

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинознавства та обладнання промислових підприємств

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

спеціальності *131 прикладна механіка*
спеціалізації - *технології машинобудування*

на тему «Удосконалення технологічного процесу обробки глибокого отвору
нежорсткої гільзи гідроциліндра»

Виконав: студент групи ТМ-17дм

Петренко В.М.

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Керівник Сергієнко О.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри Архипов О.Г.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Шевченко О.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Удосконалення технологічного процесу обробки глибокого отвору нежорсткої гільзи гідроциліндра»: 97 с., 0 табл., 49 рис., 83 джерела.

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ОБРОБКА ГЛИБОКОГО ОТВОРУ, РОЗТОЧУВАННЯ, ОГРАНКА, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Об'єкт дослідження – технологічний процес обробки глибокого отвору нежорсткої гільзи гідроциліндра.

Мета магістерської роботи – удосконалення технологічного процесу обробки глибокого отвору нежорсткої гільзи гідроциліндра на основі моделювання процесу утворення похибок форми поздовжнього і поперечного профілів отвору.

Методи дослідження – теоретичні дослідження проведені з використанням законів теоретичної механіки, опору матеріалів та методів обчислювальної математики. Достовірність результатів визначена на основі комп'ютерних та експериментальних досліджень на комп'ютерних моделях і лабораторних установках, а також при порівнянні з результатами досліджень інших авторів із застосуванням статистичних методів обробки даних.

У першому розділі виконано аналіз методів підвищення точності обробки гільз гідроциліндрів.

У другому та третьому розділах розроблено математичні моделі утворення огранки глибокого отвору та похибок поздовжнього профілю глибокого отвору нежорсткої гільзи гідроциліндра при його розточуванні, а також підходи до мінімізації огранки поперечного профілю глибокого отвору.

У четвертому розділі виконано експериментальні і комп'ютерні дослідження запропонованих методів мінімізації похибок обробки нежорстких гільз гідроциліндрів.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при проведенні науково-дослідних робіт.

ЗМІСТ

	С.
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	5
ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ГІЛЬЗ ГІДРОЦИЛІНДРІВ.....	8
1.1. Загальні положення.....	8
1.2. Технологія обробки гільз гідроциліндрів.....	8
1.2.1. Інструмент для розточування гільз гідроциліндрів.....	10
1.2.2. Типовий технологічний процес обробки глибокого отвору нежорсткої гільзи гідроциліндра.....	14
1.3. Основні похибки обробки глибоких отворів.....	17
1.4. Методи підвищення точності при розточуванні глибоких отворів	21
1.4.1. Динамічне гасіння коливань інструменту.....	23
1.4.2. Системи автоматичного керування положенням інструменту.....	27
1.4.3. Гіроскопічні системи стабілізації положення.....	29
1.4.4. Застосування комп'ютерного моделювання для підвищення точності обробки гільз гідроциліндрів.....	31
1.5. Аналіз теоретичних досліджень, спрямованих на підвищення точності обробки глибоких отворів.....	31
1.6. Мета та задачі дослідження.....	37
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ОГРАНОВУВАННЯ ОТВОРУ ПРИ ГЛИБОКОМУ РОЗТОЧУВАННІ.....	38
2.1 Розробка математичної моделі утворення огранки глибокого отвору нежорсткої гільзи гідроциліндра при його розточуванні.....	38
2.2 Вплив похибки заготовки на величину ограновування глибокого отвору.....	50
2.3 Підходи до мінімізації огранки поперечного профілю глибокого	

отвору.....	54
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ПОХИБОК ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ ОТВОРІВ ПРИ РОЗТОЧУВАННІ.....	58
3.1 Розробка математичної моделі утворення похибок поздовжнього профілю глибокого отвору при розточування.....	58
3.2 Вплив відхилення осі отвору заготовки на величину похибки Δ_e поздовжнього профілю отвору.....	67
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І КОМП'ЮТЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ МІНІМІЗАЦІЇ ПОХИБОК ОБРОБКИ НЕЖОРСТОКИХ ГІЛЬЗ ГІДРОЦИЛІНДРІВ.....	69
4.1 Комп'ютерне моделювання процесу утворення ограновування поперечного профілю гільзи гідроциліндра телескопування.....	69
4.1.1 Опис розроблених комп'ютерних моделей.....	70
4.1.2 Методика проведення комп'ютерного експерименту.....	72
4.1.3 Інтерпретація результатів комп'ютерного моделювання....	74
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ.....	79
5.1 Загальні заходи щодо безпеки життєдіяльності.....	79
5.2 Заходи безпеки при проведенні технологічних процесів механічної обробки металів.....	83
ВИСНОВКИ.....	88
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	90

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

САУ – система автоматичного управління

ПЗ – програмне забезпечення

ПК – персональний комп'ютер

МОТС – мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ

МОР – мастильно-охолоджуюча рідина

НВ – твердість за Бринелем

НV – твердість за Вікерсом

НРС – твердість за Роквелом

k – постійна Больцмана, Дж/К

J_h – інтенсивність зносу, мм³/км

δ - інтенсивність зношування інструменту, мкм/км

V - об'єм зношеної частини різця, мм³

ρ - щільність інструментального матеріалу, кг/м³

σ_T - межа плинності інструментального матеріалу, МПа

n – кількість дослідів

T – температура, К

σ_s - напруга плинності, МПа

σ_b – границя міцності, МПа

σ_t – границя текучості, МПа

$\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості, МПа

$\sigma_{.1}$ – границя втоми, МПа

ψ – відносне звуження, %

μ - коефіцієнт Пуасона

ВСТУП

В якості силових елементів обладнання нафтогазового і гірничодобувного комплексів найчастіше використовують гідроциліндри. Велику частку з них складають гідроциліндри, гільзи яких мають довжини в діапазоні $l \in [965...7500]$, діаметри $d \in [100 \dots 250]$ мм, їх відносять до нежорстких деталей (товщина стінки $S_{cm} [10 \dots 14]$ мм) з глибокими отворами ($l / d > 10$) [7]. Вони входять до складу іншого піднімального устаткування (крани, домкрати, підйомні механізми) в механізми горизонтального переміщення надважких об'єктів (верхні будови морських стаціонарних платформ, кантілівери самопідйомних плавучих бурових установок, бурові портали). Описані гідроциліндри є опорними елементами механізованого шахтного кріплення, забезпечують телескопування стріли автокрана і щогли бурової установки. Деякі з них працюють під тиском, що досягає 50 МПа, в умовах запиленості, впливу високих і низьких температур.

Від якості таких гідроциліндрів безпосередньо залежать надійність і безпека експлуатації обладнання, основною причиною поломок якого є порушення їх герметичності. Це обумовлює вимоги до точності обробки глибоких отворів нежорстких гільз гідроциліндрів. Заготовкою для їх виробництва є труба в стадії поставки, яка має відхилення Δ вісі отвору від прямолінійності. Перед початком розмірної обробки, що включає обточування, обробку вхідної ділянки, люнетних шийок, розточування і фінішну обробку розкатувальним інструментом, заготовку піддають рихтуванню для зменшення величини Δ . Однак відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки Δ , що залишилось, призводить до дисбалансу при обробці циліндричної заготовки з обертанням навколо її вісі. Більш того, внаслідок низької жорсткості, заготовка набуває властивостей пружного підвісу. Разом з пружним підвісом напрямних шпонок розточної головки виникає складна коливальна система «розточна головка - заготовка», що призводить до утворення ряду похибок: огранки поперечного профілю, відведення, відхилення від прямолінійності вісі,

погрішностей форми поздовжнього профілю отвору, які, імовірно, проявляються як технологічна спадковість від похибки Δ відхилення від прямолінійності вісі отвору заготовки.

При появі огранки (близько 20% випадків для обробки гільз гідроциліндрів телескопування стріли автокрана), фінішну обробку розкатним інструментом замінюють хонінгуванням, що дозволяє забезпечити розмірний допуск, але знижує якість поверхні отвору.

Іншим методом підвищення точності обробки гільз гідроциліндрів є гасіння коливань вищеописаної динамічної системи. Застосовують окремі динамічні гасителі та системи управління станом інструмента з діагностичного сигналу від датчика, наприклад, гіроскопічного. Однак більшість розроблених рішень не враховують механізм утворення похибок, а математичні моделі, які описують процес формоутворення при використанні відомих методів і їх експериментальні перевірки, як правило, носять приватний емпіричний характер, що обмежує область їх застосування для підвищення точності розточування при зміні параметрів заготовки.

Для дослідження впливу похибки заготовки на процес утворення похибок глибокого расточування при різних поєднаннях технологічних і конструктивних чинників в широкому діапазоні областей їх визначення цільових перевірок доцільно використовувати комп'ютерне моделювання. Однак подібні роботи не виявлені.

Таким чином, дослідження механізмів утворення і розробка методів мінімізації похибок форми отворів нежорстких гільз гідроциліндрів при їх глибокому розточування є актуальною науковою і практичною задачею, рішення якої дозволить підвищити точність обробки гідроциліндрів.

У зв'язку з цим, метою проходження наукової практики є аналіз методів підвищення точності обробки гільз гідроциліндрів з подальшою розробкою методів мінімізації похибок форми їх отворів.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ГІЛЬЗ ГІДРОЦИЛІНДРІВ

1.1 Загальні положення

Силовими елементами більшості механізмів і машин, що входять у склад нафтогазового і гірничодобувного комплексів, є гідроциліндри. Велику частку з них складають гідроциліндри, гільзи яких мають довжини в діапазоні $l = [965 \dots 7500]$ мм, діаметри - $d = [100 \dots 250]$ мм, товщину стінки $s_{ст} = [10 \dots 14]$ мм, тобто є нежорсткими деталями [16] з глибокими отворами ($l/d > 10$) [21, 53]. Вони входять до складу іншого піднімального устаткування (крани, домкрати, підйомні механізми) і в механізми горизонтального переміщення надважких об'єктів (верхні будови морських стаціонарних платформ, кантілівери самопідйомних плавучих бурових установок, бурові портали) [1].

Описані гідроциліндри є опорними елементами механізованого шахтного кріплення і забезпечують телескопування стріли автокрана і мачти бурової установки. Вони працюють, як правило, в гальмівному режимі при максимальному тиску, що досягає 50 МПа, і з малими швидкостями руху штока (0,003...0,03 мм/год.), в умовах запиленості, впливу високих і низьких температур, корозійно-активних речовин. Такі умови експлуатації обумовлюють високі вимоги до їх герметичності, від якої залежить надійність обладнання [31]. Високі вимоги пред'являють і до параметрів, що забезпечують взаємне розташування деталей гідроциліндрів. Так, відхилення вісей штока і глибокого отвору гільзи гідроциліндра від прямолінійності варіюються в діапазоні 0,05...0,5 мм [87] для різних гідроциліндрів позначеного класу. При цьому найбільшу складність представляє досягнення необхідної точності глибокого розточування отворів гільзи гідроциліндра, заготовкою для якої є нежорстка труба в стані поставки, має відхилення вісі від прямолінійності.

1.2 Технологія обробки гільз гідроциліндрів

Виробництво нежорстких гільз гідроциліндрів, відношення довжини l до діаметру d яких перевищує 10, здійснюють на спеціалізованому обладнанні

методом глибокого розточування [5, 28, 29, 35, 47]. За призначенням розрізняють три різновиди розточування: 1) чорнове, при якому задовольняються вимоги по розташуванню вісі отвору і її прямолінійності; 2) чистове, при якому забезпечується необхідна точність діаметральних розмірів і шорсткість поверхні; 3) комбіноване, при якому за один робочий хід виконуються функції чорнового і чистового розточування [29].

Основними методами розточування, в залежності від напрямку діючого зусилля подачі, є: розточування «на розтягування» борштанги і розточування «на стиск» борштанги. Перший метод характеризується тим, що під дією осьової складової сили різання борштанга відчуває розтягуюче навантаження, при другому методі обробки дія осьової складової сили різання призводить до стиснення борштанги [29, 53]. У зв'язку з необхідністю підвищення продуктивності процесу обробки отворів, на багатьох підприємствах використовують по черзі розточування «на розтягування» і «на стиск». При цьому робочим є як прямий хід, так і зворотний. При розточуванні наскрізних отворів, зміну резцевого блоку для зняття іншого припуску на зворотньому ходу виконують на виході з отвору.

Залежно від кінематичної схеми розрізняють три види обробки глибокого отвору (рис. 1.1) [53]: 1) заготовка 1 обертається, а інструмент 2 має тільки поступальний рух подачі S ; 2) заготовка 1 нерухома, а інструменту 2 повідомляють зустрічне обертання і поступальний рух подачі S . Найбільш поширеними для зазначеного класу виробів є перша і друга схеми обробки (рис. 1.1, I, II).

За способом підведення і відведення мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС) при розточування виділяють 4 способи [53]:

1) зовнішній підвід і внутрішній відвід, коли МОТС надходить в зону обробки по зазору між стінками отвору заготовки і зовнішньою поверхнею інструменту, а відведення разом зі стружкою відбувається по внутрішньому каналу інструменту. Застосування цього способу вимагає установки заглушки наскрізного отвору;

2) спосіб зовнішнього підведення і внутрішнього відведення, що відрізняється від попереднього тим, що МОРС надходить з іншого кінця заготовки через отвір в заглушці;

3) при розточуванні «на розтягування» здійснюють зовнішнє підведення і комбіноване відведення стружки, частина якої відводиться назовні по обробленому отвору через канал в інструменті, роль заглушки в цьому випадку виконує ущільнення на інструменті;

4) внутрішнє підведення в зону обробки через канал інструмента і відведення по зовнішньому каналу, роль якого виконує отвір заготовки.

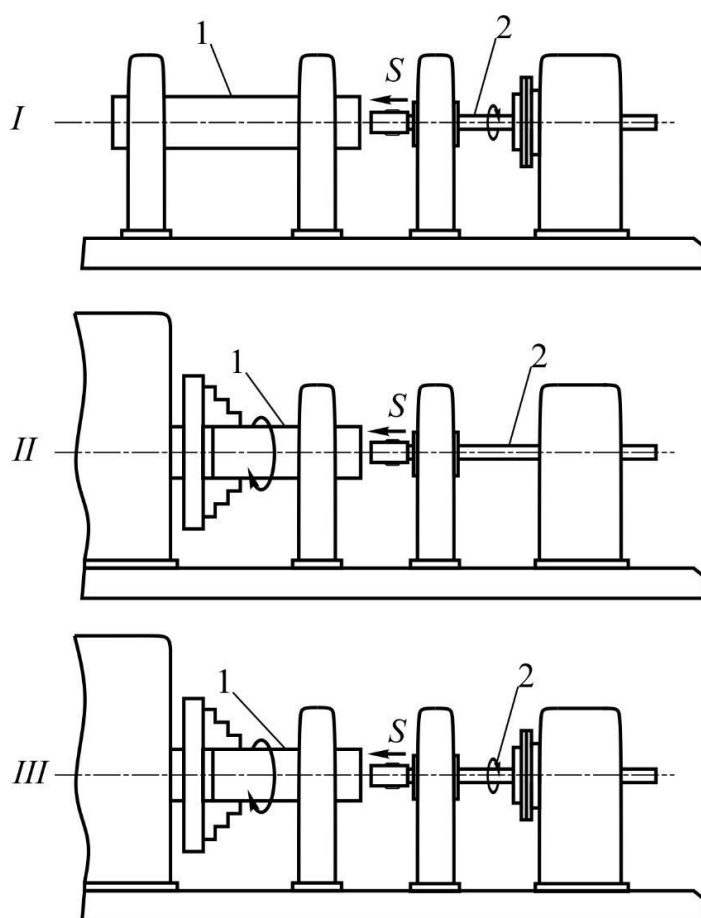


Рисунок 1.1 - Схеми розточування глибоких отворів

1.2.1 Інструмент для розточування гільз гідроциліндрів

При розточуванні глибоких отворів застосовують розточувальні головки з кріпленням на борштанзі. Зазвичай розточна головка містить корпус, паз для установки різцевого блоку і напрямні шпонки (рис. 1.2) [92, 103, 104, 105]. Різцевий блок, як правило, містить 2 змінні ріжучі пластини.

За конструктивним виконанням напрямні шпонки бувають [29]:

- 1) зафіксованими в корпусі розточний головки без можливості переміщення;
- 2) такими, що обертаються;
- 3) самовстановлюючимися, з можливістю переміщення в рамках зазору;
- 4) регульованими, налаштованими на діаметр обробки.

У якості матеріалу при виготовленні напрямних шпонок використовують: гуму, дерево твердих порід, текстоліт, метал, твердий сплав. За розташуванням напрямних шпонок щодо різців розрізняють розточувальні головки з переднім і заднім розташуванням напрямних шпонок, відомі конструкції розточувальних головок з розташуванням різцевого блоку між напрямних шпонок [29].

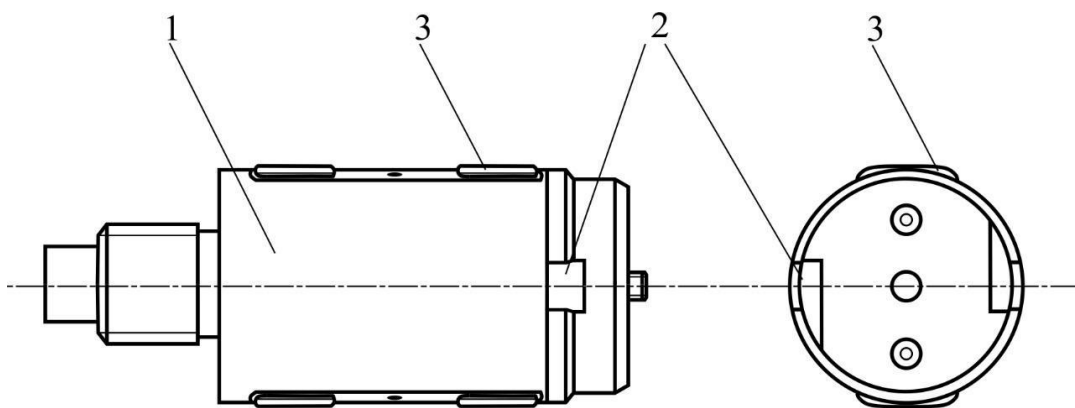


Рисунок 1.2 - Розточна головка:

1 - корпус; 2 - паз для встановлення різцевого блоку; 3 - напрямні шпонки

Після розмірної обробки розточною головкою для досягнення необхідної якості поверхні виконують, як правило, розкочування отвору розкочувальною головкою [35]. Основним елементом такого інструменту є деформуючі ролики (рис. 1.3), які виконують поверхневе пластичне деформування [35]. Відомі конструкції розточувального інструменту, (рис. 1.4) містять і ріжучий 1 і розточний 2 блоки [49, 52]. Обробку довгомірних заготовок виконують з використанням втулок, люнетів і інших напрямних пристроїв [86, 98, 99, 100]. Конструктивні особливості цих пристосувань, а також кількість і місце їх розміщення, впливають на точність обробки отвору.

Установку заготовки здійснюють в люнетах, їх кількість залежить від довжини заготовки, установка проводиться перед початком виробництва і не змінюється в процесі. Основна мета установки заготовки в люнети - забезпечення збалансованості при обертанні за рахунок зниження величини прогину при провисанні. Для точного позиціонування інструменту відносно заготовки використовують кондуктор. Наприклад, кондуктор [99] містить каретку, на якій встановлено пристосування для установки деталі, що має можливість повороту на каретці, на нижній частині якої встановлені ролики для переміщення по столу і шпонки для завдання каретці напрямку переміщення. На верхній площині каретки встановлені опорні ролики.

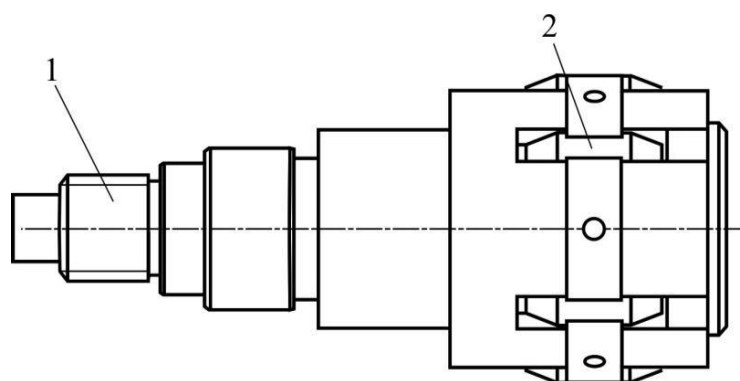


Рисунок 1.3 - Розкатуюча головка:

1 – корпус; 2 – ролики, що деформують

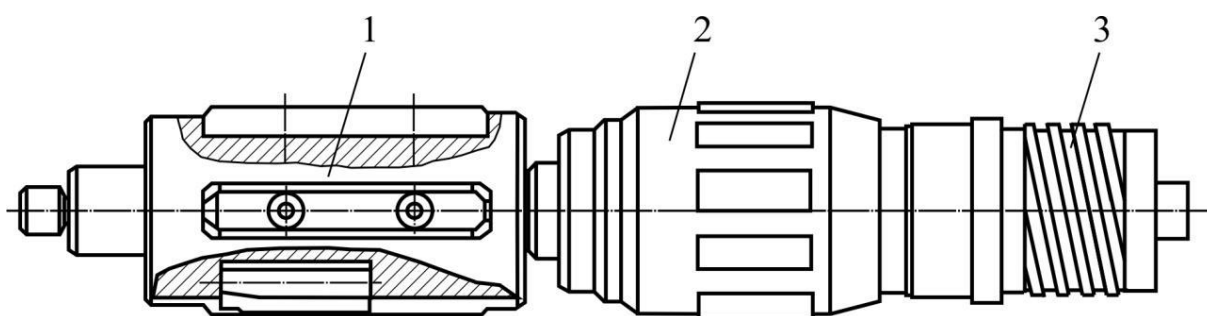


Рисунок 1.4 - Ріжуча головка фірми Sandvik Coromant (Швеція)

Для розточування довгомірних нежорстких заготовок застосовують розточувальні головки з самовстановлюючимися напрямними шпонками, що мають задне розташування щодо ріжучого блоку. Прикладом типового

інструменту є розточна головка, розроблена пермським науководослідним технологічним інститутом (рис. 1.5) [103]. Розточна головка складається з корпусу 1, в передній частині якого виконано вікно 2 для розміщення розточувального блоку, а на зовнішній поверхні виконані пази для розміщення напрямних шпонок 3, які мають прямокутну плоску основу, призматичну форму в поздовжньому і жолобник в поперечних перетинах. Радіус галтелі поперечного перерізу при цьому дорівнює необхідному радіусу обробки.

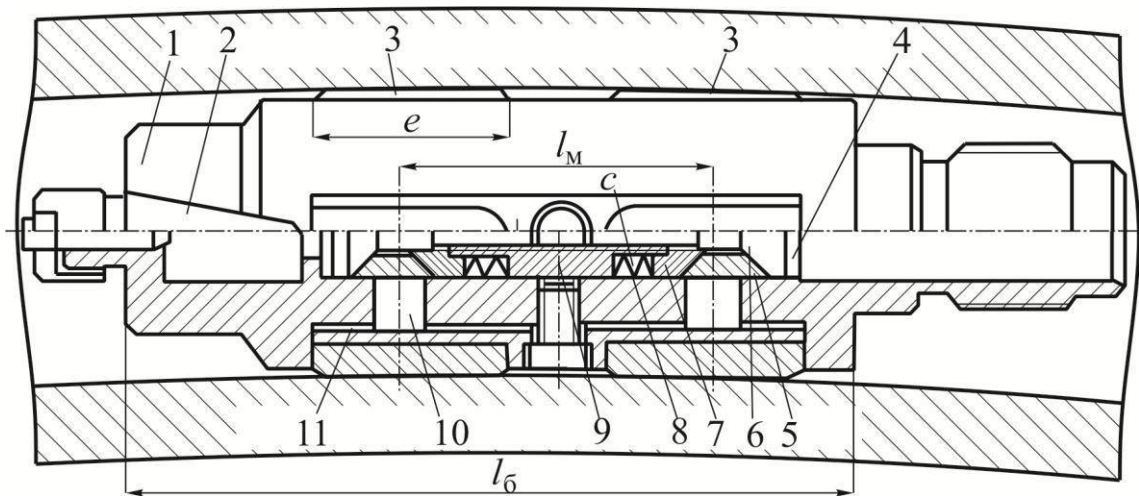


Рисунок 1.5 - Конструктивна схема розточної головки для обробки гільз гідроциліндрів телескопування:

e – довжина напрямної шпонки; l_M – відстань між радіально-рухливими опорами напрямних шпонок; c – жорсткість пакета тарілчастих пружин; $l_б$ – довжина розточної головки

По вісі корпусу 1 виконано отвір 4, в якому встановлений віброгасник, що складається із сегментів 5, які одним кінцем спираються на конічну поверхню головки гвинта 6, а іншим - на конічну поверхню кільця 7, рухомого в осьовому напрямку і підпружиненого пакетом тарілчастих пружин 8. Кожен такий пакет містить однакову кількість пружин. Гвинти 6 різьбовою частиною угвинчені в отвір для гвинта, виконаний по осі упорної втулки 9, і служать для регулювання жорсткості тарілчастих пружин 8. Напрямні шпонки 3 встановлені в пазах корпусу 1 на радіально-рухомих опорах 10, виконаних у вигляді

циліндричних стрижнів з плоскими торцями і встановлених в радіальні отвори корпусу 1. Довжина опор 10 виконана з таким розрахунком, щоб між дном паза і опорною поверхнею напрямних шпонок 3 був гарантований зазор 11, розмір якого не менше величини необхідного радіального переміщення напрямних шпонок 3. В рамках величини зазору 11 шпонки мають можливість переміщення, чим забезпечується їх самовстановлення. Після установки напрямних шпонок їх налаштовують на розмір обробки, задаючи початкове подтискання тарілчастих пружин 8, і шліфують разом з розточною головкою для досягнення необхідного радіуса обробки, тому форма напрямних шпонок в поперечному перерізі має жолобник з радіусом обробки.

Описана конструкція розточної головки дозволяє використовувати розточний блок двома способами: в якості плаваючого і жорстко зафіксованого у вікні 2. Вібrogасник 4 мінімізує амплітуду поздовжніх коливань розточної головки, так як сегменти спираються на конічні головки гвинтів, які беззазорно встановлені в осьовому отворі корпусу [103], проте він не забезпечує мінімізацію поперечних коливань розточної головки.

1.2.2 Типовий технологічний процес обробки глибокого отвору нежорсткої гільзи гідроциліндра

Типовим технологічним процесом обробки глибокого отвору нежорсткої гільзи є, наприклад, процес розточування гільзи гідроциліндра телескопування стріли автомобільного крана КС Івановець (рис. 1.6). Залежно від вантажопідйомності крана (16, 25, 32, 35, 40, 50, 60, 80 т) гільзи мають діаметри: 125, 140, 160, 220 мм. Такі гільзи відносять до нежорстких виробів з глибокими отворами [10, 16, 32]. Наприклад, при довжині $l = 7412$ мм її діаметр $d = 125$ мм, отже $l / d = 59,3$. Їх виготовляють на горизонтально-розточувальних верстатах для обробки глибоких отворів, наприклад РТ 2631115 вертлюжнію виконання. Верстат оснащений стебловими люнетами (люнет борштанги) і люнетами виробу. Заготовкою гільзи гідроциліндра телескопування є труба, виготовлена зі сталі В30ХГСА. Зважаючи на особливості прокатного

виробництва, заготовка володіє різностінністю і відхиленням Δ від прямолінійності вісі отвору, при співвідношенні $l / d = 59,3$ заготовка відноситься до нежорстких валів [34], що вимагає обробки в люнетах. Рекомендована кількість люнетів [28, 47] 3 шт. При цьому методика вибору відстані між ними в літературі відсутня, є тільки рекомендації по призначенню цієї відстані, засновані на виробничому досвіді [46, 54].

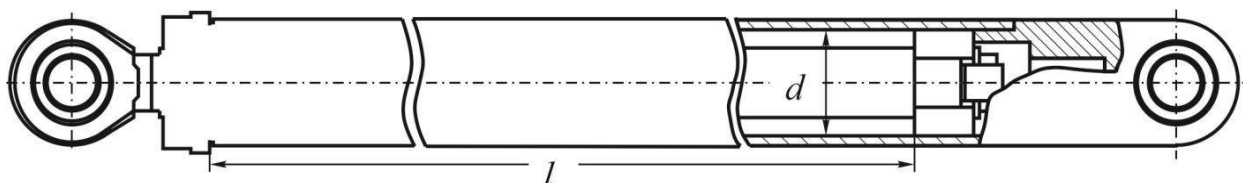


Рисунок 1.6 - Гідроциліндр телескопування стріли автокрана

Технологічний процес виробництва гільзи гідроциліндра телескопування складається з нижченаведених етапів і операцій.

Заготовкою для виробництва гільзи гідроциліндра телескопування довжиною $l = 7412$ мм і діаметром $d = 125$ мм (рис. 1.7) є труба 146 x 14 (ГОСТ 23210-89) довжиною $L = 7500$ мм. Заготовку піддають рихтуванню гідропресом за типовим технологічним процесом для досягнення допустимого значення величини Δ відхилення вісі отвору заготовки від прямолінійності. До подальшої обробки допускаються труби з відхиленням $\Delta < 1,5$ мм на погонний метр або 2 мм на всю довжину отвору.

Заготовку гільзи гідроциліндра після очищення встановлюють на токарний верстат РТ2244, де спочатку виконують підрізування торців і відрізок відходу по довжині труби, потім обробляють шийку $\varnothing 144$ мм для установки на ній рухомого люнета. Далі розмічають і обробляють шийки на відстані 500 і 3200 мм, для установки роликів люнетів.

Розточують отвір під захід інструменту $\varnothing 124,4 + 0,5$ мм довжиною $l = 130 + 5$ мм, і обточують ділянку заготовки для установки в патроні $\varnothing 140$ п7 довжиною $l = 165$ мм.

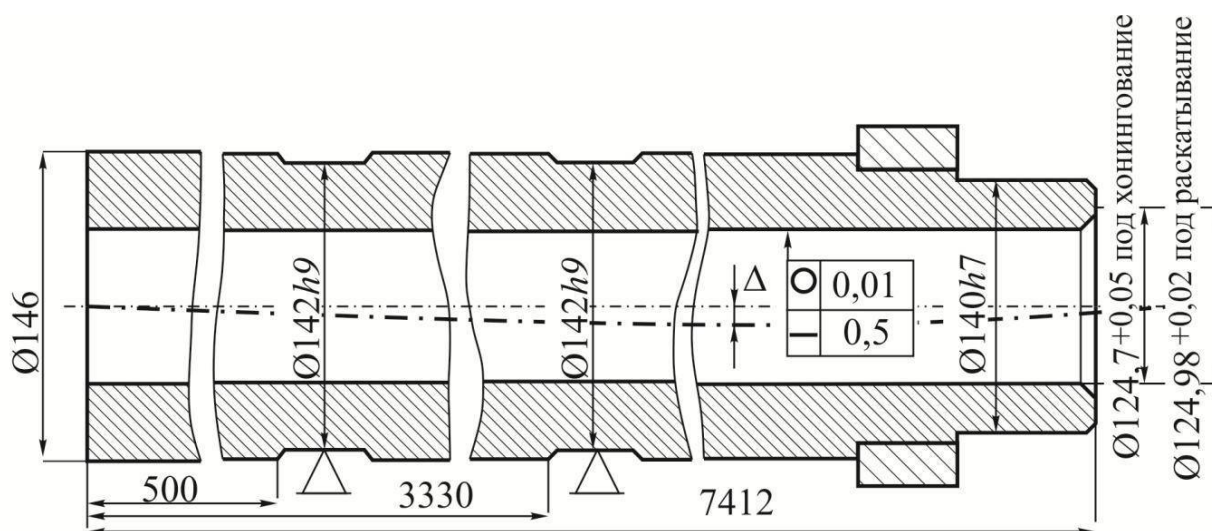


Рисунок 1.7 - Гільза гідроциліндра телескопування стріли автокрана

Після токарної обробки виконують складання підготовленої труби з цапфою і установка її в патрон і два люнета розточувального верстата РТ263214. Розточування здійснюється наступними технологічними переходами:

За допомогою розточної головки, описаної в розділі 1.2.1, з діаметром дворізцевого розточувального блоку $\text{Ø} 124,3$ виконують розточування отвору: $\text{Ø} 124,3$ мм; $l = 7412$ мм; $t = 3,15$ мм; $i = 1$; $S_{\min} = 113$ мм/хв; $n = 125$ об/хв; $V = 49$ м/хв.

Потім знімають розточний блок $\text{Ø} 124,3$, на його місце встановлюють розточний блок з $\text{Ø} 124,98$ (закріплюють як плаваючий) і зворотним ходом розточують отвір $\text{Ø} 124,98$; $l = 7412$; $i = 1$; $S_{\min} = 184$ мм/хв; $n = 125$ об/хв; $V = 49$ м/хв.

Розточують отвір $\text{Ø} 125$; $l = 7412$; $t = 0,01$ мм; $i = 1$; $S_{\min} = 300$ мм/хв; $n = 100$ об/хв; $V = 39,3$ м/хв, після чого стебло відводять в початок на холостому ході.

Останньою операцією є розкочування отвору 125Н9 $S_{\min} = 300$ мм/хв, $n = 66$ об/хв; $V = 51,8$ м/хв. Для неї використовують змінну розкатну головку по типу показаної вище (рис. 1.3).

До точності даного виду виробу ставляться такі вимоги: відхилення від круглості не більше 0,01 мм, відхилення від прямолінійності вісі отвору не більше 0,5 мм на всю довжину.

Післяопераційний контроль гільз здійснюють електронної пробкою. У оброблений отвір горизонтально розташованої деталі вводять індуктивну пробку. В необхідних або заданих перетинах вздовж отвору, як правило, 100 ... 150 мм, [34] пробку зупиняють і, за показами електронного блоку, визначають відхилення діаметра отвору в цьому перерізі. Просуваючи пробку всередину, визначають відхилення діаметра на половину глибини отвору. Потім пробку виймають з деталі і повторюють вимірювання з іншого кінця деталі. З огляду на те, що вимірювальний прилад базується всередині отвору, отже, прив'язаний до нього координатами, немає інформації про похибки поздовжньої форми отвору. Однак результати вимірювань зазначених виробів інструментом АК-1 М, дозволили встановити, що вироблені гільзи гідроциліндрів телескопування стріли автокрана мають седлообразність поздовжнього профілю отвору, а поперечний профіль 20% виробів має огранювання з кількістю граней 8 ... 13. У разі виникнення огранки, операцію розкочування замінюють хонінгуванням, що підтверджується наявністю окремого припуску (рис. 1.7) на зазначений вид обробки, проте це призводить до втрати нагартованого шару і зниження якості цих виробів. Отже, досягнення необхідної якості гільз гідроциліндрів вимагає мінімізації похибок поздовжнього і поперечного профілів глибоких отворів при їх розточуванні.

1.3 Основні похибки обробки глибоких отворів

Виходячи зі сказаного вище, обробка глибоких отворів гільз гідроциліндрів згідно найпоширенішого технологічного процесу опору утворенням ряду похибок, які поділяють на кілька груп [52], за своєю природою їх виникнення. До першої групи входять похибки вісі глибокого отвору: відведення і відхилення від прямолінійності вісі отвору (рис. 1.8, б, в). Відведення вісі отвору визначають [53] як відхилення дійсної вісі отриманого

отвору від вісі обертання деталі. Цей параметр розглядають стосовно до конкретного поперечного перерізу по довжині глибокого отвору. Відхилення від прямолінійності вісі - це найбільша відстань від дійсної вісі до теоретичної вісі отвору, тобто пряма, що з'єднує центри отворів на кінцях деталі [53].

Найбільший вплив на утворення відведення і відхилення від прямолінійності надають [52, 53, 54]: похибка базування інструменту; копіювання розточувальним інструментом похибки розташування вісі отвору заготовки, вібрації заготовки через її деформації при установці і обробці шийок, викривлення; прогин заготовки між люнетами; нерівномірність її твердості.

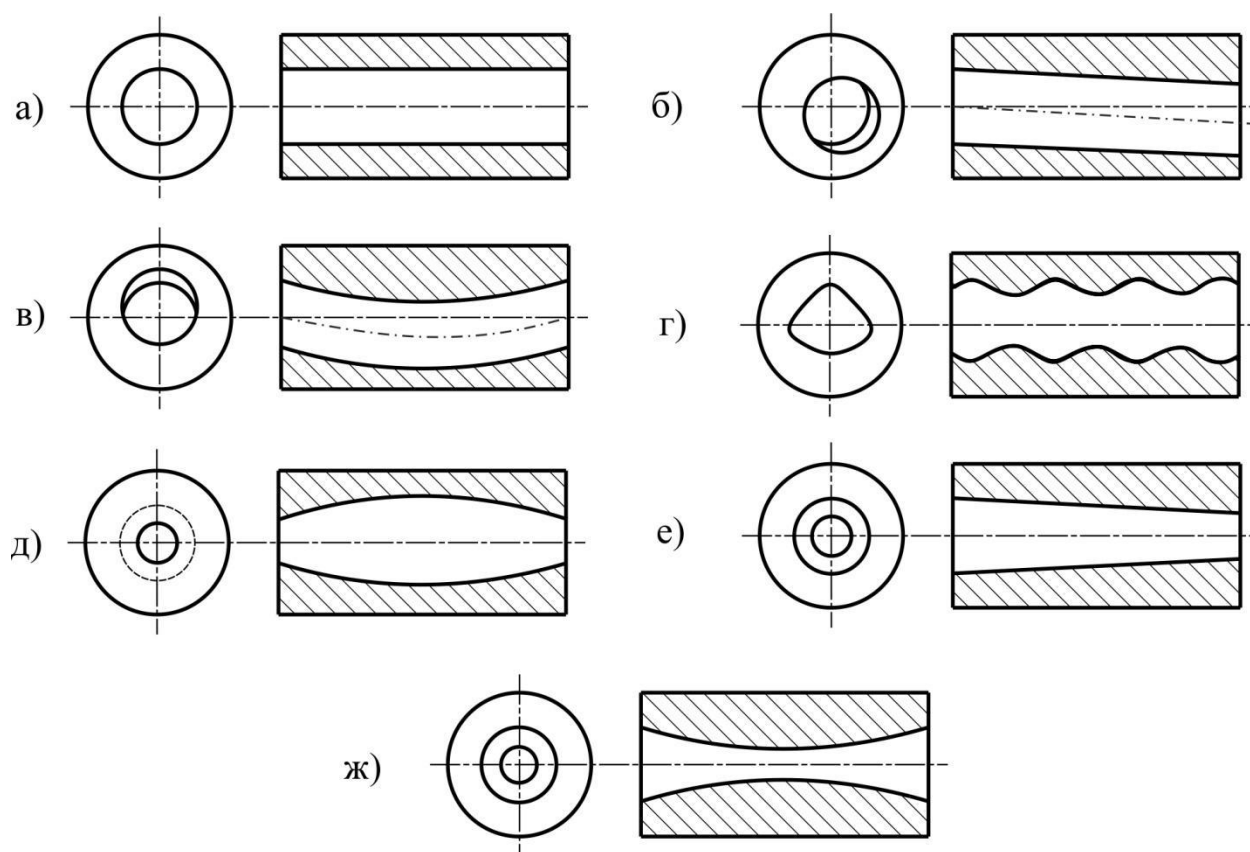


Рисунок 1.8 - Профілі отворів, отримані при впливі характерних похибок обробки глибокого отвору:

а - правильно оброблений отвір; б - відведення вісі отвору; в - відхилення від прямолінійності вісі отвору, викликане відведенням вісі; г - огранювання по довжині отвору (спіральність); д - бочкоподібність поздовжнього профілю; е - конусоподібність поздовжнього профілю; ж - сідлоподібність поздовжнього профілю

Група дослідників [50, 49] виділяє в якості основної причини виникнення зазначених похибок появу неврівноваженої складової радіальної сили ΔP_y різання при розбіжності осі інструменту з віссю вихідного отвору. У роботах [11, 32, 33] причиною виникнення відведення вважають похибку вхідної ділянки, яка призводить до неспіввісності осі інструменту і заготовки в процесі розточування. Причини виникнення неспіввісності можуть бути різні, оцінка їх впливу на точність обробки глибокого отвору проведена в роботах [22, 53, 54]. До іншої групи відносять похибки форми, що виникають в поперечному перетині отвору, найбільш характерною з яких при розточуванні глибокого отвору є відхилення від круглості поперечного профілю отвору в вигляді огранки (рис. 1.8, г). Її виділяють як вид відхилення від круглості, при якому поперечний профіль глибокого отвору має багатогранну фігуру з числом граней, іноді постійно змінюваних по довжині отвору. В роботі [39] зустрічається термін гвинтоподібне огранювання для позначення огранки по довжині отвору із змінною кількістю граней, або зміною кутового положення граней при незмінній їх кількості (рис. 1.9).

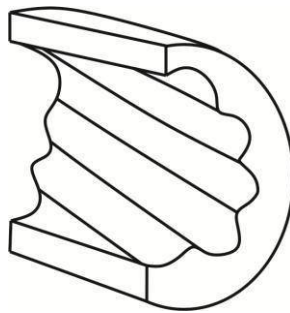


Рисунок 1.9 - Хвилеподібне огранювання або спіральність поздовжнього профілю отвору

В іноземних джерелах виділяють спіральність, як дефект, що характеризує огранювання по довжині глибокого отвору [59, 60, 62, 66, 67, 69, 70, 71, 75]. На думку більшості дослідників в області обробки глибоких отворів [23, 54, 103], утворення огранки є наслідком поперечних автоколивань розточної головки. Однак причини виникнення таких коливань в роботах не наводяться.

До окремої групи віднесені похибки форми поздовжнього профілю отвору: конусоподібність, бочкоподібність, сідлоподібність (рис. 1.8, д, е, ж). Найбільш характерними похибками з цієї групи для процесу глибокого розточування нежорстких заготовок є бочкоподібність і сідлоподібність. Причини утворення цих похибок недостатньо досліджені, зустрічаються припущення [54], що бочкоподібність є наслідком похибки базування заготовки і обробки вхідної ділянки.

В якості загальної причини виникнення описаних похибок відокремлюють наявність зміщення вісі інструменту щодо теоретичної вісі отвору [52, 53, 54, 96]. Обробка довгомірних нежорстких заготовок супроводжується, в основному, сідлоподібністю і бочкоподібністю. Механізм утворення цих похибок недостатньо вивчений.

В результаті аналізу похибок, що виникають при глибокому розточуванні отворів, і причин їх утворення, встановлено, що характерними для виробництва глибоких отворів нежорстких гільз гідроциліндрів є похибкою і вісі і форми профілів глибокого отвору. При цьому причини виникнення похибок вісі отвору описані в роботах [22, 34, 35, 53, 54, 58, 70]. Питанням мінімізації похибки відведення вісі глибокого отвору присвячені роботи Р.Н. Кулагіна, Л.Л. Фрезінського, М.Б. Діперштейна [22, 79, 83, 84, 85, 88]. Ці методи засновані на механічному коригуванні положення інструмента, або окремо його різців, під час обробки по діагностичному сигналу, який контролює положення вісі інструменту. Відомі системи автоматичного управління (САУ), що здійснюють мікропереміщення різців інструмента за результатами контролю відразу декількох діагностичних параметрів. Наприклад, система для активного контролю відведення вісі розточної головки [96] від вісі отвору містить наступні датчики: кута повороту деталі, кута повороту розточної головки, биття деталі, різностінність деталі. Сигнали від датчиків надходять в контролер і, через перетворювач і схему передачі керуючого сигналу, змінюють положення різця в радіальному напрямку. У цьому пристрої використаний механічний привід переміщення різця. Використання гідравлічного приводу дозволяє

здійснювати більш точне мікропереміщення різця.

Питання утворення похибок форми зводяться до розгляду системи «розточна головка-заготовка» як класичної коливальної, а мінімізації - до демпфування коливань на частоті, близькій до частоти власних коливань описаної системи. Цей підхід, на нашу думку, недоцільний, так як нежорстка заготовка спільно з пружним підвісом напрямних шпонок характеризує жорсткість зазначеної системи, яка змінюється по мірі висування борштанги. При цьому маса заготовки, що має відхилення від прямолінійності, утворює дисбаланс при обертанні (при відповідній схемі обробки). Облік вищесказаного при розробці методів мінімізації похибок форми поперечного та поздовжнього профілів глибокого розточування нежорстких гільз гідроциліндрів, на нашу думку, дозволить підвищити точність їх обробки.

1.4 Методи підвищення точності при розточуванні глибоких отворів

Для досягнення необхідної точності обробки гільз гідроциліндрів застосовують спеціалізовані методи. Їх поділ за різними класифікаційними ознаками описано в роботах [22, 29, 35, 52]. Ці класифікації розглядають технологічні прийоми і конструктивні особливості інструментів для обробки глибоких отворів. Виходячи з того, що однією з основних причин виникнення похибок при обробці довгомірних нежорстких заготовок є різного роду вібрації, нами запропонована класифікація методів підвищення точності обробки глибоких отворів за принципом гашення вібрацій системи «розточна головка-заготовка» (рис. 1.10). Узагальнено можна виділити три підходи до гасіння вібрацій в системі «розточна головка-заготовка»: демпфування, динамічне гасіння і застосування систем автоматичного управління.

Способи демпфування коливань інструменту, що виникають через недостатню жорсткість або зношеність елементів верстата, розглянуті в роботах М.П. Козочкіна і Ф.С. Сабірова [19, 53, 55, 63, 64], досліджені питання забезпечення необхідної шорсткості глибокого отвору за рахунок вибору відповідності частоти власних коливань пружної системи і розточної оправки.

Відомі інструменти, в конструкцію яких входять елементи, що демпфують [72, 61, 74], в тому числі виконані з в'язких матеріалів [89, 94]. Відомо конструктивне рішення [77], що дозволяє частково ізолювати борштангу або заготовку від інших елементів технологічної системи (рис. 1.11), засобом демпфуючого елемента, який складається з циліндричного демпфуючого тіла 1, навколишньої борштанги 6, з порожниною 3, що має канал з охолоджувальною рідиною 4.

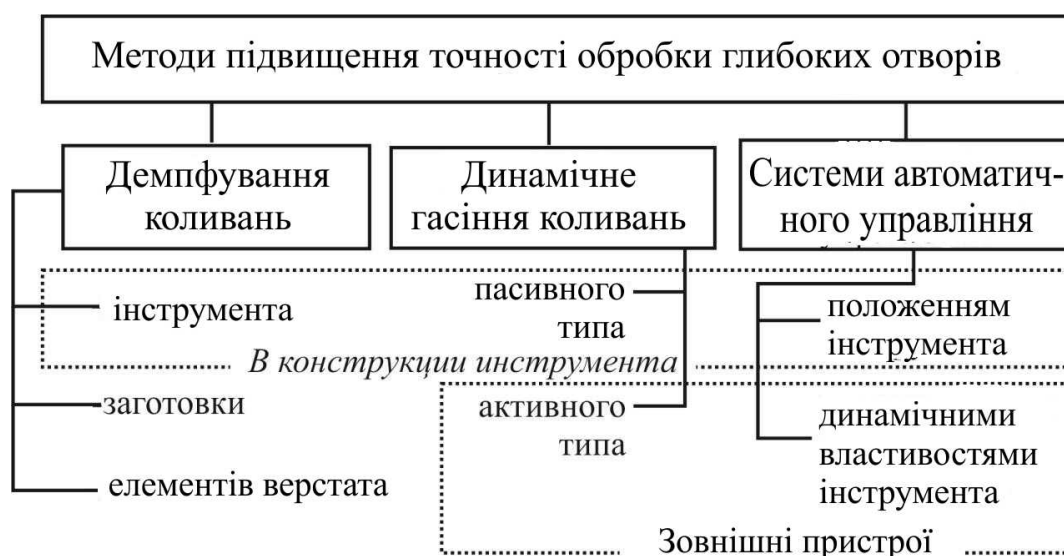


Рисунок 1.10 - Класифікація методів підвищення точності за принципом гасіння вібрацій

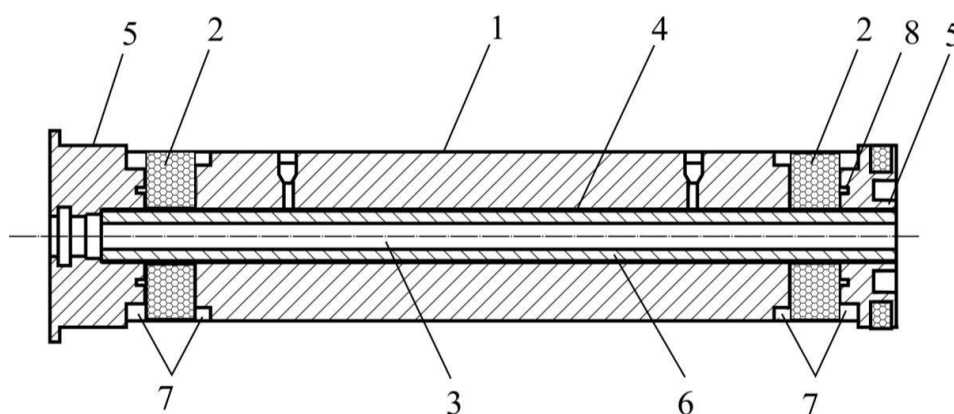


Рисунок 1.11 - Демпфуючі пристрої для борштанги і заготовки

Демпфуюче тіло 1 обмежене фланцями 5 і з'єднаного з ними за допомогою еластичних елементів 2, проміжних шайб 7 і ущільнюючих кілець 8.

Відомий спосіб обробки глибокого отвору в деталі використанням демпфера, який дозволяє компенсувати нерівномірність твердості і різносторонність заготовки [95].

При цьому перед початком обробки визначають нерівномірність твердості матеріалу по перетинах заготовки уздовж геометричної вісі отвору. За отриманими даними розробляють модель розподілу механічних властивостей заготовки, відповідно до якої розташовують демпфер в кожному з перетинів. Обробку роблять послідовно на визначену глибину, після чого правильність установки демпфера коригується для даного перетину шляхом вимірювань товщини стінки. Такий спосіб обробки вимагає зупинки технологічного процесу, що неприпустимо при розточуванні глибокого отвору. Описана група методів дозволяє знизити амплітуду коливань інструменту у вузькому діапазоні частот, за умови, що частота власних коливань об'єкта гасіння відома і постійна. Демпфування сприяє ізоляції системи «розточна головка-заготовка» від вібрацій, що передаються ззовні, однак не перешкоджає виникненню і поширенню вібрацій в самій системі.

1.4.1 Динамічне гасіння коливань інструменту

Метод динамічного гасіння коливань полягає в приєднанні до об'єкту коливань додаткових пристроїв з метою зниження амплітуди його вібрацій. Принцип дії динамічних гасителів полягає в формуванні силових впливів на об'єкт коливань [6, 36]. Для реалізації описаного методу використовують пасивні (без джерела додаткової енергії) і активні (з зовнішнім джерелом енергії) динамічні гасителі коливань [3, 6, 18, 57, 70, 73]. Їх, як правило, встановлюють безпосередньо на розточувальні оправки або вводять до складу конструкції розточної головки. Принцип дії таких пристроїв різноманітний.

Зниження вібрацій об'єкта при приєднанні динамічного гасителя може бути досягнуто розсіюванням, або перерозподілом енергії. При цьому налаштування системи об'єкт - гаситель виконують по відношенню до частоти вимушених коливань. Відомі конструкції пасивних інерційних динамічних

гасителів, які містять масивний елемент, частота власних коливань якого близька до частоти власних коливань демпфуючої системи [7]. Масивний елемент може приєднуватися до основної механічної системи за допомогою пружного або вузького елементів. Наприклад, розточний інструмент, демпфуючий вібрації [102], містить робочу частину 1 (рис. 1.12), ріжучу пластину 2, встановлену на базовій поверхні 3. Робоча частина містить базову частину 4 для її установки і корпус 7, і з'єднана з базовою за допомогою шпоночного виступу 5 і гвинтів 6. Базова частина 4 має порожнину 8, в якій розташований динамічний гаситель, і з'єднана з корпусом 7 різьбових з'єднань. Динамічний гаситель містить опорний порожнистий стрижень 9, на крайніх частинах якого зафіксовані опорні шайби 10 і 11 з в'язкими елементами 12 і 13, і з'єднаний з середньою частиною стрижня 9 за допомогою нарізного сполучення. Внутрішній отвір опорного полого стрижня 9 пов'язаний з каналами 15, 16 для підвода МОНС. В результаті - енергія коливань динамічного гасителя 14 поглинається в широкому спектрі частот при взаємодії з пружною середньою частиною опорного полого стрижня 9 і частинами 19, 20 пружних елементів 12, 13.

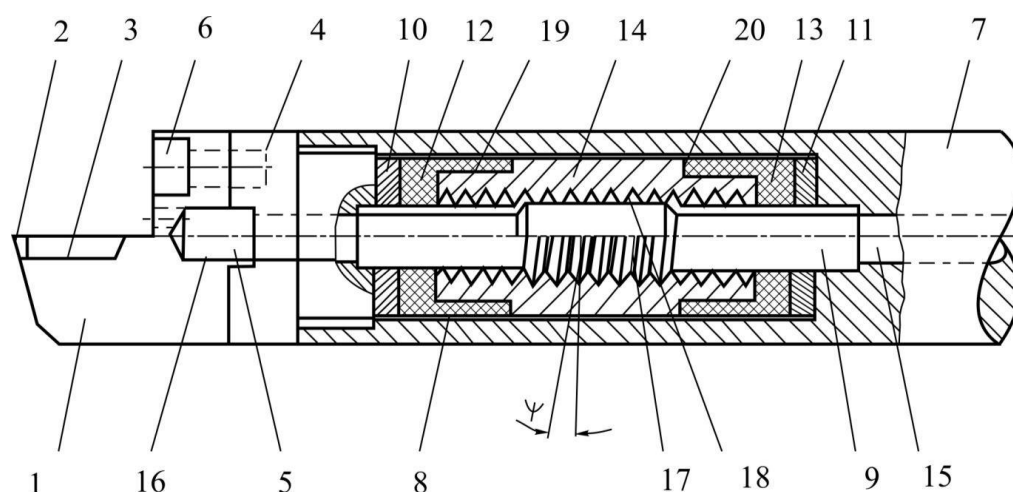


Рисунок 1.12 - Розточний інструмент, демпфуючий вібрації

Прикладом гасіння крутильних коливань розточувального інструменту служить борштанга [101]. В її кільцевій порожнині 1 (рис. 1.13) встановлюють

гільзу, що складається з консольних частин 2 і 3 з ребрами і створюють рівномірний зазор між ребрами 4 і 5, виконаними на трубі, при цьому зазор заповнений рідиною, яка має віброгасильні властивості. У процесі різання виникають крутильні коливання, які викликають відносні кутові переміщення гільзи 2, 3 і труби 1, що змінює зазор між бічними поверхнями ребер 4 і 5, викликаючи перетікання віброгасильної рідини 5, внаслідок чого відбувається гасіння крутильних коливань.

Пасивні динамічні гасителі обмежені в можливостях віброгашення вузьким діапазоном частот. В рамках цього діапазону ефективність гасіння коливань залежить від раціонального вибору динамічних параметрів гасителя.

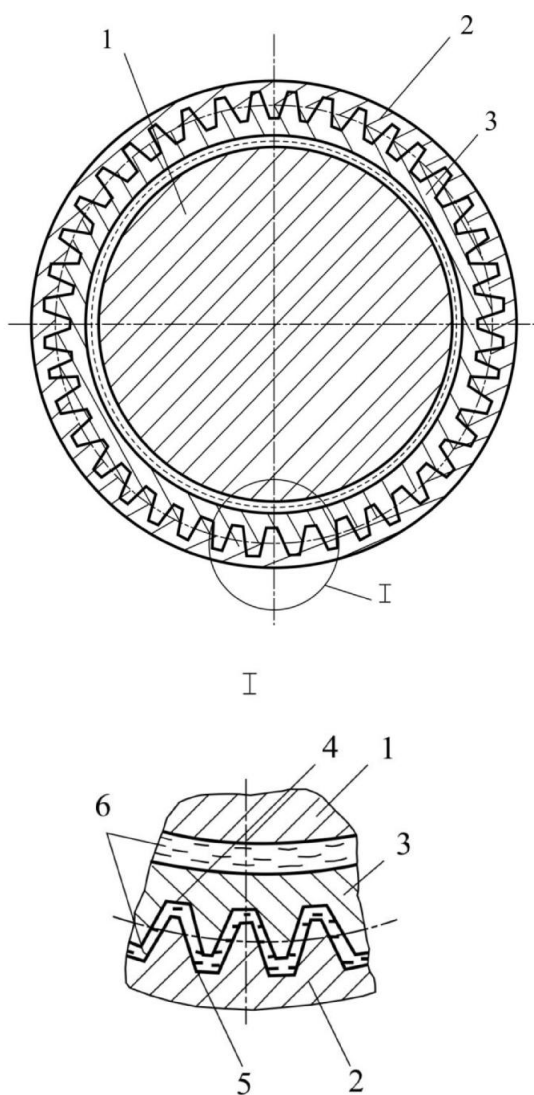


Рисунок 1.13 - Борштанг з гасителем крутильних коливань

Використання в системах динамічного гасіння коливань елементів з власним джерелом енергії розширює їх функціональні властивості та діапазон демпфуваних вібрацій. З'являється можливість налаштування системи при зміні параметрів коливальної системи [6]. Питанням синтезу активного динамічного гасителя, ефективного в широкій смузі частот зовнішньої дії, присвячені роботи [3, 18, 57]. В рамках постановки задачі синтезу активного динамічного гасителя розглядають механічну систему, що складається з об'єкта маси M , що знаходиться під дією гармонійного навантаження $f(t)$ і пов'язаного з основою лінійного пружного елемента з коефіцієнтом жорсткості c . До об'єкту через керуючий пристрій приєднана додатковий маса m (рис. 1.14). Рівняння руху розглянутої системи мають вигляд: $M\ddot{x}_1 = -cx_1 + U + f(t)$, $m\ddot{x}_2 = -U$, де x_1 і x_2 - координати об'єкта і динамічного гасителя; U - управління у вигляді лінійного зворотного зв'язку за станом системи. Наприклад, пристрій [66] містить п'єзоелектричний елемент, на який подають керуючий вплив.

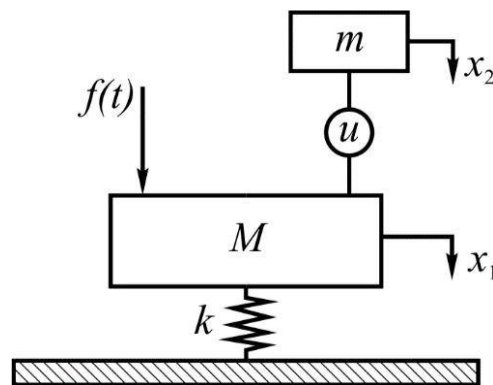


Рисунок 1.14 - Активний динамічний гаситель з керуванням

Відомі схеми використання електромагніта в якості регулятора еквівалентної жорсткості активного динамічного гасителя [6]. Використання активного принципу віброгасіння дозволяє налаштувати параметри гасителів в режимі стеження, відшукувати і реалізувати найбільш ефективні закони управління. Однак подібні гасителі засновані на приватних емпіричних залежностях, що обмежує їх придатність. Наявність узагальненої математичної моделі утворення похибок дозволить підвищити ефективність даного підходу.

1.4.2 Системи автоматичного керування положенням інструменту

Особливістю процесу глибокого розточування є зміна частоти власних коливань розточної оправки при збільшенні вильоту борштанги і зміна частоти власних коливань заготовки при знятті припуску. Для обліку цієї особливості при налаштуванні і коригуванні параметрів динамічного гасителя під час процесу обробки використовують САУ.

Наприклад, відомий інструмент для обробки отворів, оснащений мехатронною САУ положення вісі інструменту [76]. Він містить шпindel 1 (рис. 1.15), прийомну частину 2, хвостовик 3 і різцетримач 4. Інструмент оснащений телеметричним пристроєм 5, електронним елементом 6, пов'язаним з приводом 7 за допомогою запобіжної муфти 8, аксіальним елементом, що обертається 9 (осьовим гіроскопом), і блоком датчиків 10. Виникнення небажаних коливань фіксується датчиками 10, після чого електронний блок 6 за допомогою приводу 7 вносить корекцію в обертання елемента 9. Обертюва маса елемента 9 пригнічує коливання інструменту. Технічним результатом є демпфування автоколивань інструменту, за рахунок зміни його інерційних характеристик за допомогою обертового масивного елемента. Таким чином, САУ дозволяє підтримувати задане положення вісі інструменту за допомогою гіроскопічного стабілізатора у вигляді осьового гіроскопа.

В роботі [68] описана САУ жорсткістю підвісу борштанги на основі властивостей магнітореологічної рідини. Інструмент для обробки глибоких отворів містить шпindel 1 (рис. 1.16), немагнітну гільзу 9, в якій в опорах 7 розташована борштанга 6 з різцевим блоком 5. Між опорами 7 розташована катушка збудження 8, відокремлена від них епоксидною смолою. При подачі по дроту 3 електричного струму в катушку 8 виникає магнітне поле, яке визначає в'язкість магнітореологічної рідини 2. Зміна її в'язкості призводить до зміни частоти власних коливань борштанги 6.

Безперервна зміна магнітного поля призводить до зменшення амплитуди вібрацій інструменту. Застосування описаного підходу при розточуванні глибоких отворів вимагає перевірки процесу різання на стійкість.

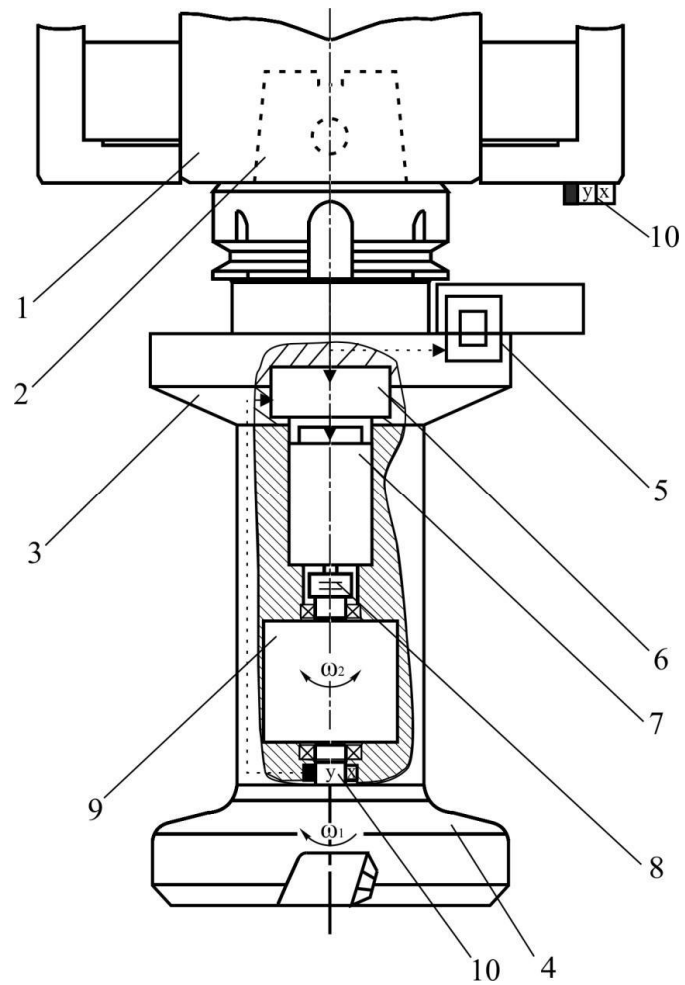


Рисунок 1.15 - Система автоматичного керування положенням вісі інструменту на основі інерційних властивостей аксіальнообертового тіла із застосуванням гіроскопічного датчика положення вісі інструменту

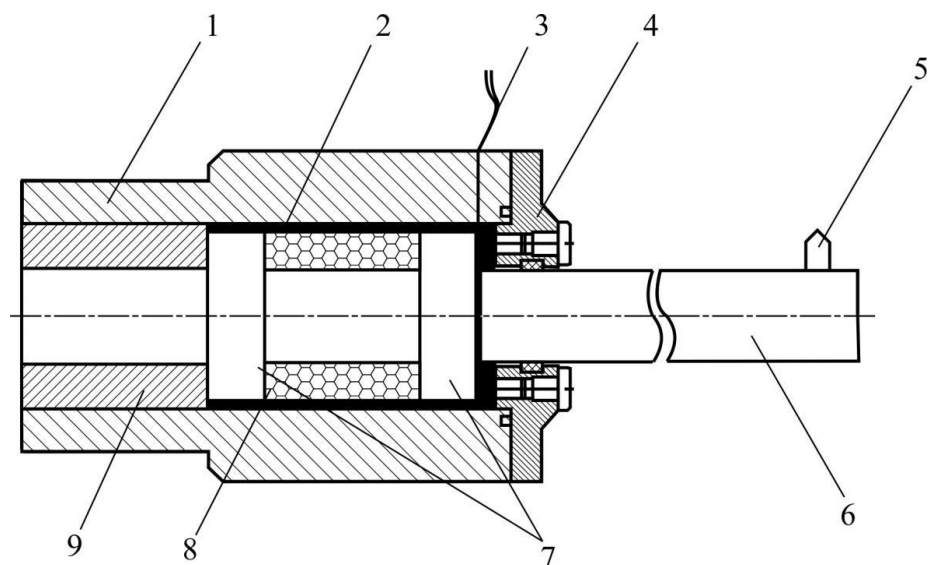


Рисунок 1.16 - Система автоматичного управління жорсткістю підвісу борштанги на основі властивостей магнітореологічної рідини

Так як жорсткість магнітореологічної рідини, а, отже, і жорсткість пружного підвісу борштанги змінюються східчасто, її застосування у складі віброгасителів може привести до втрати стійкості процесу різання і виникнення коливань системи «розточна головка - заготовка».

Відома шпindelная головка [51] з гідравлічною системою управління траєкторією обертання різця. Мікропереміщення вершини різця здійснюються за рахунок зміни тиску робочої рідини в спеціальній порожнині на фланці борштанги. При зниженні тиску положення вершини різця відновлюється за рахунок пружних властивостей борштанги. Необхідна величина тиску в порожнині борштанги визначається електричним сигналом, що надходить на обмотки клапана з пропорційним управлінням. Характерним недоліком описаного підходу є поетапна зміна параметра технологічної системи, наприклад, жорсткості підвісу борштанги або положення вершини різця. При внесенні таких змін в коливальну систему «розточна головка - заготовка», необхідна додаткова перевірка процесу на стійкість. Подібна інформація або відсутня, або носить приватний емпіричний характер.

1.4.3 Гіроскопічні системи стабілізації положення

Відомі системи стабілізації об'єктів, схильних до втрати стійкості, що функціонують на основі властивостей гіроскопів [32, 33, 37, 38, 42, 76, 81, 82, 93]. Наприклад, відомий гіроскопічний заспокоювач, в якому ротор гіроскопа 1 (рис. 1.17) змонтований в рамі 2, яка має можливість поворотів щодо об'єкта стабілізації навколо вісі 3, перпендикулярно поздовжньої вісі об'єкта. При цьому центр ваги рами розташовується нижче вісі хитань на відстані l . Відхилення вісі об'єкта коливань на кут φ призводить до відхилення вісі обертання ротора гіроскопа на кут ϑ . У цей момент в перпендикулярній площині виникає пара сил, яка призводить до коливань рами. Частоту цих коливань налаштовують, виходячи з коливань вимушених коливань, чим досягають ефекта стабілізації об'єкта. Для настроювання частоти коливань раму оснащують додатковим вантажем [32].

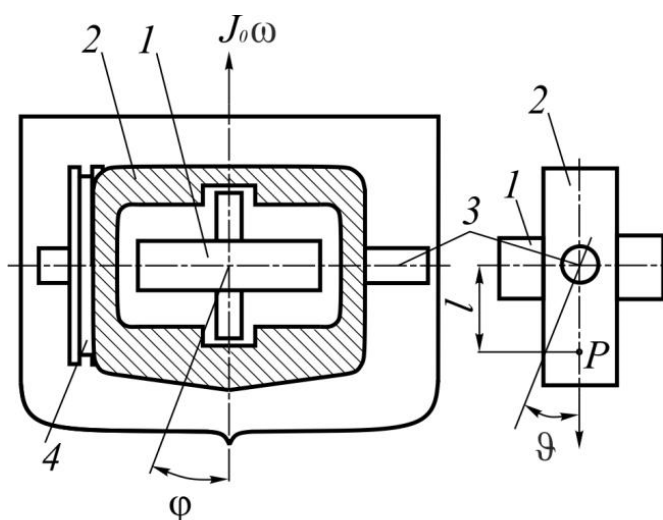


Рисунок 1.17 - Гіроскопічний заспокоювач коливань з гальмівним барабаном

Відомі конструктивні рішення, в яких використовують гальмівний барабан, або інші гальмуючі пристосування [25, 33].

Процес стабілізації описаний наступною системою диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду (1.1) [25].

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} + c\dot{\varphi} + C\omega\dot{\vartheta} = M(t); \\ A\ddot{\vartheta} + k\dot{\vartheta} + Pl\vartheta - C\omega\dot{\varphi} = 0, \end{cases} \quad (1.1)$$

де J - момент інерції об'єкта відносно поздовжньої осі, φ - кут поворота об'єкта, c - відстань до центру мас об'єкту, C - момент інерції ротора, ω - кутова швидкість ротора, A - момент інерції ротора щодо поперечної вісі, k - коефіцієнт, що характеризує в'язке тертя в барабані, P - вага рами, l - відстань від вісі гойдання рами до центру мас, ϑ - кут повороту рами.

Для $M(t) = M_0 e^{i\omega t}$ вираз, що характеризує амплітуду коливань об'єкта,

наступний:

$$\left| \frac{\vartheta}{\delta} \right| = \left\{ \frac{(1 - \xi_0^2)^2 + 4\beta_z^2 \xi_0^2}{[(1 - \xi_0^2)(1 - \xi^2) - \mu \xi^2]^2 + 4\beta_z^2 \xi_0^2 [1 - \xi^2(1 + \mu)]^2} \right\}^{1/2},$$

де $\delta = M_0 / c$; $\xi = \mu / \sqrt{c/J}$; $\xi_0 = \mu / \sqrt{Pl/A}$; $\psi = J^2 \omega^2 / PlJ$; $\beta = b_T / 2\sqrt{PlA}$.

З урахуванням змінної вимушених коливань, описувана гіроскопічна система може ефективно функціонувати лише при раціональному виборі демпфування в гальмівному барабані, методика визначення якого в літературі

відсутня, наводяться тільки емпіричні формули для конкретних об'єктів, отже, використання цього методу для інших об'єктів вимагає додаткових досліджень.

1.4.4 Застосування комп'ютерного моделювання для підвищення точності обробки гільз гідроциліндрів

Виходячи з розглянутих методів підвищення точності обробки глибоких отворів, зроблено висновок, що більшість підходів пов'язані з модернізацією конструкції розточної головки, або елементів верстата. Експериментальна перевірка розглянутих конструктивно-технологічних підходів методом натурних експериментів обмежена можливостями обладнання і конкретним набором параметрів об'єкта. Для розширення можливостей експериментального дослідження застосовують комп'ютерне моделювання методом кінцевих елементів, в рамках якого створюють твердотільну модель об'єкта зі змінними параметрами, що цікавить [2]. Описаний підхід дозволяє оперативно вносити конструктивні зміни в об'єкт і відстежувати їх вплив на досліджуєми параметр. Так, наприклад, в роботі [24] на основі твердотільного моделювання запропонована модернізована конструкція шпиндельного вузла глибокорозточного верстата, що забезпечує підвищення точності обробки глибоких отворів за рахунок зниження пружних деформацій шпиндельного вузла. В роботі [44] описано отримання профілю глибокого отвору на основі комп'ютерного моделювання процесу його свердління. Розрахунок роблять на основі сил різання, отриманих з результатів математичного моделювання.

Істотним недоліком подібних досліджень є моделювання роботи технологічної системи обробки глибоких отворів поелементно, без урахування впливу похибки заготовки на точність отвору.

1.5 Аналіз теоретичних досліджень, спрямованих на підвищення точності обробки глибоких отворів

Розглянуті методи підвищення точності обробки глибоких отворів розроблені на основі теоретичних досліджень динамічних процесів, які

супроводжують технологічний процес виробництва виробів з глибокими отворами. Питанням підвищення точності виробництва виробів, що мають глибокі отвори, присвячені роботи вчених С. В. Кірсанова, М. А. Мінкова, Ф. С. Сабірова, М. П. Козочкіна, І. Б. Шендерова, Ю. Ф. Набатникова, Н. Ф. Уткіна, А. І. Ушакова та ін. Питання стійкості процесу глибокого розточування розглянуті в роботах іноземних авторів: Y. Altintas, EJA Armarego, W. Fishwick, SA Tobias.

Відомий метод обробки глибоких отворів [91], заснований на математичній моделі формоутворення поздовжнього профілю глибокого отвору при його розточуванні [58]. Описано рівняння формоутворення, складенне з урахуванням спільної деформації технологічної системи при розточуванні «на стиск» з заднім розташуванням напрямних. Рівняння має вигляд:

$$\frac{dy}{dx} - (1,5/L + k/b)y = (k/b)y_0, \quad (1.2)$$

де x - осьова координата; y , $y(X)$ - відхилення фактичної вісі розточеного отвору заготовки від вісі верстата; L - довжина робочої частини борштанги; k - коефіцієнт, що залежить від геометрії інструмента і середньої глибини різання; b - осьове зміщення вершини різця; y_0 - відхилення фактичної вісі отвору заготовки від вісі верстата при розточуванні.

Для заготовки з вимірною величиною відхилення Δ вісі отвору від прямолінійності в контрольованих перетинах (рис. 1.18) отримані значення e відведення вісі отвору (рис. 1.19). Профіль отвору має бочкоподібність.

Явним недоліком моделі (1.2) є прийнятий лінійний закон зміни жорсткості системи «розточна оправка - заготовка» і розрахунок коефіцієнта k , виходячи з середнього значення глибини різання. На наш погляд, зміна глибини різання є наслідком динамічних процесів, що супроводжують процес глибокого розточування, а жорсткість змінюється нелінійно, що впливає на стан вісі розточної головки, а, отже, на величину похибки поздовжнього профілю глибокого отвору.

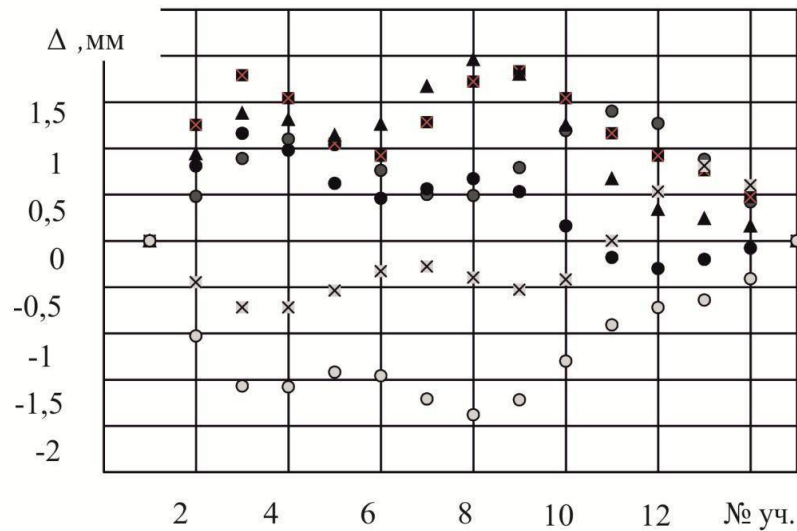


Рисунок 1.18 - Відхилення Δ вісі отвору заготовки від прямолінійності (згідно Шендерову)

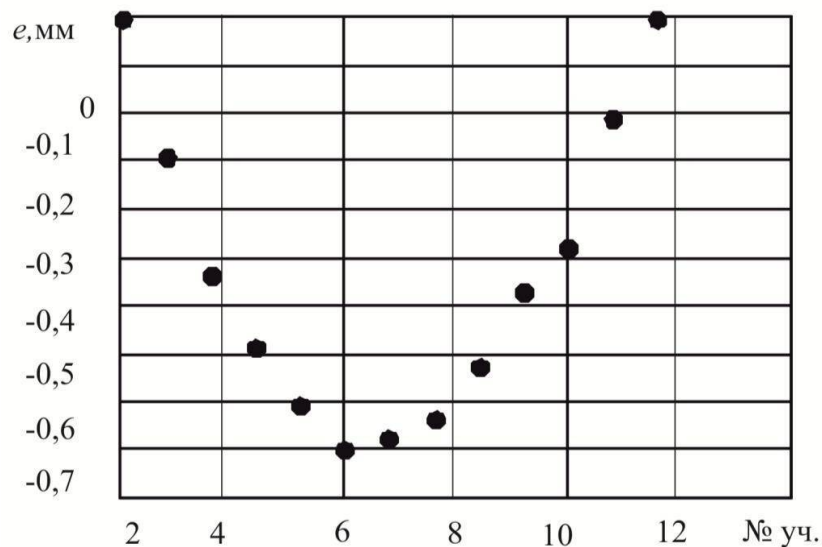


Рисунок 1.19 - Відведення e вісі отвору по перетинах заготовки (згідно Шендерову)

В роботі [54] показано, що похибка обробки отвору є пеперіодичною функцією кута повороту деталі і, в загальному випадку, може бути представлена у вигляді гармонійних складових ряду Фур'є:

$$Z_k(n) = (-1)^{n \cdot (k+1)} \cdot P^n Z_k(0) + \sum_{v=1}^n (-1)^{(n-v) \cdot (k+1)} \cdot P^{(n-v)} \cdot Q_v \frac{M_k}{EJ}, \quad (1.3)$$

де $Z_k(n)$ - похибка для k -ої гармоніки; n - кількість ділянок отвору, довжиною a (a - виліт різця перед опорою); $Z_k(0)$ - похибка вхідної ділянки отвору; v - поточний номер ділянки отвору; P - коефіцієнт копіювання; Q_v - функція приведення; M_k - фактор, що характеризує дію сил різання.

При цьому величина e відведення вісі глибокого отвору для обробки деталі, що обертається, необертотним інструментом визначається виразом:

$$e = e_0V_0 + e_1V_1 + e_6V_6, \quad (1.4)$$

де $V_0 = r(0)$ - початкова похибка або похибка вхідної ділянки; V_1 - биття деталі, що виникає в результаті некруглості роликів люнетів і люнетних шийок деталі; V_6 - похибка, викликана змінним характером сил різання.

При розрахунку величини e відведення вісі отвору по формулі (1.3), отримана його лінійна залежність від довжини оброблюваного отвору (рис. 1.20), що не узгоджується з розрахунком за моделлю (1.2), де профіль має явну бочкоподібність (рис. 1.19) для того ж типу виробів і параметрів обробки.

З представленого в роботі [54] впливу складових відведення на його підсумкове значення (рис. 1.21) видно, що найбільше значення для величини похибки відведення має складова, яка характеризує початкову похибку або похибку обробки вхідної ділянки V_0 , при цьому відхилення Δ вісі отвору заготовки від прямолінійності не розглядається.

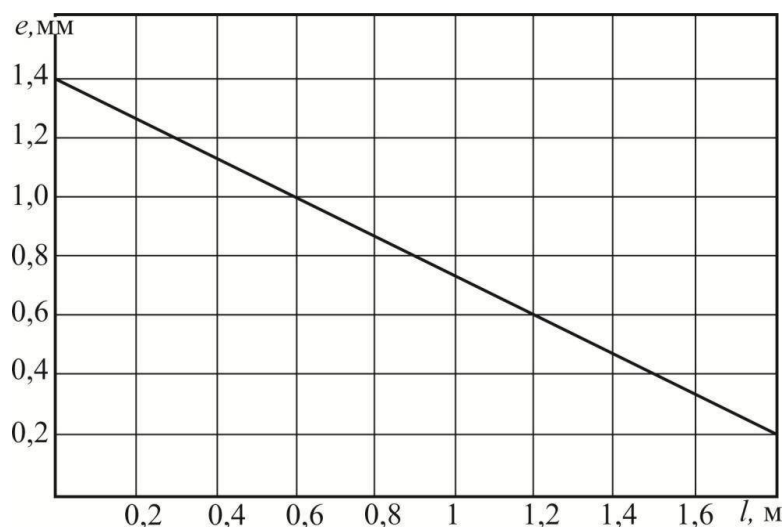


Рисунок 1.20 - Відведення e вісі отвору по перетинах заготовки (згідно Ушакову)

У моделі формування відведення [53] відхилення Δ вісі отвору заготовки від прямолінійності враховується. Вісь заготовки розглянута як відрізок параболи. Недоліком є прийняте при розробці моделі допущення про пропорційність сил різання миттєвій глибині різання.

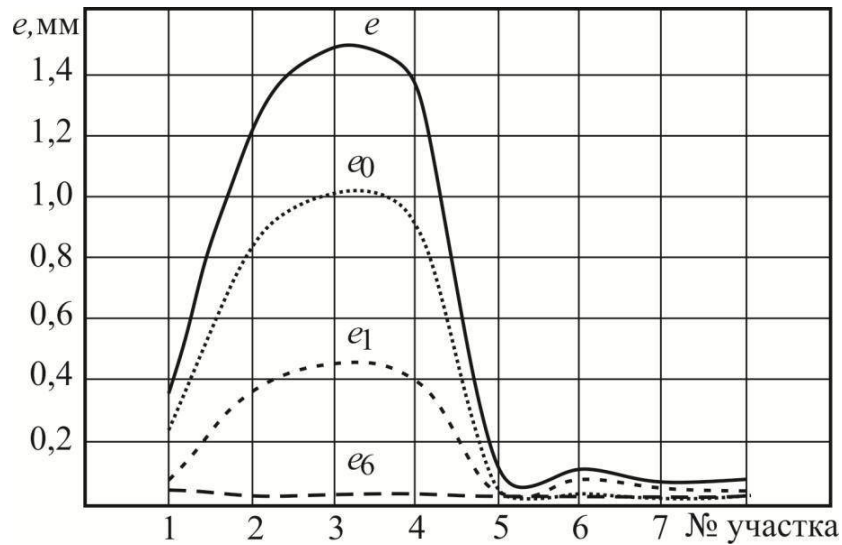


Рисунок 1.21 - Величина складових відведення вісі отвору по ділянках (згідно Ушакову): e_0 - похибка входної ділянки; e_1 - биття деталі в люнетах; e_6 - похибка, викликана змінним характером сил різання

Розглянуті математичні моделі не містять опису механізму утворення похибок при розточуванні нежорстких деталей, в них не відображено вплив змінного характеру жорсткості підвісу системи «розточна головка - заготовка» і похибки Δ відхилення від прямолінійності вісі отвору заготовки на точність обробки отвору.

У ряді робіт [62, 66, 68, 69, 71] описаний метод підвищення точності обробки глибоких отворів, заснований на забезпеченні стійкості процесу обробки.

Виходячи із загальної математичної моделі (1.5), яка описує положення вісі інструменту, будують діаграму стійкості, згідно з якою призначають режими обробки.

$$M\ddot{r}(t) + C\dot{r}(t) + Kr(t) = F_s(t) + K_t a A(t)(r(t) - r(t - \tau)) + F_{pd}(t, \dot{r}(t)), \quad (1.5)$$

де $r(t)$ - вектор зміщення вісі інструменту; M , C , K - маса, демпфування і жорсткість технологічної системи; $F_s(t)$ - періодична складова сили різання; K_t - коефіцієнт, що визначає умови різання; a - глибина різання; τ - час реакції системи; $A(t)$ - матриця положень; F_{pd} - сила, що забезпечує демпфування в системі.

Метою цього методу є відшукання коефіцієнтів для побудови діаграми стійкості і підбору параметрів процесу різання на її основі. Однак модель (1.5) має узагальнений характер, вплив похибок заготовки на точність виробу не розглядається.

Дослідження [54, 62, 69] показали взаємозв'язок співвідношення частот вимушених і власних коливань інструменту і типу дефекту, що виникає через рівняння процесу утворення похибки. В роботі [54] показаний взаємозв'язок похибок, що виникають при розточуванні, і встановлено, що наявність відведення вісі глибокого отвору супроводжується тільки трьохгранкою його поперечного профілю. Однак, це припущення не знаходить підтверджень при виробництві гільз гідроциліндрів.

Відомі математичні моделі, що описують утворення огранки поперечного профілю глибокого отвору, мають емпіричний характер і расглядають огранювання як наслідок поперечних коливань розточної головки, що не описують механізм виникнення останніх.

1.6. Мета та задачі дослідження

Метою магістерської роботи є підвищення точності глибокого растачивания нежорстких гільз гідроциліндрів на основі моделювання процесу утворення похибок форми поздовжнього і поперечного профілей отвору.

Для досягнення поставленої мети потрібно рішення наступних завдань:

- розробка математичних моделей освіти огранки поперечного профілю і похибки форми поздовжнього профілю глибокого отвору при розточуванні нежорстких гільз гідроциліндрів з урахуванням відхилення осі отвору заготовки від прямолінійності;

- розробка, на основі запропонованих математичних моделей, нових конструктивно-технологічних методів, які забезпечують мінімізацію похибок розточування глибокого отвору нежорстких гільз гідроциліндрів;

- підтвердження ефективності запропонованих методів мінімізації похибок на підставі комп'ютерного моделювання технологічного процесу розточування глибокого отвору нежорсткої гільзи гідроциліндра, що має відхилення осі отвору заготовки від прямолінійності.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ОГРАНОВУВАННЯ ОТВОРУ ПРИ ГЛИБОКОМУ РОЗТОЧУВАННІ

Згідно з результатами аналізу літературних джерел, проведеного в розділі 1, для мінімізації похибок розточування гільз гідроциліндрів, що мають довжини в діапазоні $l \in [965 \dots 7500]$ мм і діаметри отворів – $d \in [100 \dots 250]$ мм, застосовують методи, засновані на гасінні коливачів системи «розточна головка-заготовка».

Однак відомі конструкторсько-технологічні рішення для реалізації таких методів спираються на математичні моделі, які або носять приватний емпіричний характер, або не враховують наявність Δ відхилення осі отвору заготовки від прямолінійності, яке, імовірно, має суттєвий вплив на що досягається точність обробки. При цьому огляд теоретичних досліджень, спрямованих на підвищення точності обробки глибоких отворів, вказує на відсутність загальних математичних моделей процесу утворення похибок форми поздовжнього і поперечного профілів глибоких отворів, які враховують похибка Δ заготовки.

Отже, для виявлення доріг мінімізації погрешностей продольного і поперечного профілів глибокого отвору при розточуванні нежорсткої гільзи гідроциліндра, необхідно досліджувати вплив на процес утворення вказаних погрешностей величини відхилення Δ осі отвору заготовки від прямолінійності.

2.1 Розробка математичної моделі утворення огранки глибокого отвору нежорсткої гільзи гідроциліндра при його розточуванні

Зважаючи на наявність у заготовки відхилення Δ осі від прямолінійності, направляючі шпонки в процесі розточування контактують з її криволінійною поверхнею. Положення точок контакту при цьому залежить від форми криволінійного ділянки заготовки, по якій в даний момент переміщуються направляючі шпонки (рис. 2.1)

У міру обертання заготовки, положення точок контакту напрямних шпонок з поверхнею отвори змінюється і відповідає або зазначеній на рис. 2.1, а в залежності від розташування максимального Δ відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки.

При подальшому повороті заготовки, точки контакту змінюють своє положення на протилежне (рис. 2.1 б, в), аналогічна зміна відбувається і при русі розточної головки уздовж криволінійного ділянки зі швидкістю S подачі.

З огляду на те, що напрямні шпонки мають пружний підвіс у вигляді пакету тарілчастих пружин [103], Їх положення визначає величину деформації зазначеного пакета і, відповідно, силу, що діє на кожен напрямну шпонок (далі силу підтискання напрямних шпонок).

Якщо точка контакту в даний момент знаходиться на ділянці заготовки, який має вигин в позитивному напрямку (рис. 2.2), то сила підтискання комплекту тарілчастих пружин (Розділ 1.1), що забезпечують пружний підвіс направляючої шпонки, знижується, якщо - в негативному, то сила підтискання зростає за рахунок того, що, пружини в пакеті сильніше деформуються.

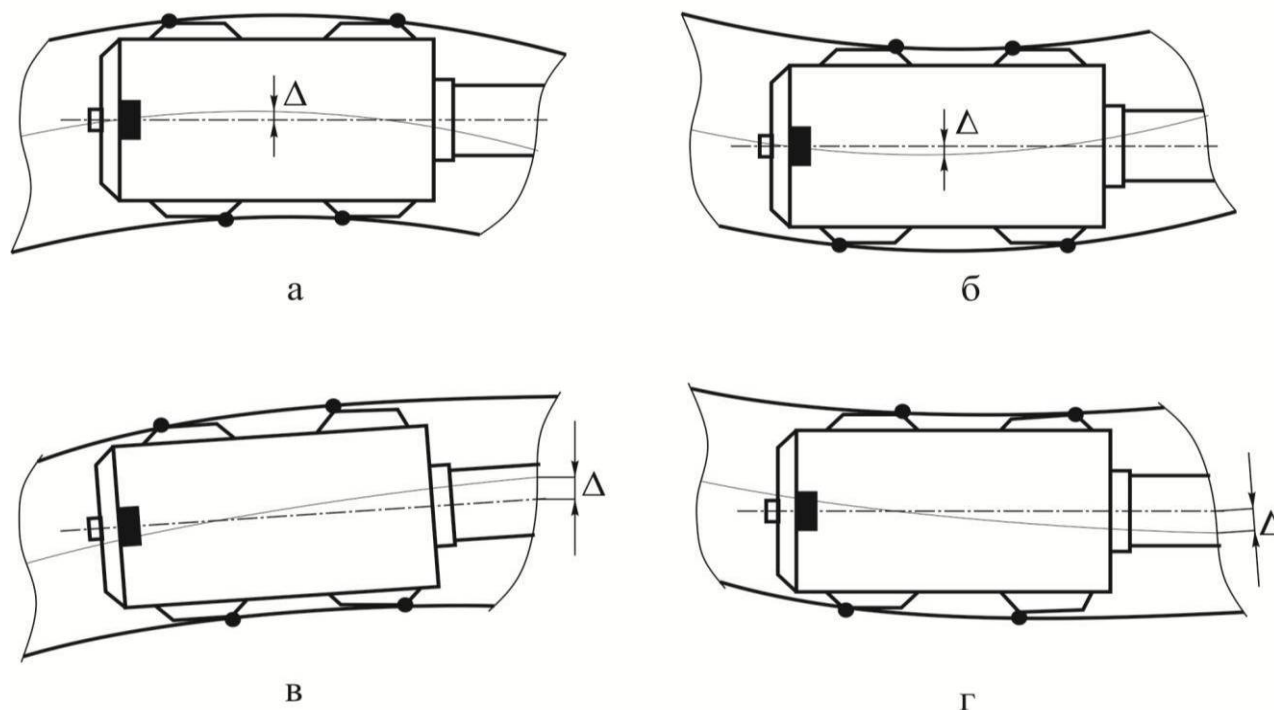


Рисунок 2.1 - Точки контакту напрямних шпонок з поверхнею заготовки

При цьому на розточувальних головку діє наступна система сил (рис. 2.2): складові сили різання для кожної з ріжучих пластин P_x , P_y , P_z ; сила F підтискання направляючої шпонки, що діє з боку пакета тарілчастих пружин на шпонку, прикладена в поточній точці її контакту з поверхнею заготовки; сила початкового підтискання F_0 комплекту пружин; сили реакції напрямних шпонок, прикладені до кожної з точок контакту заготовки з направляючими шпонками; сили тертя.

При наявності відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки, сила F підтискання, діюча на напрямні шпонки розточної головки, змінюється в міру обертання заготування для кожної з напрямних шпонок.

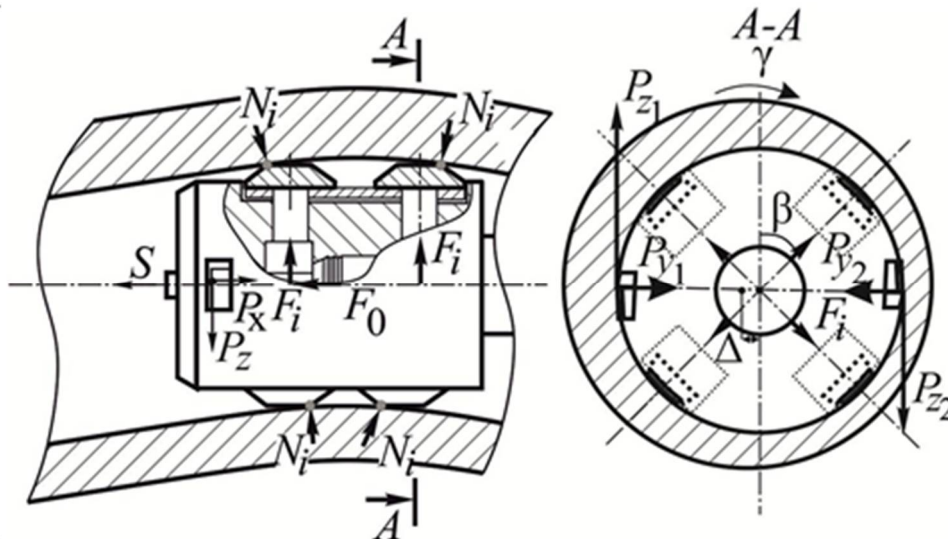


Рисунок 2.2 - Сили і моменти, що діють на розточувальних головку при обертанні заготовки

Це тягне за собою зміну сил їх реакцій N і відхилення осі розточної головки на кут φ , Що призводить до зміни глибини різання tr , A , отже, і всіх складових сили P різання для кожного з різців.

Таким чином, наявність відхилення Δ від прямолінійності осі отвору заготовки призводить до зміни величин сил і моментів, що діють на розточувальних головку в міру зміни кута γ повороту заготовки (рис. 2.2).

Для розробки моделі формування огранки при обробці глибокого отвору нежорсткій гільзи гідроциліндра прийняті наступні допущення:

- 1) Всі елементи, що розглядаються в розрахункових схемах, а саме - верстат, заготовка, борштанга, лунети, розточна головка з направляючими шпонками, є абсолютно твердими;
- 2) Контакт напрямних шпонок з обробленою поверхнею є точковим;
- 3) Відхилення Δ осі отвору заготовки від прямолінійності прийнято постійно змінюваних по косинусоїдальному закону;
- 4) Напрямні шпонки є шарнірно-рухомими опорами і мають одну складову сили реакції N ;
- 5) Жорсткість пружних підвісів напрямних шпонок підпорядковується лінійній залежності величини від деформації;
- 6) Сила F підтискання напрямних шпонок розташована в площині шпонок і спрямована перпендикулярно горизонтальній осі симетрії розточної головки.

За початок відліку прийнятий момент, коли центр мас розточної головки знаходиться в точці, де вісь отвору заготовки володіє максимальним відхиленням Δ від прямолінійності. Тоді 4 направляючі шпонки, розташовані зі зміщенням 90° , контактують з криволінійною ділянкою заготовки зовнішніми вершинами призм, так як знаходяться на вигнутій частині дуги (рис. 2.2), а решта 4 контактують внутрішніми кутами призм, так як знаходяться на увігнутої частині.

При обертанні заготовки положення кожної з направляючих шпонок змінюється, що призводить до зміни величини деформації забезпечує пружний підвіс напрямних шпонок і сили. Виходячи з цього, значення сили F поджатия кожної з шпонок визначається за виразом [15]:

$$F = \frac{4Es}{(1-\mu^2)YD_1^2} \left[(s_{\max} n - s) \left(s_{\max} n - \frac{s}{2} \right) t_1 + t_1^3 \right], \quad (2.1)$$

де E – модуль пружності; s – поточне положення напрямної шпонки щодо

початкового; Y – коефіцієнт Пуассона; Y – коефіцієнт, що залежить від типорозміру пружини; D_l – зовнішній діаметр пружини; s_{max} – максимальна деформація пружини; n – кількість пружин в пакеті; t_l – товщина пружини.

На початку відліку сили F кожної з чотирьох передніх направляючих шпон (однакові і рівні силі пакету пружин ($F_i = F_0 / 4$)). Аналогічно, для чотирьох задніх направляючих шпонок. Сили пакету пружин передніх і задніх на-правляючих шпонок рівні.

Згідно введеному допущенню про розподіл відхилення Δ осі отвору заготовки від прямолінійності за косинусоїдальному закону, поточне положення s пружини, пов'язане зі зміною значення відхилення від прямолінійності на ділянці l , з подачі S можна описати вираженням: $\Delta_t = \Delta \cos(\pi St / l)$, а по мірі обертання заготовки зі швидкістю ω вираженням: $\Delta_p = \Delta_t \cos(\omega t + \beta)$, де β – кутове положення площини, в якій знаходяться розглянуті напрямні шпонки.

Для описаних у розділі 1.2.2 технологічних режимів обробки глибокого отвору гільзи гідроциліндра телескопіювання стріли автокрана, зміна положення напрямних шпонок по обертанню заготовки $\omega 12$ рад/с (Рисунок 2.3) відбувається значно швидше, ніж по подачі $S = 113$ мм/хв, отже, зміною сили F зажима напрямних шпонок по довжині заготовки, пов'язаних з подачею інструменту, при розробці математичної моделі формування ограновування можна знехтувати.

Досить скласти рівняння дії системи сил і моментів при повороті заготовки на один оборот для оцінки впливу похибок заготовки на формування ограновування глибокого отвору.

Тоді положення напрямної шпонки s у формулі (2.1) визначено як:

$$s = \Delta \cos(\gamma + \beta), \quad (2.2.)$$

де $\gamma = \omega t$ – поточний кут повороту заготовки; β - кутове положення площини, в якій знаходяться розглянуті напрямні шпонки.

В кожній площині, що проходить через можливу точку контакту

направляючої шпонки з поверхнею заготовки (рис. 2.4), діє результуюча сила піджиму, що дорівнює різниці сил піджиму F_i опозитних напрямних шпонок. Проекції цих результуючих сил на площину ОУ (площина різців) (рис. 2.4) позначені в площинах:

$$1 - F_{rez1y};$$

$$2 - F_{rez2y};$$

$$3 - F_{rez3y};$$

$$4 - F_{rez4y}.$$

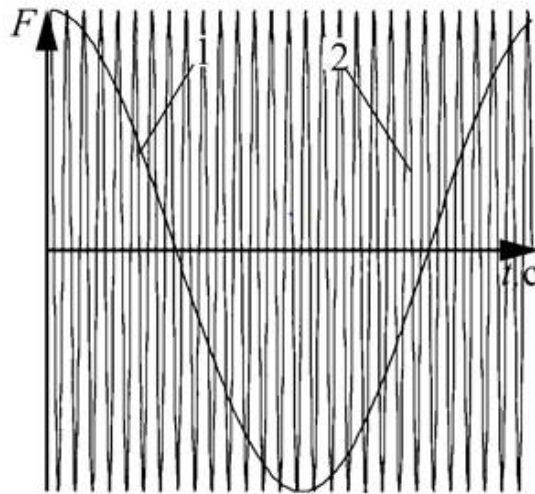


Рисунок 2.3 - Зміна сили F підтискання направляючої шпонки:

1 - подача S інструменту; 2 – обертання ω заготовки

У площині 5 присутній результуюча сила $Prez_y$ різання для шкірного з різців: $Prez_y = Py_1 - Py_2$ (рис. 2.4).

Різниця сил різання виникає rez у y_1 y_2 при відхиленні осі розточної голівки на кут φ через зміни глибини різання і може бути описана функцією $\delta(\varphi) = \tan(\varphi) l_\delta / 2$, де φ - кут нахилу розточної голівки; l_δ - відстань від центру мас розточної голівки до площини різців (рис. 2.5). Тоді результуючі складові сил різання $Prez_x$, $Prez_y$, $Prez_z$ для кожного з різців визначаються, виходячи з виразів:

$$\begin{aligned}
 P_{rez_x} &= 339 \cdot S^{0,5} \cdot v^{-0,4} [(0,5t_p + \delta(\varphi)) - (0,5t_p - \delta(\varphi))], \\
 P_{rez_y} &= 243 \cdot S^{0,6} \cdot v^{-0,3} \cdot [(0,5t_p + \delta(\varphi))^{0,9} - (0,5t_p - \delta(\varphi))^{0,9}], \\
 P_{rez_z} &= 300 \cdot S^{0,75} \cdot v^{-0,15} \cdot [(0,5t_p + \delta(\varphi)) - (0,5t_p - \delta(\varphi))].
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

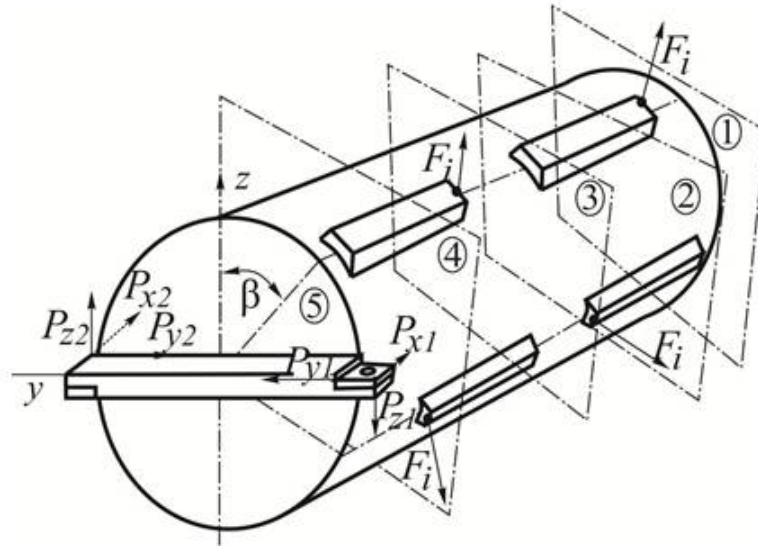


Рисунок 2.4 - Розрахункова схема розточної голівки з нанесеними площинами, в яких розташовані можливі точки контакту напрямних шпонок з оброблюваною поверхнею

Зважаючи на малість величини кута φ нахилу осі розточної голівки, вирази (2.3) мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 P_{rez_x} &= 339 \cdot S^{0,5} \cdot v^{-0,4} [(0,5t_p + \varphi) - (0,5t_p - \varphi)], \\
 P_{rez_y} &= 243 \cdot S^{0,6} \cdot v^{-0,3} \cdot [(0,5t_p + \varphi)^{0,9} - (0,5t_p - \varphi)^{0,9}], \\
 P_{rez_z} &= 300 \cdot S^{0,75} \cdot v^{-0,15} \cdot [(0,5t_p + \varphi) - (0,5t_p - \varphi)].
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Складова сили різання P_{rez_x} на порядок менше інших складових і її значенням у рамках даної схеми можна нехтувати. Рівняння суми моментів усіх сил в проєкціях на площину різців OY (рис. 2.5, а) відносно центру мас розточувальної голівки O має вигляд:

$$M_o = (F_{rez1y} - F_{rez4y}) \cdot 0,5(l_M + e) + (F_{rez3y} - F_{rez2y}) \cdot 0,5(l_M - e) + (N_1 + N_2) \cdot 0,5l_M - P_{rez_y} \cdot 0,5l_6, \quad (2.5)$$

де F_{rez1y} , F_{rez2y} , F_{rez3y} , F_{rez4y} - результуючі сили підтискання в кожному поперечному перерізі головки (рис. 2.5); l_M - відстань між центрами напрямних шпонок; e - ширина направляючої шпонки; N_1 , N_2 - сили реакції заготовки; P_{rez_y} - різниця складової P_y ; l_6 - довжина розточної головки.

Вираз для суми моментів, що діють в точках А і В (рис. 2.5, а) і спроектованих на площину ОУ, записано як:

$$-F_{rez1y} \cdot (l_M + 3e/2) - N_1 \cdot (e + l_M) + F_{rez2y} \cdot (l_M + e/2) + F_{rez3y} \cdot e/2 + F_{rez4y} \cdot e/2 + P_{rez_y} \cdot 0,5 \cdot (l_6 - l_M - e) = 0, \quad (2.6)$$

$$-F_{rez1y} \cdot e/2 - F_{rez2y} \cdot e/2 - F_{rez3y} \cdot (l_M + e/2) - N_2 \cdot (l_M + e) + F_{rez4y} \cdot (3e/2 + l_M) + P_{rez_y} \cdot (l_6 - e/2) = 0, \quad (2.7)$$

Підставивши з (2.6) і (2.7) N_1 і N_2 в (2.5), з урахуванням (2.4), отримаємо вираз для результуючого моменту M_o в площині різців ОУ. Отриману залежність зміни моменту M_o від повороту заготовки на один оберт для різних значень відхилення Δ від прямолінійності осі отвору заготівлі (рис. 2.6).

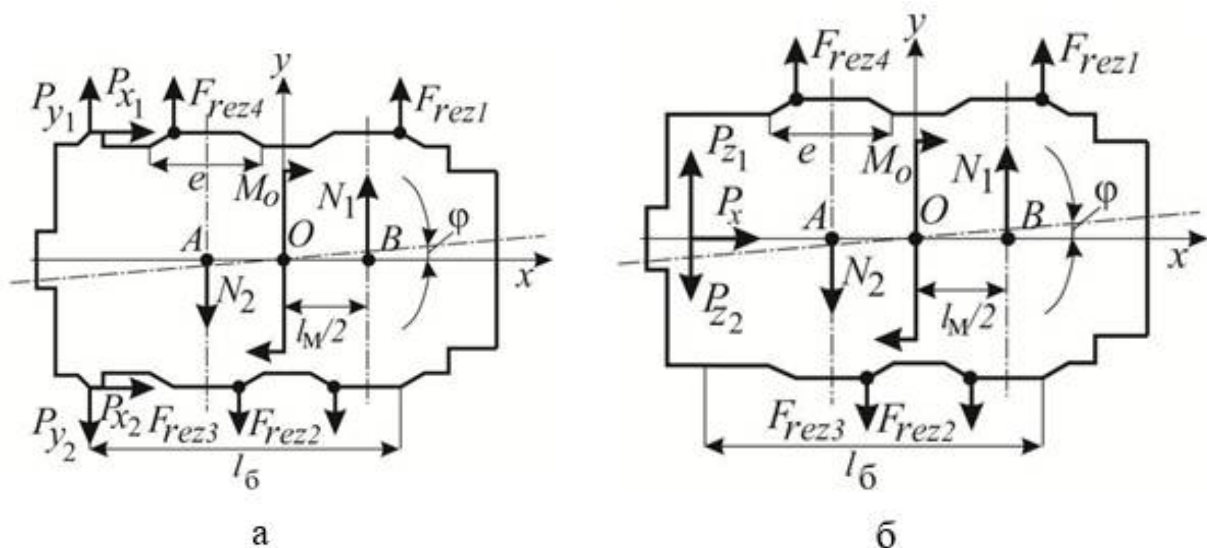


Рисунок 2.5 - Проекція сил, що діють на розточувальну головку:

а - площина різців ОУ; б – перпендикулярна ОУ площина ОZ

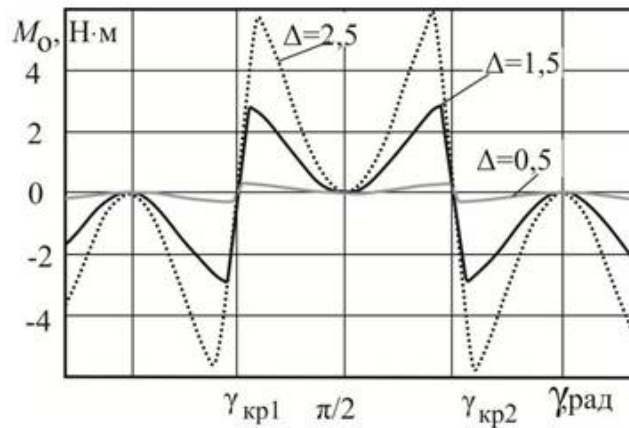


Рисунок 2.6 - Зміна результуючого моменту M_0 сил, що діють в центрі мас розточної голівки за один оберт обертання заготовки

З графіка (рис. 2.6) видно, що при значеннях кута повороту заготовки $\gamma = \gamma_{кр1}$ і $\gamma = \gamma_{кр2}$ відбувається стрибкоподібна зміна величини і знаку моменту. збільшення відхилення Δ від прямолінійності осі отвору заготовки призводить до збільшення амплітуди цього "стрибка".

З урахуванням того, що до обробки допускаються сурми, відхилення Δ яких досягає 2 мм, можна припустити, що описане зміна моменту присутній у більшості випадків обробки.

Отримане зміна моменту пов'язано з тим, що за один оборот повороту заготівлі двічі виникає момент звернення в нуль парі сил F_0 позитно розташованих напрямних шпонок. Це відбувається, коли описані шпонки проходять положення (рис. 2.7), де їх підтискання або дорівнює початковому, або дорівнює за величиною і протилежно по напрямку один одному, тобто сумарна сила дорівнює нулю.

Якщо розглянути дію сил в проекції на площину різців, то ці моменти виникають при повороті заготівлі на кут, $\gamma = \gamma_{кр1}$ і $\gamma = \gamma_{кр2}$ (рис. 2.7). У момента досягнення шкiрного з цих кутів точки контакт та кожної з шпонок змінюються на протилежні і результуючий момент сил M_0 , приведений до центра мас розточної голівки, змінює знак на протилежний.

Частота цієї стрибкоподібної зміни моменту дорівнює подвоєною частоті обертання заготовки. Це періодичне ступеневу зміна результуючого моменту сил M запропоновано апроксимувати східчастою функцією (рис. 2.8). Тоді правомірно уявити стрибкоподібне зміна моменту сил M запропоновано апроксимувати східчастою функцією (рис. 2.8).

Тоді правомірно уявити стрибкоподібне зміна моменту сил M_0 у вигляді набору n гармонік, з частотами, кратними подвоєній частоті обертання заготовки. Серед частот, що входять в таке розкладання, імовірно, присутні близькі, або кратні частоті власних коливань розточної голівки, що є умовою резонансу, і призводить до збільшення амплітуди поперечних коливань розточної голівки.

Ці коливання супроводжуються зміною положення вершин різців відносно заданого, що веде до нерівномірності зняття припуску, появи моменту сил різання.

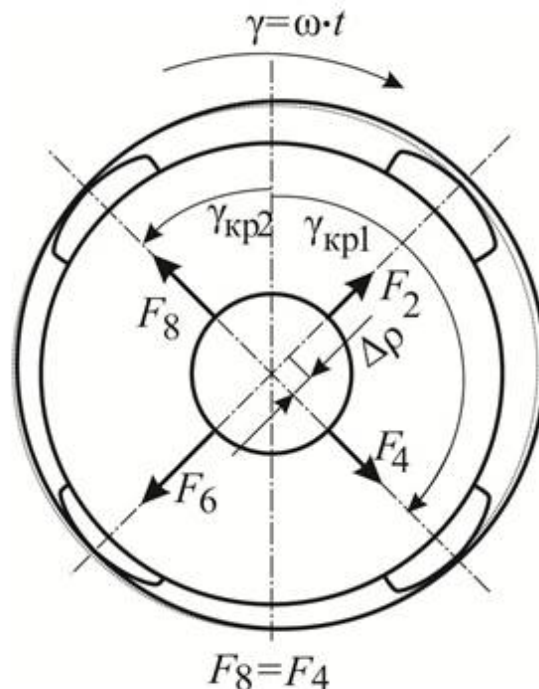


Рисунок 2.7 - Критичні кути повороту заготовки $\gamma = \gamma_{кр1}$ і $\gamma = \gamma_{кр2}$

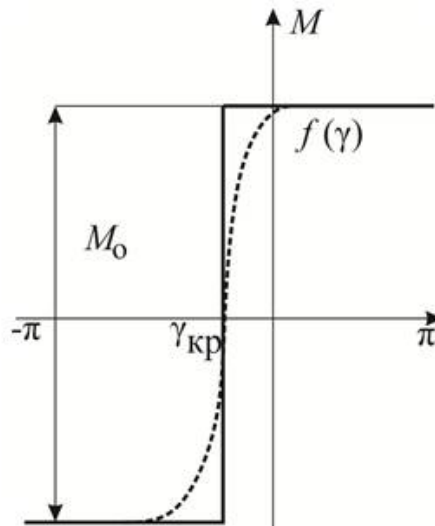


Рисунок 2.8 - Зміна величини моменту сил M_0 при повороті заготовки на кут $\gamma = \pi$

Момент сил різання впливає на величину сили F підтискання для кожної з напрямних шпонок і сил реакцій з боку заготовки, і на величину моменту M .

$$J\ddot{\varphi} + k_d\dot{\varphi} + M_F\varphi = f(\gamma_{кр}), \quad (2.8)$$

де J - момент інерції розточний головки; φ - відхилення осі розточної головки від заданого положення в поточний момент часів t ; $M_F = l_m \cdot F_0$ - момент сили пружного підвісу напрямних шпонок щодо центру мас розточної головки (від сили F_0); k_d - коефіцієнт демпфірування; $f(\gamma_{кр})$ - результуючий момент сил, що діють на розточувальну головку в момент поворота заготовки на кут $\gamma_{кр}$.

Апроксимуюча функція зміни моменту M_0 (рис. 2.8) має вид:

$$f(\gamma) = -M_0 \cdot \frac{\gamma - \gamma_{кр}}{|\gamma - \gamma_{кр}|}, \quad (2.9)$$

де M_0 - результуючий момент сил, що діють на розточувальних головку, обчислений з (2.5), $\gamma = \omega t$ - поточний кут повороту заготовки при подвоєною заданої ω швидкості обертання заготовки, $\gamma_{кр}$ - кут повороту заготовки, при якому точка контакту направляючої колодки переходить на протилежну вершину призми.

Рішення рівняння (2.8) в околицях кута $\gamma_{кр}$ дозволить знайти амплітуду і частоту коливань розточної головки.

При розкладанні в тригонометричний ряд Фур'є функція $f(\gamma)$, визначена на проміжку $[-\pi.. \pi]$, має вигляд:

$$f(\gamma) = \frac{1}{2} a_0 + b_1 \sin(\gamma) + b_2 \sin(2\gamma) + b_k \sin(k\gamma) + \dots + b_n \sin(n\gamma), \quad (2.10)$$

де
$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\gamma) dt, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\gamma) \sin(k\gamma) dt$$
 - коефіцієнти Фур'є

З урахуванням стандартних позначень: $\sqrt{c/J} = \omega_0^2$ частота власних коливань розточн головки, $h_0 = a_0 / J$, $H_0 = b_k / J$, $\xi = k\delta / J$ і вирази (2.10), рівняння (2.8) приймає вигляд:

$$\ddot{\phi} + \omega_0^2 \phi + \xi \dot{\phi} = \frac{1}{2} h_0 + \sum_{k=1}^n H_0 \cdot \sin(k\gamma). \quad (2.11)$$

Приватне рішення диференціального неоднорідного рівняння другого ступеня з правою частиною у вигляді ряду Фур'є має вигляд:

$$\frac{1}{2} h_0 + \sum_{k=1}^n \frac{H_0}{\omega_0^2 - k^2 \omega^2} \cdot \sin(k\omega t). \quad (2.12)$$

Вираз (2.12) описує процес поперечних коливань розточної голівки при стрибкоподібному зміні моменту M_0 , що відбувається з подвоєною частотою ω обертання заготівлі. З виразу (2.12) видно, що рівність значення $k\omega$ величиною ω_0 викликає резонанс на k -й гармоніці. Однак, так як k - ціле число, а відношення ω_0/ω залежить від обраних технологічних параметрів, конструкції інструменту і може бути нецілим, то максимальна амплітуда коливань розточної голівки буде визначатися амплітудою і частотою найближчій цілої до обчисленого k гармоніці. Визначення цього значення і його близькості до резонансної гармоніці $k_{рез}$ дозволити скорегувати параметри технологічного

процесу для роботи динамічної системи в зоні, далекій від резонансу, ніж підвищить точність обробки глибокого отвору.

Частота $\mu = k\omega$ і амплітуда $A = H_0 (\omega_0^2 - k^2\omega^2)^{-1}$ коливань визначають величину H і ступінь m огранки поперечного перерізу глибокого отвору в поточному перетині наступним чином:

$$H = A \sin(k \cdot \gamma + \Theta), \quad (2.13)$$

де k - відношення частоти поперечних коливань $k\omega$ розточної головки до частоти обертання заготовки ω , γ - кут повороту заготовки; Θ - зсув фази коливань. Таким чином, після виконання необхідних перетворень з урахуванням введених позначень, вираз (2.13) набуває вигляду:

$$H = \frac{JM_0 \sin(\gamma_{кр} \cdot k) \sin(k)}{\omega^2 (k_\omega^2 - k^2)}, \quad (2.14)$$

де $k_\omega = \omega_0 / \omega$ - відношення частоти власних коливань розточної головки до подвоєною частоті обертання заготовки; k - номер гармоніки розкладання в ряд Фур'є.

2.2 Вплив похибки заготовки на величину ограновування глибокого отвору

Для конструкції розточної головки, описаної в розділі 1.2.1, виробу, описаного в розділі 1.2.2, приймемо в якості розрахункових наступні параметри: $l = 1$ м - для ділянки заготовки, на якій прийнято відхилення Δ від прямолінійності; $l_6 = 0,147$ м; $l_M = 0,05$ м; $D_0 = 0,126$ м; $e = 0,043$ м; $D_1 = 0,045$ м - зовнішній діаметр тарільчастої пружини; $D_2 = 0,0224$ м - внутрішній діаметр тарільчастої пружини; $t_1 = 0,0115$ м - товщина пружини; $Y = 0,69$ - безрозмірний коефіцієнт для розрахунку жорсткості пружини; $s_{max} = 0,0145$ м - максимальна деформація однієї пружини; $\omega = 12$ рад/с - кутова швидкість обертання заготовки; $S = 113$ мм/хв - подача інструменту. Величина відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки $\Delta = 2$ мм відповідає максимально допустимій для обробки гільзи гідроциліндра.

Визначено величини H і ступінь k огранки глибокого отвору при варіюванні наступних параметрів: Δ - відхилення від прямолінійності осі отвору; величини відносини $k_{\omega} = \omega_0/\omega$; жорсткості пружного підвісу напрямних шпонок за допомогою зміни кількості тарілчастих пружин пакеті; довжини напрямних шпонок. Значення H слід розуміти як максимальне відхилення отриманого діаметра отвору від необхідного $d = 125$ мм.

Значення H порівнюють з верхнім граничним відхиленням, яке для даного виробу становить 0,01 мм. Чисельні рішення рівнянь (2.3 - 2.14) виконані з використанням інженерного програмного комплексу Maple.

Отримано характеристики (рис. 2.9) величини H огранки глибокого отвору для близьких до $k_{\omega} = \omega_0/\omega$ гільзи гідроциліндра телескопування гармонік. На графіку (рис. 2.9) показані значення величини H огранки для отриманого співвідношення $k_{\omega} = 7,8$ розглядаваної гільзи і - для поблизу-ких значень k , рівних 5,6,7 і 8. Для $k = 8$, максимально близького до величині відношення $k_{\omega} = 7,8$, спостерігається найбільш різке зростання величини огранки H глибокого отвору для досліджуваних $\Delta \in [0 \dots 2,5]$ мм відхилень від прямолінійності осі отвору заготовки.

Для похибки заготовки $\Delta = 2$ (Максимально допустимої похибки для обробки) отримано значення $H = 0,025$ мм, що перевищує допустиме відхилення від круглості готового виробу 0,01 мм. Досягнення необхідного відхилення від круглості можливо при відхиленні осі отвору заготовки $\Delta \leq 1,85$ мм. Ступінь огранки (рис. 2.10) визначає найближче цілим до $k_{\omega} = \omega_0/\omega$ і побудована для $k = 8$, $k = 12$.

Однак при розрахунку амплітудно-частотної характеристики (рис. 2.11) встановлено, що забезпечення відхилення від прямолінійності $\Delta \leq 1,85$ мм осі отвору заготовки є недостатнім для досягнення необхідного відхилення від круглості, так як збільшення H огранки спостерігається на декількох гармоніках. Для відхилення осі отвору заготовки $\Delta = 1,85$ мм спостерігається

п'ять резонансних гармонік, які призводять до ступеня k огранки отвору 10, 5, 4, 2 і 1.



Рисунок 2.9 - Залежність величини H огранки глибокого отвору від відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки при значеннях k близьких до $k_\omega = 7,8$

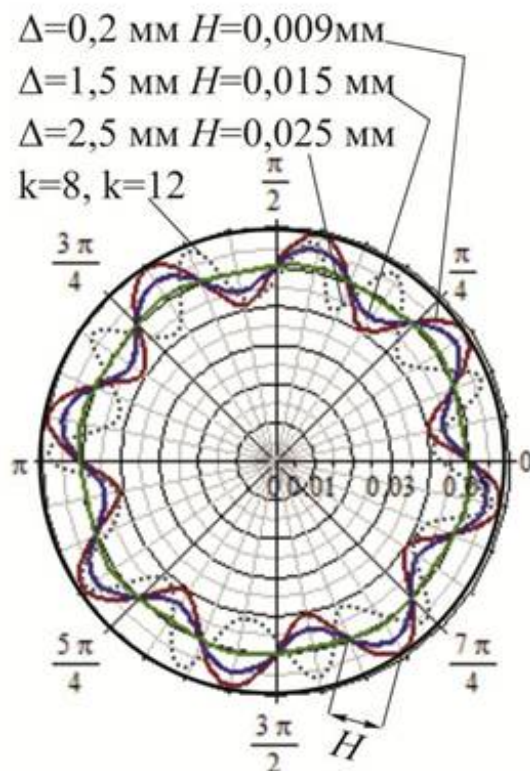


Рисунок 2.10 - Величина H огранки глибокого отвору при деяких значеннях Δ відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки.

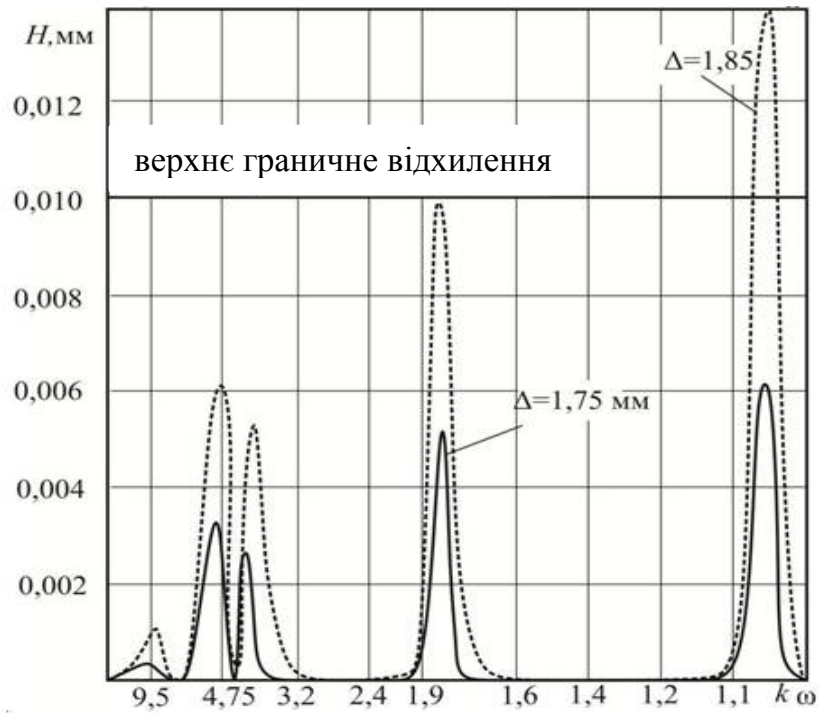


Рисунок 2.11 - Залежність величини H огранки глибокого отвору при зміні співвідношення $k\omega = \omega_0 / \omega$ для $\omega_0 \in [20 \dots 200]$ рад/с

На величину огранки в великій мірі впливає жорсткість пружного підвісу направляючої шпонки (рис. 2.12), яка забезпечується набором тарілчастих пружин.

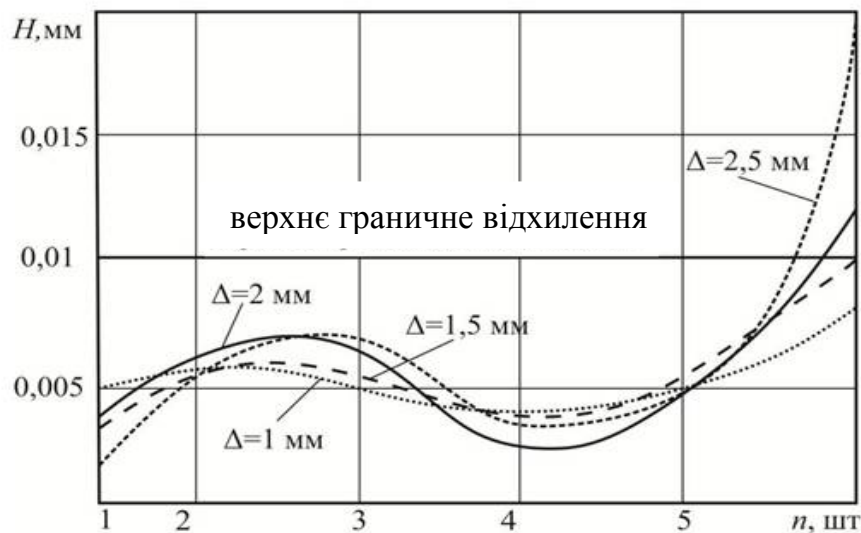


Рисунок 2.12 - Вплив кількості пружин в складі пружного підвісу напрямних шпонок на величину H огранки глибокого отвору при деяких значеннях Δ відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки

Отримано залежність зміни величини H огранки глибокого отвору при зміні довжини e направляючої шпонки (рис. 2.13), яка дозволяє визначити, що довжина направляючої шпонки $e > 35$ мм дозволяє мінімізувати величину огранки.

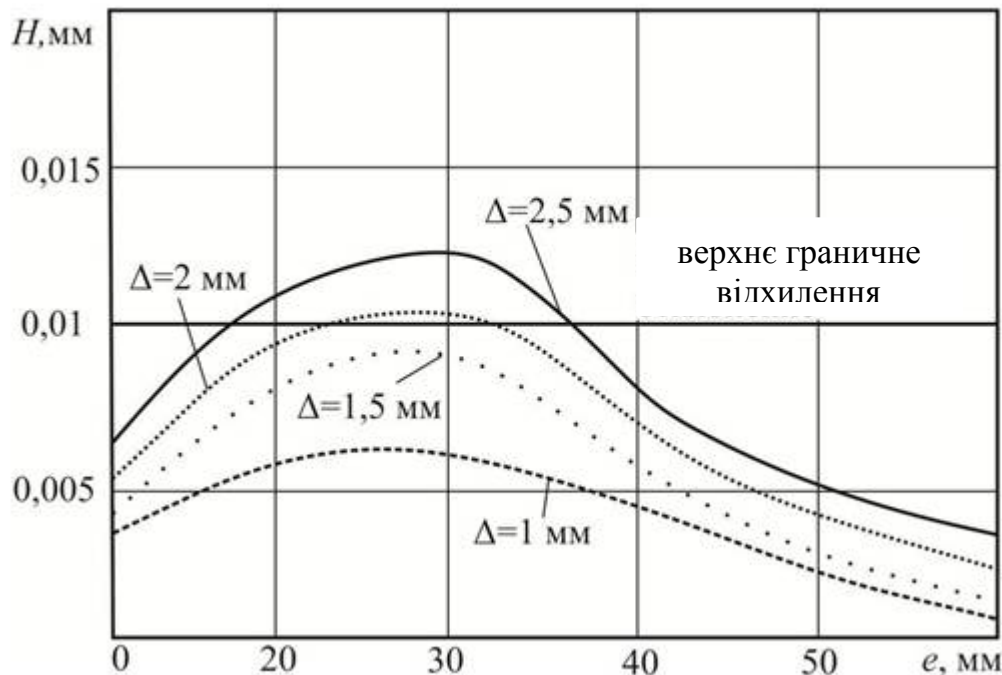


Рисунок 2.13 - Вплив довжини e направляючої шпонки на величину H огранки глибокого отвору при деяких значеннях Δ відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки

Так як огранювання не збільшується при подальшому збільшенні довжини e , швидше за все положення точок контакту не змінюється, тобто контакт відбувається по одній з вершин призми. Отже, довжина направляючої шпонки, що забезпечує мінімальну величину H огранки глибокого отвору, лежить в діапазоні $e \in [35..50]$ мм при даній конструкції розточної головки.

2.3 Підходи до мінімізації огранки поперечного профілю глибокого отвору

Як показано на рис. 2.14, величина поточного відношення k може перебувати праворуч або ліворуч від резонансної гармоніки, що визначають

виходячи з знака виразу:

$$k_{\omega} - k_{рез} \quad (2.15)$$

При від'ємному значенні величини (2.15) (рис. 2.14) дана динамічна система знаходиться в дорезонансній зоні, при позитивному - в пострезонансній. Абсолютне значення (2.17) визначає близькість системи до резонанса, і отже, амплітуду коливань розточної головки. Ступінь огранки при цьому визначає найбільш ціле до k_{ω} .

Визначення поточного режиму роботи та напрямки зміни параметрів запропоновано здійснювати за алгоритмом (рис. 2.15).

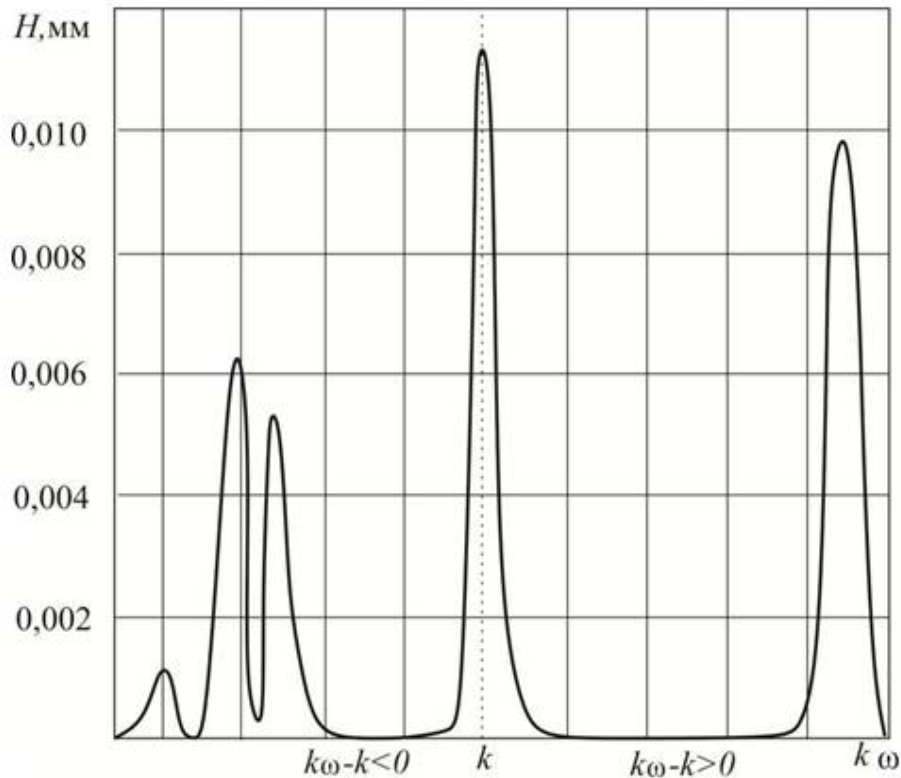


Рисунок 2.14 - ЛАЧХ формування огранки глибокого отвору

На першому кроці необхідно обчислити $k_{рез}$. Для чого, виходячи з результату розкладання в ряд Хур'є стрибкоподібного зміни моменту M_0 , визначають гармоніку, частота якої найбільш близька до частоті $\omega_{власних}$ коливань розточної голівки. Ця k -а гармоніка приводить до виникнення

резонансу в системі, збільшення амплітуди коливань розточної голівки і до ограновування глибокого отвору.

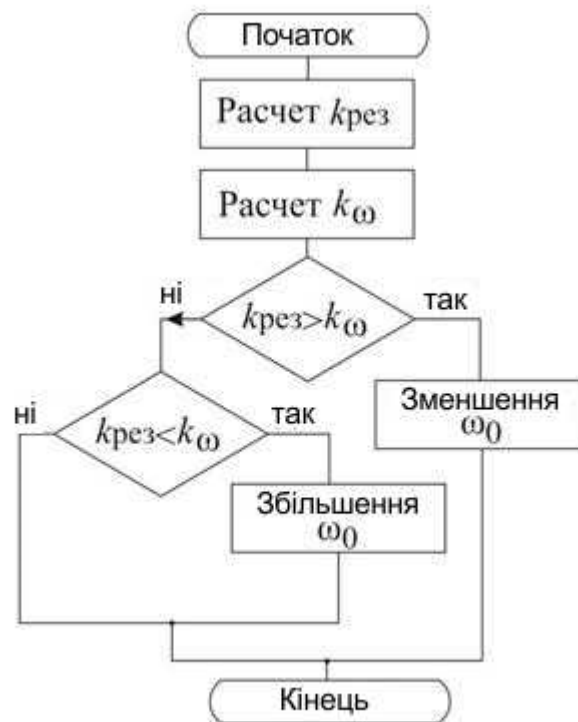


Рисунок 2.15 - Алгоритм вибору напрямку зміни частоти ω_0 власних коливань розточної голівки

На наступному етапі обчислюють відношення частот $k_\omega = \omega_0 / \omega$, де ω - подвоєна частота обертання заготовки. величину k_ω округлюють до найближчого цілого і порівнюють з $k_{рез}$. якщо $k_{рез} > k_\omega$, То система працює в дорезонансному режимі і для запобігання резонансу необхідно будь-яким способом зменшити k_ω .

Так як частота ω вимушених коливань є заданою і визначається режимом обробки, єдиним керованим параметром є частота ω_0 власних коливань розточної голівки. Для зменшення зазначеного співвідношення ω_0 потрібно зменшити. якщо $k_{рез} < k_\omega$, то система працює в пострезонансному режимі, і для запобігання резонансу необхідно збільшити k_ω , отже, збільшити ω_0 . При зміні вказаного співвідношення необхідно переконатися, що нове значення k_ω знаходиться досить далеко від наступної резонансної гармоніки.

Одним із способів зміни частоти власних коливань системи є зміна її жорсткості, що може бути досягнуто зміною жорсткості пружного підвісу напрямних шпонок. Так як їх жорсткість залежить від параметрів тарілчастих пружин, що входять до складу розточної головки, то необхідна частота власних коливань може бути досягнута шляхом зміни кількості тарілчастих пружин або підбору пружин з іншого жорсткістю. Як показано на рис. 2.12, змінювати кількість пружин можливо тільки в строго визначеному діапазоні, отже, цей метод не завжди забезпечує необхідний результат.

Виходячи з результатів розрахунку за запропонованою математичної моделі зроблено висновок, що мінімізувати огранювання глибокого отвору можливо при відсутності стрибкоподібного зміни моменту сил M_0 , що діє в центрі мас розточної голівки. Тоді рух розточної голівки може бути описане замість (2.11) наступним виразом:

$$\ddot{\varphi}(T) + \omega_0 \dot{\varphi}(T) + \xi \varphi(T) = H_0 \cdot \sin(\omega t)$$

Характер руху розточної головки в цьому випадку визначає величина демпфірування ξ . Граничними умовами є рівність нулю відхилення осі розточної головки в початковий момент часу $t=0$ і при повному обороті заготовки. У Зацим від величини демпфірування, коливання мають різну сталу амплітуду.

Іншим підходом до мінімізації огранки є зміна форми напрямної шпонки. Призматичну форму поздовжнього перерізу запропоновано замінити на форму, при якій напрямна шпонка має жолобник в поздовжньому перерізі. Очікуваним технічним результатом є зниження амплітуди поперечних коливань розточної головки.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ПОХИБОК ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ ОТВОРІВ ПРИ РОЗТОЧУВАННІ

В результаті огляду основних похибок поздовжнього профілю отвору, що виникають при розточування нежорстких гільз гідроциліндрів, і причин їх утворення, наведеного в розділі 1.3 встановлено, що виникнення бочкоподібності і седлообразно глибокого отвору пов'язано зі зміною взаємного положення розточної головки і заготовки в процесі обробки.

Однак механізм утворення похибок поздовжнього профілю отвору в літературі не наводиться. Відомі математичні моделі, розглянуті в розділі 1.5, також не описують механізм утворення седлообразно і бочкоподібності поздовжнього профілю глибокого отвору при його розточування.

3.1 Розробка математичної моделі утворення похибок поздовжнього профілю глибокого отвору при розточуванні

Для розробки математичної моделі освіти похибок поздовжнього профілю глибокого отвору прийняті, крім описаних в розділі 2.1, такі припущення:

- 1) Заготовка не має прогину між люнетами, має однакову твердість по всій довжині отвору;
- 2) Биття заготовки в люнетах відсутнє;
- 3) Жорсткість підвісу розточного оправлення розглядається як послідовне з'єднання жорсткості підвісів Борштанги і напрямних шпонок;
- 4) Центр мас розточного оправлення розташований на його горизонтальній осі симетрії;
- 5) У момент початку розрахунку центр коливань розточного оправлення збігається з центрами коливань і мас розточної головки.

У рамках прийнятої розрахункової схеми (рис. 3.1) розглянуто рух розточного оправлення по ділянці заготівлі довжиною l_{yc} , вісь отвору якої має відхилення Δ від прямолінійності.

При цьому розточна оправка складається з розточної голівки і частини Борштанги довжиною $l_{бор}$, яка в даний момент години знаходиться в межах розглянутої ділянки. У момент качану розрахунку розточна голівка знаходиться в отворі заготовки, а борштанга має початкову довжину $l_{бор} = l_0$, яка знаходиться у вертлюзі.

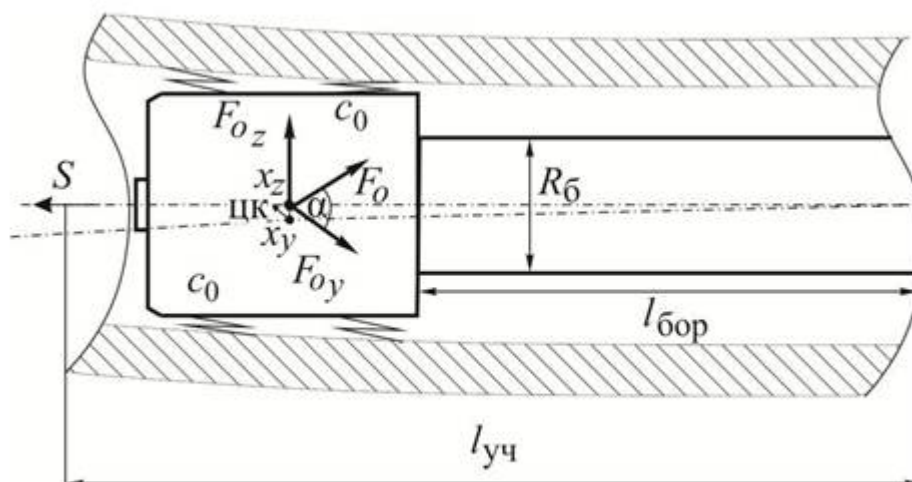


Рисунок 3.1 - Утворення похибки Δ_e поздовжнього профілю глибокого отвору при розточуванні:

цк - центр коливань розточної оправки; S - подача; F_{0y} , F_{0z} - результуючі сили, що діють в центрі мас розточної голівки; x_y , x_z - координати зсуву цк; c_0 - жорсткість пружного підвісу напрямних шпонок розточної голівки; α_k - площина коливань; $R_б$ - радіус борштанги; $l_{бор}$ - довжина частини борштанги, що знаходиться в отворі заготовки в даний момент часу; $l_{уч}$ - довжина розглянутої ділянки заготовки

Закінченням розрахунку вважається момент, коли довжина борштанги стає рівною довжині розглянутої ділянки заготовки $l_{уч} = l_{бор}$. Зміна вильоту борштанги $l_{бор}$ по мірі подачі S інструменту призводить до зміни жорсткості її підвісу $c_{бор}$ і частоти ω_i власних коливань розточної оправки. При цьому в центрі мас розточної голівки діє сила F_0 , яка є результуючою всіх сил, що діють на розточувальну голівку, згідно з розрахунковою схемою, наведеною в розділі 2.1. Вона також є обурюючою при русі розточної оправки уздовж розглянутої

ділянки заготовки.

Виходячи з припущення про абсолютну твердість розточної оправки і про розташування центру мас інструменту на горизонтальній осі його симетрії, відхилення осі інструменту визначено, як відхилення положення його центру мас. Інформація про характер зміни цього відхилення по довжині оброблюваної заготовки дозволить визначити вид і чисельне значення похибки поздовжнього профілю глибокого отвору при його розточування.

Рівняння руху центру мас розточної оправки має вигляд:

$$\begin{cases} m_{\text{и}} \ddot{x}_y + c_{\text{и}} (x_y + \Delta_{e_{0y}}) = F_{O_y}; \\ m_{\text{и}} \ddot{x}_z + c_{\text{и}} (x_z + \Delta_{e_{0z}}) = F_{O_z}, \end{cases} \quad (3.1)$$

де $m_{\text{и}} = m_{\text{г}} + m_{\text{бор}}$ - маса розточної оправки, яка складається з мас $m_{\text{г}}$ розточної головки і змінюється по мірі подачі $m_{\text{бор}}$ борштанги.

При цьому $m_{\text{бор}} = \pi R_{\text{б}2} l_{\text{бор}} \rho$, де $R_{\text{б}}$ - радіус Борштанги; $l_{\text{бор}} = St + l_0$ - довжина борштанги в даний момент часу; ρ - щільність матеріалу борштанги; x_y - відхилення центру мас інструменту в площині OY; x_z - відхилення центру мас інструменту в площині OZ; $c_{\text{и}}$ - жорсткість підвісу розточної оправки; F_{O_y} , F_{O_z} - результуюча сила, що діє в центрі мас розточної головки в площині OY і OZ відповідно, приведена до центру мас інструменту; $\Delta_{e_{0y}}$, $\Delta_{e_{0z}}$ - проекції ексцентриситету осі західного отвору на осі y і z відповідно.

Величину відхилення Δ_e форми поздовжнього профілю отвору з системи рівнянь (3.1) визначають за виразом:

$$\Delta_e = \sqrt{x_y^2 + x_z^2} \quad (3.2)$$

Для визначення жорсткості $c_{\text{и}}$ підвісу розточувальної оправки розглянута еквівалентна розрахункова схема, по якій жорсткість $c_{\text{и}}$ розглядається як послідовне з'єднання жорсткостей c_0 пружного підвісу направляючих шпонок і борштанги c . Таким чином, жорсткість $c_{\text{и}}$ підвісу розточувальної борштанги визначають за наступним виразом:

$$\frac{1}{c_{\text{н}}} = \frac{1}{c_0} + \frac{1}{c_{\text{бор}}} = \frac{c_{\text{бор}} + c_0}{c_{\text{бор}}c_0}, c_{\text{н}} = \frac{c_{\text{бор}}c_0}{c_{\text{бор}} + c_0}, \quad (3.3)$$

де c_0 - жорсткість пакета тарілчастих пружин, що визначає жорсткість пружного підвісу напрямних шпонок, яку згідно визначають як:

$$c_0 = \frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{s^3}{YD_1^2} \cdot \left[\left(\frac{s_{\text{max}}n}{t_1} \right)^2 - 3 \frac{s_{\text{max}}n}{t_1} \cdot \frac{s}{t_1} + \frac{3}{2} \left(\frac{s}{t_1} \right)^2 + 1 \right], \quad (3.4)$$

де E - модуль пружності; s - поточний стан направляючої шпонки щодо початкового; μ - коефіцієнт Пуассона; Y - розрахунковий коефіцієнт, що залежить від типорозміру пружини; D_1 - зовнішній діаметр пружини; s_{max} - максимальна деформація пружини; t_1 - товщина пружини; n - кількість пружин в пакеті.

Жорсткість борштанги $c_{\text{бор}}$ визначена як жорсткість циліндричного стрижня, довжина якого $l_{\text{бор}}$ змінюється по мірі подачі S інструменту. Вираз для $c_{\text{бор}}$ має вигляд :

$$\begin{cases} c_{\text{бор}} = 12EJ_c / (l_0^3), \text{ при } t = 0, \\ c_{\text{бор}} = 12EJ_c / (l_{\text{бор}} + l_0)^3, \text{ при } t > 0, \end{cases} \quad (3.5)$$

де E - модуль пружності; J_c - момент інерції перерізу круглого стрижня, прийнятого як модель борштанги; l_0 - початкова довжина борштанги, рівна довжині борштанги, вміщеній в вертлюга; $l_{\text{бор}}$ - довжина ділянки борштанги, що знаходиться всередині розглянутого ділянки заготовки $l_{\text{бор}} = S \cdot t$, де S - подача інструменту, t - поточний час.

Вираз (3.3) з урахуванням (3.5) набуває вигляду:

$$c_{\text{н}} = \frac{12EJ_c c_0}{6EJ_c + c_0(l_0 + l_{\text{бор}})^3} = \frac{12EJ_c c_0}{6EJ_c + c_0(l_0 + S \cdot t)^3} \quad (3.6)$$

З графіка (рис. 3.2, а) видно, що жорсткість $c_{\text{н}}$ підвісу розточної оправки знижується в 7 разів при проходженні довжини оброблюваного отвору $l_{\text{уч}} = 7$ м. Нелінійний характер зниження жорсткості пояснюється тим, що в початковий

момент часу жорсткість підвісу c_u розточної оправки визначається переважаючою жорсткістю $c_{бор}$ борштанги, так як вона має невеликий виліт (3.5), з моменту початку обробки жорсткість c_u різко знижується за рахунок збільшення вильоту борштанги. Описана зміна жорсткості c_u підвісу розточної оправки призводить до зниження частоти ω_u її власних коливань, яка визначається виразом:

$$\omega_u^2 = 12EJ_c c_0 / (6EJ_c + c_0(l_0 + S \cdot t)^3)(m_\Gamma + m_{бор}) \quad (3.7)$$

При обробці отвору на всю довжину ділянки $l_{yc} = 7$ м, частота ω_u власних коливань розточної оправки знижується в 12 разів (рис. 3.2, б). Величина складових результуючої сили F_{oy} , F_{oz} , що діють в центрі мас розточної головки, визначена, виходячи з результуючої сили підтискання напрямних шпонок, наведеної до центру мас інструменту. Результуючу силу підтискання визначають для площин OY і OZ за розрахунковими схемами, наведеними в розділі 2.1 (рис. 2.5, а, б). Для цього складено рівняння суми сил, що діють в центрі мас розточної головки:

$$F_{rez1y} - F_{rez2y} + N_1 - F_{rez3y} + F_{rez4y} - N_2 + P_{rez_y} = 0 \quad (3.8)$$

$$F_{rez1z} - F_{rez2z} + N_1 - F_{rez3z} + F_{rez4z} - N_2 + P_{rez_z} = 0 \quad (3.9)$$

Отже, сума сил F_0 визначається виразом для площині OY і OZ з відповідними індексами:

$$F_{O_y} = F_{rez1y} - F_{rez2y} - F_{rez3y} + F_{rez4y} \quad (3.10)$$

$$F_{O_z} = F_{rez1z} - F_{rez2z} - F_{rez3z} + F_{rez4z} \quad (3.11)$$

Сили реакції N_1 і N_2 визначені за умови рівності нулю моментів в точках А і В (рис. 2.5, б) для площини OY за виразами (2.6) і (2.7) для площини OZ за виразами:

$$N_1 = [F_{rez2_z}(l_M + 0,5e) + (F_{rez3_z} + F_{rez4_z})0,5e + P_{rez_z} 0,5(l_{\bar{6}} - l_M - e) - F_{rez1_z} \times (l_M + 1,5e)] / (e + l_M) \quad (3.12)$$

$$N_2 = [-F_{rez3_z}(l_M + 0,5e) + (F_{rez1_z} + F_{rez2_z})0,5e + P_{rez_z}(l_{\bar{6}} - 0,5e) - F_{rez4_z} \times (l_M + 1,5e)] / (e + l_M) \quad (3.13)$$

Значення поточного кута нахилу осі розточної головки визначають за умови рівності нулю моменту M_o сил, що діють в центрі мас розточної головки (рис. 2.5), для площини OY- визначається за виразом (2.5) для $M_o = 0$, для площини OZ за виразом:

$$M_o = (F_{rez1_z} - F_{rez4_z}) \cdot 0,5(l_M + e) + (F_{rez3_z} - F_{rez2_z}) \cdot 0,5(l_M - e) + (N_1 + N_2) \cdot 0,5l_M - P_{rez_z} \cdot 0,5l_{\bar{6}}, \quad (3.14)$$

Так як відхилення осі розточного оправлення розглядається в її центрі коливань, який переміщається у міру зміни вильоту борштанги, а результуюча сила з описаних виражень розрахована в центрі мас розточної голівки, то отримані результуючі сили F_{oy} , F_{oz} приведені до центру коливань розточної оправки, положення якої визначається з:

$$x_{цк} = [0,5m_{\Gamma}l_{\bar{6}} + m_{\bar{6}op}(l_{\bar{6}} + St + l_0)] / (m_{\Gamma} + m_{\bar{6}op}) \quad (3.15)$$

З урахуванням зміни положення центру коливань $x_{цк}$ система рівнянь (3.1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \ddot{x}_y + \omega_{и}^2(x_y + \Delta_{e_{0y}}) = F_{0y}(x_{цк} - 0,5l_{\bar{6}}) / (l_{\bar{6}op} + l_{\bar{6}})(m_{\Gamma} + m_{\bar{6}op}); \\ \ddot{x}_z + \omega_{и}^2(x_z + \Delta_{e_{0z}}) = F_{0z}(x_{цк} - 0,5l_{\bar{6}}) / (l_{\bar{6}op} + l_{\bar{6}})(m_{\Gamma} + m_{\bar{6}op}), \end{cases} \quad (3.16)$$

При цьому площина коливань визначають за виразом:

$$\alpha_K = \arcsin(x_z / x_y), \quad (3.17)$$

де α - кут, який становить площину коливань розточної голівки з площиною OY.

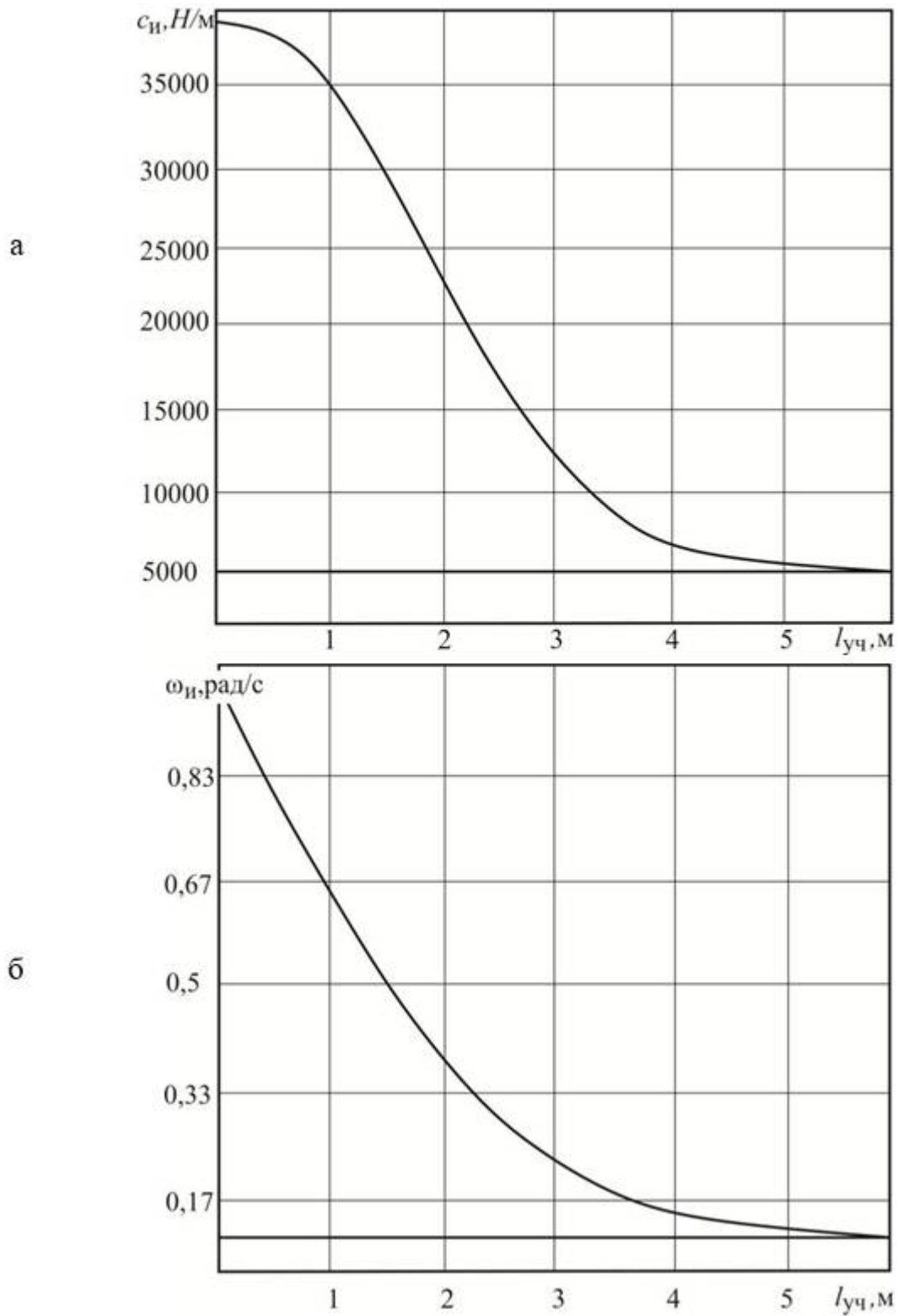


Рисунок 3.2 - Зміна величини жорсткості c_u розточної оправки в міру обробки отвору і частоти ω_u власних коливань розточної оправки

Рішенням системи рівнянь (3.16) є координати x_y і x_z відхилення Δ_e форми поздовжнього профілю отвору в перетині потокового становища центру

коливань. Характер зміни відхилення форми поздовжнього профілю отвору по довжині оброблюваного отвору вказує на вигляд похибки поздовжнього профілю глибокого отвору. Для визначення величини Δ_e запропонований наступний алгоритм (рис. 3.4).

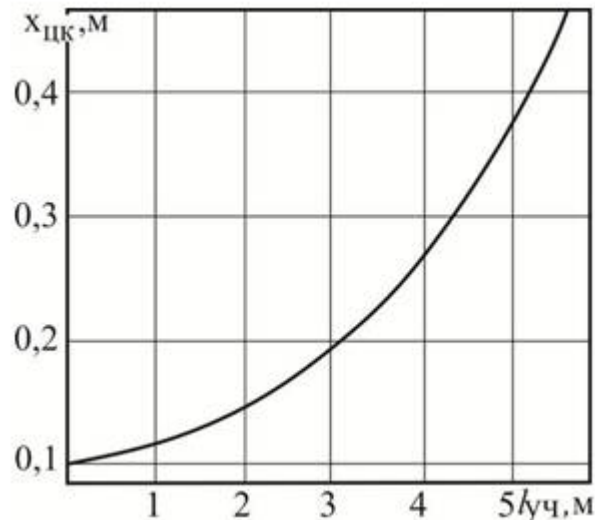


Рисунок 3.3 - Зміщення центру коливань $x_{цк}$ розточного оправлення по довжині оброблюваного отвору

Обчислення роблять у такий спосіб. У першому блоці вводять параметри, що визначають розточувальну оправку:

Для розточної головки - все лінійні розміри (l_m , l_0), масу (m_2), кут зсуву напрямних шпонок щодо площини різців (β), Характеристики тарілчастих пружин, що забезпечують жорсткість напрямних шпонок (D_0 , D_1 , D_2 , t_1 , Y , s_{max}), Довжину напрямних шпонок (e).

Для борштанги - радіус (R_0), щільність матеріалу (ρ), початковий виліт (l_0). Вводять параметри технологічного процесу: подачу (S), швидкість різання (v), Глибину різання (t_p).

Вихідним параметром також є довжина ділянки оброблюваного отвору ($l_{уч}$), На якому розглядається формування похибки. Задають величину Δ відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки.

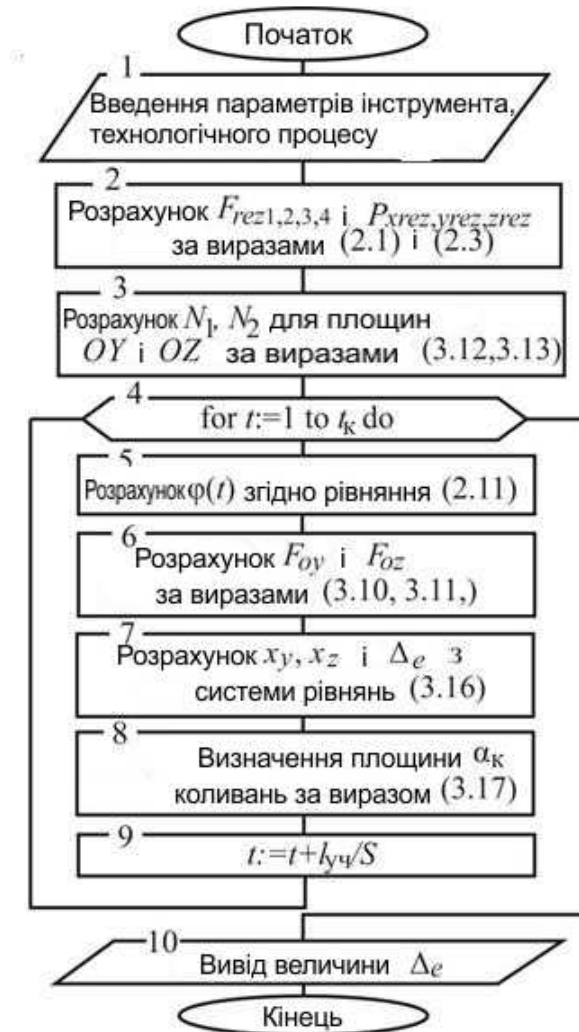


Рисунок 3.4 - Алгоритм розрахунку відхилення Δ_e профілю отвори
 На наступному кроці (Блок 2) виробляють обчислення сил підтискання

На наступному кроці (блок 2) виконують розрахунок сил підтискання напрямних шпонок за розрахунковою схемою (рис. 2.5, а, б). При цьому величину сили підтискання F для кожної напрямної шпонки обчислюють за виразом (2.1), в якому за величину деформації пружного підвісу напрямної шпонки приймають: $s = \Delta \cos(\pi S t / l_{yc} + b) \cdot \cos(\omega t + \beta)$, де Δ - відхилення від прямолінійності на ділянці l_{yc} ; b - відстань від центру мас розточної головки до точки контакту напрямної шпонки з оброблюваною заготовкою; S - подача інструменту; l_{yc} - довжина ділянки; ω - кутова швидкість обертання заготовки; β - кутове положення площини, в якій знаходяться напрямні шпонки, що розглядаються.

Визначають вираз для обчислення результуючих величин складових сил різання P_{rezy} , P_{rezz} за виразами (2.3). У блоці 3 здійснюється розрахунок сил реакцій напрямних шпонок N_1 і N_2 для кожної з площин OY і OZ за виразами (3.12-3.13).

Блок 4 відкриває цикл розрахунку відхилення Δ_e поздовжнього профілю отвору. У тілі циклу, виходячи з отриманого значення відхилення для даного часу процесу (блок 5), визначають значення результуючих сил F_{Oy} , F_{Oz} , діючих в площинах OY і OZ відповідно.

Отримані значення передають в блок 7, де відбувається рішення системи рівнянь (3.1 6) і далі в блоці 8 визначається площину, в якій відбуваються коливання (3.17). У блоці 9 задається новий перетин для розрахунку, який визначається часом обробки при заданому значенні подачі інструменту S .

Таким чином, знаючи відстань l_{yc} між важливими перетинами, крок задають як: $t = t + l_{yc} / S$. Блок 10 забезпечує виведення координат Δ_e поздовжнього профілю отвору.

3.2 Вплив відхилення осі отвору заготовки на величину похибки Δ_e поздовжнього профілю отвору

Отримано характер зміни відхилення Δ_e поздовжнього профілю отвору (рис. 3.5) при варіюванні величиною Δ відхилення осі отвору заготовки від прямолінійності. При $\Delta = 1,5$ на вході $\Delta_e = 0,18$ мм, а на виході $\Delta_e = 0,53$ мм, що перевищує допуск на відхилення від прямолінійності осі отвори деталі 0,5 мм. При значеннях відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки $\Delta = 2,5$ мм отвір також має сідлообразна профіль зі значенням відхилення Δ_e поздовжнього профілю отвору (рис. 3.5) на вході $\Delta_e = 0,51$, на виході $\Delta_e = 0,68$, Що перевищує допуск на відхилення від прямолінійності осі отвору деталі в обох перетинах. При цьому мінімальне значення відхилення досягається на рівні 3-го перетину, тобто на довжині отвору близько 3000 мм.

Теоретичні значення Δ_e відхилень профілю отвори по перетинах заготовки порівнювалися з експериментальними даними, отриманими при

вимірюванні отвори гільзи гідроциліндрів телескопування стріли актокрана (рис. 3.6).

При порівнянні даних відхилень Δ_e поздовжнього профілю отвору спостерігається (рис. 3.6) в обох випадках похибка у вигляді седлообразно отвори. При цьому відхилення Δ_e в початкових перетинах отвори менше, ніж на його виході, а на рівні 3-го перетину значення відхилення Δ_e мінімальні.

Отримані результати, в цілому, вказують на якісно схожу картину і дозволяють підтвердити адекватність розробленої математичної моделі формування похибки поздовжнього профілю глибокого отвору при розточування даної гільзи гідроциліндра.

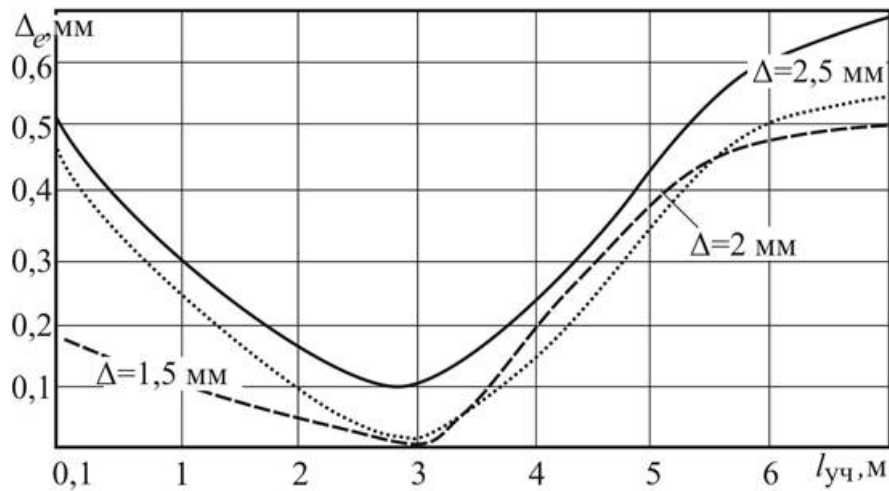


Рисунок 3.5 - Зміна відхилення Δ_e поздовжнього профілю отвору по ділянках



Рисунок 3.6 - Порівняння теоретичних та експериментальних даних величини відхилень Δ_e поздовжнього профілю отвору.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І КОМП'ЮТЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ МІНІМІЗАЦІЇ ПОХИБОК ОБРОБКИ НЕЖОРСТОКИХ ГІЛЬЗ ГІДРОЦИЛІНДРІВ

Для розробки методів мінімізації похибок форми поздовжнього і поперечного профілів глибокого отвору необхідно провести перевірку теоретичних положень, отриманих в результаті математичного моделювання процесу утворення зазначених похибок (розділи 2, 3).

З огляду на необхідність дослідження зазначеного процесу в широкому діапазоні областей визначення деяких конструктивних і технологічних факторів, доцільно використовувати комп'ютерне моделювання процесу утворення похибок при глибокому розточування заготовки. Обрані наступні програмні пакети, що дозволяють здійснювати твердотельне моделювання і розрахунок методом кінцевих елементів: SolidWorks 2011, FlowVision 3.

4.1 Комп'ютерне моделювання процесу утворення ограновування поперечного профілю гільзи гідроциліндра телескопування

Метою дослідження є оцінка адекватності математичного опису процесу формування огранки глибокого отвору процесів, що відбуваються при їх розточування, і визначення факторів, що впливають на величину виникаючих похибок. Для досягнення мети поставлені такі завдання комп'ютерного моделювання:

1) Розробка комп'ютерних моделей розточний головки, борштанги, оброблюваної заготовки, що володіють необхідними можливостями відносного переміщення, інерційними характеристиками, демпфірувальними властивостями, похибками.

2) Розробка комп'ютерної моделі руху компонентів (розточна головка, направляючі шпонки, борштанга, заготівля), відповідно до параметрів одного технологічного переходу растачивания отвори на всю довжину.

3) Розробка методики проведення комп'ютерного експерименту і оцінки результатів.

4.1.1 Опис розроблених комп'ютерних моделей

Твердотільна комп'ютерна модель розточної головки (рис. 4.1) Виконана у вигляді корпусу 1, в якому виконані пази 2 для установки планок 3, несучих напрямні шпонки 4. У корпусі 1 виконано вікно для закріплення різцевого блоку 5. При цьому на кожному з планок 3 з двома направляючими шпонками 4 накладені обмеження по переміщенню в пазу 2: обмежена можливість переміщення в напрямку до та від центру розточної головки, уздовж паза, обмежений кут нахилу. Корпус 1 з'єднаний з планками 3 за допомогою елементів «демпфер», жорсткість яких варіюється. У вікні корпусу розточний головки жорстко закріплений різцевий блок 5 так, що його центр збігається з поздовжньою віссю симетрії розточний головки. Матеріал і розміри всіх елементів розточний головки відповідають розточний голівці, розглянутої в попередніх розділах (розділ 2.2).

Борштанга виконана у вигляді порожнього циліндра, вісь якого закріплена в декількох точках. Розточна головка сполучена з борштангою за допомогою сполучення «співвісність», і вісь обох елементів збігається. Напрямні шпонки 3 виконані в двох видах: призматическими (рис. 4.1, а), згідно з відомою конструкцією, і мають жолобник в поздовжньому перетині (рис. 4.1, б) для перевірки гіпотези про шляхи зниження огранки глибокого отвору, висунутої раніше (розділ 2.3). Заготовка виконана як тіло обертання, вісь якого має відхилення від прямолінійності Δ , що варіюється в діапазоні $\Delta \in [1,2 \dots 2,5]$ мм, довжина складає 7000 мм, діаметр отвору $D = 127$ мм, товщина стінок 14 мм.

В заготовці виконані західний отвір і люнетні шийки, згідно з вимогами технологічного процесу обробки гільзи гідроциліндра телескопування. Описані елементи з'єднані в документі «збірка» і запропоновано такі початкові установки для моделювання процесу розточування:

- 1) Заготовка, розточна головка і борштанга розташовані на одній осі.
- 2) Довжина різцевого блоку між вершинами різців дорівнює діаметру отвору. Напрямні шпонки відрегульовані так, що кожна пара виступає на однакову відстань від корпусу, і розташована точно посередині паза.

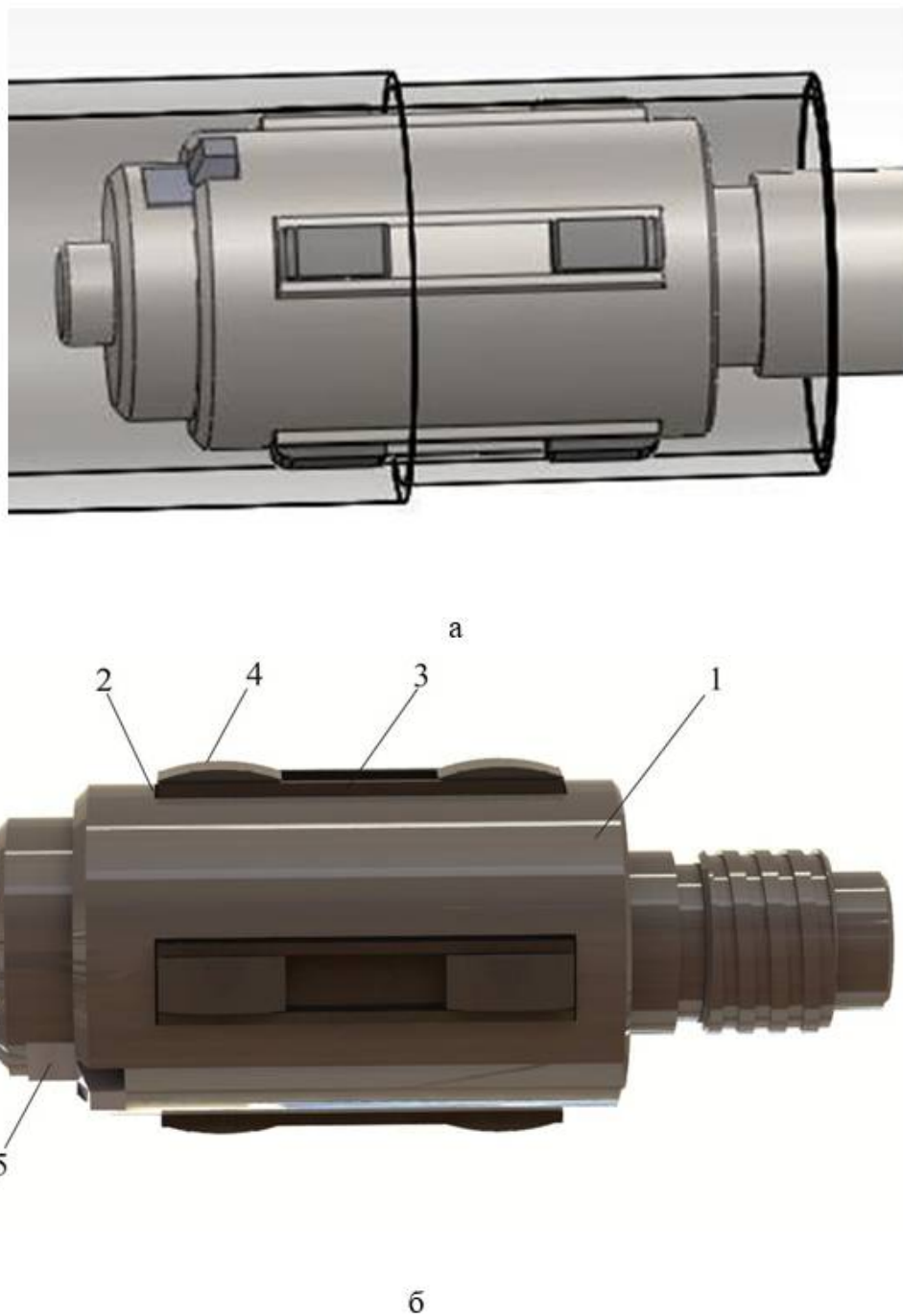


Рисунок 4.1 - Твердотільна модель розточної головки:

а - модель розточної головки з призматичними напрямними шпонками; б - модель розточної головки з запропонованими автором напрямними шпонками, що мають жолобник в поздовжньому перетині

- 3) Всі напрямні шпонки і вершини кожного з різців контактують внутрішньою поверхнею заготовки та розташовані всередині західного отвору.
- 4) Борштанга оснащена елементом «лінійний двигун», швидкість якого відповідає величині подачі розточної головки $S = 113 \text{ мм / хв.}$

- 5) Заготовка оснащена елементом «двигун обертання», швидкість якого відповідає швидкості обертання заготовки $n = 125$ об / хв.
- 6) Починаючи з моменту включення двигунів, відключається примусове розташування елементів на одній осі, у міру руху борштанги, точки закріплення осі не переміщаються, заготовка має одну ступінь свободи обертання.
- 7) Напрямні шпонки, планки, демпфери, корпус розточної головки і заготовка об'єднані в контактну групу типу «тверді тіла», що дозволяє зробити моделювання руху шпонок фізично вірним, за рахунок наявності сухого тертя пари метал-метал. Так як поверхня заготовки не прямолінійна, контакт відбувається не з усіма напрямними шпонками одночасно. Шпонки зміщуються при збільшенні сили, що діє з боку заготовки, а так як є пружний підвіс у вигляді комплексу тарілчастих пружин (в моделі замінені еквівалентною жорсткістю), то виникає сила реакції з боку шпонки.

Описані вище настройки здійснюються для модуля «Рух» програмного комплексу SolidWorks.

4.1.2 Методика проведення комп'ютерного експерименту

Для описаних в попередньому розділі (розділ 4.1.1) твердотільних моделей варіювалися наступні параметри:

1. Жорсткість пружного підвісу напрямних шпонок. Моделювання проводили зі значеннями $c_0 \in [135, 435, 835, 1235, 2235, 3235]$ Н / мм.
2. Форма поздовжнього перетину напрямних шпонок. Моделювання проводили з призматичними шпонками і зі шпонками, що мають жолобник в поздовжньому перетині з радіусами $r \in [60, 65, 70, 75, 85, 90]$ мм.
3. Довжина напрямної шпонки $e \in [32, 38, 40, 43, 46, 48]$ мм.
4. Відхилення осі отвору заготовки від прямолінійності $\Delta \in [1 \dots 3,5]$ мм.

Для кожного набору параметрів виконували моделювання з початкового моменту, коли розточна головка знаходиться всередині західної ділянки, до моменту досягнення площиною резцових блоків перетину протилежного торця

заготовки. Технологічні параметри обробки задані, виходячи з технологічного процесу обробки гільзи гідроциліндра телескопування (розділ 1.2.2).

Оцінка величини огранки H проводилася в такий спосіб. На вершині кожного різця фіксувалася контрольна точка (рис. 4.2), переміщення якої в двох площинах реєструвалося протягом проходження довжини розточувального отвору (рис. 4.3) і показати його на екрані програми. Значення переміщення вершин різців автоматично експортувалися в Excel, де проводилася їх обробка.

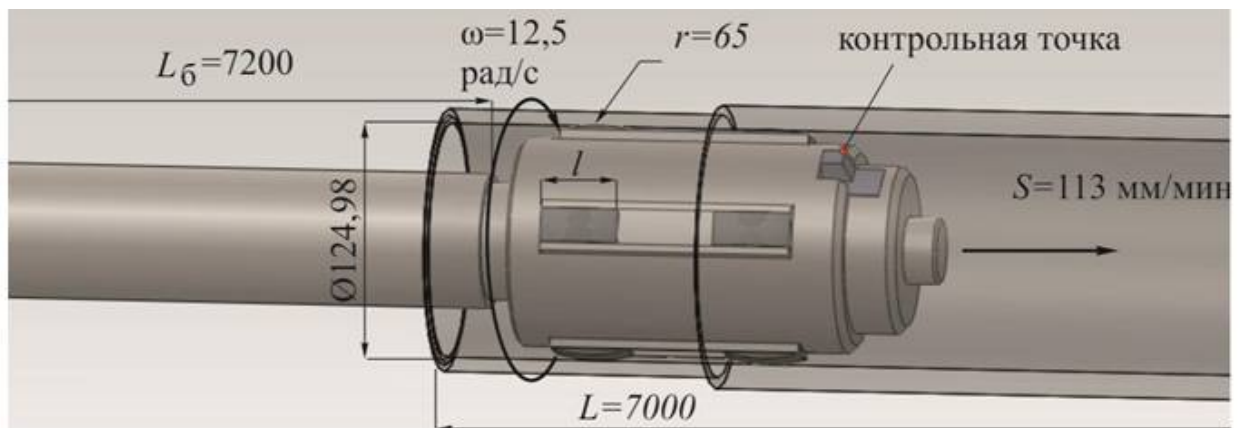


Рисунок 4.2 - Взаємне розташування компонентів і параметри процесу глибокого розточування при комп'ютерному моделюванні процесу утворення похибок

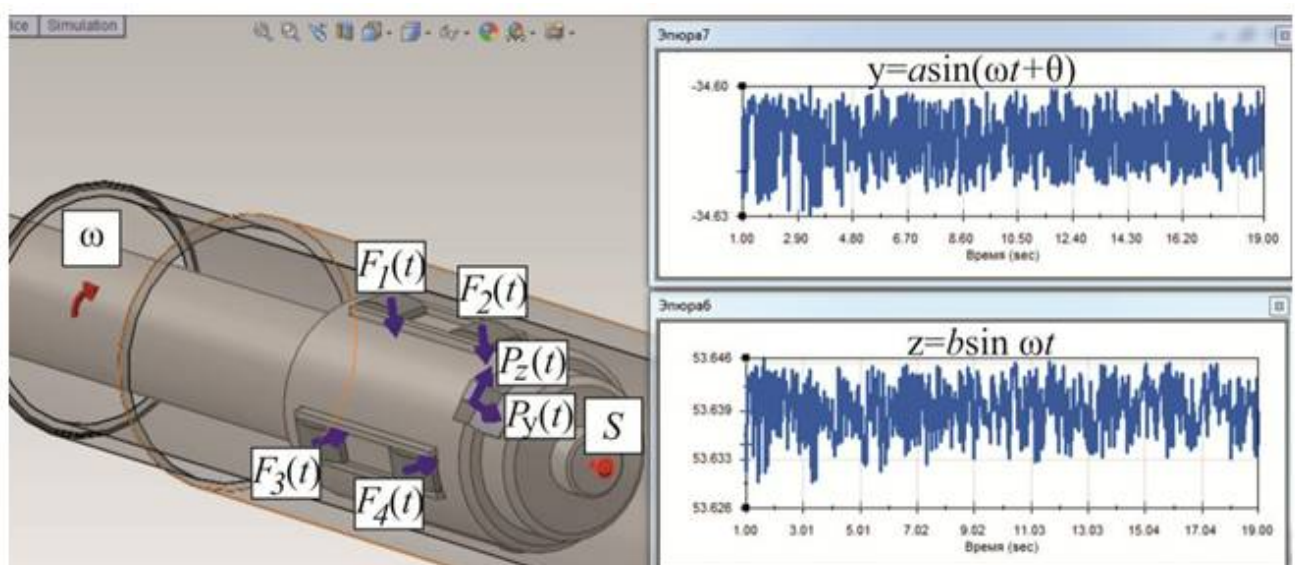


Рисунок 4.3 - Екран результату переміщення вершин різця в площинах OY і OZ , отриманих при комп'ютерному моделюванні процесу утворення похибок глибокого розточування нежорсткої гільзи гідроциліндра

Для оцінки величини огранки H глибокого отвору в Excel визначалася максимальна амплітуда A коливань різців, як половина різниці максимального значення переміщення і мінімального, і частота коливань вершини різця, як частота гармоніки з максимальною амплітудою за отриманими графіками коливань в обох площинах [30]. Це дало можливість за відомою формулою [53] визначити величину H і ступінь огранки глибокого отвору.

Моделювання з занесенням в пам'ять персонального комп'ютера (ПК) даних про переміщення різця виконувалася для кожного набору параметрів.

Для оцінки похибок поздовжнього профілю глибокого отвору вимірювалося відхилення контрольної точки від теоретичної осі отвору.

4.1.3 Інтерпретація результатів комп'ютерного моделювання

При моделюванні процесу обробки розточною головкою, оснащеною напрямними шпонками з призматичною формою поздовжнього профілю і формою, при якій напрямна шпонка має жолобник радіусу r , встановлено, що величина поперечного профілю глибокого отвору при обробці розточною головкою, оснащеною шпонками з жолобником ($r = 70$ мм), на порядок нижче величини H огранки, отриманої при моделюванні обробки розточною головкою з призматичними шпонками для значень відхилень від прямолінійності осі отвору заготовки: $\Delta = 1,5; 2; 2,5$ (рис. 4.4).

При моделюванні процесу розточування для розточувальних головок з різними радіусами галтелів напрямних шпонок встановлено, що зміна радіуса r галтелі напрямної шпонки в поздовжньому перетині до значення $r = 75$ мм призводить до зниження величини H огранки глибокого отвору, а подальше збільшення радіусу r призводить до її збільшення (рис. 4.5) для різних жорсткостей c_0 .

При цьому, проаналізовано співвідношення форми і площі плями контакту з величиною H отриманої огранки. Встановлено, що мінімальна величина огранки глибокого отвору досягається при максимальній площі контакту напрямної шпонки з обробленою поверхнею при проходженні

розточною головкою перетину з максимальною величиною відхилення Δ осі отвору заготовки від прямолінійності (рис. 4.6).

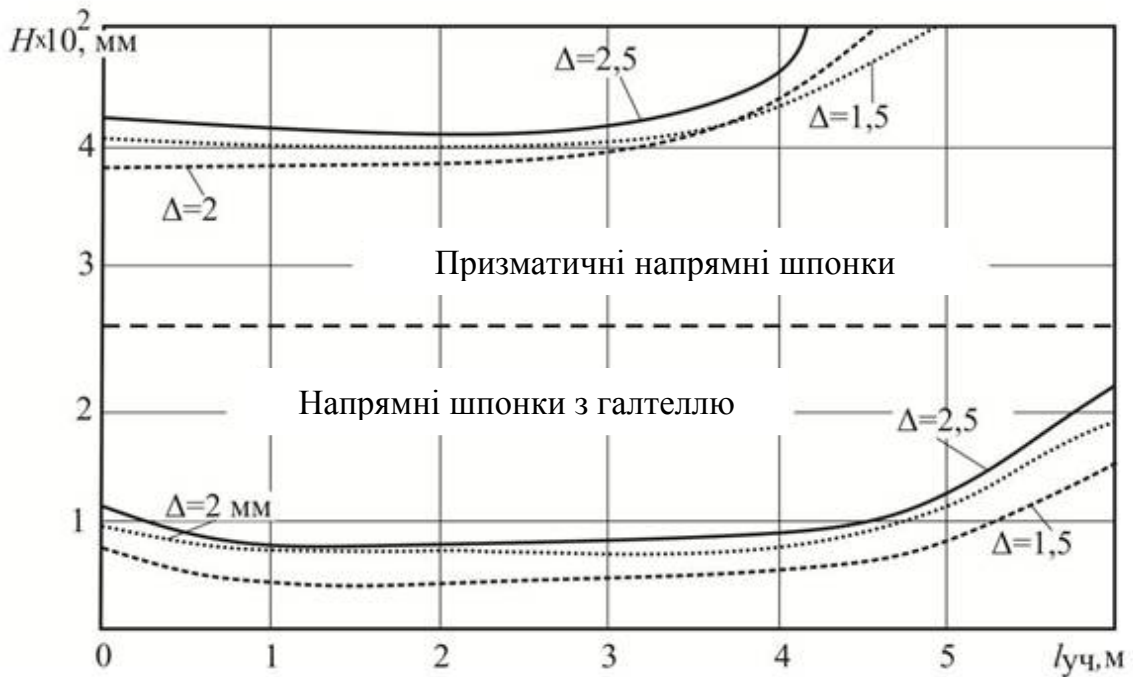


Рисунок 4.4 - Величини H огранки глибокого отвору при моделюванні процесу розточування з двома видами шпонок при різних відхиленнях Δ від прямолінійності осі отвору заготовки

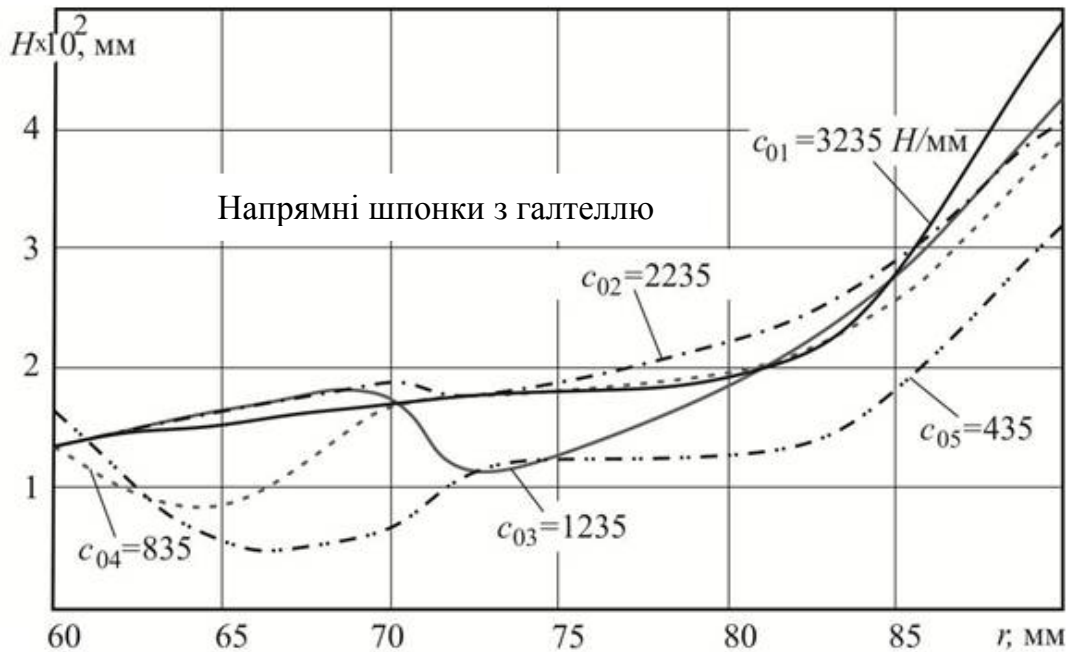
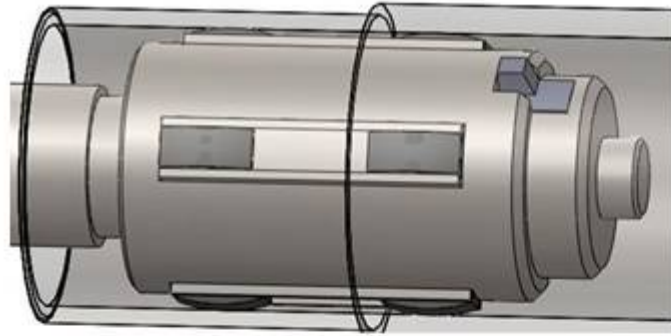
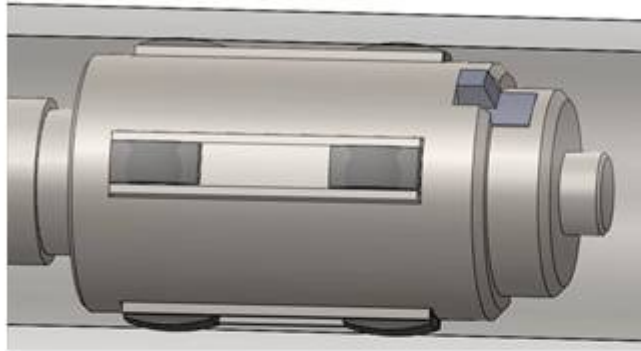


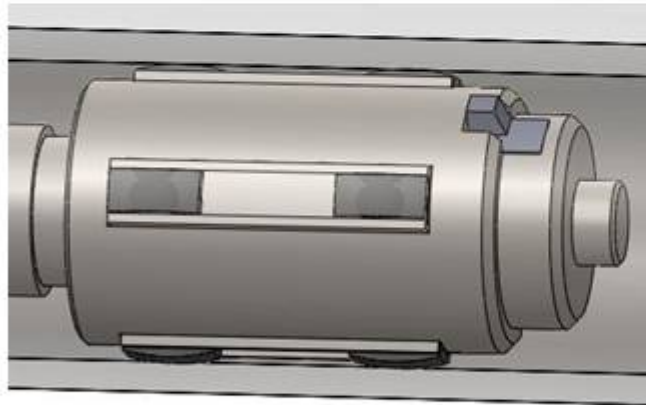
Рисунок 4.5 - Величини H огранки глибокого отвору при моделюванні процесу розточування з різною жорсткістю c_0 підвісу напрямних шпонок



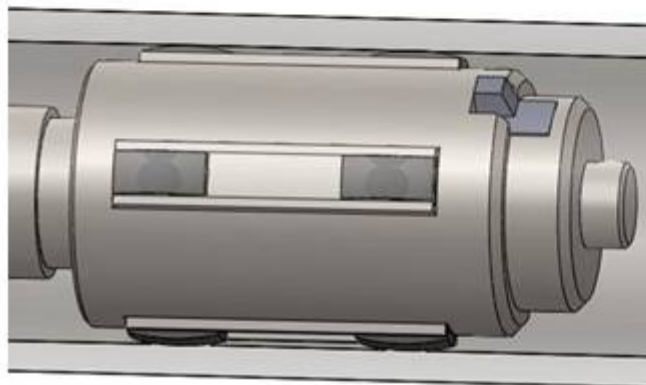
а



б



в



г

Рисунок 4.6 - Площа контакту напрямних шпонок з оброблюваною поверхнею при різних радіусах галтелі шпонки в поздовжньому перетині: радіус галтелі становить: а - 60 мм; б - 75 мм, в - 80 мм; г - 90 мм

Найменше значення величини огранки H отримано при величині галтелі $r = 75$ мм (рис. 4.6, б). При збільшенні жорсткості c_0 пружного підвісу напрямних шпонок (рис. 4.7) величина огранки H глибокого отвору, навпаки, підвищується, однак, існує зона оптимальних жорсткостей, де спостерігається зниження при всіх значеннях відхилень від прямолінійності Δ осі отвору заготовки. Подальше підвищення жорсткості знову призводить до збільшення огранки.

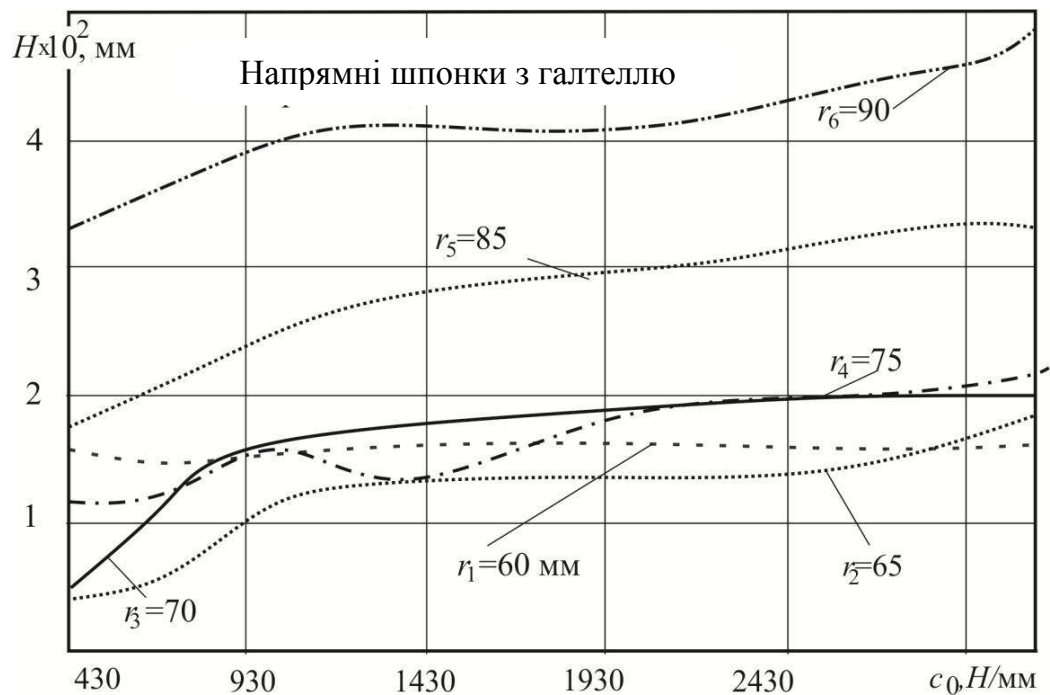


Рисунок 4.7 - Величини H огранки глибокого отвору при моделюванні процесу розточування з різним радіусом r галтелі напрямної шпонки

Результат моделювання процесу розточування глибокого отвору гільзи гідроциліндра підтверджують отримані теоретично (розділ 2.2) рекомендації по вибору довжини e і жорсткості c_0 пружного підвісу напрямної шпонки.

При аналізі даних моделювання процесу обробки отвору розточною головкою, оснащеною напрямними шпонками запропонованої форми, встановлена залежність величини H огранки глибокого отвору від довжини e і радіусу r галтелі напрямних шпонок при різних відхиленнях Δ осі отвору заготовки від прямолінійності, яка дозволяє визначити радіус галтелі

напрямної шпонки, що забезпечує мінімізацію величини огранки глибокого отвору:

$$r = e^2 / 16\Delta,$$

де e - довжина напрямної шпонки; Δ - відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

5.1 Загальні заходи щодо безпеки життєдіяльності

Всі дослідницькі роботи, представлені в даній роботі, проводилися в металографічних лабораторіях. У зв'язку з цим необхідно передбачити створення сприятливих умов для проведення експериментів на робочому місці.

Створення комфортних метеоумов. Мікроклімат на робочому місці в приміщенні лабораторії нормується з урахуванням температури повітря, його відносної вологості і швидкості руху. Основним показником є температура; вологість і вентиляція - супутні показники, що підсилюють її дію. Рекомендується періодично коригувати параметри системи опалення з урахуванням пори року [79]. Регулювання повітряного середовища здійснюється за допомогою вентиляції. Для зменшення рухливості повітря усуваються можливі причини виникнення протягів (відкриті кватирки, зазори між рамами тощо.).

Умови освітлення. Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Незадовільне освітлення ускладнює проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці і працездатності очей. Для створення природного освітлення в приміщенні використовують світлові прорізи в стінах (вікна). Електричне освітлення необхідно для проведення робіт в темний час доби або в місцях без достатнього природного освітлення. У якості штучних джерел світла рекомендується використовувати лампи розжарювання і люмінесцентні лампи. Приймаємо освітлення двох видів: робоче (для проведення робіт в звичайних умовах) і аварійне (для тимчасового продовження робіт або евакуації працюючих при раптовому відключенні робочого освітлення) [79, 80]. Аварійне освітлення передбачається з незалежним джерелом живлення або при автоматичному перемиканні на нього у випадку аварії.

Захист від шуму. При проведенні металографічних досліджень використовується різне обладнання (шліфувальні і полірувальні верстати,

електронний мікроскоп), експлуатація якого супроводжується шумом. Шум викликає зміни в нервовій системі, впливає на психіку людини, серцево-судинну систему, погіршує сон [79 – 82]. Робота в умовах постійного шуму може викликати головний біль, запаморочення, ослаблення уваги. Шум є причиною швидкого розвитку втоми і зниження працездатності. Встановлений в лабораторії рівень звукового тиску при частоті 1000 Гц складає 60 дБ - при шумі, що виникає всередині приміщення, і 45 дБ - при шумі, проникаючому ззовні [81]. Для захисту від шумових впливів застосовують звукоізолюючі огорожі установок, які відображають більшу частину світлової енергії, що падає на них. Наприклад, верстати розташовуються в місцях, відгороджених глухими перегородками від решти лабораторії. Також для зниження шуму агрегатів використовують звукоізолюючі кожухи, в які укладають їх шумливі вузли. Люди, які безпосередньо працюють біля верстатів, повинні використовувати спеціальні вкладиші, типу беруші.

Захист від шкідливих речовин і пилу. При проведенні дослідницьких робіт виникає потенційна небезпека небажаної дії на організм речовин, що застосовуються в роботі. Всі забруднюючі повітря речовини надають шкідливої дії, якщо вони потрапляють в організм в кількостях, що перевищують деяку порогову величину; але навіть і в менших кількостях вони шкідливі, якщо знаходяться в організмі в незвичайних концентраціях або станах. Також при роботі може виникнути і безпосередній контакт зі шкідливими речовинами. При шліфуванні і поліруванні зразків повітря забруднюється металевим пилом. У зв'язку з багатокомпонентним складом досліджуваної сталі забруднення повітря може викликати різні реакції. Ряд металів (хром в даній сталі) може привести до алергічних захворювань - бронхіальна астма, ураження шкіри, очей, носа тощо [81, 82]. Багато металу, в тому числі, залізо, ванадій, молібден, кремній, марганець, а також фосфор є біологічними мікроелементами, що знаходяться в крові, печінці, м'язах в дуже невеликих кількостях (10^{-3} - $10^{-2}\%$) [82]. Недолік або надлишок мікроелементів у порівнянні з нормальним вмістом призводить до порушень тих чи інших функцій організму. Для запобігання розповсюдження пилу дослідна

лабораторія розташовується в окремому приміщенні, ізольованому дверима від сусідніх робочих місць. Також передбачене регулярне вологе прибирання для видалення осілих частинок пилу. При проведенні робіт виникає необхідність в застосуванні хімічних сполук різної небезпеки, зокрема для травлення зразків (трихлористе залізо, пікринова кислота). Для захисту від шкідливих випарів передбачена місцева витяжна вентиляція, призначена для видалення забрудненого повітря безпосередньо від джерела утворення виділень. Даний вид вентиляції представлений в лабораторіях у вигляді укриттів і витяжних шаф. Для очищення повітря від шкідливих виділень і продуктів дихання людей передбачена загальнообмінна припливно-витяжна вентиляція, повітря для якої забирається з чистої зони. Додатково використовуються засоби індивідуального захисту. Для захисту рук при роботі з травителями застосовують кислототривкі рукавички, які повинні тісно прилягати до шкіри.

Захист від електричного струму. Причинами ураження електричним струмом є зіткнення з відкритими струмоведучими частинами і проводами; дотик до струмоведучих частин, ізоляція яких пошкоджена; дотик до струмоведучих частин через предмети з низьким опором ізоляції; дотик до металевих частин обладнання, випадково опинилися під напругою [79 – 82]. Небезпека електричних поразок створює працююче від мережі обладнання, освітлювальні прилади і електрична проводка. Дія електричного струму на організм може викликати різні електричні травми (електричний опік, металізацію шкіри, електричний знак та ін.), тому передбачають заходи захисту від ураження електричним струмом. Для мережі загального освітлення допускається напруга не вище 220 В. Для захисту від дотику здійснюють недоступне розташування струмоведучих частин (на висоті, під підлогою або приховано в стінах). Незахищені струмоведучі частини, до яких можливий дотик людей надійно захищають. Застосовувані проводи та кабелі повинні відповідати умовам експлуатації обладнання. Для виключення мережі при короткому замиканні використовують швидкодіючий релейний захист і вимикачі, настановні автомати і плавкі запобіжники. Для захисту працюючого

в разі дотику до металевих частин електричної установки, випадково опинилися під напругою, застосовують захисне заземлення.

Захист від електромагнітних випромінювань. Виникаючі при використанні струмів високої частоти електромагнітні поля різних частотних діапазонів представляють певну професійну шкідливість, тому необхідно вживати заходів щодо захисту від їх впливу на організм. Надійним методом захисту є екранування [79]. Металеві частини установок і систем водоохолодження заземляють, щоб не допустити ураження струмом. Проводи, кабелі та інші струмопровідні частини огорожують. Повинна бути виключена можливість їх нагріву. Передбачають пристрої (рубильники, вимикачі), що забезпечують відключення від мережі. Обов'язкова загальна вентиляція приміщень (з витяжкою з верхньої зони приміщення в робочу зону). Приміщення високочастотних установок забороняється захаращувати металевими предметами. Повинні бути дотримані вимоги електробезпеки.

Захист від пожежі. Пожежі становлять значну небезпеку, так як заподіюють великі пошкодження і матеріальний збиток, тому запобігання пожеж є важливим завданням. Для зменшення небезпеки виникнення і поширення пожеж велике значення має раціональне пристосування і розташування лабораторій і виходів з них [82]. Обов'язкова наявність вентиляції, так як її відсутність може стати причиною задимлення приміщень і ускладнює боротьбу з пожежею. У вентиляційних пристроях не повинен накопичуватися пил; швидкість руху повітря повинна бути такою, щоб зважені в повітрі частки не осідали. Обов'язкова наявність повідомлюючої пожежної сигналізації в будівлі. Кожна лабораторія повинна бути оснащена вогнегасником для усунення пожежі, що починається. У будівлі забезпечують можливість швидкої безпечної евакуації людей у разі виникнення загоряння. З коридору рекомендується проектувати, як правило, не менше двох евакуаційних виходів. Пожежну небезпеку можуть представляти електричні пристрої в разі перевантаження або короткого замикання. Для запобігання цього необхідні: правильний монтаж і експлуатація мереж і агрегатів, дотримання правил їх експлуатації.

5.2 Заходи безпеки при проведенні технологічних процесів механічної обробки металів

У виробничих процесах, пов'язаних з виготовленням деталей для радіоелектронної апаратури, важливе місце займає механічна обробка металів на металорізальних верстатах (токарних, фрезерних, свердлильних, заточувальних, шліфувальних і ін).

При механічній обробці металів різанням виникає ряд небезпечних і шкідливих виробничих факторів: рухомі частини виробничого обладнання, ріжучі інструменти, пристосування для закріплення оброблюваної деталі, оброблювана деталь, висока температура поверхні оброблюваних деталей та інструменту, стружка, пил і шкідливі аерозолі оброблюваних матеріалів, підвищена напруга або статичну електрику, шум та вібрація верстатів, недостатнє освітлення робочої зони, мастильно-охолоджуючі рідини, фізичні перевантаження, перенапруження зору, монотонність праці [83].

Найбільш поширеними видами травм у верстатників є поранення очей, обличчя, рук, забої тіла [83].

Травму можуть завдати фрези, свердла, абразивні круги при випадковому зіткненні з ними, у разі їх руйнування або захоплення ними одягу; оброблювана деталь при недостатньо надійному її кріпленні; відлітає стружка, що має велику кінетичну енергію і високу температуру (до 600 °С); приводні і передавальні механізми верстата при наладці, змазуванні і ремонті та ін.

Аналіз причин виробничого травматизму в цехах холодної обробки металів показує, що основними є відсутність або недосконалість захисних огорожень і запобіжних пристроїв, несправний стан обладнання, інструменту та пристосувань, неправильне розміщення верстатного обладнання в цеху, неправильні прийоми роботи. Таким чином, безпека при роботі на металорізальних верстатах пов'язана насамперед із виконанням вимог безпеки, а також здійснення необхідних заходів при організації робочого місця верстатника і суворе дотримання охорони та гігієни праці при роботі на верстатах.

Передачі (ремінні, зубчасті, канатні, шарнірні, ланцюгові та ін), які розташовані поза корпусів верстатів і становлять небезпеку травмування, повинні мати огорожі (суцільні, з жалюзі, з отворами), оснащені пристроями (рукоятками, скобами і тощо) для зручного та безпечного їх відкривання, зняття, переміщення та устанавлення.

Захисні пристрої (щити, ширми, екрани), що огорожують зону обробки, повинні захищати працюючого на верстаті і людей, що знаходяться поблизу верстата, від відлітаючої стружки, мастильно-охолоджувальної і робочої рідин. Застосування захисних огорожувальних пристроїв обов'язково для токарних, фрезерних, свердлильних, розточувальних, стругальних, зуборізних, шліфувальних верстатів.

Захисні пристрої, що знімаються частіше одного разу за зміну при встановленні і знятті оброблюваної деталі або інструмента, при вимірюванні деталі, підналагодження верстата та в інших випадках, повинні мати масу не більше 6 кг і кріплення, яке не вимагає застосування ключів і викруток. Захисні пристрої відкриваючого типу повинні при усталеному русі переміщатися із зусиллям не більше 40 Н (4 кгс).

Захисні пристрої не повинні обмежувати технологічних можливостей верстата і викликати незручності при роботі, прибиранні, налагодженні, приводити при відкриванні до забруднення підлоги. При необхідності вони повинні мати рукоятки, скоби для зручності відкривання, закривання, знімання, переміщення та устанавлення.

Кріплення захисних пристроїв повинно бути надійним, що виключає випадки самовідкривання. Пристрої, що підтримують огороження у відкритому стані, повинні надійно утримувати їх в цьому положенні.

Поверхні верстатів, захисних пристроїв, органів управління, верстатних приладь і пристосувань не повинні мати гострих кромek і задирок, які можуть травмувати працюючого.

Верстати повинні мати запобіжні пристрої від перевантаження, здатного викликати поломку деталей верстата і травмування (плавкі запобіжники, автомати відключення, шпонки, муфти та ін.), і для забезпечення

безпечних границь переміщення збірних одиниць (столу або супорта) верстатів (обмежувачі). Крім цього, верстати повинні мати пристрої, що запобігають мимовільне опускання шпинделів, кронштейнів, головок, бабок, рукавів (в радіально-свердлильних верстатах) і інших складальних одиниць.

Велике значення для запобігання нещасних випадків на виробництві має надійне закріплення на верстатах оброблюваних заготовок, патронів, планшайб, оправок, насадних головок, інструменту та інших знімних елементів.

Для зручності роботи і безпеки праці ряд вимог пред'являється до органів управління верстатами; обладнання органів управління надійними фіксаторами, що виключають мимовільне їх переміщення і випадкове включення; оснащення їх відповідними блокуваннями, пояснюючими написами, символами та ін.

Верстати треба обладнувати пристроями для відсмоктування із зони обробки забрудненого повітря (пил, дрібна стружка, шкідливі для здоров'я аерозолі рідин, газів), включаючи пило-, стружко-, газоприйомники та відсмоктуючі агрегати. Існують вимоги до обмеження шуму і вібрації верстатів, раціональному влаштуванню місцевого освітлення, забезпеченню електробезпеки, а також специфічні вимоги безпеки по групах верстатів токарських, фрезерних, свердлильних та ін.

При роботі на токарних верстатах необхідно застосовувати захист працюючих від травмування відлітаючою стружкою, що утворюється при обробці в'язких (сталей) і крихких металів (чавуну, бронзи, латуні, текстоліту та ін.), яка має високу температуру (400..600 °С) і велику кінетичну енергію. Для цього застосовують спеціальні різці, що забезпечують завивання стружки в гвинтову спіраль, що видаляється спеціальними гачками, або дроблення її на окремі елементи. Верстати оснащують огорожами зони різання з оглядовими вікнами, газо-, пило-, стружкоприймачами, повітряночисниками туманоуловлювачами і гальмівними пристроями. Робочі використовують індивідуальні засоби захисту (захисні окуляри, індивідуальні щитки, спецодяг мазі і пасти для захисту шкіри рук).

При цьому необхідно суворо дотримуватися правил носіння спецодягу. Для попередження небезпеки захоплення одягу і волосся працюючого обертовими механізмами верстата робочий одяг не повинен мати вільно розвіваючихся частин, рукава повинні щільно облягати руку і бути застебнутими на гудзики, волосся слід прибирати під берет, або косинку. Кінці косинки повинні бути ретельно заправлені.

При обробці деталей на фрезерних верстатах травми верстатнику можуть бути нанесені, фрезою, стружкою, оброблюваною деталлю і пристроєм для її закріплення.

Для попередження травмування фрезою і відлітаючою стружкою застосовують огороження зони різання, що відкриваються і огороження ріжучого інструменту в неробочій його частині.

При обробці крихких металів і полімерних матеріалів важливу роль відіграє видалення пилу з робочої зони, тому на фрезерні верстатах застосовують огорожі – пило-, стружкоприймачі.

При роботі на свердлильних верстатах найбільшу небезпеку для працюючих являють обертові шпindel, патрон, свердло, які можуть захопити одяг або волосся, травмувати зламаним свердлом; а також стружка і пил.

Тому необхідно виконувати наступні умови:

- механізм кріплення інструмента повинен забезпечувати надійний затиск, точне центрування і швидку зміну свердла;
- для установки на верстаті оброблюваних деталей необхідно користуватися затискними пристосуваннями (утримувати деталь руками не допускається);
- потрібно застосовувати засоби дроблення сталеві стружки (свердла зі стружко-дробильними канавками) і пило-, стружкоприймачі;
- змитати стружку з верстата тільки спеціальною щіткою;
- використовувати індивідуальні захисні засоби і суворо дотримуватися правил носіння спецодягу.

При організації роботи на шліфувальних і заточувальних верстатах, у яких різальним інструментом є абразивний круг, що обертається з великою

швидкістю, серйозну небезпеку становить можливість аварійного розриву шліфувального круга, через наявність у ньому тріщин, вибоїн, раковин, а також велика пилоутворення в зоні різання.

З метою забезпечення безпечної роботи на верстатах шліфувальної групи необхідно проводити наступні заходи: попередній зовнішній огляд і простукування кола дерев'яним молоточком; дотримуватися правил зберігання абразивних кругів; проводити випробування кругів на механічну міцність; дотримуватися вимоги і норми безпеки при установці і закріпленні кіл на верстаті; користуватися безпечними прийомами редагування кіл; застосовувати постійні сталеві захисні кожухи для шліфувальних кругів, а також спеціальні пристрої (підручники, прозорі оглядові екрани) і засоби знепилення; дотримуватися інструкції для верстатників.

ВИСНОВКИ

1. З аналізу літературних даних зроблено висновок, що гідроциліндри з відношенням довжини l гільзи до діаметру d її отвору, що перевищує 10, являють собою численний клас виробів, які використовуються в складі обладнання нафтогазового і гірничодобувного комплексів. При цьому від точності обробки нежорсткої гільзи гідроциліндра залежать безпека і надійність експлуатації обладнання.

2. Характерними похибками, що виникають при обробці нежорстких гільз гідроциліндрів, є: огранювання поперечного профілю і похибки поздовжнього профілю її глибокого отвору. В якості основної причини виникнення зазначених похибок виділяють вібрації розточної головки, які супроводжують обробку довговимірної нежорсткої заготовки, проте механізм виникнення цих вібрацій в літературі не розглядається.

3. Для підвищення точності обробки глибоких отворів нежорстких гільз гідроциліндрів необхідно використання методів мінімізації похибок форми поздовжнього і поперечного профілів глибокого отвору на основі математичних моделей освіти похибок форми отвори, враховуючих відхилення від прямолінійності осі отвору заготовки.

4. Розроблені математичні і комп'ютерні моделі освіти похибок форми поздовжнього і поперечного профілів глибокого отвору при його розточування дозволили встановити, що:

4.1. Дані похибки проявляються як технологічна спадковість похибки відхилення Δ осі отвору заготовки від прямолінійності.

4.2. Причиною утворення огранки глибокого отвору є поперечні коливання розточної головки, що виникають внаслідок стрибкоподібного зміни моменту M_0 , який призводить до параметричного резонансу на частоті, що входить в розкладання цього «стрибка» в ряд Фур'є.

4.3. Ступінь огранки відповідає номеру k -ої гармоніки, на частоті якої виникає резонанс, а величина H огранки визначається амплітудою коливань k -ої гармоніки.

4.4. Для запобігання стрибкоподібної зміни моменту M_0 необхідно забезпечити плавну зміну контакту напрямних шпонок з обробленою поверхнею за рахунок наявності галтелі у останніх.

4.5. Зниження в 4 ... 10 разів величини H огранки при обробці отвору довжиною $l = 7200$ мм, діаметром $D = 125$ мм з відхиленням Δ від прямолінійності осі отвору заготовки з діапазону $\Delta \in [1 \dots 3,5]$ мм досягається при значеннях жорсткості пружного підвісу $c_0 \in [930 \dots 1430]$ Н / мм, довжини напрямної шпонки $e \in [44 \dots 48]$ мм, радіуса галтелі напрямної шпонки $r \in [65 \dots 75]$ мм.

5. Запропонована, на основі існуючих, класифікація методів підвищення точності обробки глибоких отворів за способом віброгасіння дозволила встановити, що найбільш доцільно використовувати метод динамічного гасіння коливань системи «розточна головка - заготовка», з урахуванням наявності відстані вісі отвору заготовки і змінюється частота власних коливань розточної оправки. Обґрунтовано можливість використання гіроскопічного ефекту для стабілізації положення вісі інструменту.

6. На основі огляду методик проведення експериментальних досліджень встановлено, що для розширення діапазону варійованих факторів при розробці методів мінімізації похибок обробки глибоких отворів доцільно використовувати комп'ютерне моделювання методом кінцевих елементів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Агагусейнов Ю. А., Вишневская Э. Л., Кулиев И. П., Лейбензон С. Р., Маршлок А. Б., Мочалов М. Н., Саркисов В. Г. Самоподъемные плавучие буровые установки. М.: Недра, 1979. 215 с.
2. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2011. 464 с.
3. Баландин Д.В., Федотов И.А. Синтез активного динамического гасителя колебаний с использованием линейных матричных неравенств // Математическое моделирование и оптимальное управление. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2007.№6. С. 153-159.
4. Боярский В.Г., Шеров К.Т., Сихимбаев М.Р., Макеев В.Ф. Самоустанавливаемость плавающего резцового блока в комбинированном инструменте при обработке на труборасточных станках // Фундаментальные исследования. 2012. №6-2. С. 414-418.
5. Вибрации в технике: справочник / В.К. Асташев [и др.]. М.: Машиностроение, 1981. Т.6–6.
6. Вибрации в технике: справочник / И.И. Артоболевский [и др.]. М.: Машиностроение, 1978. Т.1–6.
7. ГОСТ 30987–2003. Назначение размеров и допусков для нежестких деталей. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 6 с.
8. Кобелев В. М. Эффективность одно- и двухэлементных динамических гасителей колебаний // Труды Одесского политехнического университета. 2008.№2. С. 7-9.
9. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С. Выявление дефектов шпиндельных узлов виброакустическими методами // Вестник УГАТУ. 2009. Т.13. №1(34). С. 133-138.
10. Костюкович С.С., Дечко Э.М., Долгов В.И. Точность обработки глубоких отверстий. Мн.: «Вышэйш. школа», 1978. 144 с.
11. Кулагин Р. Н. Исследование и разработка систем автоматического

- управления положением инструмента при черновом растачивании глубоких отверстий: дис. канд. техн. наук. Волгоград, 2000. 158 с.
12. Курган В. П., Панкин А. А. Приближенное исследование автоколебаний в нелинейной модели процесса растачивания // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. Всерос. науч. конф. Самарский государственный техниче-ский университет, 2004. Вып. 2. С. 136– 139.
 13. Ларионов М. А. Повышение точности консольного растачивания глубоких отверстий на основе моделирования процесса их обработки дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012.
 14. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983. Т.2–2.
 15. Малов А. Н. Справочник технолога-машиностроителя. М.: Машиностроение, 1973. 695 с.
 16. Минков М. А. Технология изготовления глубоких точных отверстий. М.– Л: Машиностроение, 1968. 183 с.
 17. Набатников Ю. Ф. Повышение точности изготовления силовых гидроцилиндров механизированных крепей путем совершенствования технологического процесса сборки: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2012. 262 с.
 18. Николаи Е.Л. Теория гироскопов. Л.: ОГИЗ, 1948. 172 с.
 19. Обработка глубоких отверстий в машиностроении: справочник / С.В. Кирсанов [и др.]. М.: Машиностроение, 2010. 344 с.
 20. Отений Я.Н., Смольников Н.Я., Ольштынский Н.В. Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: монография. Волгоград: РПК «Политехник», 2003. 136 с.
 21. Парс Л.А. Аналитическая динамика. М.: Наука, 1971. 636 с.
 22. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. М.: Высш. Шк., 1988. 424 с.
 23. Пермяков А.А., Пациора А.П. Теоретические основы формирования гидродинамического эффекта на направляющих опорах инструмента для обработки глубоких отверстий // Сборник научных трудов «Вестник НТУ» Технології в машинобудуванні. 2010. №41. С. 101–110.

24. Ройтеберг Я.Н. Гироскопы. М.: Наука, 1975. 592 с.
25. Сергеев С.В. Применение конечноэлементных моделей для расчета погрешностей обработки отверстий // Технология машиностроения. 2012. № 2. С. 60-64.
26. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.1 / под ред. А. М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова, – 5 изд., исправл. – М.: Машиностроение – 1, 2003. 910 с.
27. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.2 / под ред. А. М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова, – 5 изд., исправл. – М.: Машиностроение – 1, 2001. 944 с.
28. Степанов М., Иванова М. Исправление погрешности расположения оси отверстия комбинированным осевым инструментом // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2015. P. 143-147.
29. Стрельцов В.А., Кравцов В.И. Неуравновешенные силы резания, действующие на многолезвийный инструмент при несовпадении оси его с осью исходного отверстия // Труды Фрунзенского политехнического института. 1971. № 54. С. 86-100.
30. Тихенко В.Н., Жеглова В.М. Компьютерное моделирование упругих деформаций борштанги гидропривода микроперемещений отделочно расточного станка // Труды Одесского политехнического университета. 2005. Вып. 2(24). С. 57–60.
31. Троицкий Н. Д. Глубокое сверление. Л.: Машиностроение, 1971. 176 с.
32. Уткин Н. Ф., Кижняев Ю.Н., Плужников С.К. Обработка глубоких отверстий. Л.: Машиностроение, 1988. 269 с.
33. Ушаков А. И. Динамические процессы при обработке глубоких отверстий: дис. канд. техн. наук. Москва, 1974. 177с.
34. Хомяков В. С., Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С. Исследование динамической характеристик шпиндельных узлов // Вестник МГТУ «Станкин», 2008. №4. С. 15-22.

35. Шейн А. И., Земцова О. Г. Оптимизация многомассовых гасителей колебаний при гармоническом воздействии // *Машиностроение и машиноведение*. 2010. №1. С. 113–122.
36. Шендеров И. Б. Управление качеством при растачивании глубоких отверстий в интерактивном технологическом процессе изготовления трубных заготовок // *Вестник ИжГТУ*. 2012. №1. С.30-33.
37. Юрлов М.А., Юрлова Н.А. Стратегии демпфирования колебаний конструкций с пьезоэлементами и внешними электрическими цепями и их экспериментальная иллюстрация // *Вестник ПНИПУ*. 2014. №4. С. 240–270.
38. Biermann D., Sacharow A., Wohlgemuth K. Simulation of the BTA deep-hole drilling process // *Production Engineering Res. Devel.* 2009. P. 339–346.
39. Botek [Электронный ресурс] // BTA - Bohrverfahren . URL: http://www.botek.de/unsere_produkte/system-bta. (дата обращения: 07.02.2017).
40. Chin D., Yoon M., Sim S. Roundness modeling in BTA deep hole drilling // *Precision Engineering*. 2005. P. 176–188.
41. Isaev A.V., Kozochkin M.P. Use of a measurement information system to increase the precision with thin-walled parts are machined on numerically controlled milling machines // *Measurement Techniques*. 2014. P. 1155-1161.
42. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Suslov D.N., Abramov A.P. Vibroacoustic Diagnostics of Spindle Bearings in High-Speed Machine Tools // *Russian Engineering Research*. 2010. P. 944-947.
43. Lu X., Chen F., Altintas Y. Magnetic actuator for active damping of boring bars // *CIRP Annals–Manufacturing Technology*. 2014. P. 369–372.
44. Matsubara A, Maeda M, Yamaji I. Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit // *CIRP Annals–Manufacturing Technology*. 2014. P. 373–376.
45. Matsuzaki K., Ryu T., Sueoka A., Tsukamoto K. Theoretical and experimental study on rifling mark generating phenomena in BTA deep hole drilling process (generating mechanism and countermeasure) // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2015. P. 194–205.

46. Mei D., Kong T., Shih A. J., Chen Z. Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. P. 1861–1870.
47. Messaoud A., Weihs C., Hering F. Detection of chatter vibration in drilling process using multivariate control charts // *Computational Statistics & Data Analysis*. 2008. P. 3208–3219.
48. Munoa J., Beudaert X., Dombovari Z., Altintas Y., Budak E., Brecher C., Stepan G. Chatter suppression techniques in metal cutting // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2016. P. 785–808.
49. Novakov T., James J. M.. Chatter problems in micro and macrocutting operations, existing models, and influential parameters – a review // *Manuf. Technol*. 2010. P. 597–620.
50. Product Tooling [Электронный ресурс] // Anti - Vibration Holders and Adapters. URL: <http://www.iscar.com/Products.aspx/CountryId/1/ProductId/4900>. (дата обращения: 07.02.2017).
51. Rubio L., Loya J. A., Miguelez M. H., Fernandez-Saez J. Optimization of passive vibration absorbers to reduce chatter in boring // *Nechemical Systems and Signal Processing*. 2013. P. 691–704.
52. Sandvik coromant [Электронный ресурс] // Silent tools. URL: http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/silent_tools. (дата обращения: 07.02.2017).
53. Weinert K., Weihs C., Webber O., Raabe N. Varying bending eigenfrequencies in BTA deep hole drilling: mechanical modeling using statistical parameter estimation // *Production Engineering Res. Devel*. 2007. P. 127–134.
54. Пат. DE 102004024170. МПК B23B29/12, B23C5/00, B23C9/00. Die folgenden Andaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen / Bernd Aschenbach. 01.12.2005.
55. Пат. US 20050258580 МПК F16M 1/00. Damping apparatus for the damping of vibrations / Anders Digernes. 14.04.2003.
56. А. с. 1352764 СССР, В23 В35/00. Способ обработки глубоких отверстий / Фрезинский Л.Л., Кулагин Р.Н., Ткаченко А.А. // Б.И. 2000.

57. А. с. 1839920 СССР, G01C 12/18. Гироскопический стабилизатор / Лянзбург В.П., Эйрих В.И., Климарев А.М. // Б.И. 2006, №14.
58. А. с. 1839933 СССР, G01C 19/16, G01C 21/18. Двухосный гиростабилизатор / Гладышев Г.Н., Дмитриев В.С., Янгулов В.С. // Б.И. 2006, № 17.
59. А. с. 1000231 СССР, МКИ В 23 Q 15/00. Устройство для обработки глубоких отверстий / Биленко А.И., Диперштейн М.Б., Качоровский А.Б., Кулагин Р.Н., Ткаченко А.А., Жирнов В.А. // Б.И. 1983, №8.
60. А. с. 500025 СССР, МКИ В 23 Q 15/04. Устройство для контроля положения резцовой головки расточного станка / Диперштейн М.Б., Качоровский А.Б., Кулагин Р.Н. // Б.И. 1976, №3.
61. А. с. 740477 СССР, МКИ В23Q 15/04. Устройство контроля положения инструментальной головки /Кулагин Р.Н. // Б.И.1980, №22.
62. А.с. 831494 СССР, МКИ В23Q 1/24. Самоцентрирующийся люнет / Матвеев Ю.И., Коняхин В.Т., Сенькин Е.С., Кобылин Р.А., Жижин Н.Н., Карцева М.В. // Б.И. 1981
63. Пастоев И. Л. Разработка систем передвижения автоматизированных угледобывающих агрегатов: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 1987. 345 с.
64. Патент РФ 1352764, МПК В23В35/00. Способ обработки глубоких отверстий / Фрезинский Л.Л., Кулагин Р.Н., Ткаченко А.А. // Б.И.2000.
65. Патент РФ 139407, МПК В23В29/00. Резцедержатель, демпфирующий вибрации / Горелова А.Ю., Плешаков А.А., Кристаль М.Г., Стяжин В.Н. // Б.И. 2014, 11.
66. Патент РФ 2008126, МПК В23В1/00. Способ глубокого растачивания прецизионных цилиндров / Шендеров И. Б. // Б.И. 1994.
67. Патент РФ 2067513, МПК В23В51/00. Инструмент для обработки глубоких отверстий / Силин Н.С., Силин В.Н., Свистунов Б.А., Лефнер М.Н. // Б.И. 1996, № 21.
68. Патент РФ 2224219, МПК G01C19/30. Гироскопическое устройство / Макаров Б.Ф., Мартынов В.М., Леонов Н.А. // Б.И. 2004, № 31.

69. Патент РФ 2365471, МПК В23В29/00. Резцедержатель, демпфирующий вибрации / Михик П. // Б.И. 2009, №24.
70. Патент РФ 2421302, МПК В23В35/00. Способ сверления глубокого отверстия в детали / Комаишко С.Г. [и др.] // Б.И.2011, № 17.
71. Патент РФ 2424877, МПК В23В29/034, В23Q17/22. Устройство для сверления или растачивания отверстий / Ведель М.В. // Б.И.2011, № 21.
72. Патент РФ 2211116, МПК В23В41/02. Направляющее устройство для обработки глубоких отверстий / Лапин В.В. [и др.] // Б.И.2003.
73. Патент РФ 2098236, МПК В23В49/02. Направляющая втулка / Терехов В.М., Полеев В.П. // Б.И.1997.
74. Патент РФ 26762, МПК В23В49/02. Кондуктор / Макаров В.В. [и др.] // Б.И. 2002.
75. Патент РФ 2014965, МПК В23В29/02. Борштанга для растачивания глубоких отверстий / Аслибемян С.Ф., Филин М.М., Ветров С.И., Мещеряков Р.К. // Б.И.1994, № 27.
76. Патент РФ 2298456, МПК В23В29/02. Расточной инструмент / Корюкина Н.А. // Б.И. 2007, № 13.
77. Патент РФ 2196027, МПК В23В29/03. Расточная головка / Смирнов Г.В., Смирнов В.Г., Чалков Н.А. // Б.И.2003.
78. Патент РФ 2113943, МПК В23В5/08. Резцовая головка / Смирнов Г.В., Смирнов В.Г. // Б.И.1998.
79. Основи охорони праці: підручник / М.С. Одарченко, А.М. Одарченко, В.І. Степанов, Я.М. Черненко. – Х.: Стиль-Издат, 2017. – 334 с.
80. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халі мовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.
81. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: підручник для студентів вищих навч. закладів / За ред. М.П. Гандзюка – К.: Каравела, 2004. – 408 с.

82. Голінько В.І. Г 60 Основи охорони праці: підручник / В.І. Голінько; МОН України; Нац. гірн. ун-т. – 2-ге вид. – Д.: НГУ, 2014. – 271 с.
83. С.С. Козлов. Методичні вказівки до виконання розділу “Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях” в дипломних проектах для підготовки студентів факультету електроніки за освітньо-кваліфікаційним рівнем “Спеціаліст” та ”Магістр”. “ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ”. - К.: НТУУ ”КПІ”, 2013, - 44с.