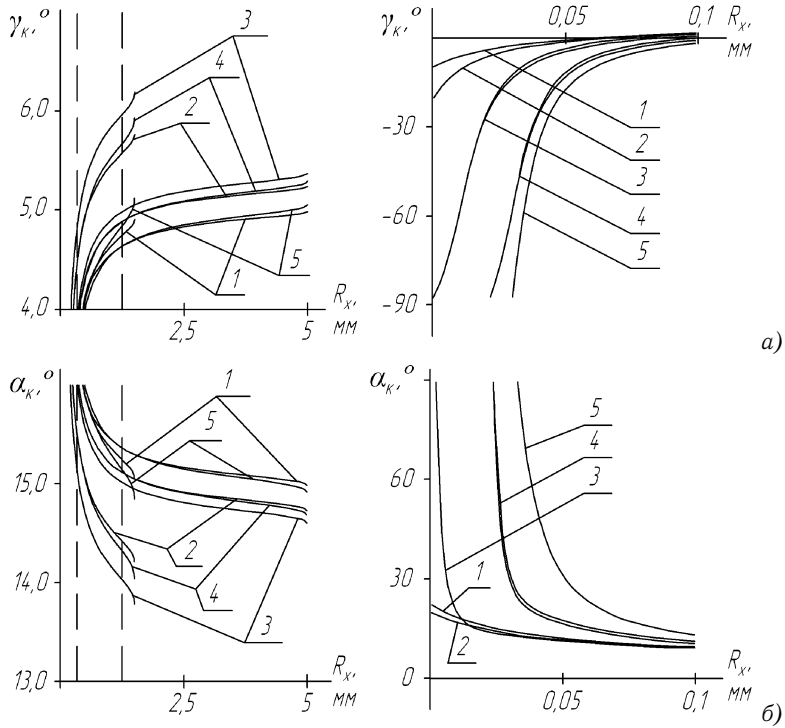


Рис. 2.11. Значення кінематичних кутів:

а - γ_K ; б - α_K :

1 - $t_{06} = -90^\circ$; 2 - $t_{06} = -45^\circ$; 3 - $t_{06} = 0^\circ$; 4 - $t_{06} = 45^\circ$;

5 - $t_{06} = 90^\circ$

У результаті розрахунків величин γ_K та α_K для різних діаметрів фрез та максимальних значень подач, встановлено, що для забезпечення зміни кінематичних геометричних параметрів у межах $\pm 1^\circ$ у порівнянні зі статичними рекомендується вибирати кути випередження не менше: для фрез $\varnothing 1$ мм – 33° , $\varnothing 2$ мм – 18° , $\varnothing 3$ мм – 12° , $\varnothing 4$ мм – 8° , $\varnothing 5 \dots 6$ мм – 7° , $\varnothing 7 \dots 8$ мм – 6° , $\varnothing 9 \dots 10$ мм – 5° .

Надання осі фрези кута випередження дозволяє як уникнути різання вершинною ділянкою різальної кромки з нераціональною геометрією, так і підвищити мінімальну швидкість різання в точках, що приймають участь у різанні, відстань яких до осі фрези залежить від величини кута випередження і визначається залежністю (2.22). На практиці ж значення кута випередження найчастіше приймають рівним $10^\circ \dots 15^\circ$, а іноді його значення досягає до 30° , що викликано тим, що точки різальної кромки, близькі до осі мають малу швидкість різання. Розраховані значення мінімальної швидкості різання у відсотках від швидкості самої периферійної точки різальної кромки фрези в залежності від кута випередження наступні.

Мінімальна швидкість для фрези діаметром 2 мм:

Подача, мм/об	Кут випередження, град		
	5	15	30
0,01	8,22	25,40	49,57
0,025	7,47	24,67	48,91
0,04	6,72	23,95	48,26
0,05	6,22	23,46	47,82

Мінімальна швидкість для фрези діаметром 5 мм:

Подача, мм/об	Кут випередження, град		
	5	15	30
0,01	0,025	8,22	25,4
0,025	0,05	7,72	24,92
0,04	0,075	7,22	24,43
0,05	0,10	6,72	23,95

Мінімальна швидкість для фрези діаметром 10 мм:

Подача, мм/об	Кут випередження, град		
	5	15	30
0,025	8,47	25,64	49,78
0,05	8,22	25,40	49,57
0,075	7,97	25,16	49,35
0,10	7,72	24,92	49,13
0,12	7,52	24,2	48,96

Аналіз отриманих значень показав, що у випадку кута випередження 5° швидкість самої близької до осі точки, яка знімає припуск, буде приблизно в 11,8... 16,1 рази менше швидкості самої периферійної точки різальної кромки, тоді як при кутах випередження 10° і 15° - відповідно в 3,9... 4,26 і 2... 2,1 рази.

Виходячи з цього, для підвищення швидкості різання величину кута випередження потрібно вибирати максимально допустиму з точки зору можливості обробки заданої поверхні деталі при такому розташуванню сферичної кінцевої фрези.

Реалізація проектно-програмного модуля побудови 3D моделі сферичної фрези потребує вирішення ряду задач, пов'язаних з формоутворенням поверхонь заданим інструментом.

Робочу частину сферичних кінцевих фрез отримують вишліфовкою конічними шліфувальними кругами на верстатах з ЧПК. Отже виникає задача вирішення формоутворення конічних гвинтових поверхонь конічним шліфувальним кругом і створення на основі отриманих залежностей 3D моделі такої поверхні.

2.2.4 Задачі формоутворення

Для вирішення задачі формоутворення гвинтових поверхонь конічним шліфувальним кругом необхідно визначити рівняння контакту і знайти характеристики, що визначають профіль стружкової канавки в різних перерізах.

Для цього виберемо нерухому систему координат $X_1Y_1Z_1$, пов'язану із заготовкою фрези (рис. 2.12): вісь X_1 направимо вздовж осі відносного гвинтового руху круга і заготовки, осі Y_1 і Z_1 розташуємо в площині, перпендикулярній осі заготовки. З шліфувальним кругом зв'яжемо рухому систему координат $X_0Y_0Z_0$, вісь Y_0 якої направимо вздовж осі конічного шліфувального круга.

Вважаємо, що в початковий момент часу вісь Z_0 співпадає з віссю Z_1 , а осі Y_0 , Y_1 , X_0 , X_1 лежать в одній площині. Кут між осями Y_0 і

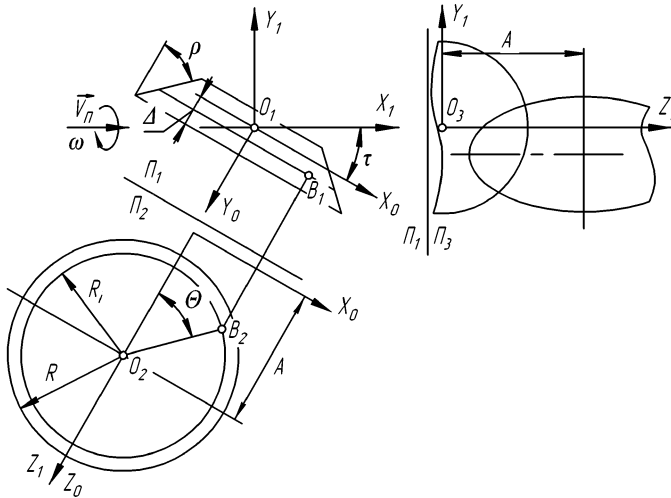


Рис. 2.12. Схема формоутворення гвинтових поверхонь

Y_1 , а також між X_0 та X_1 у початковий момент позначимо τ , відстань між осями заготовки і круга – A , кут профілю шліфувального круга – ρ , радіус шліфувального круга в торцевому перерізі – R , відстань від торця шліфувального круга до точки – Δ , параметр гвинтового руху круга відносно заготовки – p .

Гвинтовий рух з параметром p можна розглядати як сукупність обертального руху з кутовою швидкістю ω і поступального руху з швидкістю V_n .

Поворот на кут $t_{\text{пов}}$ навколо осі X_1 відповідатиме поступальному переміщенню вздовж осі X_1 на відстань рівну $p t_{\text{пов}}$. У разі кінчного гвинтового руху з'являється ще складова руху $(p \operatorname{tg}(\varphi/2) t_{\text{пов}}) / (2\pi)$, що змінює відстань від точки до осі X_1 , де φ – кут конусності траєкторії. Позитивним напрямком кута $t_{\text{пов}}$ приймаємо напрямок від Z_1 до Y . Формули переходу від системи $X_0Y_0Z_0$ до системи $X_1Y_1Z_1$ будуть:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_0 \cos \tau - Y_0 \sin \tau, \\ Y_1 &= -(X_0 \sin \tau + Y_0 \cos \tau), \\ Z_1 &= Z_0. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Гвинтова поверхня деталі, оброблена кінчним шліфувальним кругом, складається з трьох ділянок: оброблених кінчною поверхнею круга, торцевою площиною круга та граничним колом радіуса R .

У системі координат $X_0Y_0Z_0$ рівняння конічної поверхні у векторній формі буде:

$$\vec{r} = \vec{i}R_i \sin \Theta + \vec{j}[\Delta - (R - R_i) \operatorname{ctg} \rho] + \vec{k}(A - R_i \cos \Theta) \quad (2.24)$$

де R_i – прийнятий радіус шліфувального круга у вибраному перерізі, перпендикулярному осі круга;

Θ – кут, що визначає положення вибраної точки A на колі радіусу R_i .

У системі координат $X_0Y_0Z_0$ рівняння торцевої площини у векторній формі буде:

$$\vec{r} = \vec{i}R_i \sin \Theta + \vec{j}\Delta + \vec{k}(A - R_i \cos \Theta). \quad (2.25)$$

У системі координат $X_0Y_0Z_0$ рівняння граничного кола у векторній формі буде:

$$\vec{r} = \vec{i}R \sin \Theta + \vec{j}\Delta + \vec{k}(A - R \cos \Theta). \quad (2.26)$$

За наведеними рівняннями знайдемо рівняння контакту поверхонь круга і деталі. Вектор $\vec{N}_{\text{кон}}$ нормалі до конічної поверхні шліфувального круга в системі координат $X_0Y_0Z_0$ буде

$$\vec{N}_{\text{кон}} = -\vec{i}R_i \sin \Theta + \vec{j}R_i \operatorname{tg} \rho + \vec{k}R_i \cos \Theta. \quad (2.27)$$

У системі координат $X_1Y_1Z_1$ рівняння (2.27) прийме вигляд:

$$\vec{N}_{\text{кон}} = (-\sin \Theta \cos \tau - \operatorname{tg} \rho \sin \tau; \sin \Theta \sin \tau - \operatorname{tg} \rho \cos \tau; \cos \Theta). \quad (2.28)$$

З урахуванням руху шліфувального круга (2.28) прийме вигляд:

$$\begin{aligned} \vec{N}_{\text{кон}} = & (-\sin \Theta \cos \tau - \operatorname{tg} \rho \sin \tau \\ & - \cos \Theta \sin t_{\text{пов}} + (\sin \Theta \sin \tau - \operatorname{tg} \rho \cos \tau) \cos t_{\text{пов}}; \\ & \cos \Theta \cos t_{\text{пов}} + (\sin \Theta \sin \tau - \operatorname{tg} \rho \cos \tau) \sin t_{\text{пов}}) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Аналогічно визначається вектор $\vec{N}_{\text{пл}}$ нормалі до торцевої площини шліфувального круга в системі координат $X_1Y_1Z_1$ з урахуванням його руху

$$\vec{N}_{\text{пл}} = (\sin \tau; \cos \tau \cos t_{\text{пов}}; \cos \tau \sin t_{\text{пов}}). \quad (2.30)$$

Рівняння руху довільної точки $B(X_B^0; Y_B^0; Z_B^0)$ по конічній траєкторії буде:

$$\begin{aligned} X_B(t_{\text{пов}}) &= X_B^0 + p t_{\text{пов}} / (2\pi), \\ Y_B(t_{\text{пов}}) &= [R_B^0 + (p \operatorname{tg}(\varphi/2) t_{\text{пов}}) / (2\pi)] \sin(t_B^0 - t_{\text{пов}}), \\ Z_B(t_{\text{пов}}) &= [R_B^0 + (p \operatorname{tg}(\varphi/2) t_{\text{пов}}) / (2\pi)] \cos(t_B^0 - t_{\text{пов}}). \end{aligned} \quad (2.31)$$

де

$$R_B^0 = \sqrt{(Y_B^0)^2 + (Z_B^0)^2}, \quad t_B^0 = \operatorname{arctg}(Y_B^0 / Z_B^0).$$

Координати вектора швидкості $\vec{V}(V_x(t_{\text{пов}}); V_y(t_{\text{пов}}); V_z(t_{\text{пов}}))$ довільної точки $B(X_B^0; Y_B^0; Z_B^0)$ при русі по конічній траєкторії визначаються по (2.31) і будуть:

$$\begin{aligned} V_x(t_{\text{пов}}) &= dX_B(t_{\text{пов}}) / dt, \\ V_y(t_{\text{пов}}) &= dY_B(t_{\text{пов}}) / dt, \\ V_z(t_{\text{пов}}) &= dZ(t_{\text{пов}}) / dt. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Рівняння контакту буде

$$\vec{N} \cdot \vec{V} = 0. \quad (2.33)$$

Визначення форми обробленої поверхні зводиться до вирішення рівняння контакту і знаходження точок характеристик, тобто точок контакту поверхонь круга і обробленої поверхні в різних перерізах, перпендикулярних осі X_1 . Рівняння площини перерізу буде

$$X_1 = X_0. \quad (2.34)$$

За (2.31) і (2.34) визначаємо значення параметра $t_{\text{пов}}$ для довільної точки, при якому вона знаходитиметься в площині перерізу $X_1 = X_0$

$$X_0 = X_B^0 + p t_{\text{пов}} / (2\pi). \quad (2.35)$$

Звідки

$$t_{\text{пов}} = ((X_0 - X_B^0) 2\pi) / p. \quad (2.36)$$

Задаючись перерізом (2.34) та визначивши вектори нормалі $\vec{N}_{\text{кон}}$ (2.29) і $\vec{N}_{\text{пл}}$ (2.30) та вектор швидкості руху \vec{V} (2.32) чисельно знаходимо рішення рівняння контакту (2.33).

Під час проектування слід враховувати той факт, що залежно від розмірів фрези і круга та його установчих параметрів, можливі випадки, коли слід характеристики граничного кола перетинатиметься в межах тіла сферичної фрези, що приведе до підрізання передньої поверхні фрези. Підрізання можливе також торцевою площиною круга, якщо точка перетину слідів від граничного кола і торцевої площини також знаходитиметься в області тіла фрези. У результаті такого підрізання значення діаметра фрези не відповідатиме заданому значенню, крім того на гвинтових різальних кромках отримаємо негативні значення переднього кута.

На підставі отриманих характеристик за допомогою засобів твердотілого моделювання може бути побудована як поверхнева, так і твердотільна модель стружкової канавки.

Вирішення задачі формоутворення конічних гвинтових стружкових канавок сферичних кінцевих фрез конічним шліфувальним кругом безпосередньо використано для побудови їх твердотільних моделей у САПР сферичних кінцевих фрез.

2.2.5 Алгоритм проектування фрез

На базі розроблених теоретичних основ розрахунку геометричних параметрів сферичної кінцевої фрези був розроблений алгоритм проектування з аналізом геометричних параметрів та побудовою твердотільної моделі фрези. Алгоритм включає блок вхідних даних, блоки розрахунку та аналізу геометричних параметрів фрези, та блок побудови твердотільної моделі інструмента.

При проектуванні такого інструмента автоматизовано:

- визначення та аналіз геометричних параметрів сферичних кінцевих фрез у процесі їх роботи;
- визначення установчих параметрів шліфувального круга при формоутворенні різних поверхонь сферичної кінцевої фрези;
- створення на основі визначених установчих параметрів шліфувальних кругів при заданій кінематиці формоутворення твердотільної моделі кінцевої фрези.

Блоки розрахунку і аналізу геометричних параметрів фрези в кінематичній системі реалізовано на основі математичних залежностей, наведених у підрозділі 2.2.2 на с. 120.

Блок визначення установчих параметрів круга для обробки гвинтової стружкової канавки робочої частини фрези базується на те-

оретичному розв'язку цієї задачі, який наведено в розділі 2.2.4 на с. 132.

Для подальшої побудови моделі необхідно визначити установчі параметри шліфувальних кругів заданої форми та розмірів при обробленні:

- гвинтової стружкової канавки на конічній частині фрези;
- задньої та затилочної поверхонь на конічній частині фрези;
- передньої поверхні сферичної частини фрези;
- задньої та затилочної поверхонь сферичної частини фрези;
- вершини фрези для отримання необхідної величини заднього кута вершинної точки.

Наступним етапом є побудова твірних та направляючих кривих для булевих операцій утворення елементів фрези, а саме:

- поверхні стружкової канавки конічної частини фрези;
- задньої та затилочної поверхонь конічної частини фрези;
- передньої поверхні сферичної частини фрези;
- задньої та затилочної поверхонь сферичної частини фрези;
- прорізки частини різальної кромки в центральній зоні, які не повинні доходити до осі фрези;
- побудови поверхні підточки вершини фрези.

І завершальним є створення твердотільної моделі фрези, яка складається з побудови базового тіла (побудови сфери і конуса та операції їх об'єднання), створення та булевих операцій віднімання з базового тіла:

- гвинтової стружкової канавки;
- задньої та затилочної поверхонь на конічній частині фрези;
- передньої поверхні сферичної частини фрези;
- задньої та затилочної поверхонь на сферичній частині фрези;
- прорізки частини різальної кромки в центральній зоні зубців фрези;
- підточки вершини фрези.

Під час заточки задніх поверхонь гвинтового зубця, розташованого на конічній (або циліндричній) частині, згідно [45] фрезу повертають навколо своєї осі на величину кута α , що визначається в торцевому перерізі фрези, а шліфувальний круг відносно осі фрези на кут ω_y (рис. 2.13), які визначаються за залежностями:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \operatorname{tg} \alpha_n \cos \omega, \\ \sin \omega_y &= \sin \alpha_n \sin \omega \end{aligned} \quad (2.37)$$

де α_n – заданий інструментальний задній кут у нормальному до різальної кромки перерізі.

У відповідності до визначених положень круга відносно фрези знаходяться характеристики на поверхнях шліфувального круга, по яким відбувається побудова форм поверхонь різальної та робочої частини сферичних кінцевих фрез.

На базі описаного алгоритму було розроблено програмний продукт САПР різальної частини сферичних кінцевих фрез, який працює в автоматизованому режимі і дозволяє отримувати твердотільні моделі такого інструмента з необхідними параметрами з урахуванням можливості їх виготовлення.

Програмний продукт має назву DAC_TM, написаний на мові програмування C++ та є зовнішнім додатком Unigraphics NX2. DAC_TM працює під операційною системою Windows XP. Для функціонування програми необхідна система Unigraphics NX2. На програму DAC_TM отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №28575.

Також для програми DAC_TM розроблена інструкція користувача в якій викладені і наочно представлені основні етапи роботи програми та її можливості.

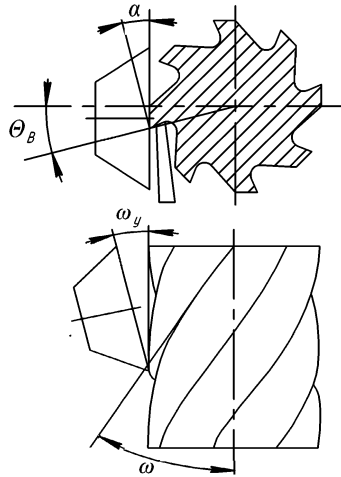


Рис. 2.13. Схема заточки задньої поверхні [45]

2.2.6 Побудова твердотільної моделі

Алгоритм побудови моделі складається з автоматизованого послідовного виконання наступних основних етапів.

Етап 1

Побудова в системі Unigraphics NX2 заготовки фрези з об'ємних прототипів (усічений конус, циліндр, сфера).

Етап 2

Визначення установчих параметрів конічного круга для обробки стружкової канавки фрези з необхідними геометричними параметрами.

Етап 3

На основі вирішення задачі формоутворення і отримання формоутворюючих точок, виконується побудова двох перерізів (у вершинній точці і в кінці тіла фрези) та трьох направляючих кривих. Криві будуються у вигляді сплайнів, вузли яких є формоутворюючими точками.

Етап 4

За двома перерізами та трьома направляючими виконується команда Unigraphics «замітання» з відніманням тіла стружкової канавки з тіла фрези (рис. 2.14).

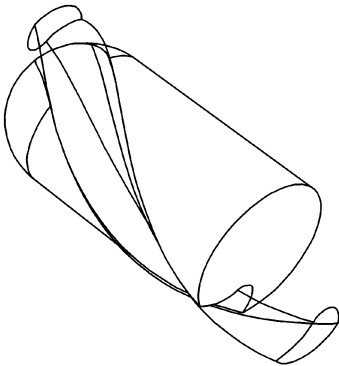


Рис. 2.14. Отримання стружкової канавки

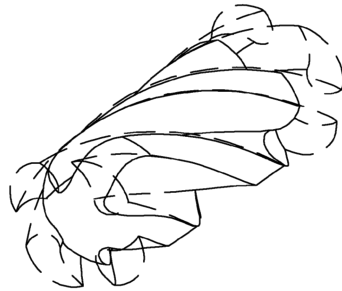


Рис. 2.15. Отримання решти стружкових канавок

Етап 5

Побудова перерізів, направляючих і операція «замітання» повторюється для кожної канавки (рис. 2.15).

Етап 6

Визначення установчих параметрів конічного круга для обробки задньої поверхні зубця фрези на циліндричній або конічній частині фрези для отримання необхідних геометричних параметрів.

Етап 7

Оскільки формоутворення при обробці задньої поверхні зубця фрези проводиться тільки колом, яке є лінією перетину торцевої площини та конічної поверхні конічного круга, визначаються три точки на цьому колі в різних положеннях круга при обробці. Формоутворюючі точки знаходитимуться на цьому колі. За трьома точками в різних положеннях проводиться побудова двох перерізів і трьох направляючих кривих. Направляючі будуються у вигляді сплайнів, вузли яких є формоутворюючими точками перерізу у вигляді дуг кіл.

Етап 8

За двома перерізами і трьома направляючими виконується команда Unigraphics «замітання» з відніманням з тіла фрези (рис. 2.16).

Етап 9

Побудова перетинів, направляючих і операція «замітання» повторюється для кожної канавки (рис. 2.17).



Рис. 2.16. Отримання задньої поверхні одного зубця



Рис. 2.17. Отримання задніх поверхонь всіх зубців

Етап 10

Для отримання моделі заточування по передній поверхні на сферичній частині фрези, визначаються точки різальної кромки в дискретних перерізах, що проходять через центр сфери. Дискретність задається рівномірною зміною кутового положення перерізу в осьовій площині. Кількість перетинів задається.

Етап 11

Проводиться побудова двох перерізів і трьох направляючих з урахуванням необхідних геометричних параметрів. Направляючі криві будуються у вигляді сплайнів, вузли яких є формоутворюючими точками.

Етап 12

За двома перерізами і трьома направляючими виконується команда Unigraphics «замітання» з відніманням з тіла фрези.

Етап 13

Побудова перерізів, направляючих і операція «замітання» повторюється для кожної канавки (рис. 2.18).

Етап 14

Визначення установчих параметрів кінчного круга для обробки спинки зубця фрези на сферичній частині для отримання заданих величин головного і потиличного задніх кутів.

Етап 15

За трьома точками кола кінчного круга в різних положеннях проводиться побудова двох перерізів і трьох направляючих. Направляючі будуються у вигляді сплайнів, вузли яких є формоутворюючими точками. Переріз виконується у вигляді дуг кіл.

Етап 16

За двома перерізами і трьома направляючими виконується команда Unigraphics «замітання» з відніманням з існуючого тіла з отриманням необхідної задньої поверхні зубців.

Етап 17

Побудова перерізів, направляючих і операція «замітання» повторюється для кожного зубця (рис. 2.19).

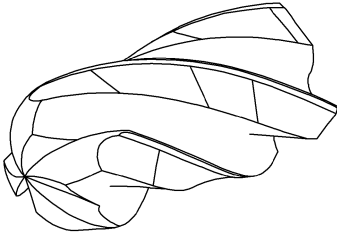


Рис. 2.18. Побудова передньої поверхні і канавки

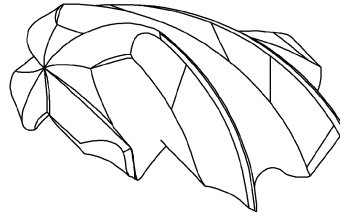


Рис. 2.19. Отримання задньої поверхні всіх зубців

Етап 18

Аналогічно виконується команда Unigraphics «замітання» з відніманням з існуючого тіла з отриманням необхідного заднього кута потиличної поверхні зубця.

Етап 19

Побудова перерізів, направляючих і операція замітання повторюється для кожного зубця (рис. 2.20).

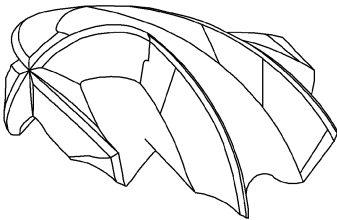


Рис. 2.20. Утворення потиличних поверхонь

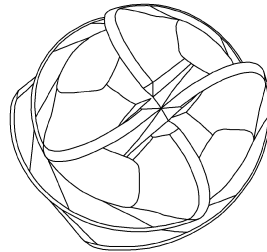


Рис. 2.21. Прорізка зубців

Етап 20

Завершувальною операцією є прорізка зубців, які не повинні сходитися до центру (рис. 2.21).

Після автоматичного збереження моделі та установчих параметрів під заданим ім'ям у користувача є можливість ручної зміни та корегування моделі фрези.

2.2.7 Розроблення сферичної фрези

Результати машинних експериментів проектування фрез у розробленій САПР показали, що в сферичних кінцевих фрезах з плоскою передньою поверхнею, у місці переходу сферичної частини у циліндричну різальні кромки не спряжені між собою (рис. 2.22), що пояснюється тим, що дотичні до цих двох кромок у точці переходу не співпадають за напрямком. Це негативно впливає на якість обробленої поверхні, збільшуючи її шорсткість у випадку, коли відбувається обробка цією ділянкою фрезерного інструмента.

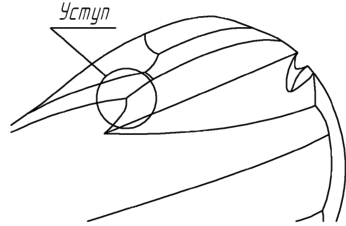


Рис. 2.22. Уступ на місці стику поверхонь

Для оцінки можливості усунення наведеного недоліку такої конструкції фрези з використанням розробленої САПР сферичних кінцевих фрез було проаналізовано декілька моделей фрез з плоскою передньою поверхнею, створених з різними значеннями інструментального переднього кута γ_i та кута нахилу гвинтової лінії ω , інші параметри залишалися постійними для всіх конструкцій.

Аналіз цих моделей показав, що уникнути утворення уступу не можливо для плоскої передньої поверхні при $\gamma_i < 10^\circ$ та $\omega > 25^\circ$. У зв'язку з цим було запропоновано фрезу з конічними передньою і задньою поверхнями, різальна кромка якої є основою конічних поверхонь, причому дотичні до цієї кромки і гвинтової кромки на циліндричній (або конічній) робочій частині фрези в точці їх переходу співпадають.

Положення площини, в якій розташована різальна кромка сферичної частини фрези по відношенню до положення гвинтової кромки визначається повздовжнім $\Theta_{пв}$ і поперечним $\Theta_{п}$ кутами її розташування.

Для визначення кутів $\Theta_{пв}$ і $\Theta_{п}$, у площинах проєкцій Π_1 і Π_2 зображуємо сферичну вихідну інструментальну поверхню радіуса R і спряжену з нею конічну поверхню робочої частини фрези, твірні якої розташовані під кутом η (рис. 2.23).

Точкою переходу торцевої кромки, розташованої на сферичній ВІП, у гвинтову на конічній, буде точка B . У цій точці дотична AB до гвинтової лінії циліндричної кромки пройде в площині Π_2 під кутом

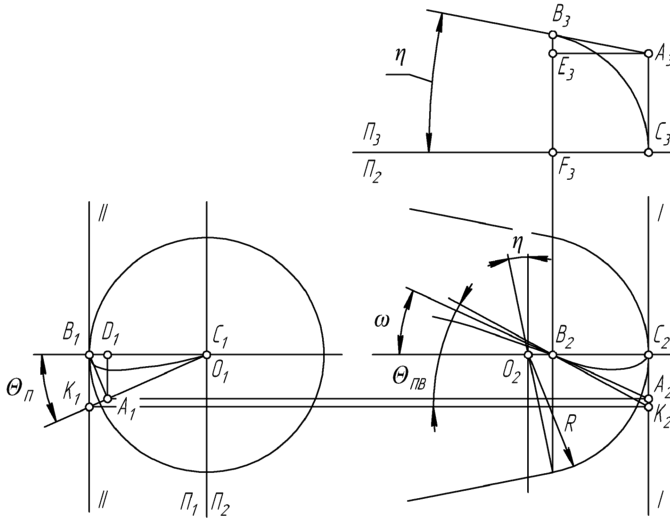


Рис. 2.23. Визначення кутів побудов

нахилу гвинтової канавки ω , а в площині Π_3 під кутом η . Так як дотична до основи конічних поверхонь і до гвинтової кромки конічної робочої частини співпадають, то спільна дотична лежить у площині різальної кромки, яку можна задати прямими AB і AC .

У точці C проведемо поперечний переріз I-I, а в точці B повздовжній переріз II-II, в яких і визначимо поперечний і повздовжній кути. З перерізом I-I площина перетинається по прямої AC . Величина кута $\angle A_1C_1B_1$ визначає величину поперечного кута розташування площини різальної кромки Θ_n .

Розглядаючи наведену графічну побудову отримано залежності:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \Theta_n &= \operatorname{tg} \omega \cos \eta, \\ \operatorname{tg} \Theta_{nv} &= \operatorname{tg} \omega (1 + \sin \eta). \end{aligned} \quad (2.38)$$

Для сфероциліндричних фрез, в яких гвинтові різальні кромки розташовані на циліндричній робочій частині ($\eta = 0$), ці кути відповідно будуть

$$\Theta_n = \Theta_{nv} = \omega. \quad (2.39)$$

На основі цих досліджень було запропоновано нову конструкцію фрези з конічними передньою та задньою поверхнями, утвореними на сферичній різальній частині фрези (рис. 2.24).

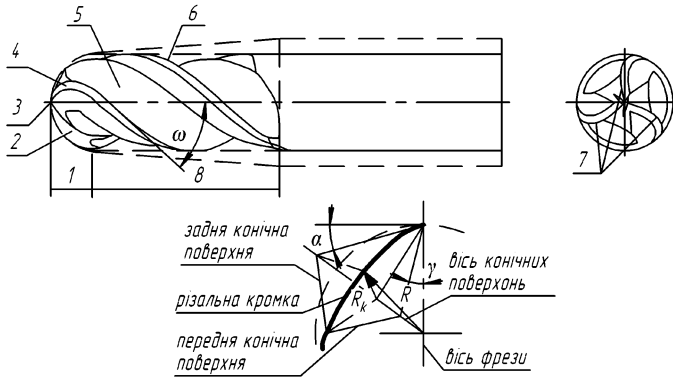


Рис. 2.24. Фреза нової конструкції

Фасонна кінцева фреза (рис. 2.24) має циліндричну або конічну робочу частину 8 з гвинтовими стружковими канавками 5 і утвореними ними гвинтовими різальними кромками 6 з кутом нахилу ω та сферичну частину фрези 4 з різальними кромками 6, які утворюють основу для передньої 7 та задньої 4 конічних поверхонь фрези та проходять через вершинну точку 3 фрези і дотичну до гвинтової кромки в точці переходу сферичної частини фрези в циліндричну або конічну.

Твірні конічних передньої та задньої поверхонь розташовані під відповідними інструментальними кутами γ та α .

Виконання в такий спосіб фасонної кінцевої фрези дозволяє уникнути уступа за рахунок плавного сполучення гвинтової та торцевої різальних кромки, чим досягається зниження шорсткості обробленої поверхні, у порівнянні з фрезою з плоскою передньою поверхнею⁴².

Після отримання необхідної геометрії різальних кромки було проведено порівняльні експериментальні дослідження фрез, що включали проведення стійкісних випробувань, та визначення шорсткості оброблених поверхонь.

У порівняльних експериментальних дослідженнях приймали участь по 3 твердосплавних сферичних кінцевих фрез $\varnothing 6$ мм з плоскою та конічною передніми поверхнями та конічними задніми поверхнями. Отримання плоскої передньої та конічної передньої поверхонь проводилось перезаточуванням фрез зі сплаву ВК8, виготовлених на ВАТ

⁴²Новизна розробленої конструкції підтверджена патентом на корисну модель №35578.

“Мотор Січ”⁴³.

Як оброблюваний матеріал використовувалися плити 400x400x50 мм із сталі 5ХНМ, отримані куванням. Дефектний шар перед випробуваннями був видалений.

Інструментальні геометричні параметри для обробки даного матеріалу були вибрані наступними: $\gamma_i = 5^\circ$; $\alpha_i = 12^\circ$. Відхилення геометричних параметрів після перезаточування на верстаті не перевищували $\pm 1^\circ$.

Випробування проводилися на оброблювальному центрі HSM 600 фірм Mikron, оснащеному стійкою Heidenhain iTNC 530.

Верстат, призначений для випробувань за паспортними даними відповідав встановленим для нього нормам точності по ДСТУ ГОСТ 27843:2007 (ISO 230-2:1997) «Випробування верстатів. Визначення точності та повторюваності позиціювання осей з числовим програмним керуванням».

Випробування проводилися при наступних режимах різання: частота обертання шпінделя $n = 5000$ об/хв, що відповідало швидкості різання $V = 94$ м/хв, глибина різання складала 0,3 мм, крок між проходами 0,3 мм, подача на зуб рівна 0,05 мм, що відповідало хвилинній подачі 500 мм/хв.

Вимірювання величини зношення фрези проводилися кожні 10 хвилин роботи на мікроскопі БМІ-1Ц⁴⁴ на найбільш зношених ділянках торцевих різальних кромок фрези.

Шорсткість оброблених поверхонь вимірювалась на вимірювальному комп'ютерному комплексі на основі профілометра мод. 296⁴⁵, який відповідає DIN EN ISO 3274. Шорсткість вимірювалась на профільній ділянці оброблених поверхонь методом оцупування в системі середньої лінії за ГОСТ 2789-73. Обробка результатів вимірювання проводилась за методикою згідно ГОСТ 25142-82.

⁴³“МОТОР СІЧ” – одне з провідних підприємств у світі з виготовлення авіаційних двигунів для літаків і вертольотів, а також промислових газотурбінних двигунів.

Історія підприємства почалася в 1907 році та нараховує вже більше 100 років. Підприємство випускає надійні авіаційні двигуни та газотурбінні установки, які є конкурентними на світовому ринку. Продукція підприємства експлуатується на літаках та вертольотах різного призначення більш ніж у 120 країнах світу.

⁴⁴Мікроскоп інструментальний БМІ-1Ц призначений для вимірювання у світлі що проходить та у відбитому: зовнішніх лінійних розмірів і діаметрів валів до 150 мм в подовжньому напрямі і до 50 мм в поперечному напрямі; кутів виробів до 360° по кутомірній головці і столу.

⁴⁵Профілометр моделі 296 призначена для вимірювання в цехових контрольних пунктах шорсткості поверхні виробів, перетин яких в площині вимірювання представляє пряму лінію.

Результати вимірювання шорсткості обробленої поверхні фрезами такі:

– фрези що мають плоску передню поверхню:

номер фрези	1	2	3
Ra , мкм	2,01	1,87	1,77

– фрези що мають конічну передню поверхню:

номер фрези	1	2	3
Ra , мкм	0,92	0,77	0,67

У якості критерію при стійкісних випробуваннях було прийнято величину зношення вздовж задньої поверхні фрези, рівну 0,3 мм, що відповідає розмірному зношенню інструмента 0,015 мм. При величинах зношення більше 0,3 мм спостерігалось різке погіршення якості обробленої поверхні, що викликане підвищенням тертя по задній поверхні інструмента.

Аналіз середніх величин зносу показує, що стійкість фрез нової конструкції при критерії зношення 0,3 мм у 1,2 рази більше, ніж у фрез з плоскою передньою поверхнею (рис. 2.25).

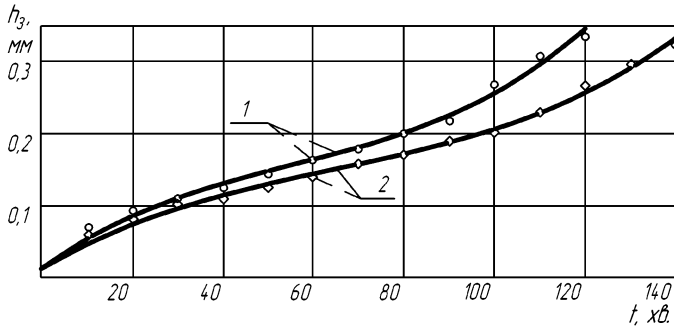


Рис. 2.25. Усереднені значення зношення фрез

1 – фреза з плоскою передньою поверхнею;

2 – фреза з конічною передньою поверхнею.

2.3 Висновки

Підсистема проектування

Для реалізації підсистеми аналізу при автоматизованому проектуванні сферичних фрез розроблено методику розрахунку геометри-

чних параметрів сферичних кінцевих фрез в кінематичній системах координат з урахуванням особливостей конструкції та експлуатації такого інструмента.

Проаналізовано вплив конструктивних параметрів фрези та кутів нахилу і випередження осі фрези в процесі її роботи на кінематичні геометричні параметри.

Показано, що найбільш раціональними для сферичних кінцевих фрез з точки зору зміни вздовж різальної кромки геометричних параметрів є плоска або конічна форми передньої та конічна форма задньої поверхні.

Геометричні параметри

Встановлено, що найбільший вплив на геометричні параметри в кінематичній системі координат мають величина подачі та кут випередження, а кут нахилу осі фрези в процесі обробки не впливає на величини переднього та заднього кутів в кінематичній системі координат.

Встановлено також, що кут випередження фрези в процесі різання, при якому забезпечуються доцільні геометричні параметри, залежить від діаметра фрези та величини подачі і для забезпечення зміни кінематичних кутів вздовж різальної кромки в межах $\pm 1^\circ$ в порівнянні зі статичними, значення кута випередження слід вибирати не менше:

діаметр фрези, мм	1	2	3	4	5...6	7...8	9...10
кут випередження, град	33	18	12	8	7	6	5

Орієнтація інструмента

Надання осі фрези кута випередження дозволяє як уникнути різання вершинною ділянкою різальної кромки з нераціональною геометрією, так і підвищити мінімальну швидкість різання в точках, що приймають участь в різанні.

Виходячи з цього, для підвищення швидкості різання величину кута випередження потрібно вибирати максимально допустиму з точки зору можливості обробки сферичною кінцевою фрезою заданої поверхні деталі.

Теоретична реалізація

Теоретично та програмно реалізовано формоутворення конічних гвинтових поверхонь конічними шліфувальними кругами. Безпосереднє використання результатів вирішення цих задач формоутворення дозволяє при побудові моделей отримати форми цих поверхонь

з урахуванням кінематики формоутворення, а побудовані в результаті такого підходу твердотільні моделі можуть використовуватися як електронний еталон при проведенні автоматизованого контролю сферичних кінцевих фрез після їх виготовлення.

Програмна реалізація

На основі представлених структури та алгоритму САПР робочої частини сферичних кінцевих фрез створено комп'ютерну програму «DAS_TM» - систему автоматизованого проектування, аналізу та контролю сферичних кінцевих фрез, на яку отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір та розроблено інструкцію користувача.

З використанням цієї САПР розроблена нова конструкція фрези, що забезпечує підвищення стійкості та зниження шорсткості оброблених такою фрезою поверхонь. Новизна цієї конструкції підтверджена патентом на корисну модель.

Впровадження

Розроблена САПР різальної частини сферичних кінцевих фрез впроваджена у виробництво на ВАТ «Мотор Січ», що дозволило на стадії проектування за рахунок аналізу геометричних параметрів забезпечити вибір раціональної геометрії інструмента і отримання твердотільної моделі, що використовується під час виготовлення та контролю фрез після виготовлення.

Впровадження цієї розробки дозволило скоротити термін підготовки виробництва сферичних кінцевих фрез, підвищити їхню якість та знизити витрати.

Список літератури

1. Автоматизированная подготовка программ для станков с ЧПУ / Р. Э. Сафраган, Г. Б. Евгеньев, А. Л. Дерябин и др. – К.: Техніка, 1986. – 191 с.
2. Автоматизированное проектирование металлорежущего инструмента / В. А. Гречишников, Г. Н. Корсаков, А. В. Кутаев и др. – М.: Мосстанкин. 1984. – 107 с.
3. Алексеев Г. А. Конструирование инструмента / Г. А. Алексеев, В. А. Аршинов, Р. М. Кричевская. – М.: Машиностроение, 1979. – 384 с.
4. Васин С. А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 448 с.
5. Вовк В. В. Геометричне забезпечення САПР різальної частини сферичних кінцевих фрез: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Вовк Вячеслав Володимирович. – К., 2010. – 187 с.
6. Григорьев С. Н. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ / С. Н. Григорьев, М. В. Кохомский, А. Р. Маслов. – Машиностроение, 2006. – 544 с.
7. Евгеньев Г. Б. Основы программирования обработки на станках с ЧПУ / Г. Б. Евгеньев. – М.: Машиностроение, 1983. – 304 с.
8. Иноземцев Г. Г. Проектирование металлорежущих инструментов / Г. Г. Иноземцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
9. Кудевицкий Я. В. Фасонные фрезы / Я. В. Кудевицкий. – Л.: Машиностроение, 1978 – 176 с.
10. Оброблення різанням. Терміни, визначення та позначення: ДСТУ 2249-93. – [Чинний від 1995-01-01] – К.: Держстандарт України, 1994. – 55 с.
11. Панчук В. Г. Теоретичні основи проектування відрізних фрез: дис... д ра техн. наук: 05.03.01 / Панчук Віталій Георгійович. – К., 2009. – 360 с.
12. Петрухин С. С. Основы проектирования режущей части металлорежущих инструментов / С. С. Петрухин. – М.: Машгиз, 1960. – 163 с.
13. Равская Н. С. Геометрия передней поверхности режущего инструмента / Н. С. Равская, Т. П. Николаенко // Наукові праці Донецького національного університету. – 2004. – Вип. 7.– С. 134-139.
14. Равская Н. С. Геометрия поперечной кромки спирального сверла / Н. С. Равская, Т. П. Николаенко, Л. С. Мельничук // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – 2004. – Вип. №15. – С. 3-8.

15. Равская Н. С. Геометрия стандартного спирального сверла с различными углами при вершине / Н. С. Равская, Т. П. Николаенко, Л. С. Мельничук // Резание и инструмент в технологических системах. – 2005. – Вып. 69. – С. 233-238.
16. Равская Н. С. Графическое определение кинематических геометрических параметров режущей части отрезных фрез со стружечными канавками переменной глубины / Н. С. Равская, В. Г. Панчук, О. В. Рублюк // Резание и инструмент в технологических системах. – 2008. – Вып. 74. – С. 267-276.
17. Равская Н. С. Общая теория определения геометрических параметров режущей части инструмента / Н. С. Равская, А. А. Охрименко // Материалы, технология и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин. – 2009. – Т.2 – С. 260-265.
18. Равская Н. С. Общий метод определения геометрических параметров инструментов / Н. С. Равская, Т. П. Николаенко, Л. С. Мельничук // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – 2003. – Вип. №14. – С. 3-11.
19. Равская Н. С. Определение кинематического угла в плане и толщины среза при нарезании резьбы метчиком / Н. С. Равская, Т. П. Николаенко, Д. А. Красновид // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – 2003. – Вып. 44. – С. 121-122.
20. Равская Н. С. Формообразование винтовых поверхностей коническим шлифовальным кругом / Н. С. Равская, Т. П. Николаенко, В. В. Вовк // Вестник НТУУ “КПИ”. Машиностроение. – 2006, – Вып. 49. – С. 150-152,
21. Равська Н. С. Геометрические параметры режущей части дисковых отрезных пил / Н. С. Равська, В. Г. Панчук, С. В. Майданюк // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. праць. – 2005. – №18. – С. 73 – 82.
22. Равська Н. С. Геометрические параметры режущей части отрезных фрез с подрезающими кромками / Н. С. Равська, В. Г. Панчук, Н. О. Нощенко // Резание и инструмент в технологических системах. – 2006. – Вып. 71. – С. 112-120.
23. Равська Н. С. Геометричні параметри призматичних та радіальних фасонних різців з нахиленим розташуванням бази кріплення в статичній системі координат / Н.С. Равська, Т. П. Ніколаєнко, Є. В. Корбут // Наукові праці Донецького національного університету. – 2005. – Вип. 92. – С. 176-183.
24. Равська Н. С. Геометричні параметри різальної частини різбових різців / Н. С. Равська, Д. О. Красновид, В. О. Токунов // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – 2009. – Вип.24. – С. 38-42.

25. Равська Н. С. Геометрія дискових відрізних фрез / Н. С. Равська, Н. О. Нощенко // Вісник ЖДТУ. – 2005. – Вип. 4 (35). – С. 23-28.
26. Равська Н. С. Геометрія різальної частини мітчика в кінематичній системі координат / Н. С. Равська, Д. О. Красновид // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2005. – Вип. №1. – С. 363-374.
27. Равська Н. С. Методика аналітичного визначення геометричних параметрів різальної частини інструмента / Н. С. Равська, Т. П. Ніколаєнко, Д. О. Сільчин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2009. – Вип. 6 (154). – С. 118 – 129.
28. Равська Н. С. Основи кінематичної теорії визначення геометричних параметрів різальної частини інструмента / Н. С. Равська // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – 2009. – Вип.24. – С. 9-18.
29. Равська Н. С. Основи формоутворення при механічній обробці / Н. С. Равська, П. Р. Родін, П. П. Ніколаєнко, Т. П. Мельничук. – Житомир: ЖІТІ, 2000. – 332 с.
30. Равська Н. С. Теорія аналітичного визначення геометричних параметрів різальної частини інструментів / Н. С. Равська, Т. П. Ніколаєнко, Є. В. Корбут // Вісник ЖДТУ. – 2004. – Вип. 29. – С. 134-138.
31. Равська Н. С. Узагальнена теорія визначення геометричних параметрів різальної частини відрізних фрез / Н. С. Равська, В. Г. Панчук // Вестник НТУУ «КПІ». Машиностроение. – 2007. – Вип. № 50. – С. 34-39.
32. Радзевич С. П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. Монография. / С. П. Радзевич. – К.: Растан, 2001. – 592с.
33. Радзевич С. П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С. П. Радзевич. – К.: Вища школа, 1991. – 192 с.
34. Резников Н. И. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / Н. И. Резников. – М.: Машиностроение, 1972. – 198 с.
35. Родин П. Р. Металлорежущие инструменты / П. Р. Родин. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 455 с.
36. Родин П. Р. Проектирование и производство режущего инструмента / П. Р. Родин. – К.: Техніка, 1968. – 358 с.
37. Родин П. Р. Обработка фасонных поверхностей на станках с числовым программным управлением / П. Р. Родин, Г. А. Линкин, В. Н. Татаренко. – К: Техніка, 1976 – 200 с.

38. Родин П. Р. Основы теории проектирования режущих инструментов / П. Р. Родин. – М. – Киев: Машгиз, 1960 – 160 с.
39. Родін П. Р. Різальний інструмент в прикладах і задачах: Навч. посібник / П. Р. Родін, Н. С. Равська, Л. І. Ковальова, Р. П. Родін. – К.: Вища шк., 1994. – 294 с.
40. Сахаров Г. Н. Металлорежущие инструменты / Г. Н. Сахаров, О. Б. Арбузов, Ю. Л. Боровой и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
41. Сахнюк Н. В. Определение траектории перемещения заготовки и инструмента для пятикоординатной высокоскоростной обработки поверхностей лопатки компрессора / Н. В. Сахнюк, Ю. В. Грачев, А. Я. Качан // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – №2. – С. 139-141.
42. Сахнюк Н. В. Технологические особенности изготовления лопаток компрессора методом высокоскоростного фрезерования / Н. В. Сахнюк, В. К. Яценко, С. Д. Зиличихис // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – 2004. – Вип. №16. – С. 126-131.
43. Справочник конструктора-инструментальщика / В. И. Баранчиков, Г. В. Боровский, В. А. Гречишников и др. – М.: Машиностроение – 1994. – 560 с.
44. Таратынов О. В. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ / О. В. Таратынов, Ю. П. Тарамыкин. – М.: Высш. шк., 1991. – 423 с.
45. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М. М. Палей, Л. Г. Дибнер, М. Д. Флид и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 288с.
46. Шагалова З. Ю. Конструювання різального інструменту: Підручник / З. Ю. Шагалова, Н. Г. Сиротенко. – К.: Вища шк., 1970. – 267 с.
47. Ящерицын П. И. и др. Основы проектирования режущих инструментов с применением ЭВМ / П. И. Ящерицын, Б. И. Сеницын, Н. И. Жигалко. – Минск: Высшейш. шк., 1979. – 304 с.
48. Angel Vachev, “Conversion methodology to relate tool and working angels – an alternative to ISO3002/2”, Journal of the Technical University at Plovdiv. “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 13, 2006.: 51-58.
49. Angel Vachev, Angel Poparov, “Tool-in-Hand and Tool-in-Use System when drilling (3D), boring, reaming and counterboring”, Journal of the Technical University at Plovdiv, “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 13, 2006.: 85-92.

50. Angel Vachev, Angel Poparov, "Tool-in-Hand and Tool-in-Use System when plane milling (2D)", Journal of the Technical University at Plovdiv, "Fundamental Sciences and Applications", Vol. 13, 2006.: 71-77.
51. Angel Vachev, Angel Poparov, "Tool-in-Use System and motion angles when turning", Journal of the Technical University at Plovdiv, "Fundamental Sciences and Applications", Vol. 13, 2006.: 59-70.
52. Angel Vachev, Angel Poparov, "Tool-in-Hand and Tool-in-Use System when volume milling (3D)", Journal of the Technical University at Plovdiv, "Fundamental Sciences and Applications", Vol. 13, 2006.: 79-84.

3 КОНТРОЛЬ МІКРОГЕОМЕТРІЇ ІНСТРУМЕНТА

Розділ присвячено актуальній науково-технічній задачі – автоматизації вимірювання мікрогеометрії різальної кромки інструмента і комп'ютерному моделюванню тривимірної мікрогеометрії, що останнім часом набуває все більшого значення за умов високошвидкісного⁴⁶ та високоефективного⁴⁷ оброблення матеріалів.

Створений апаратно-програмний комплекс не поступається за можливостями кращим закордонним зразкам, проте має суттєво нижчу вартість і меншу кількість експлуатаційних обмежень.

3.1 Основи побудови комплексу

Процес механічного оброблення матеріалів є одним із найпоширеніших методів формоутворення поверхонь деталей. У зв'язку з розвитком верстатів з ЧПК широкого використання в авіа- та машинобудівній галузі набули фасонні поверхні. Актуальною задачею на виробництві є контроль таких поверхонь.

Крім того часто виникають задачі реінжиніринга, коли для аналізу геометрії існуючого виробу доцільно отримати його тривимірну модель. Виконати такі вимірювання можна за допомогою координатно-вимірювальних машин та 3D сканерів⁴⁸, проте їх використання стримується великою вартістю такого обладнання.

3.1.1 Проблеми мікрогеометрії

Вимірювання геометричних параметрів різального клину може виконуватися за допомогою різного типу кутомірів та інструментального мікроскопу і є достатньо поширеним. Отримані параметри різального елемента описують його макрогеометрію, що має великий вплив на процес різання.

⁴⁶HSM – High Speed Machining

⁴⁷HEM – High Efficiency Machining

⁴⁸3D-сканер — периферійний гаджет, що аналізує форму предмета і на основі отриманих даних створює його 3D-модель.

Останнім часом дослідники стали приділяти увагу і параметрам мікрогеометрії, які на відміну від макрогеометрії різального клину, описують різальну кромку як елемент системи стружковідділення.

Важливість параметрів мікрогеометрії різального інструмента з точки зору впливу на процеси мікро- і нано- різання підкреслюється у [10] – “трансформація механізмів пластичного й крихкого руйнування в нанопроцесі стружкоутворення відбувається внаслідок великого гідростатичного тиску та температури в області вершини різального леза й залежить, перш за все, від співвідношення товщини зрізуваного шару та радіуса округлення різальної кромки інструмента або від співвідношення поточного значення товщини зрізуваного шару та його критичного значення, рівня гідростатичного тиску⁴⁹ у зоні вершини різального клину й рівня температури”.

Отже, на сьогодні перспективним є акцент на дослідження саме мікрогеометрії леза різального інструмента, а найважливішим її параметром є округлення різальної кромки – фасонної поверхні⁵⁰, яка зв’язує передню і задню поверхні різального клину інструмента.

Для покращення контактних процесів у процесі різання існують спеціальні форми різальних кромок, які можуть бути округлими, можуть мати одну або декілька мікрофасок, а можуть поєднувати фаски та округлення [15, 16]. На рис. 3.1 представлені різні варіанти форм різальних кромок, які знаходять своє практичне застосування в різних методах різання під час оброблення різних матеріалів.

Мікрогеометрія різальних кромок описується параметрами Δr , φ , $S\gamma$, $S\alpha$, r та К-фактором⁵¹ (форм-фактором), який визначає орієнтацію округлення кромки [15]. Ці параметри дозволяють більш точно охарактеризувати різальну кромку, адже округлена не завжди є симетричною та з постійною величиною радіуса. К-фактор визначається як співвідношення $S\gamma/S\alpha$, де $S\gamma$ та $S\alpha$ – це відстань між точкою розділу округленої різальної кромки, точкою в якій починається перехід від плоскої поверхні до округленої, та вершиною інструмента з ідеально гострою різальною кромкою на передній та

⁴⁹Гідростатичний тиск (рос.гидростатическое давление, англ. *hydrostatic pressure*, нім. *Hydrostatischer Druck, Wasserdruck*) — тиск рідини в будь-якій точці об’єму цієї рідини. Згідно з сучасними поглядами процес різання можливо розглядати як відділення дуже густої рідини. У такому випадку процеси відділення стружки сходять з процесом течії струму густої рідини.

⁵⁰Остання дослідження переконливо показують, що різальна кромка це фасонна поверхня складного профілю стохастичного характеру.

⁵¹К-фактор (нагл. *K-Factor*) – параметр який характеризує міру відхилення від заданої величини, форми.

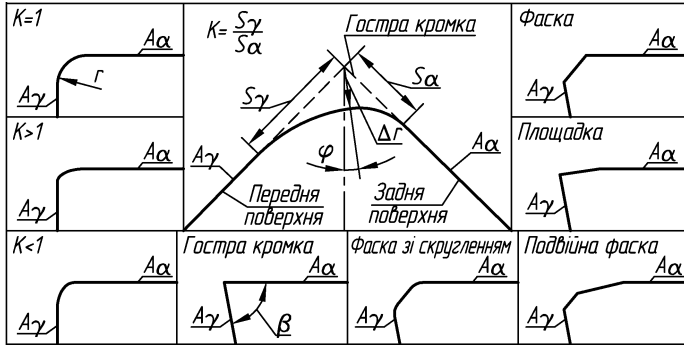


Рис. 3.1. Форми різальних кромок

задній поверхнях відповідно.

Отже, форма округлення різальної кромки може бути розділена на три класи:

- $K = 1$ – описує симетричну мікрогеометрію;
- $K > 1$ – вказує на нахил на передню поверхню;
- $K < 1$ – вказує на нахил на задню поверхню.

Параметр Δr та кут φ описують затуплення (площинність) різальної кромки інструмента та вимірюється як найкоротша відстань та зміщення між ідеально гострою та округленою різальними кромками. Радіус округлення різальної кромки визначається як радіус кола, яке вписується (підганяється) у перетин між передньою та задньою поверхнями різального клину. Слід відмітити, що це спрощене представлення радіуса округлення, оскільки ідеально округлених кромок не існує.

Форма різальної кромки має безпосередній вплив на складові сили різання та траєкторію руху матеріалу при різанні. В порівнянні з гострими кромками в округлених сила різання та подачі більші. При збільшенні радіуса округлення зростають і середні сили різання, але для асиметричних кромок ці величини будуть значно менші, ніж для симетричних з такою ж величиною радіуса округлення, не залежно від величини K -фактору.

Особливо слід відмітити, що методи вимірювання параметрів округлення різальних кромок знаходяться лише в стадії становлення.

3.1.2 Методи вимірювання мікрогеометрії

Задача визначення радіуса округлення зводиться до визначення радіуса кривизни поверхні спряження передньої та задньої поверхонь інструмента. Величина цього параметру, як правило варіюється в діапазоні від 2...3 мкм до 100...200 мкм. Існують як контактні, так і безконтактні методи вимірювання [1, 2, 9, 23, 24].

Метод світлового перерізу

При вимірюванні методом світлового перерізу⁵² інструмент розташовують на предметному столику. Екран розташовують на відстані 300-350 мм від окуляру таким чином, щоб збільшення у всіх точках зображення контуру різальної кромки було однаковим. Визначення радіуса заокруглення проводять з допомогою раніше отриманих шаблонів величин округлення кромки. Недоліком методу є те, що вимірювання проводять на граничному збільшенні мікроскопа ($\times 100$), яке дає значні спотворення результату.

Крім того, глибина різкості оптичних мікроскопів значно менше вимірюваного радіуса, що спричинює нечіткість зображення та зниження точності вимірювань. При такому методі можна виміряти тільки максимальне значення радіуса на обраній ділянці кромки.

Метод відбитку

При вимірюванні радіуса методом відбитку кромка вдавлюється в пластину з м'якого матеріалу (наприклад, алюмінію) і потім на металографічному мікроскопі визначається радіус заокруглення кривої у відповідному перерізі. Значення радіуса в деякій мірі залежить при цьому від властивостей пластини, сили вдавлювання, орієнтації зразка при вимірюванні.

Одним з різновидів цього методу є притискання різальної кромки під прямим кутом до тонкої проволочки з м'якого матеріалу, і наступний розгляд відбитка на проволочці. При такому способі гостроту кромки можна оцінювати по мінімальній силі, при якій утворюється видимий відбиток. Такий спосіб дозволяє оцінити кромки з шири-

⁵²Світловий переріз (потік) – просторово обмежений у напрямку, перпендикулярному до розповсюдження, потік світла. Світлові пучки утворюються при проходженні сферичного потоку світла від джерела через апертуру. Пучки від джерела розбіжні, що означає, що їхній поперечний переріз збільшується з віддаллю. При проходженні через певні оптичні системи, наприклад, збірні лінзи, світловий пучок може стати збіжним. Окремий випадок складають важливі для досліджень колімовані пучки, тобто пучки, світлові промені в яких паралельні.

ною фаски близько 0,1 мкм. До недоліків можна віднести залежність радіуса сліду на проволоці від діаметра проволоки та її шорсткості.

Метод оцупування

Вимірювання методом оцупування виконують на профілографі-профілометрі скануванням досліджуваної ділянки щупом з малим радіусом його округлення. За отриманою профілограмою і визначається радіус округлення різальної кромки. Оскільки вимірювання проводиться заокругленим щупом, виникає необхідність визначення його радіуса і подальше врахування при розрахунках.

Метод оптичного відзеркалення

Метод оптичного вимірювання радіусів проводиться скануванням лазерним променем у перерізі, перпендикулярному лінії перетину передньої та задньої поверхонь інструмента (різальній кромці). При цьому відбитий від поверхні промінь⁵³ фокусується оптичною системою і реєструється світлочутливою матрицею. Отриманий сигнал обробляється на комп'ютері для визначення радіуса округлення за трьома точками.

До недоліків відноситься те, що для вимірювань малих значень радіусів округлення потрібне використання оптичних систем зі збільшенням понад 100 разів, світлочутливих матриць високої роздільної здатності та лазерного променю значно меншої товщини ніж радіусом округлення інструмента, що дуже сильно підвищує вартість такої установки.

При вимірюванні радіуса за шириною смуги, що світиться, вимірювання проводять на оптичному інструментальному мікроскопі. При розгляді кромки у мікроскопі будемо бачити полосу відбитого світла, ширина якої залежить від радіуса заокруглення. Недоліком є низька точність вимірювання радіуса округлення та неможливість вимірювань радіусів менше 10 мкм.

Метод електронного мікроскопу

Ще одним з способів вимірювання є застосування растрового електронного мікроскопа. При цьому зразок опромінюється сфокусованим промінцем електронів з мінімальним діаметром близько 10 нм, що відповідає роздільній здатності таких мікроскопів.

⁵³Віддзеркалення (англ. *mirror image*) (в плоскому дзеркалі) — це відбита копія зображення об'єкта яка виглядає майже ідентичною, але є оберненою в напрямі перпендикулярному площині дзеркала. Як оптичний ефект, віддзеркалення є результатом відбиття від субстанцій на зразок дзеркала. Віддзеркалення також є поняттям геометрії.

Кожне положення промінця при скануванні відповідає точці на екрані мікроскопа. Яскравість цієї точки залежить від кута нахилу поверхні до напрямку промінця. Тобто на екрані формується топографія поверхні, і подальше оцифровування цього зображення і обробка його дозволяє визначити радіус округлення кромки⁵⁴.

Метод оптичної проекції

Вимірювання оптичними мікроскопами дає не досить велику точність вимірювань і не дає великих можливостей автоматизації цього процесу. Тому найбільшого вжитку на теперішній час отримало устаткування для автоматизованого вимірювання радіуса округлення за методом проекції інтерференційних смуг (компанії GFM та LMI) [21, 22].

Такими представниками є установки:

- MikroCAD light (робоча зона $2,4 \times 1,8 \times 1$ мм (XYZ);
 - роздільна здатність по координаті Z дорівнює 0,2 мкм;
 - роздільна здатність відліку по координатам X, Y дорівнює 1,5 мкм;
- MikroCAD PICO (робоча зона $1.8 \times 1.2 \times 1$ мм (XYZ):
 - роздільна здатність по координаті Z становить 0,2 мкм;
 - роздільна здатність відліку по координатам X, Y становить 2,5 мкм;
 - мінімальний радіус округлення інструмента – 10 мкм.

При вимірюванні зразок, тобто кромка підсвічуються під кутом смугами інтерференційного шаблону, який проеціюється на всю робочу зону.

Зчитування відбувається камерою високої роздільної здатності, з відповідною обробкою даних, яка не перевищує декількох секунд. При цьому розраховуються величини радіусів вздовж кромки зі статистичним аналізом; проводиться візуалізацію 3D даних та оцінка асиметрії кромки (K -фактор) [17].

⁵⁴Електронний мікроскоп (ЕМ) прилад, що дозволяє отримувати зображення об'єктів з максимальним збільшенням до 10^6 разів, завдяки використанню, на відміну від оптичного мікроскопа, замість світлового потоку пучка електронів з енергіями 200 эВ 400 кэВ і більш (наприклад високої роздільної здатності з прискорюючою напругою 1 МВ).

Цінова політика

Стримуючим фактором методу оптичної проекції є його дуже висока ціна. З ціною на два порядки нижче такого роду устаткування може бути реалізоване при контактному методі вимірювання – ошупуванні. Значно нижча вартість вимірювальних датчиків та електроніки при цьому вимагатиме високої точності контролю переміщень датчиків та прецизійних механічних передач, відсутніх у MikroCAD.

Узагальнення

Порівняльний аналіз наведених методів вимірювання параметрів мікрогеометрії різальної кромки дозволяє вказати, що найбільш продуктивні й автоматизовані методи – це оптичні безконтактні методи, проте прилади, які їх реалізують є дуже дорогими, що стримує їхнє широкое застосування.

Також дані методи мають певні обмеження щодо можливостей аналізу мікрогеометрії поверхонь, що дуже блищать.

В той же час методи ошупування забезпечують точність, яка не гірша за оптичні методи, не мають обмежень з точки зору того, що поверхня блищить, але мають суттєві недоліки з точки зору придатності для автоматизації вимірювань і, як наслідок, продуктивності цього процесу. Суттєвим позитивним фактором таких методів є їх невисока вартість.

Отже створення повністю автоматизованого апаратно-програмного комплексу вимірювання параметрів мікрогеометрії різальної кромки методом ошупування є перспективною науково-практичною задачею.

3.2 Математичні основи визначення мікрогеометрії

Використання методу ошупування в одному перерізі дає картину, яка в загальному виді наведена на рис. 3.2а.

Визначати параметри різальної кромки в одному перетині будемо з використанням методів лінійної алгебри [4] у такому порядку.

Етап 1

Визначення рівнянь прямих опису сліду задньої та передньої поверхонь різання. Застосування регресійного аналізу [7] до ділянки від Z_{Pb} до $Z_{Pf} + 0,25(Z_{Pf} - Z_{Pb})$ дозволяє отримати рівняння для сліду задньої поверхні у вигляді

$$z = k_1x + b_1. \quad (3.1)$$

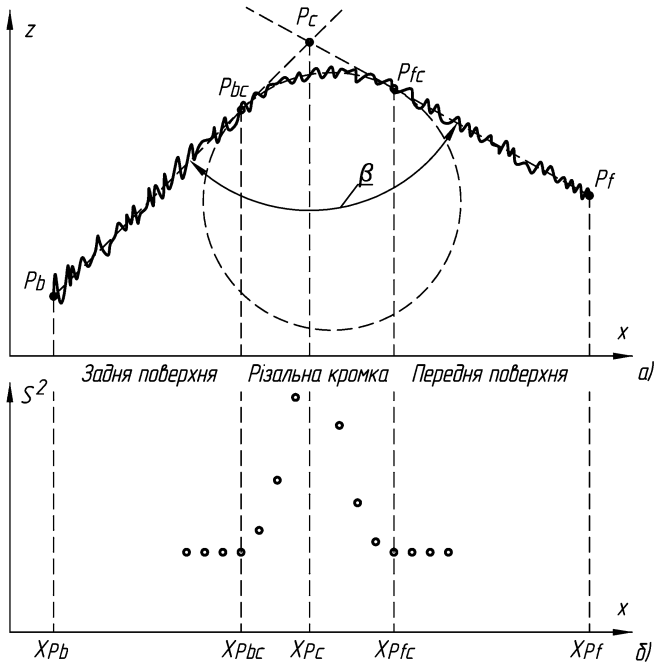


Рис. 3.2. Визначення параметрів мікрогеометрії кромки:

- a* – елементи ділянок різаної кромки;
- б* – графік середнього квадратичного відхилення при визначенні точок дотику;
- P_b – початкова точка масиву даних;
- P_f – кінцева точка масиву даних;
- P_c – уявна точка вершини різальної кромки;
- P_{bc} – точка переходу задньої поверхні в різальну кромку;
- P_{fc} – точка переходу передньої поверхні в різальну кромку;
- β – кут загострення різаної кромки.

Застосування регресійного аналізу до ділянки від $Z_{Pb} + 0,75(Z_{Pf} - Z_{Pb})$ до Z_{Pf} дозволяє отримати рівняння для сліду задньої поверхні у вигляді

$$z = k_2x + b_2. \quad (3.2)$$

Контроль коректності визначення доцільно провести, порівнюючи отримані значення із кутом загострення β , який легко вимірюється традиційними методами [8]. Розрахункове значення $\beta = \arctg(k_1) + \arctg(k_2)$. У випадку, якщо розраховане значення й попередньо виміряне різняться не більше ніж на 5% приймаємо результати як задовільні.

Етап 2

Визначення координат уявної точки вершини різальної кромки. Така точка є точкою перетину двох прямих, описаних рівняннями (3.1) і (3.2). Тому для знаходження координати x запишемо:

$$\begin{aligned} k_1x_{Pc} + b_1 &= k_2x_{Pc} + b_2, \\ (k_1 - k_2)x_{(Pc)} &= b_2 - b_1, \\ x_{(Pc)} &= \frac{b_2 - b_1}{k_1 - k_2}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Підставляємо (3.3) у (3.1) і отримуємо:

$$z_{Pc} = \frac{k_1(b_2 - b_1)}{(k_1 - k_2) + b_1}. \quad (3.4)$$

Етап 3

Визначення координат точок переходу передньої та задньої поверхонь у різальну кромку.

Визначення координат точки P_{bc} переходу задньої поверхні в різальну кромку будемо розпочинати від координати $(x_{Pb} + x_{Pc})/2$. Поступово збільшуючи генеральну сукупність точок, що розглядаються на $(x_{Pc} - x_{Pb})0,05$, будемо визначати середнє квадратичне відхилення s^2 по генеральній та локальній вибіркам.

Збільшення середнього квадратичного відхилення s^2 локальної вибірки над генеральною на 10% і більше (рис.3.2б) явно вказує на перехід від задньої поверхні до різальної кромки.

Визначення координат точки P_{fc} переходу задньої поверхні в різальну кромку будемо розпочинати від координати $(x_{Pf} + x)/2$. Поступово збільшуючи генеральну сукупність точок, що розглядаються на $(x_{Ps} - x_{Pf})0,05$, будемо визначати середнє квадратичне відхилення s^2 по генеральній та локальній вибіркам. Тут так само, збільшення середнього квадратичного відхилення s^2 локальної вибірки над генеральною на 10% і більше (рис. 3.26) явно вказує на перехід від передньої поверхні до різальної кромки.

Етап 4

Визначення форми різальної кромки.

Маючи інформацію про положення точок P_c , P_{bc} , P_{fc} ми можемо визначити відстань між ними, аналіз якої дасть нам можливість визначити форму кривої, яка описує різальну кромку.

Спочатку визначимо відстані між парами точок (P_c, P_{bc}) , (P_c, P_{fc})

$$\begin{aligned} L_{P_c, P_{bc}} &= \sqrt{(x_{P_c} - x_{P_{bc}})^2 + (z_{P_c} - z_{P_{bc}})^2}, \\ L_{P_c, P_{fc}} &= \sqrt{(x_{P_c} - x_{P_{fc}})^2 + (z_{P_c} - z_{P_{fc}})^2}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Тепер, якщо виконується умова

$$\frac{L_{P_c, P_{bc}}}{L_{P_c, P_{fc}}} = 0,95 \dots 1,05. \quad (3.6)$$

приймаємо, що форма різальної кромки достатньо точно описується дугою кола. Якщо ж умова (3.6) не виконується, приймаємо, що різальна кромка описується дугою еліпсу.

Етап 5

Визначення параметрів різальної кромки. Порядок визначення для випадку округлення різальної кромки дугою кола (рис. 3.3) передбачає побудову перпендикулярів до прямої (P_{fc}, P_f) у точці P_{fc} та до прямої (P_{bc}, P_b) у точці P_{bc} та знаходження координат (x_r, z_r) точки перетину цих двох прямих, які і будуть центром дуги, що описуватиме округлення різальної кромки. Цей спосіб знаходження параметру r є дуже наближеним та неможливим для застосування у випадках якщо кут загострення різаної кромки $\beta = 90^\circ$.

Для розрахунку параметрів радіус дуги кола потрібна частина даних, які описують профіль різальної кромки в одному перерізі. Цю задачу можливо вирішити декількома способами.

Спосіб спільного вирішення групи рівнянь.

Криволінійна поверхня [11], отримана розрахунково або шляхом вимірювання (рис. 1.4), може бути представлена масивом точок з координатами $(x_i; z_i) : (i = 0...n)$. Можливо два варіанти визначення параметрів заміни колом:

- почергове вирішення низки груп систем рівнянь, з подальшим усередненням отриманих результатів;
- одночасне вирішення всієї сукупності рівнянь, без подальшого усереднення отриманих результатів.

Слід зазначити, що при досить великій кількості розрахункових точок обидва способи дають однакові результати.

Розглянемо спосіб почергового вирішення ряду груп рівнянь, з подальшим усередненням результатів. Нехай розрахункова крива задана масивом координат $(x_i; z_i) : (i = 0...n)$. У загальному випадку рівняння кола можна записати у вигляді

$$f_1 \equiv (x_i - x_c)^2 + (z_i - z_c)^2 = r^2 \quad (3.7)$$

де x_i, y_i – поточні координати точок, що належать колу;
 x_c, y_c – координати центру замінюючого кола;
 r – радіус замінюючого кола.

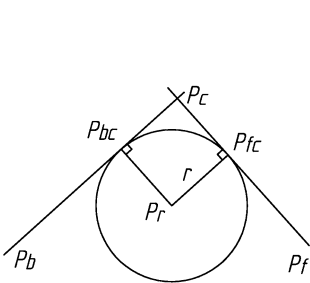


Рис. 3.3. Різальна кромки для випадку дуги кола

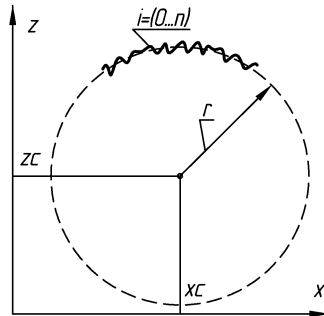


Рис. 3.4. Розрахункова крива

Дане рівняння містить три невідомих параметра x_c, z_c і r , тому

для їх знаходження необхідно вирішити систему з трьох рівнянь:

$$\begin{cases} (x_1 - x_c)^2 + (z_1 - z_c)^2 - r^2 = 0 \\ (x_2 - x_c)^2 + (z_2 - z_c)^2 - r^2 = 0 \\ (x_3 - x_c)^2 + (z_3 - z_c)^2 - r^2 = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Послідовно вирішуючи наведену систему з трьох рівнянь, отримаємо наступні залежності для визначення шуканих параметрів, що входять до неї:

$$\begin{aligned} z_c &= A_c / B_c, \\ x_c &= \frac{x_1^2 - x_2^2 - 2z_c z_1 + z_1^2 + 2z_c z_1 - z_2^2}{2(x_2 - x_1)}, \\ r &= \sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (z_1 - z_c)^2}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

де

$$\begin{aligned} A_c &= -x_2^2 x_3 + x_1^2 (x_3 - x_3) + x_3 (z_1^2 - z_2^2) + \\ &\quad + x_1 (x_2^2 - x_3^2 + z_2^2 - z_3^2) + x_2 (x_3^2 - z_1^2 + z_3^2), \\ B_c &= 2(x_3(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_1)). \end{aligned}$$

Отримані значення параметрів x_c , z_c і r характеризують коло, яке проходить тільки через три обрані точки. Для того щоб отримати параметри замінюючого кола, яке проходить через весь масив $(x_i; z_i) : (i = 0...n)$ точок обраної кривої, можна поступити наступним чином:

- групувати точки по три, знайти параметри x_c , z_c і r замінюючих кіл для кожної трійки обраних точок. При цьому групування вихідних даних, може бути довільним і одночасно з частковим повторенням вихідних точок;
- отримані значення розрахункових параметрів x_c , z_c і r для створених груп точок, усереднити і прийняти за остаточні.

Розглянутий спосіб зручний тим, що не містить складних обчислень, однак їх результат залежить від характеру групування вихідних даних.

Спосіб глобального вирішення системи з трьох рівнянь, одночасно оперує з усіма точками, дозволяє визначити параметри замінюючого

кола безпосередньо по всіх точках кривої. В цьому випадку система рівнянь має наступний вигляд

$$\begin{cases} q_1 = 0 \\ q_2 = 0 \\ q_3 = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

де

$$\begin{aligned} q_1 = & -2 \sum x_i^3 + 6 \sum x_i^2 x_c - 6 \sum x_i x_c^2 + n 2 x_c^3 - 2 \sum z_i^2 x_i + \\ & 2 \sum z_i^2 x_c + 4 z_c \sum x_i z_i - 4 \sum z_i z_c x_c - 2 z_c^2 \sum x_i + \\ & + 2 n z_c^2 x_c + 2 r^2 \sum x_i - 2 n r^2 x_c, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_2 = & -2 \sum x_i^2 z_i + 2 \sum x_i^2 z_c + 4 \sum x_i z_i x_c - 4 \sum x_i x_c z_c - \\ & - 2 x_c^2 \sum z_i + 2 n x_c^2 z_c - 2 \sum z_c^3 + 6 \sum z_i z_c^2 + \\ & + 2 n z_c^3 + 2 r^2 \sum z_i - 2 n r^2 z_i, \end{aligned}$$

$$q_3 = \sum x_i^2 - 2 \sum x_i x_c + n x_c^2 + \sum z_i^2 - 2 \sum z_i z_c + n z_c^2 - n r^2.$$

Отримані параметри x_c , z_c і r відповідають замінюючому колу, яке проходить через весь масив обраних точок з найменшою похибкою.

Спосіб найменших квадратів

Теоретичні основи заміни кривої частиною дуги, відомі як “спосіб найменших квадратів” були розроблені Гауссом ще в 1794 році, і згодом багаторазово адаптувалися для конкретних прикладних задач. В основному це стосувалося форми представлення вихідних даних.

Для того щоб визначити параметри x_c , z_c і r , що замінюють коло в явному вигляді, можна використовувати метод найменших квадратів [18] для всіх точок вихідної кривої одночасно. Запишемо рівняння кола у вигляді

$$(x_i - x_c)^2 + (z_i - z_c)^2 = r^2. \quad (3.11)$$

Тоді шукана функція способу найменших квадратів набуде загального вигляду:

$$f_2 \equiv ((\sum x_i - x_c)^2 + (\sum z_i - z_c)^2 - r^2)^2. \quad (3.12)$$

Виконавши диференціювання рівняння (3.12) по параметру r , і приврівнявши його нуля, отримуємо рівняння

$$\begin{aligned} \frac{df_2}{dr} = nr^2 - r \sum x_i^2 + 2rx_c \sum x_i - nrx_c^2 - \\ - r \sum z_i^2 + 2rz_c \sum z_i - nz_c^2 = 0. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Вирішивши це рівняння щодо параметра r , отримуємо вираз для визначення радіуса замінюючого кола

$$r = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{nx_c^2 + nz_c^2 - 2x_c \sum x_i + \sum x_i^2 - 2z_c \sum z_i + \sum z_i^2}. \quad (3.14)$$

Далі, виконуємо диференціювання рівняння (3.12) по параметру x_c і отримуємо вираз:

$$\begin{aligned} \frac{df_2}{dx_c} = \frac{4}{n} (\sum x_i) (\sum x_i^2 - 2z_c \sum z_i + \sum z_i^2) - \frac{8}{n} x_c (\sum x_i)^2 + \\ + (2x_c \sum x_i^2 - \sum x_i^3 + 2z_c \sum x_i z_i - \sum x_i z_i^2) = 0. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Звідки визначаємо координату z_c центру замінюючого кола

$$z_c = \frac{Z_1 + Z_2}{Z} \quad (3.16)$$

де

$$\begin{aligned} Z_1 &= 2x_c (\sum x_i)^2 - \sum x_i (\sum x_i^2 + \sum z_i^2); \\ Z_2 &= n (-2x_c \sum x_i^2 + \sum x_i^3 + \sum z_i^2 x_i); \\ Z &= -2 \sum x_i \sum z_i + 2n \sum z_i x_i. \end{aligned}$$

Далі, виконуємо диференціювання рівняння (3.12) по параметру z_c і отримуємо вираз

$$\frac{df_2}{dz_c} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{\sum x_i \sum z_i - n \sum x_i z_i} = 0 \quad (3.17)$$

де

$$C_1 = \sum x_i^3 (\sum x_i)^2 + n \sum x_i^2 z_i \sum x_i z_i - 2n x_c (\sum x_i z_i)^2 - \\ - 2x_c (\sum x_i)^2 \sum z_i^2 - n \sum x_i^3 \sum z_i^2 - \sum z_i \sum x_i z_i \sum z_i^2;$$

$$C_2 = \sum x_i^2 (2x_c (\sum z_i)^2 + \sum z_i \sum z_i x_i - 2n x_c \sum z_i^2) + \\ + (\sum z_i^2)^2 \sum z_i^2 x_i - n \sum z_i^2 \sum z_i^2 x_i;$$

$$C_3 = \sum x_i (-\sum x_i^2 z_i \sum z_i + \sum z_i^2 (\sum z_i^2 + \sum x_i^2)) + \\ + \sum x_i (\sum z_i (4x_c \sum x_i z_i - \sum z_i^3)) + n \sum x_i z_i \sum z_i^3.$$

З отриманого рівняння визначаємо координату x_c центру замінюючого кола

$$x_c = \frac{a_1 + a_2}{a_3} \quad (3.18)$$

де

$$a_1 = n \sum z_i x_i^2 \sum z_i x_i - \sum x_i^2 \sum z_i \sum z_i x_i - \sum z_i \sum z_i x_i \sum z_i^2 + \\ + \sum x_i^3 ((\sum z_i)^2 - n \sum z_i^2) + (\sum z_i)^2 \sum z_i x_i^2;$$

$$a_2 = \sum x_i (-\sum z_i x_i^2 \sum z_i + \sum x_i^2 \sum z_i^2 + (\sum z_i^2)^2 - \\ - \sum z_i \sum z_i^3) - n \sum z_i^2 \sum x_i z_i^2 + n \sum z_i x_i \sum z_i^3;$$

$$a_3 = -4 \sum x_i \sum z_i \sum x_i z_i + 2n (\sum x_i z_i)^2 + \\ + 2 (\sum x_i z_i)^2 \sum z_i^2 + 2 \sum x_i^2 ((\sum z_i)^2 - n \sum z_i^2).$$

Отримані рівняння дозволяють безпосередньо визначити значення параметрів x_c , z_c і r замінюючого кола, яке “найкращим чином” проходить через масив точок x_i , z_i ($i = 1 \dots n$). При цьому положення центра замінюючого кола завжди розташоване з увігнутої сторони кривої, яка замінюється дугою кола.

Отримані математичні залежності дозволяють визначати параметри кола, яке замінює криволінійну частину мікрогеометрії різальної кромки. Форма їх подання адаптована для інженерних пакетів та програмування і може бути реалізована на будь-який ЕОМ.

Порядок визначення для випадку округлення різальної кромки дугою еліпсу (рис. 3.5) передбачає побудову перпендикулярів до прямої (P_{fc}, P_f) в точці P_{fc} та до прямої (P_{bc}, P_b) в точці P_{bc} та знаходження координат точки (x_e, z_e) перетину цих двох прямих, які і будуть центром еліпсу, що описуватиме округлення різальної кромки.

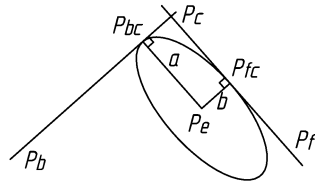


Рис. 3.5. Різальної кромки для випадку дуги еліпсу

Наступним кроком стане визначення параметрів еліпсу – довжин його піввісей, які для випадку, коли одна з піввісей колінеарна до однієї з площин, а кут загострення β близький до 90° , можна визначити так:

$$\begin{cases} a = \sqrt{(x_{pe} - x_{pbc})^2 + (z_{pe} - z_{pbc})^2} \\ b = \sqrt{(x_{pe} - x_{pfc})^2 + (z_{pe} - z_{pfc})^2} \end{cases} \quad (3.19)$$

Етап 6

Визначення K -фактору на базі параметрів різальної кромки.

Для випадку, коли форма різальної кромки описується дугою кола, K -фактор дорівнюватиме 1. Для випадку, коли форма різальної кромки описується дугою еліпсу, K -фактор визначається за формулою

$$K = \frac{a}{b} \quad (3.20)$$

де a – піввісь еліпсу, спрямована вздовж передньої поверхні різального клину;

b – піввісь еліпсу, спрямована вздовж задньої поверхні різального клину.

Таким чином, представлені математичні залежності дозволяють перейти від масиву стохастичних даних, які описують профіль різальної кромки в одному з перетинів до її макрогеометричних (кут загострення) та мікрогеометричних (форма, радіус дуги кола або параметри дуги еліпсу) різальної кромки і можуть бути покладені в основу програмного забезпечення автоматизованого проектування параметрів різальної кромки.

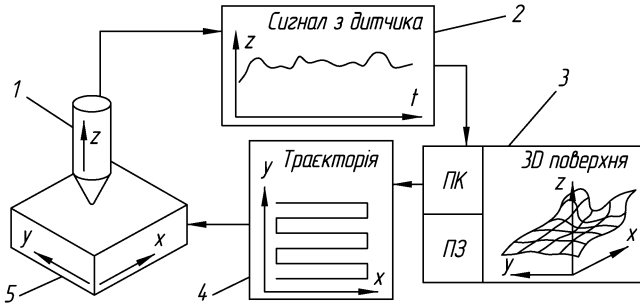


Рис. 3.6. Функціональна схема комплексу

3.3 Комплекс вимірювання мікрогеометрії

В цій частині описано оригінальний апаратний комплекс для автоматизованого вимірювання мікрогеометрії поверхонь деталей та побудови їх тривимірних поверхневих моделей для подальшого контролю чи реінжинірингу. Специфічними вимогами до комплексу стали відносно невелика зона вимірюваної поверхні та підвищені вимоги щодо точності вимірювань.

Оскільки наша задача відрізняється лише кількістю ступенів свободи вимірювання, доцільним буде розробити прилад який обводитиме своїм чутливим щупом поверхню не лише в одному перерізі, а по певній пласкій траєкторії. За прототип було вибрано модуль для вимірювання фасонних профілів [5], який розроблений та відмінно працює на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування.

3.3.1 Функціональна схема

Функціональна схема комплексу представлена на рис. 3.6. Ощупування поверхні деталі здійснюється індуктивним датчиком лінійних переміщень 1 у вертикальному напрямку. Інформація з датчика 2 обробляється і передається на комп'ютер 3 в оцифрованому вигляді. Переміщення деталі в горизонтальному напрямку забезпечується предметним столиком 5 з кроковими двигунами. Траєкторія ощупування 4 задається з комп'ютера програмно і перетворюється в керуючі сигнали для крокових двигунів.

Поширеність USB-інтерфейсу зробила його наявність у системі фактично обов'язковою. З іншого боку комплекс повинен сприймати аналогові сигнали з датчика, оцифровувати їх з достатньою точні-

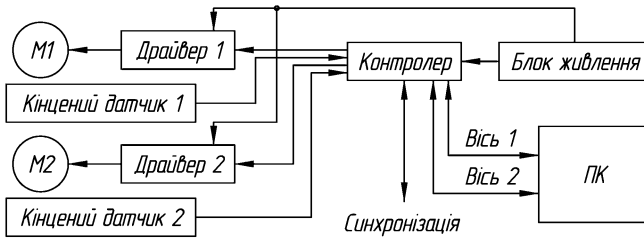


Рис. 3.7. Принципова схема керування двигунами

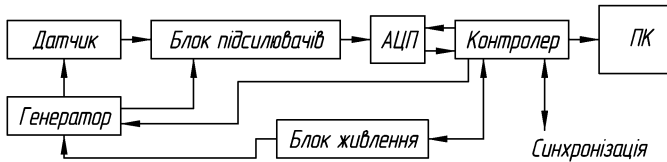


Рис. 3.8. Принципова схема отримання сигналу з датчика

стю, керувати кроковими двигунами відповідно до траєкторії, заданої з комп'ютера. Таку задачу добре виконає сучасний мікроконтролер STM32F051 [14], який має всю необхідну периферію, аби підключити датчик і блок керування двигунами до комп'ютера через USB-інтерфейс. Написання додатку контролера здійснено в середовищі IAR Embedded Workbench (IAR C/C++ Development Guide Compiling and Linking for ARM) [19], а прошивка записана через програматор ST-LINK/V2 [25].

Для реалізації функціональної схеми було розроблено дві принципові схеми: керування двигунами (рис.3.7) та схема отримання сигналу з датчика (рис.3.8).

Контролер (рис.3.7) отримує дані про траєкторію з ПК, опрацьовує їх і подає керуючі сигнали на драйвери, що керують струмом в обмотках двигунів, та приєднані до блоку живлення. Весь процес синхронізовано, а звіт про відпрацювання кроків відправляється назад у ПК. Той самий контролер зображено і на рис.3.8, де він задає синусоїдальний сигнал для генератора, який живить датчик. Вихідний сигнал з датчика підсилюється та перетворюється в блоці підсилювачів, у синхронізації з керуванням оцифровується за допомогою АЦП, опрацьовується контролером і відправляється на ПК.

3.3.2 Конструктивна реалізація

Оскільки сканована поверхня повинна переміщатись у горизонтальній площині під чутливим щупом, а розміри площини обмежені кількома міліметрами потрібно обрати відповідний пристрій. Цим вимогам відповідає предметний столик мікроскопа (рис. 3.9), який переміщуватиметься в площині мікрометричними гвинтами, діапазон переміщення 12,5 мм. Для реалізації була допрацьована конструкція кріплення двигунів M1 та M2 і кінцевих вимикачів.

Для забезпечення синхронності вимірювань до мікрометричних гвинтів приєднуємо крокові двигуни. Дискретність переміщення в площині предметного столика визначається дискретністю кроку двигуна та величиною переміщення за оберт мікрометричного гвинта. За один оберт гвинта столик переміщується на 500 мкм. Обрані нами крокові двигуни (мод. СДХ 1.8/2) [3] мають 200 кроків на оберт, тобто за один крок двигуна отримаємо переміщення сканованої деталі на 2,5 мкм.

Окрім повнокрокового режиму, такі двигуни можуть обертатись і в режимі ділення кроків. Цей режим має обмежені можливості розділення кроків на менші, але до певних меж його можна використовувати. Наприклад при діленні повного кроку на 5 отримаємо дискретність переміщення столика в 0.5 мкм.

В наш час крокові двигуни є досить розповсюдженими, у тому числі вони використовуються в 3D принтерах, які набувають все більшої популярності. Для високої точності двигун повинен мати малу дискретність кроку і максимально лінійні характеристики положення ротора, проте такі двигуни є дорогими.

Більш дешевим рішенням є використання крокового двигуна з більшою дискретністю кроків при цьому використовуючи мікрокроковий режим. Цей режим дозволяє зменшити дискретність кроку, але точність позиціонування тоді також зменшується. Дана проблема вирішується методом корегування токів фаз. Саме цей метод ми розглянемо на конкретному прикладі.

Двигуни в пристрої підключені за уніполярною схемою, що відрізняється більшою простотою в порівнянні з біполярною. При цьому

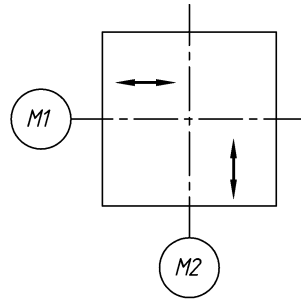


Рис. 3.9. Схема предметного столика з двигунами

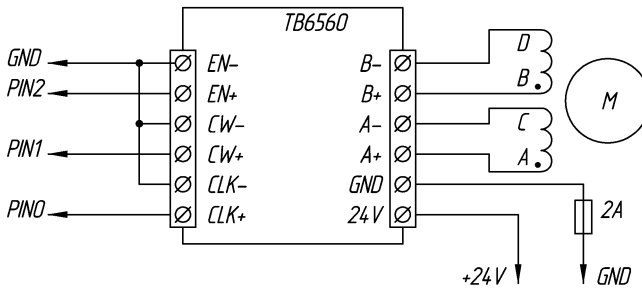


Рис. 3.10. Схема біполярного включення двигуна

втрачається крутний момент крокового двигуна, проте це допустимо за даних умов.

Для сканування мікрогеометрії різальних кромek важливо досягти якомога меншої дискретності кроків між вимірами, оскільки радіус округлення кромки може сягати всього кількох мікрометрів. Окрім величини, важливою є і точність переміщень. З метою забезпечення максимальної точності переміщень було проведено ряд експериментів з обраними двигунами.

В якості драйвера для біполярної схеми було використано готовий модуль на основі мікросхеми tb6560 (рис. 3.10) [12]. Для уніполярної схеми було розроблено схему на польових транзисторах з керуванням через мікроконтролер серії STM32 з функцією широтно-імпульсної модуляції.

Така схема дозволила налаштувати кожен мікро-крок окремо та досягти якомога вищої точності переміщень. Варто зазначити, що швидкість руху також має вплив на плавність переміщень. У випадку роботи з кроковими двигунами варто уникати резонансних швидкостей. Схема підключення двигуна до керуючого контролера (STM32F303) зображена на рисунку 3.11.

Експеримент проводився на уніполярному кроковому двигуні моделі ПБМГ-200-265. Він має наступні характеристики:

- дискретність 200 кроків на оберт;
- робоча напруга 12 В;
- струм 0,17 А.

Для побудови графіків положення ротора та аналізу плавності і точності ходу предметного столика використовувалась конструкція, схема якої зображена на рис. 3.12.

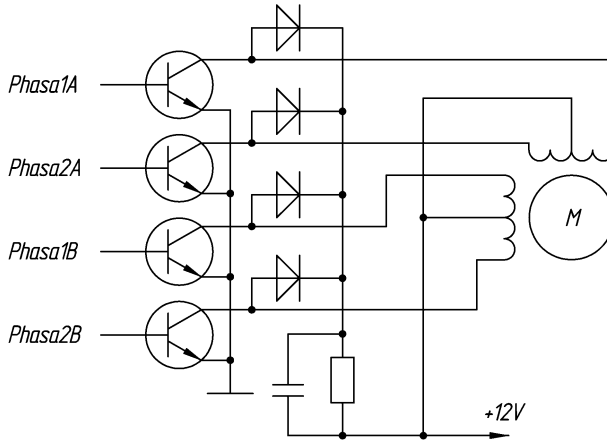


Рис. 3.11. Підключення двигуна до контролера

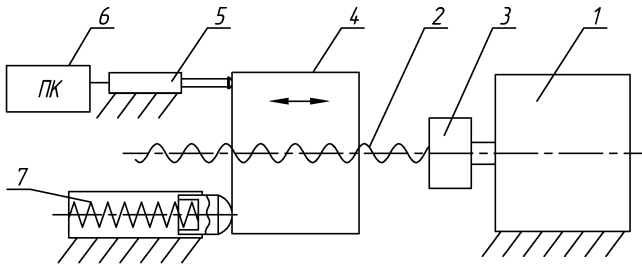


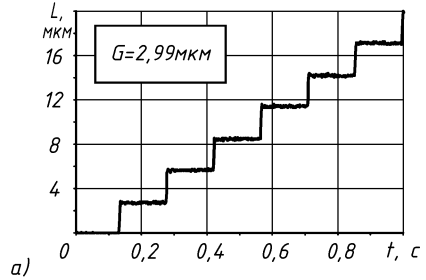
Рис. 3.12. Схема дослідження плавності ходу

Двигун 1 обертає вал 2 через муфту 3. Обертальний рух перетворюється в поступальний рух предметного столика 4 по направляючим і реєструється датчиком 5. Датчик приєднано до комп'ютера 6, де зберігаються характер залежності переміщення від часу. Для зменшення впливу зазору у гвинтовому з'єднанні на вісь переміщення встановлюється додаткова пружина 7.

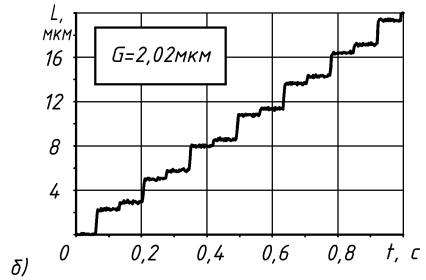
Під час проведення дослідження було зроблено серію вимірювань плавності ходу осі предметного столика з різними налаштуваннями кроку.

На графіку (рис. 3.13а) зображено залежність переміщення з використанням повно-крокового режиму (струм по чергово подається на кожну з обмоток).

Фаза	Співвідношення струмів для кроків, %			
	1	2	3	4
Phase1A	100			
Phase2A		100		
Phase1B			100	
Phase2B				100



Фаза	Співвідношення струмів для мікро-кроків, %							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase1A	100	100						100
Phase2A		100	100	100				
Phase1B				100	100	100		
Phase2B						100	100	100



Фаза	Співвідношення струмів для мікро-кроків, %							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase1A	100	70,7						70,7
Phase2A		70,7	100	70,7				
Phase1B				70,7	100	70,7		
Phase2B						70,7	100	70,7

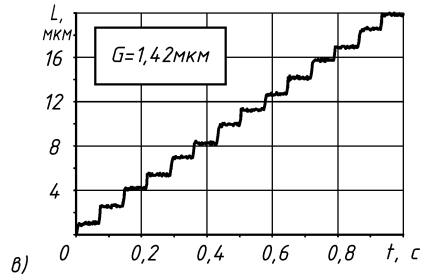


Рис. 3.13. Рух у кроковому та мікро-кроковому режимах

Як видно, графік значно відрізняється від прямої лінії. Вирахуємо максимальне відхилення від лінії як суму максимального відхилення над і під прямою. Цей параметр становить $G = 2,99$ мкм.

Для зменшення дискретності без використання корегованого струму також використовують півкроковий режим. Від повнокрокового режиму він відрізняється проміжними положеннями, для яких струм подається одночасно на дві сусідні обмотки як показано в таблиці.

З графіка (рис. 3.13б) видно, що кроки не діляться рівно навпіл. Відхилення становить $G = 2,02$ мкм. Це можна пояснити тим, що сума квадратів струмів на двох обмотках не дорівнює квадрату струму однієї обмотки.

Скористаємося методом корегування токів фаз і змінимо значення струму в обмотках на півкроках.

Для задання значення струму скористаємося широтно-імпульсною модуляцією з частотою значно більшою за частоту зміни кроків. Отримаємо наступну послідовність токів (рис. 3.13в). Для цього випадку струм рівний 70,7%, саме з таким відношенням в обмотках буде зберігатися сума квадратів струмів.

Як бачимо півкроки стали рівними, графік дещо наблизився до прямої лінії. Відхилення становить $G = 1,42$ мкм. Отже метод корегування струмів обмоток у півкроковому режимі дозволив збільшити плавність положення предметного столика на 30%.

Для зменшення дискретності поділимо кроки ще у два рази, використовуючи кореговані токи. Обрані практично струми залишимо попередніми, додамо проміжні значення і будемо їх корегувати. Результати залежності відношення струмів та графіки переміщення можна побачити на рис. 3.15.

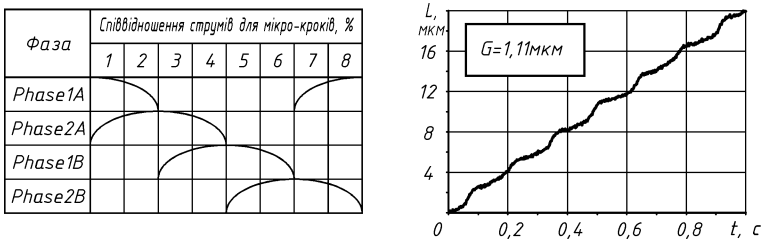
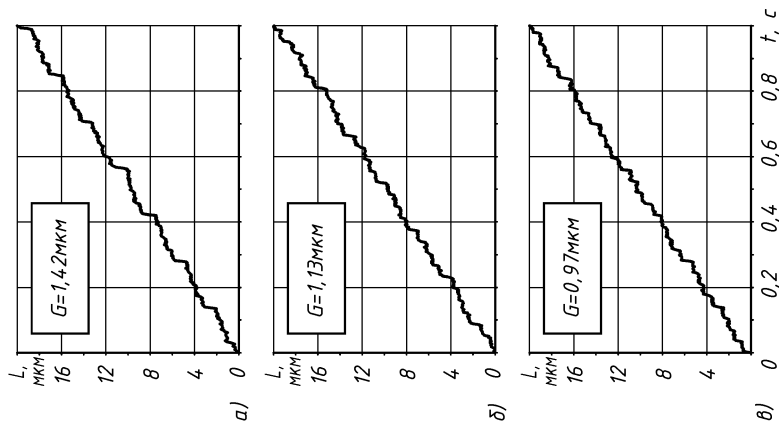


Рис. 3.14. Рух у режимі синусів та косинусів

Даним методом вдалось досягти мінімального відхилення від лінійної залежності у $G = 0,97$ мкм, співвідношення значення струмів для кроків 2 та 4 можливо корегувати і надалі.



Фаза	Співвідношення струмів для мікро-кроків, %															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Phase1A	100	75	70,7	30										30	70,7	75
Phase2A		30	70,7	75	100	75	70,7	30								
Phase1B						30	70,7	75	100	75	70,7	30				
Phase2B									30	70,7	75	100	75	70,7	30	

Фаза	Співвідношення струмів для мікро-кроків, %															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Phase1A	100	80	70,7	40										40	70,7	80
Phase2A		40	70,7	80	100	80	70,7	40								
Phase1B						40	70,7	80	100	80	70,7	40				
Phase2B									40	70,7	80	100	80	70,7	40	

Фаза	Співвідношення струмів для мікро-кроків, %															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Phase1A	100	90	70,7	35										35	70,7	90
Phase2A		35	70,7	90	100	90	70,7	35								
Phase1B						35	70,7	90	100	90	70,7	35				
Phase2B									35	70,7	90	100	90	70,7	35	

Рис. 3.15. Корегування току в обмотках

Ділення кроків можна продовжувати і далі, підбираючи значення токів для кожного мікрокроку. Початкове значення струмів слід обирати за законом синусів та косинусів у відповідних фазах, оскільки сума квадратів струмів в обмотках повинна бути рівна. Робити це зручно використовуючи обладнання подібне до того, яке було використано в даному дослідженні.

Далі зображено результати досліду, в якому струм змінюється за законом синусів та косинусів у відповідних фазах для повно крокового режиму без корегування співвідношення струмів (рис. 3.14).

Як видно, без корегування струмів фаз, графік положення відрізняється від прямої. Відхилення від прямої $G = 1,1$ мкм, що більше ніж при діленні кроку на 4 з корегуванням токів. Відхилення від лінії пояснюється не ідеальністю деталей двигуна, а саме неоднорідністю повітряного проміжку між частинами ротора і статора та наявністю магнітного гістерезису (надлишкової намагніченості). Тому корегування токів потрібно проводити для кожного двигуна окремо.

Отже для високої точності та лінійності характеристик крокового двигуна він не обов'язково повинен мати малу дискретність кроку і відповідно дорого коштувати. Можна використати недорогий двигун та оптимізувати залежність положення ротора за допомогою мікроконтролерів та корегування струмів фаз.

Для відстеження положення ротора зручно використовувати вал, який перетворює обертовий рух у поступальний. Поступальний рух легко записати і побудувати залежність від часу за допомогою датчика лінійного руху.

Струми для кожного кроку можна визначити за законом синусів та косинусів і потім корегувати його відношення практично, відстежуючи зміни на графіку положення. Для задання значення струму можна використовувати широтно-імпульсну модуляцію і транзисторні ключі відповідної потужності.

Таким чином можна значно зменшити ціну приладу, який використовує крокові двигуни. В результаті дослідження ми досягли збільшення лінійності характеристик крокового уніполярного двигуна в тричі у порівнянні з повно кроковим режимом використовуючи ділення кроку на 4 та корегування токів фаз.

Для отримання даних по осі z , яка є перпендикулярною площині сканування використовується індуктивний датчик лінійних переміщень. В передній частині латунного корпусу 1 датчика (рис. 3.16) розташований вимірювальний механізм, що являє собою диференціальний лінійний перетворювач, виконаний на Ш-подібному ферито-

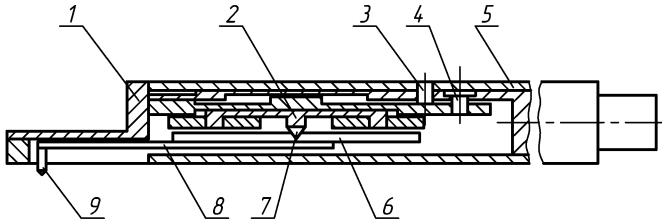


Рис. 3.16. Датчик переміщень для сканування поверхні

вому сердечнику 2. Якір 6 з прикріпленим до нього щупом 8 посаджений на ножову опору 7. На кінці щупу 8 розташована алмазна голка 9. Положення голки 9 відносно корпусу 1 регулюється гвинтами 3 та 4. Механізм закритий кожухом 5.

В конструкції алмазної голки (рис. 3.16)

є ряд недоліків, які несуттєво впливають на вимірювання криволінійних поверхонь. Тож, на вимірювані поверхні накладається ряд обмежень пов'язаних з конструкцією: максимальна висота миттєвого перепаду висот; кут нахилу профілю поверхні. Максимальна висота миттєвого перепаду висот замінюється при скануванні поступовим рухом твірної алмазної голки по найвищій точці перепаду (рис. 3.17а) та спотворює поверхню. По цій же причині і кут нахилу не може бути менший ніж половина кута загострення алмазної голки (рис. 3.17б). При скануванні різальних кромки на сканері важливо щоб дві криволінійні поверхні: вимірювана поверхня з одного боку, та сферична поверхня алмазної голки з другого боку контактували по точках саме цих поверхонь. Це можливо в зоні I, як показано на рис. 3.17в.

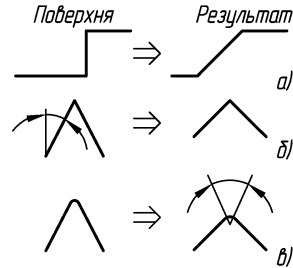


Рис. 3.17. Недоліки алмазної голки

Датчик перетворює лінійні коливання голки, що відповідають нерівностям поверхні, в електричні сигнали. Точність вимірів індуктивного датчика переміщень залежить від точності приладів, до яких він підключається, а саме генератора синусоїдальних сигналів та аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Сигнал отриманий з датчика поступає на блок підсилювачів, в якому формується сигнал для подальшого оцифровування.

3.3.3 Електронні компоненти

Розроблений прилад має призначення керувати кроковими двигунами для осягання поверхні по заданій траєкторії та отримувати у відповідних горизонтальних координатах значення вертикальної координати методом оцифрування сигналу з датчика лінійних переміщень. Таким чином елементну базу приладу можна розбити на дві групи: керування кроковими двигунами та отримання сигналу індуктивного датчика.

Елементна база керування кроковими двигунами

Частина керування схематично зображена на рис. 3.7, вона призначена для роботи з кроковими двигунами та містить у собі крокові двигуни М1, М2 для переміщення предметного столика в площині, драйвери для керування двигунами, два кінцевих датчики для базування предметного столика в початок координат, контролер для зв'язки ПК з виконавчою периферією та блок живлення для забезпечення приладу необхідною напругою.

В даному приладі використовуються уніполярні крокові двигуни марки СДХ 1.8/2, що обумовлює конструкцію драйверів. Драйвер кожного двигуна складається з транзисторних ключів, які отримують керуючі сигнали з контролера і на вихідному каскаді мають 4 силових транзистори FQPF10N60C з максимальною робочою напругою 600 В та струмом 9,5 А. Блок живлення забезпечує двигуни струмом до 8,5 А з напругою 12 В.

Така конструкція дозволяє підключати уніполярні крокові двигуни струмом до 4 А з робочою напругою 12 В та забезпечує можливість програмного ділення кроків двигуна, тобто мікрокроковий режим. Цей режим здійснюється апаратними засобами контролера, а саме широто-імпульсним модулятором (ШИМ) працюючим на частоті 40 кГц. Кінцеві датчики являють собою мікроримикачі призначені для базування і під'єднані до контролера. При спрацьовуванні датчика сигнал поступає на мікроконтролер і опрацьовується. Команди для двигунів отримуються з ПК, опрацьовуються і передаються на виконавчу периферію. Весь процес відпрацювання команд є синхронізованим програмно.

Елементна база отримання сигналу від індуктивного датчика

Частина сигналу від індуктивного датчика (рис. 3.8) призначена для отримання та оцифрування з індуктивного датчика лінійних переміщень, що відповідає нерівностям сканованої поверхні. Індуктивний датчик перетворює механічний рух в електричний сигнал, його живлення забезпечує генератор синусоїдальних біполярних коливань з частотою 10 кГц та напругою $\pm 1,7$ В, який живиться біполярною напругою від блока живлення (рис. 3.18). Для спрощення схеми генератора, зразковий однополярний синусоїдальний сигнал отримується за допомогою 12-бітного цифрово-аналогового перетворювачем (ЦАП), що входить до складу контролера, а в блоці генератор корегується його амплітуда та полярність.

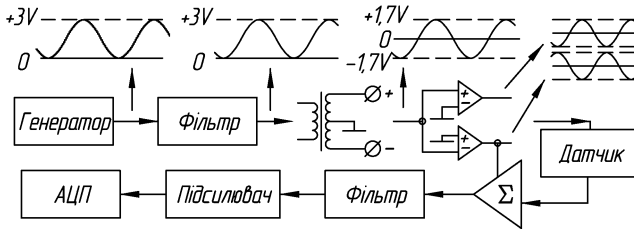


Рис. 3.18. Блок підсилювачів

Особливістю аналогових сигналів, які формуються в цифрово-аналогових перетворювачах є їх дискретність, яка в даному випадку буде виступати як шум. Згладити синусоїдальний сигнал, створений таким методом можливо за допомогою фільтру низьких частот [13]. Такий фільтр (рис. 3.19) складається з резистора R та конденсатора C , і має просту формулу для розрахунку частоти зрізу (рис. 3.20).

$$f = \frac{160\,000}{RC} \quad (3.21)$$

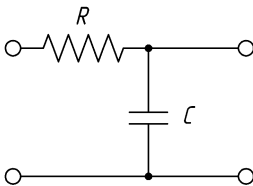


Рис. 3.19. Схема RC фільтру

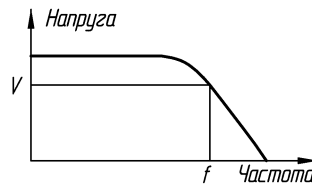


Рис. 3.20. Графік амплітуди

Відфільтрований сигнал все ще однополярний, а для живлення індуктивного датчика переміщень потрібен двохполярний сигнал. Таке перетворення можна зробити за допомогою трансформатора з однією входною котушкою, та двома вихідними. На цьому етапі сигнал живлення датчика готовий лише на половину, оскільки потрібен ще один протифазний сигнал. Для цього можна пропустити той самий сигнал через інвертуючу (рис. 3.21) та неінвертуючу (рис. 3.22) схеми операційних підсилювачів [6].

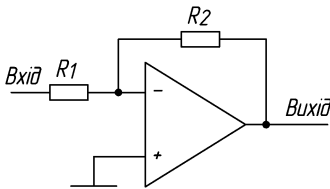


Рис. 3.21. Схема інвертуючого операційного підсилювача

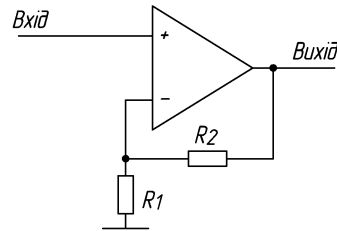


Рис. 3.22. Схема неінвертуючого операційного підсилювача

Для визначення величини вихідного сигналу використовуємо формули для розрахунку коефіцієнта підсилення, який визначається за відношенням резисторів R_1 та R_2 . Формула для визначення коефіцієнта підсилення у випадку підключення операційного підсилювача за схемою інвертуючого підсилювача має вигляд:

$$V_{\text{вих}} = \frac{-V_{\text{вх}} R_2}{R_1}. \quad (3.22)$$

У випадку підключення операційного підсилювача за схемою неінвертуючого підсилювача маємо:

$$V_{\text{вих}} = V_{\text{вх}} (1 + R_2/R_1) \quad (3.23)$$

Особливістю роботи індуктивних датчиків є те, що вихідний сигнал може приймати будь-яке значення між двома протифазними сигналами живлення в залежності від положення чутливого елемента. Такий сигнал є біполярним та змінного струму, а для зчитування сигналу за допомогою АЦП мікроконтролера необхідно мати уніполярний сигнал, при чому постійного струму. Для того, щоб зробити сигнал уніполярним, додамо його з одним із входних сигналів, що використовуються для живлення датчика. Використаємо

для цього операційний підсилювач зі схемою сумарного підключення (рис. 3.23).

Формула для визначення коефіцієнта підсилення у випадку підключення операційного підсилювача за схемою суматора має вигляд

$$V_{\text{вих}} = -1 \left(\frac{V_1 R_3}{R_1} + \frac{V_2 R_3}{R_2} \right). \quad (3.24)$$

Для перетворення сигналу зі змінного струму в постійний, пропустимо його через ще один фільтр низьких частот. Такий сигнал можна зчитати за допомогою застосованого в схемі АЦП, але максимальна чутливість до корисного сигналу буде тоді, коли всі можливі значення будуть у межах від 0 до 3 вольт, що є граничними межами вимірювання для даного АЦП. Промасштабувати сигнал можна з допомогою операційного підсилювача увімкненого за схемою неінвертуючого підсилювача.

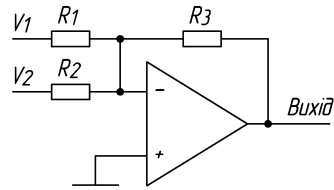


Рис. 3.23. Схема суматора на операційному підсилювачі

За стандартною схемою включення, отриманий сигнал з датчика додається з сигналом генератора, підсилюється та перетворюється на аналоговий сигнал у блоці підсилювачів. Кінцевий аналоговий сигнал являє собою рівень напруги в межах від 0 до 3 В, що відповідає положенню голки індуктивного датчика. З блоку підсилювачів сигнал поступає на 12 бітний АЦП, що входить до складу контролера, де він оцифровується до цілого числа в межах від 0 до 4095 включно, де 0 та 4095 відповідає крайнім положенням голки. Цифрове значення сигналу з датчика зберігається в пам'яті контролера на період одного виміру, після чого передається в ПК для накладання на траєкторію і відтворення поверхні. Синхронізація зчитувань сигналу відбувається програмно в контролері і відбувається в певний момент між кроками двигунів, що є найоптимальнішим для зняття даних.

В даному приладі використано сучасний високопродуктивний контролер STM32F051 на базі 32 бітного ядра Cortex M0 з тактовою частотою 48 МГц. Даний контролер має у своєму складі ЦАП і АЦП, які необхідні для роботи з датчиком лінійних переміщень і забезпечують дискретність зчитування сигналу в 4096 значень; велику кількість апаратних ШІМ для керування кроковими двигунами

в режимі ділення кроків; підтримку інтерфейсу RS232, який через перетворювач забезпечує двостороннє USB з'єднання з ПК достатньої швидкості; наявність входів для підключення датчиків кінцевого положення, що необхідні при базуванні. Контролер забезпечується напругою 3,3 В з блоку живлення.

Технічні характеристики

Загальний вигляд робочої зони апаратного комплексу наведено на рис. 3.24. Його основні технічні характеристики такі:

Параметр	Значення
розмір ощупуваної поверхні, мм	12 × 12
хід датчика по висоті, мм	1,5
дискретність вздовж траєкторії, мкм	1,25
дискретність між проходами, мм	> 0,0025

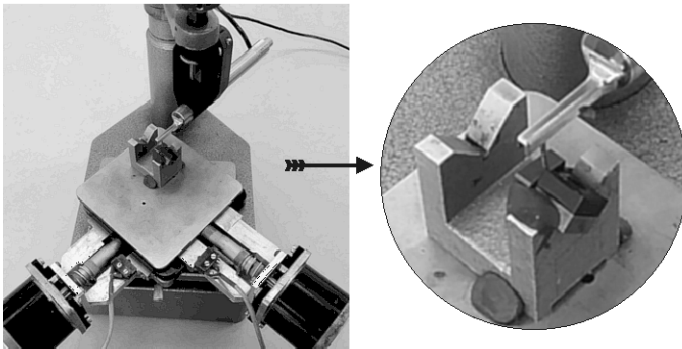


Рис. 3.24. Робоча зона апаратного комплексу

3.4 Програмне забезпечення комплексу

Задачею програмного забезпечення (ПЗ) є автоматизація процесу ощупування поверхонь, отримання та обробки даних, визначення радіуса округлення різальних кромek та визначення К-фактору, створення зручного користувацького інтерфейсу з 3D візуалізацією поверхні та виведенням результатів ощупування у файли, що можуть бути відкриті іншими програмними продуктами, такими, як

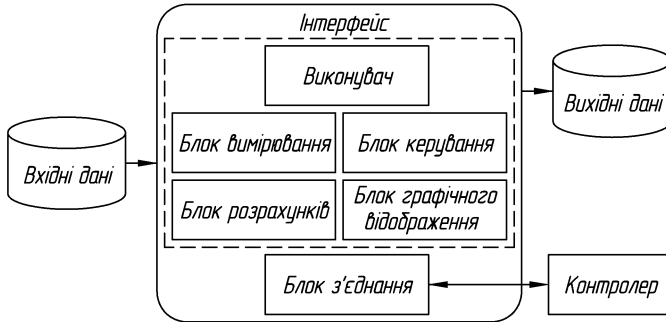


Рис. 3.25. Структурна схема Windows-додатку

Microsoft Excel, MathCAD, Surfer 3D та ін., автоматизоване створення траєкторії ошупування та можливість задання траєкторії через зовнішні .spc файли. Програмне забезпечення має назву – MicroEdge, є спеціальним і складається з Windows-додатку та додатку контролера, таким чином його структуру можна розбити на дві взаємодіючі групи: перша виконується на ПК, друга на контролері.

Структура додатку для ПК

Основна частина алгоритму виконується на ПК (рис.3.25), тут формуються команди для приладу і відбувається більша частина обробки даних з приладу.

Вхідні дані

Файл .spc з G-кодом, що задає траєкторію ошупування.

Вихідні дані

Файли .txt, що залежно від обраної команди можуть містити в собі точки ошупаної поверхні для опрацювання в інших програмах, або звіт з вже обрахованими параметрами.

Блок вимірювань

Елемент додатку, призначений для проведення ошупування поверхні, призначення його параметрів та траєкторії.

Блок керування

Призначений для керування координатним столиком, його позиціонування та базування.

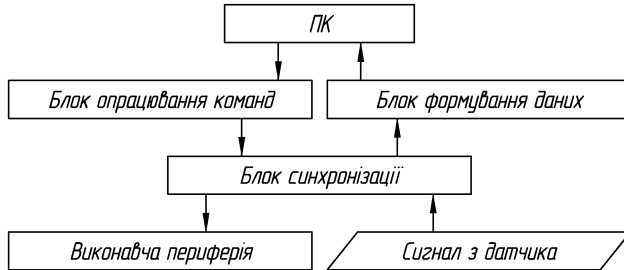


Рис. 3.26. Структурна схема додатку для контролера

Блок графічного відображення

Забезпечує графічну побудову траєкторії в 2D та ошупаної поверхні в 3D форматі.

Блок розрахунків

Необхідний для проведення розрахунку параметрів ошупаної поверхні.

Блок з'єднання

Призначений для комунікації з контролером, формування даних для відправки та опрацювання отриманих даних через протокол RS232.

Виконувач

Система алгоритмів, що містить основні функції, які використовуються в додатку та забезпечує взаємодію всіх інших блоків.

Структура додатку для контролера

Додаток контролера містить набір інструкцій, які виконуються при отриманні з ПК тих чи інших команд, ці інструкції містяться в блоці “опрацьовувач команд” рис.3.26. Отримані дані з ПК опрацьовуються і передаються у вигляді відповідних сигналів у блок “виконавча периферія”, що вмикає чи вимикає живлення силової частини приладу, задає переміщення предметного столика керуючи двигунами.

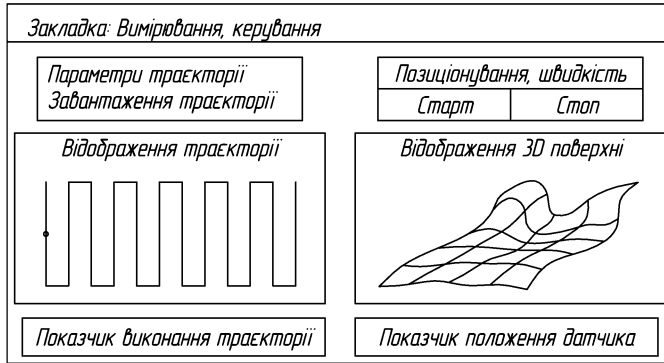


Рис. 3.27. Інтерфейс закладки “Вимірювання”

Перед тим, як потрапити до виконавчої периферії, керуючі сигнали проходять через блок синхронізації, що є необхідним для зчитування значень сигналу у визначені моменти часу. Таким чином значення сигналу з датчика лінійних переміщень зчитується рівно між кроками двигунів, а зчитування стану датчиків кінцевого положення відбувається саме в режимі базування. Блок формування даних відправляє на ПК звіт щодо виконання команд з усіма необхідними даними, як значення сигналу з АЦП, сигнал завершення позиціонування чи відпрацювання двигунами кроків.

Інтерфейс програмного забезпечення MicroEdge

Програмне забезпечення створене в середовищі C# [26], а для забезпечення задач виведення 3D-графіки використана бібліотека побудови 3D поверхні через примітиви [20].

Головний інтерфейс розділений на чотири закладки: “Вимірювання”, “Градування”, “Розрахунки”, “Результат”.

Інтерфейс закладки “Вимірювання” наведено на рис.3.27. У лівій частині вікна користувач має можливість або змінювати параметри траєкторії вимірювання, або вибрати заздалегідь створений файл програми ошукування в G-кодах.

Траєкторія відіграє велике значення при вимірюванні та при подальшій обробці поверхні. На сьогоднішній час існує велика кількість можливих траєкторій. Та їх реалізація на вимірювальному комплексі не завжди можлива. Розглянемо декілька можливих варіантів траєкторій.

Найпоширенішими та простішими в реалізації є лінійні траєкторії.

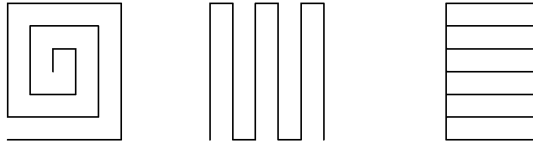


Рис. 3.28. Лінійні траєкторії

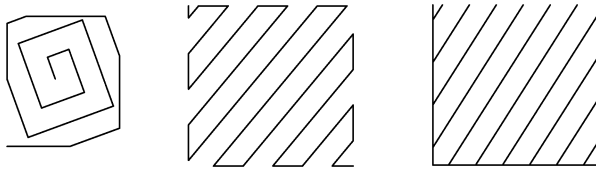


Рис. 3.29. Лінійні траєкторії під кутом

Вони можуть бути різної комбінації прямолінійних рухів. Так на рис. 3.28 наведені деякі прості: пряма спіральна, зигзагоподібна, Ш-подібна.

Пряма спіральна відрізняється від зигзагоподібної тим, що вимірювання ведеться круговими рухами вздовж зовнішньої границі та на різній відстані від неї. Ш-подібна траєкторія забезпечує однаковий характер сканування, що відіграє великого значення при точних скануваннях поверхонь. Цей спосіб виключає можливість впливу люфтів у гвинтових парах предметного столика. Суттєвим недоліком такого способу є велика кількість холостих ходів при вимірюванні, але на програмному рівні їх можливо виконувати з підвищеною швидкістю переміщення. Ці варіанти можливо використовувати по різних осях при вимірюванні та під кутом (рис. 3.29).

Можливі також і траєкторії криволінійні (рис. 3.30). Представлені кругова спіральна, кругова концентрична, кругова радіальна. Такі траєкторії складніші і при обробці поверхні тому, що мають різну щільність точок, та лінійність.

При необхідності, будь-яку з цих траєкторій можливо вписувати в бажані форми рамок (рис. 3.31), або відомих границь для сканування.

Обраний варіант відображається в зоні перегляду й може масштабуватись. Права верхня частина вікна призначена для керування й запуску програми вимірювання. Оскільки цей процес є тривалим,

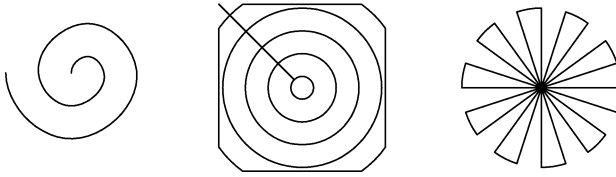


Рис. 3.30. Криволінійні траєкторії

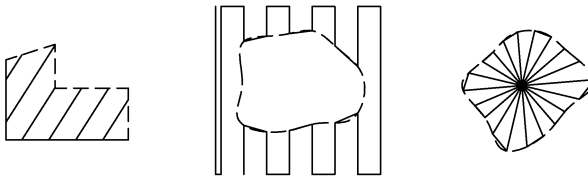


Рис. 3.31. Траєкторії вписані в рамки

його перебіг відображається на “прогресбарі” а поточна точка – на траєкторії. Після завершення вимірювань є можливість побудувати 3D-модель ощупаної поверхні (центральна частина вікна).

Для виконання поставлених задач, додаток має набір функцій доступних через графічний інтерфейс, а саме: автоматизоване задання траєкторії ощупування по параметрах або із зовнішнього файлу з графічним відображенням, позиціонування і автоматичне базування предметного столика, відображення положення голки датчика, задання швидкості і розрахунок часу ощупування, 3D побудова ощупаної поверхні, градуювання по всіх 3-х осях, позиціонування та базування, автоматизований розрахунок параметрів профілю різальної кромки у всіх перерізах, відображення отриманих статистичних даних і побудова графіку зміни параметрів по довжині різальної кромки, збереження результатів у зовнішні файли.

За умови проведеного градуювання для початку ощупування достатньо ввести розміри ділянки, кількість перерізів та провести позиціонування предметного столика, після чого натиснути кнопку “Старт”. За необхідності сканування поверхні складної форми відмінної від прямокутника, а також якщо необхідна інша стратегія ощупування, можна завантажити .спс файл з довільною траєкторією, яку можна створити в сторонніх програмах. Хід процесу й положення датчика на траєкторії відображається графічно, а по за-

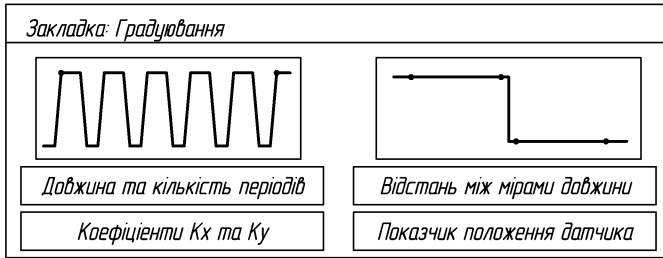


Рис. 3.32. Інтерфейс закладки “Градування”

кінченню ошукування на екран виводиться 3D модель поверхні. Всі розрахунки проводяться автоматично у відповідних вкладках. За необхідності масив отриманих точок ошупаної поверхні можна зберегти в зовнішній файл для подальшого опрацювання в інших програмних продуктах.

Інтерфейс закладки “Градування” наведено на рис. 3.32. Основним результатом даного блоку є визначення коефіцієнтів по координатах X, Y, Z .

Для визначення дійсних розмірів поверхні, яка вимірюється, передбачена можливість градування по всіх X, Y, Z . Для градування по координатах X, Y використовується зразок з регулярним профілем 1 ($Ra\ 0,50 \dots 0,80$ мкм), як це показано на рис. 3.33а-б. Для градування датчика 2 по координаті Z використовуються плоскопаралельні кінцеві міри 3 різної довжини (рис. 3.33в). Потім визначається різниця h та перераховується в коефіцієнт.

Процедура градування проводиться по чергово на всіх осях. Пластинка з еталонним профілем ставиться вздовж осі X так, щоб столик рухався перпендикулярно профілю, висіченому на пластинці.

Далі, у програмі натискається кнопка градування по осі X , у результаті чого столик переміщується на певну відстань вздовж даної осі. По закінченню руху у вікні буде виведено вимірний профіль еталонного зразка. У вікні необхідно курсором миші обрати дві точки на виміряному профілі між якими відстань є відомою та ввести цю відстань у вікно програми. Дана операція проводиться з кожною з осей, після чого градування вважається завершеним.

При градуванні вертикальної осі Z дві плоскопаралельні кінцеві міри різної довжини по чергово встановлюють під алмазною голкою. У вікні необхідно курсором миші обрати дві точки на кожній з поверхонь та вказати різницю між розмірами h .

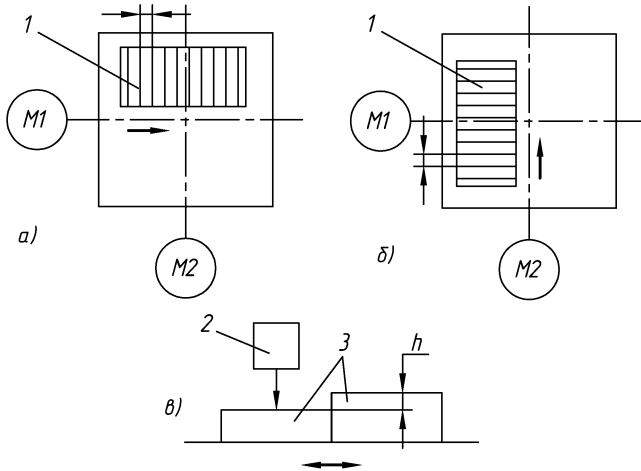


Рис. 3.33. Виконання градування комплексу:
а – по координаті X ; б – по координаті Y ; в – по координаті Z

На рис. 3.34 показаний інтерфейс закладки “Розрахунки”, де є можливість відкрити бідь-який переріз та, для випадку округлення різальної кромки дугою кола, визначити числові параметри – радіус округлення в мікрометрах.

На рис. 3.35 відображено інтерфейс закладки “Результат”, який дозволяє побачити цілісну картину зміни радіуса округлення різальної кромки вздовж неї, наочно відображає зміну мінімального й максимального радіуса та K -фактору.

Алгоритми, що закладені в програмі автоматично визначають межі, де закінчується передня та задня поверхня різця, а між ними вписується еліпс, або коло в залежності від отриманої форми. Процес опрацювання даних перш за все описано математично і складається з кількох етапів.

Етап 1

На першому етапі визначаються рівняння прямих сліду задньої та передньої поверхонь різання. Для цього використовується регресійний аналіз для першої та останньої чверті перерізу, що дозволяє отримати рівняння прямих типу $z = kx + b$.

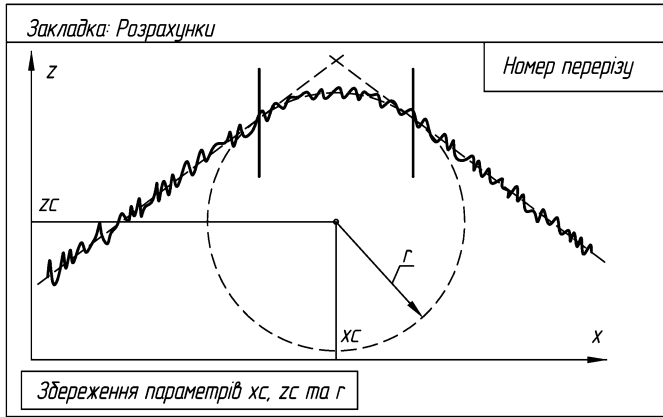


Рис. 3.34. Інтерфейс закладки “Розрахунки”

Інтерфейс дозволяє бачити побудову вписаного кола в режимі реального часу та вносити в ітеративному режимі необхідні корекції.

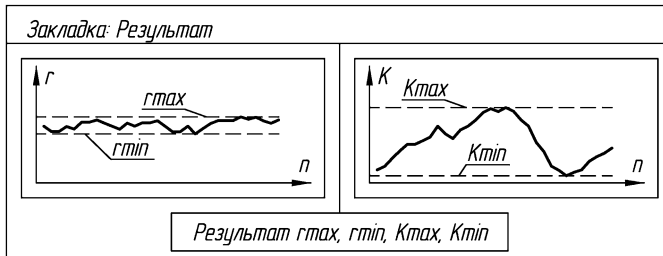


Рис. 3.35. Інтерфейс закладки “Результат”

Інтерфейс дозволяє в ітеративному режимі контролювати профіль виміряної поверхні та межі максимального та мінімального відхилення профілю.

Етап 2

Другим етапом є визначення координат уявної точки вершини різальної кромки. Математично точку знаходимо прирівнюючи рівняння координати z ліній передньої та задньої кромки, а після розв'язку отримуємо готові формули.

Етап 3

Наступним етапом знаходяться точки переходу від передньої та задньої поверхонь до різальної кромки леза. Пошук точки переходу починається на передній поверхні з середини відрізка між початком перерізу та уявною вершиною кромки. Поступово збільшуючи генеральну сукупність точок, що розглядається на передній поверхні визначається середнє квадратичне відхилення по генеральній та локальній вибіркам.

Збільшення середнього квадратичного відхилення локальної вибірки над генеральною на 10% і більше явно вказує на перехід від задньої поверхні до різальної кромки. Аналогічним є алгоритм пошуку точки переходу від задньої поверхні до різальної кромки.

Етап 4

Четвертим етапом визначаємо форму різальної кромки. Для цього обчислюється відстань між точками переходу передньої і задньої поверхні в різальну кромку і уявною вершиною різця. Якщо відношення цих відстаней коливається в діапазоні 0,95...1,05, приймаємо, що форма різальної кромки достатньо точно описується дугою кола. Якщо ж умова не виконується, приймаємо, що різальна кромка описується дугою еліпсу.

Етап 5

На п'ятому етапі визначаються параметри різальної кромки. Для цього з точок закінчення передньої і задньої поверхонь, перпендикулярно самим поверхням проводяться дві прямі, точка перетину яких і буде центром дуги кола або еліпса. В залежності від визначеної форми визначається радіус округлення різальної кромки або довжина піввісь вписаного в профіль еліпса.

Етап 6

Далі визначається K – фактор, який для випадку кола буде рівним 1, а для випадку еліпсу дорівнюватиме відношенню довжини піввосі еліпса напрямленої вздовж передньої і задньої поверхні різального клину відповідно.

Таким чином, представлені принципи і математичні залежності дозволяють перейти від масиву стохастичних даних, які описують профіль різальної кромки в одному з перетинів до її макрогеометричних (кут загострення) та мікрогеометричних (форма, радіус дуги кола або параметри дуги еліпсу).

В результаті опрацювання даних, отриманих при сканування різальної кромки виводяться в окреме вікно графіки зміни параметрів по довжині.

3.5 Практичне застосування комплексу

Комплекс можливо використовувати для визначення параметрів шорсткості та представлення мікрогеометрії поверхні. Тестові вимірювання поверхні різної шорсткості приведені на рис. 3.36. На рис. 3.36а зображено поверхню утворену торцею фрезеруванням. На рис. 3.36б тривимірна поверхня чавунного лиття.

Також можливо використовувати комплекс для отримання мікрогеометрії складних за формою поверхонь. Такі поверхні можливо зберігати як хмару точок з наступною обробкою в спеціалізованому програмному забезпеченні.

Ця можливість може бути використана при вирішенні задач реінжинірингу, коли для аналізу геометрії існуючого виробу доцільно отримати його тривимірну модель. Приклад такого сканування приведений на рис. 3.37.

Але найширшого застосування комплекс набув при вирішенні параметрів саме різальної кромки (рис. 3.38). Ці параметри цікавлять користувачів різального інструмента як у процесі експлуатації так і після окремих фінішних операцій.

Також є зацікавленість цими даними і в розробників нового інструмента в умовах високошвидкісного та високоефективного оброблення матеріалів. Такі результати на період проектування інструмента здатні вирішити безліч запитань пов'язаних з його експлуатацією.

Так під час фінішного оброблення точних отворів за допомогою розвертки суттєвий вплив на розміри обробленого отвору та стан приповерхневих шарів має радіус округлення різальних кромок розвертки.

Після отриманої перехідної поверхні було проведено розрахунок радіуса округлення різальної кромки різально-вигладжувальної розвертки (рис. 3.39а).

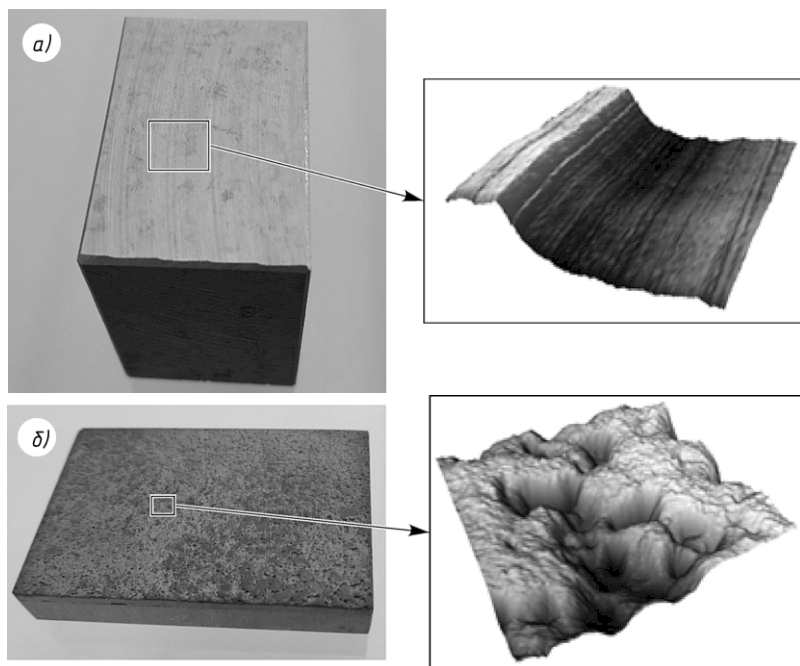


Рис. 3.36. Візуалізація мікрогеометрії поверхні

Ділянка поверхні зразка після його сканування може бути візуалізована тривимірним зображенням, яке в режимі реального часу можливо трансформувати, або змінити орієнтацію в просторі.

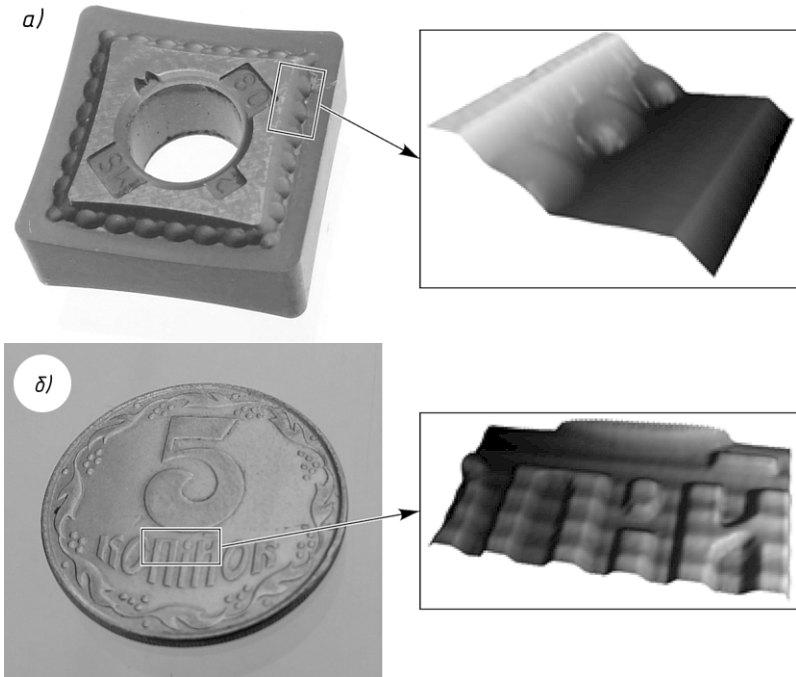


Рис. 3.37. Мікроегеометрії фасонної поверхні

- a* – змінна багатогранна пластина твердого сплаву. Візуалізована передня поверхня пластини із фасонним профілем для покращення умов подрібнення стружки;
- б* – п'ять копійок зразка 1995 року.

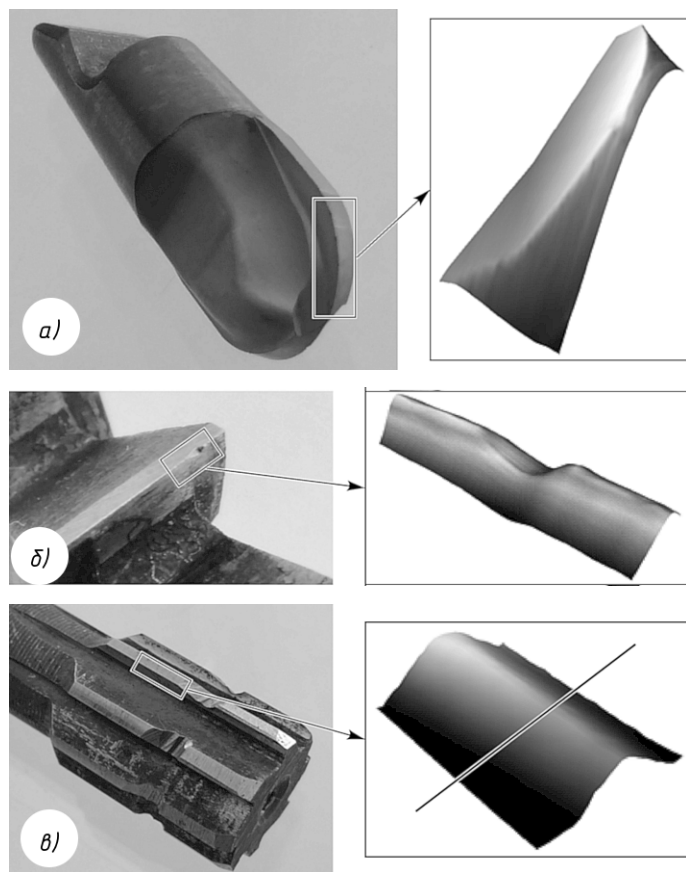


Рис. 3.38. Сканування різальних кромок:

a – фреза кінцева фасонна;

б – фреза дискова (зображена кромка з пошкодженням);

в – розвертка різально-вигладувальна.

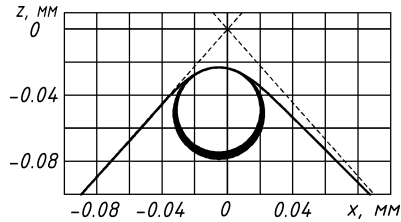


Рис. 3.39. Визначення радіуса округлення

Для дослідного зразка (рис. 3.39) радіус округлення різального леза становить 0,024 мм. Отже, у разі технологічного припуску на оброблення менше $\frac{1}{3} \cdot 0,024 \approx 0,008$ мм замість зрізування припуску буде його пластичне деформування.

Після отриманого результату необхідно врахувати обмеження комплексу та його особливі параметри. Для збільшення точності розрахунків необхідно провести серію вимірювань та зробити аналіз розрахованих результатів.

3.6 Висновки

Отже, на сьогодні перспективним є дослідження мікрогеометрії різального інструмента, а найважливішим її параметром є округлення різальної кромки – фасонної поверхні, яка зв'язує передню і задню поверхні різального клину інструмента.

Порівняльний аналіз методів вимірювання параметрів мікрогеометрії різальної кромки показав, що створення повністю автоматизованого апаратно-програмного комплексу вимірювання параметрів мікрогеометрії різальної кромки методом осязування є перспективною задачею, яка вирішувалась у даній науковій роботі.

Представлений у роботі підхід та математичні залежності дозволили перейти від масиву стохастичних даних, які описують профіль різальної кромки в одному з перерізів до її макрогеометричних (кут загострення) та мікрогеометричних (форма, радіус дуги кола або параметри дуги еліпсу) параметрів різальної кромки, що покладено в основу створення універсального апаратного комплексу вимірювання 3D-мікрогеометрії поверхні та спеціалізованого програмного забезпечення автоматизованого комп'ютерного моделювання та визначення параметрів різальної кромки.

Апаратний комплекс являє собою універсальний, автоматизований, програмно-керований прилад, який методом осязування до-

зволяє визначати параметри мікрогеометрії на ділянці поверхні розміром 12×12 мм, що робить його придатним для вирішення спеціальних завдань – вимірювання мікрогеометрії різальної кромки інструмента.

Програмне забезпечення являє собою спеціалізовану програму, яка виконує як функцію керування апаратним комплексом по параметрах, які задаються користувачем, так і функцію автоматизованого оброблення статистичних даних про результати вимірювання та визначення параметрів геометрії мікропрофілю різальної кромки інструмента.

Список літератури

1. Баклунов Е. Д., Москалев А. П. Использование двойного микроскопа МИС-11 для определения радиуса округления режущих лезвий // Труды Николаевского кораблестроительного института. – 1974. – Вып. 81. – С. 51-54
2. Волкова Т. М., Бура С. Т. Измерение радиуса округления режущей кромки инструмента // Измерительная техника. – 1968. - №10. – С. 78-79.
3. Как работают шаговые двигатели [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://robotosha.ru/electronics/how-stepper-motors-work.html>
4. Лінійна алгебра та аналітична геометрія: Навч. посібник / В. В. Булдигін, І. В. Алексеева, В. О. Гайдей, О. О. Диховичний, Н. Р. Коновалова, Л. Б. Федорова; за ред. проф. В. В. Булдигіна. — К. : ТВіМС, 2011. — 224 с.
5. Майданюк С. В. Модуль для вимірювання фасонних профілів / С. В. Майданюк, О. А. Плівак, Р. А. Бекмурадов. // Вісник Житомирського державного технічного університету. Технічні науки. – 2007. – №2 (41). – С. 15–18.
6. Операційний підсилювач [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:<http://easyelectronics.ru/operacionnyj-usilitel.html>
7. Основы линейной регрессии [Электронный ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://statistica.ru/theory/osnovy-lineynoy-regressii/>
8. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Мазур Н. П., Внуков Ю. Н., Грабченко А. И. и др. ; под общ. ред. Н. П. Мазура и А. И. Грабченко. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. – 534 с.
9. Практическая растровая электронная микроскопия: Пер. с англ. / Под ред. Д. Г. Гоулдстейна. – М.: Мир, 1978. – 656 с.
10. Грабченко А. И. Процессы микро- и нанорезания: текст лекций для студентов инженерных специальностей дневной и заочной форм обучения /А. И. Грабченко, Е. А. Лымарь,В. А. Фадеев – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 166 с.
11. Солодкий В. И. Модифицированный кинематический метод определения огибающей к винтовой поверхности. Вестник национального технического университета Украины "КПИ", Машиностроение, вып. 33, 1998. – с. 169-174.
12. Схема біполярного включення крокового двигуна [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:<http://mypractic.ru>

13. Фільтр низьких частот [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>
14. Datasheet STM32F051x4 STM32F051x6 STM32F051x8 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/55/53/3e/86/29/61/41/d9/DM00039193.pdf/files/DM00039193.pdf/jcr:content/translations/en.DM00039193.pdf>
15. Denkena B. Cutting edge geometries / B. Denkena, D. Biermann. // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2014. – №63. – С. 631–653.
16. Denkena B. Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load / B. Denkena, A. Lucas, E. Bassett // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2011. – Vol. 60. – pp. 73 – 76.
17. Frankowski, G. and Chen, M. and Huth, T.: Realtime 3D Shape Measurement with Digital Stripe Projection by Texas Instruments Micromirror Devices (DMD); Proc. Of SPIE 3958, 90106 (2000)
18. H. Dubbel. Tashenbuch fur den maschinenbau. Drezden. 1925. – 298 s.
19. IAR C/C++ Development Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://supp.iar.com/ENU.pdf>
20. MeshGeometry3D Class [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://msdn.microsoft.com/enus/library/system.windows.media.media3d.meshgeometry3d\(v=vs.110\).aspx](https://msdn.microsoft.com/enus/library/system.windows.media.media3d.meshgeometry3d(v=vs.110).aspx)
21. MikroCAD - LMI Technologies [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://lmi3d.com/products/mikrocad/>
22. MikroCAD 3D Scanner for Metrology | GoMeasure3D [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://gomeasure3d.com/mikrocad/>
23. Nakayama K. N., Arai M. A., Wang X. Способ оценки остроты режущей кромки // Сэймицу когаку кайси = J. Jap. Soc. Presic. Eng. – 1989. – Т. 55, №12. –С. 2261-2266.
24. Schafer W. S. Измерение радиуса округления режущих кромок инструмента // – 1972. – Т.3, №6. – С. 174-176.
25. UM1075 User manual [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/65/e0/44/72/9e/34/41/8d/DM00026748.pdf/files/DM00026748.pdf/jcr:content/translations/en.DM00026748.pdf
26. Visual C# library [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/kx37x362\(v=vs.120\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/kx37x362(v=vs.120).aspx)