

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення технології виготовлення корпусу 738196.112 з
дослідженням параметрів інструменту для розточування отворів

Виконав: студент VI курсу, групи МПмд-61
спеціальності 131 “Прикладна механіка”

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)	Волинець С.Я. (прізвище та ініціали)
----------	---

Керівник	(підпис)	Окіпний І.Б. (прізвище та ініціали)
----------	----------	--

Нормоконтроль	(підпис)	Ткаченко І.Г. (прізвище та ініціали)
---------------	----------	---

Завідувач кафедри	(підпис)	Окіпний І.Б. (прізвище та ініціали)
-------------------	----------	--

Рецензент	(підпис)	(прізвище та ініціали)
-----------	----------	------------------------

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: “Розроблення технології виготовлення корпусу 738196.112 з дослідженням параметрів інструменту для розточування отворів”.

У кваліфікаційній роботі представлено схему процесу розточування отвору розточною оправкою із ріжучою пластиною та напрямними опорами, розроблено розрахункову схему для дослідження деформації розточної оправки із напрямними опорами. Виведено диференціальне рівняння деформації розточної оправки з трьома пружними напрямними опорами як геометричне місце центрів поперечних перерізів оправки. Розв’язок диференціального рівняння виконано поєднанням методів Фур’є, чисельного методу Рунге-Кутта із розв’язком задачі Штурма-Ліувілля. Результати розв’язку з початковими граничними умовами представлено у вигляді графіків.

Проведено дослідження методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану розточної оправки із напрямними опорами.

Під час досліджень виконувалось проектування різних розточних оправок із напрямними опорами з вибором оптимального варіанту. Після цього здійснено вибір матеріалів оправки, ріжучої пластини та напрямних опор, накладання обмежень на кінчну частину розточної оправки, що закріплюється у шпинделі верстата, пружних властивостей направляючих опор та силового навантаження на ріжучу кромку пластини в трьох ортогональних напрямках декартової системи координат, генерування кінцево-елементної сітки моделі розточної оправки. В результаті проведених розрахунків програмним забезпеченням одержали графічне відображення величин напружень та деформацій в розточній оправці із напрямними опорами, а також місць, що мають найменший запас міцності для трьох випадків моделювання: при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою; при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості; при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою великої жорсткості.

Вдосконалено технологічний процес виготовлення корпусу 738196.112.

ЗМІСТ

Вступ	
1 Аналітична частина	
1.1. Аналіз стану питання.....	
1.2. Висновки та постановка завдань.....	
2 Науково-дослідна частина	
2.1. Дослідження деформації розточної оправки із напрямними опорами.....	
2.2. Дослідження методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану розточної оправки із напрямними опорами.....	
2.3. Висновки.....	
3 Технологічно-конструкторська частина	
3.1. Службове призначення деталі.....	
3.2. Вибір способу одержання заготовки.....	
3.3. Формування технологічного процесу	
3.4. Визначення припусків на оброблення.....	
3.5. Визначення режимів різання.....	
3.6. Розрахунок пристосування.....	
4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	
Висновки.....	
Перелік посилань.....	
Додатки	

ВСТУП

Для підвищення точності процесу розточування, покращення якості обробленої поверхні та підвищення його продуктивності виробники розточних інструментів використовують різноманітні технічні рішення. Серед яких є підвищення жорсткості розточної оправки інструмента. Одним із методів підвищення жорсткості розточних інструментів є встановлення додаткових опор на технологічному оснащенні та верстаті.

Низька жорсткість розточної оправки також є причиною зміни сили різання під час розточування отвору. Радіальна складова сили різання призводить до відхилення оправки, що зменшує дійсну глибину різання та одержаний діаметр обробленого отвору. Зношення ріжучої кромки твердосплавної пластини призводить до поступового зростання радіальної складової сили різання та виникнення відхилення від циліндричності обробленого отвору.

Процес розточування отворів піддається складному моніторингу, особливо при обробленні великих деталей із твердих матеріалів, що використовуються в аерокосмічній промисловості. Особливі обмеження стосуються вчасного виявлення виникнення автоколивань, руйнування ріжучих пластин, заклинювання стружки. Через малу жорсткість розточних оправок, пов'язаних із особливостями конструкції, такі інструменти схильні до виникнення автоколивань, тому для уникнення цього часто використовують засоби внутрішнього демпфування

Тому проектування процесу розточування, що буде стабільним щодо автоколивань, стружкоутворення, стійкості ріжучих пластин, жорсткості та точності обробленої поверхні є актуальним завданням.

Актуальним є також розроблення технологічного процесу виготовлення корпусу 738196.112.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Аналіз стану питання

Процес розточування (рис. 1.1) використовується для оброблення отворів різноманітних деталей машин із точністю до 5 мкм. Для підвищення точності процесу розточування, покращення якості обробленої поверхні та підвищення його продуктивності виробники розточних інструментів використовують різноманітні технічні рішення. Серед яких є підвищення жорсткості розточної оправки інструмента. Одним із методів підвищення жорсткості розточних інструментів є встановлення додаткових опор на технологічному оснащенні та верстаті.

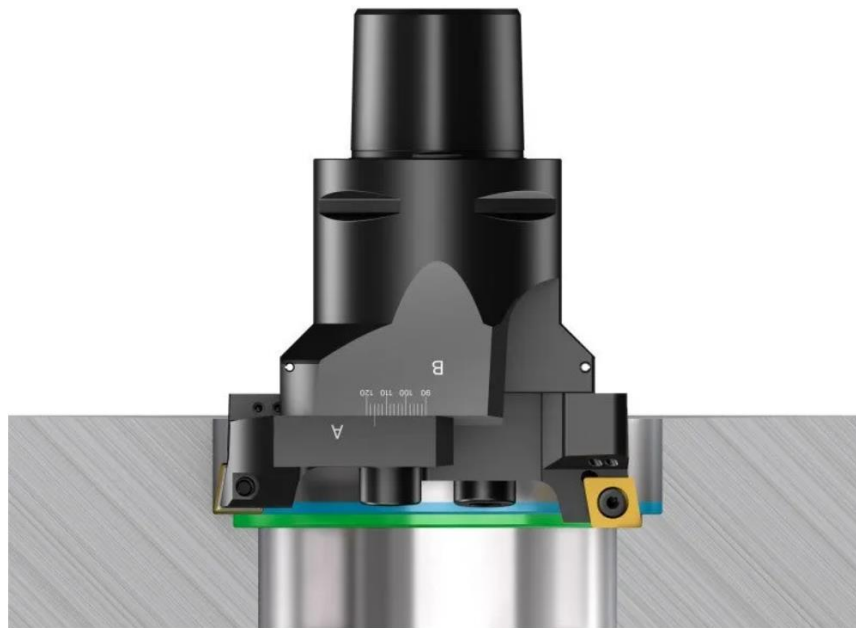


Рисунок 1.1 – Процес розточування ступінчастого отвору [12]

Однак такі опори перешкоджають здатності обробляти на одному верстаті заготовки різноманітних конструкцій, тобто знижують гнучкість обладнання. Для одержання необхідної виробничої гнучкості компанією Maral розроблено розточні оправки з налагоджувальними обертовими ріжучими пластинами а

також щонайменше із двома напрямними опорами, що розташовані на периферійній поверхні інструменту безпосередньо за ріжучою пластиною [15].

Інструмент використовує попередньо оброблену поверхню отвору як опору, усуваючи необхідність використання нерухомих опорних втулок на верстаті. Порівняно із звичайними розточними інструментами без опор, у запропонованих інструментах підвищується жорсткість та частота власних коливань, що забезпечує кращу якість оброблених поверхонь, особливо при великих співвідношеннях довжини розточної оправки до її діаметра. Проте порівняно із розточними оправками, що мають фіксовані додаткові опори з торцевої сторони, розміщені на верстаті, оправки із обертовими напрямними опорами мають меншу жорсткість.

Процес розточування ускладнюється при розточуванні складних деталей, наприклад серії концентричних отворів для колінчастого вала корпусу двигуна, що показано на рис. 1.2. Для оброблення таких отворів запропоновано [15] використовувати напрямні середні опори, що базуються по попередньо оброблених поверхнях заготовки, а також додаткову опорну втулку перед заготовкою. Проте, незважаючи на ці опори, розточна оправка має малу жорсткість, що призводить до виникнення автоколивань інструмента. Для уникнення цього явища у багатьох роботах проводиться детальний аналіз та моделювання процесу із застосуванням методів кінцевих елементів.

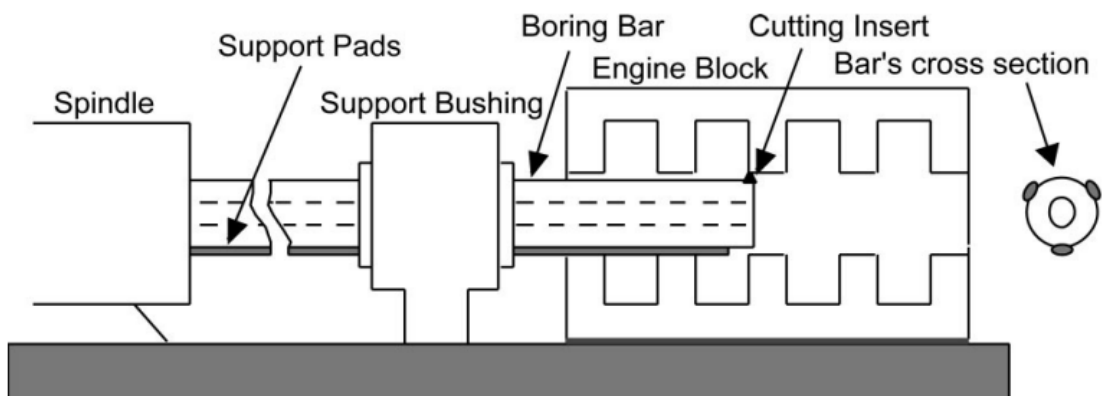


Рисунок 1.2 - Процес розточування серії концентричних отворів для колінчастого вала корпусу двигуна [15]

У більшості наукових робіт аналіз стабільності процесу розточування сфокусований на нерухомих розточних оправках та обертових заготовках, при цьому напрямок сили різання в інерційній системі координат є фіксований. Це відображається на незмінних у часі коефіцієнтах, що визначають силові параметри процесу. При обробленні великих корпусних деталей застосовуються обертові розточні інструменти. У цьому випадку напрямки дії радіальної та тангенціальної складових сили різання, що діють на інструмент, обертаються разом із розточною оправкою.

Аналіз процесу розточування обертотворим інструментом можна виконувати двома напрямками. При першому методі аналіз проводиться у нерухомих інерційних координатах, при цьому коефіцієнти, що визначають напрямки складових сили різання періодично змінюються в часі. При другому методі аналіз виконується у обертотворій прив'язаній до інструменту системі координат, при цьому коефіцієнти, що визначають напрямки складових сили різання будуть постійними. При цьому ортогональні координати інструменту будуть динамічно прив'язаними як функції швидкості обертання шпинделя.

У роботі [15] проведено аналіз процесу розточування отвору із застосуванням вказаних вище методів для дослідження різниці динамічних характеристик процесів розточування отворів із обертотворим та нерухомим інструментами.

Параметри двохмірного моделювання процесу розточування показано на рис. 1.3. Розточну оправку прийнято як зосереджену масу m . Переміщення q_r , q_t пов'язані із вершиною інструмента у радіальному e_r та тангенціальному e_t напрямках, тоді як переміщення q_1 , q_2 та x , y пов'язані із обертотворою та інерційною системами координат. Сили F_r та F_t відповідно радіальна та тангенціальна складові сили різання, що діють на інструмент. Також у моделі враховано жорсткість k_1 і k_2 інструменту у двох напрямках та відповідні коефіцієнти демпфування c_1 і c_2 . Вказані параметри визначаються експериментальними або аналітичними методами на основі теорії балок.

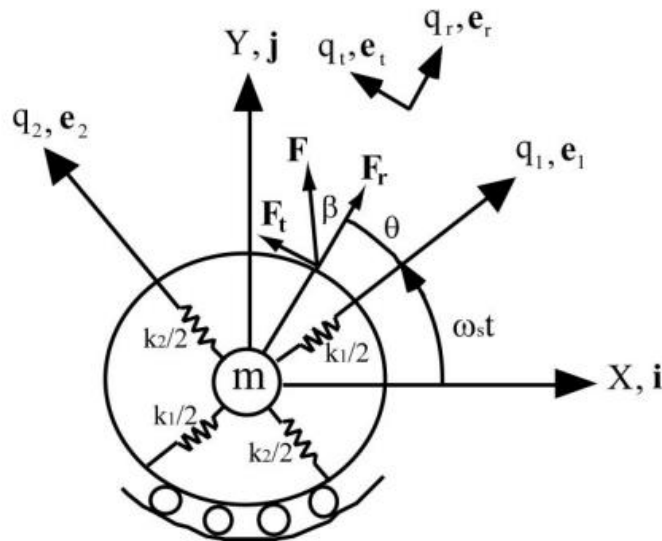


Рисунок 1.3 - Параметри двохмірного моделювання процесу розточування отвору [15]

Розточні інструменти із напрямними опорами компанії MAPAL [18] (рис. 1.4) дозволяють досягати високої точності та низької шорсткості оброблених поверхонь завдяки переміщенню напрямних опор по обробленій поверхні отвору а також за рахунок високоякісних точно оброблених змінних ріжучих пластин. Для фінішних операцій розточування висуваються високі вимоги до матеріалу ріжучої пластини, її покриття, геометрії ріжучої кромки та її шліфування. Завдяки точній системі налагодження точність оброблених отворів змінюється в межах мікрометрів. Час для встановлення ріжучих пластин знижено завдяки застосуванню системи EasyAdjust-System, при якій виставляється тільки діаметр інструмента.

Процес розточування отворів піддається складному моніторингу, особливо при обробленні великих деталей із твердих матеріалів, що використовуються в аерокосмічній промисловості. Особливі обмеження стосуються вчасного виявлення виникнення автоколивань, руйнування ріжучих пластин, заклинювання стружки. Через малу жорсткість розточних оправок, пов'язаних із особливостями конструкції, такі інструменти схильні до виникнення автоколивань, тому для уникнення цього часто використовують засоби внутрішнього демпфування [24].



Рисунок 1.4 - Розточні інструменти із напрямними опорами компанії MAPAL
[18]

При збільшенні довжини інструмента границі стабільності зменшуються і виникає необхідність у переналаджуванні параметрів процесу для забезпечення його стабільності. Границі стабільності процесу часто збільшують за рахунок зменшення радіуса заокруглення при вершині інструменту [25], або збільшуючи подачу різання [26], проте це призводить до підвищення шорсткості обробленої поверхні та зниження стійкості інструменту. При обробленні твердих матеріалів у аерокосмічній промисловості ця ситуація стає ще гіршою.

Низька жорсткість розточної оправки також є причиною зміни сили різання під час розточування отвору. Радіальна складова сили різання призводить до відхилення оправки, що зменшує дійсну глибину різання та

одержаний діаметр обробленого отвору [27]. Зношення ріжучої кромки твердосплавної пластини призводить до поступового зростання радіальної складової сили різання та виникнення відхилення від циліндричності обробленого отвору. Тому проектування процесу розточування, що буде стабільним щодо автоколивань, стружкоутворення, стійкості ріжучих пластин, шорсткості та точності обробленої поверхні потребує витрат часу та значних зусиль.

Для моніторингу процесу розточування у роботі [28] розроблено розточні оправки, що обладнані елементами демпфування, датчиками та іншими електронними компонентами для вимірювання сили різання, деформації та вібрації інструмента (рис. 1.5). Передача сигналів від датчиків до комп'ютера здійснюється безпроводово, що надає оператору та розробнику процесу інформацію про те, що відбувається на ріжучій кромці.

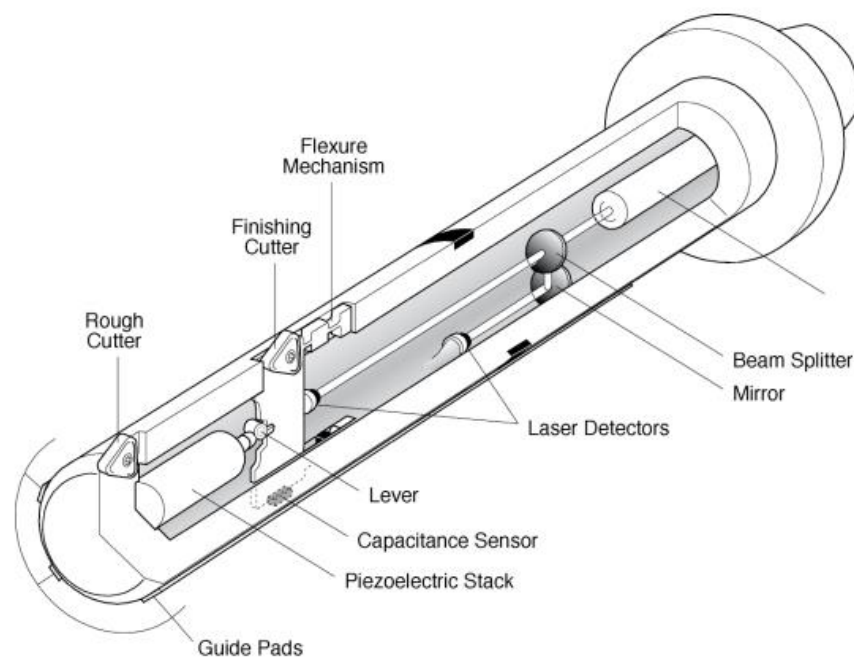


Рисунок 1.5 - Розточна оправка, обладнана елементами демпфування і датчиками [28]

На етапі проектування процесу така система може використовуватись для визначення та уникнення проблемних параметрів та режимів різання, на етапі

виробництва результати використовуються для моніторингу процесу та документації.

Багато рішень щодо уникнення проблемних параметрів розточування ґрунтуються на результатах вимірювань сили різання або вібрацій інструмента. У роботі [28] представлено загальну систему та представлено декілька прикладів як моніторинг параметрів дозволяє виявляти та коректувати різні проблеми, пов'язані із деформацією інструмента, зношення та руйнування ріжучих пластин, заклинювання стружки та виникнення автоколивань. Це ті проблеми, що можуть призвести до похибки розмірів, відхилення від циліндричності, дефектів оброблених поверхонь.

Типовим інструментом для розточування отворів є розточна оправка (рис. 1.6), на якій розміщено дві ріжучі пластини, одна використовується для чорнової обробки, друга – для чистової. При одному із переходів використовується тільки одна ріжуча пластина. Інструмент має значну кількість направляючих опор, що підтримують розточну оправку на обробленій поверхні заготовки. При початковому чорновому розточуванні отвору для підтримування розточної оправки використовується опорна обертова втулка інтегрована з інструментом. При заміні інструменту також замінюється опорна втулка як складальна одиниця.

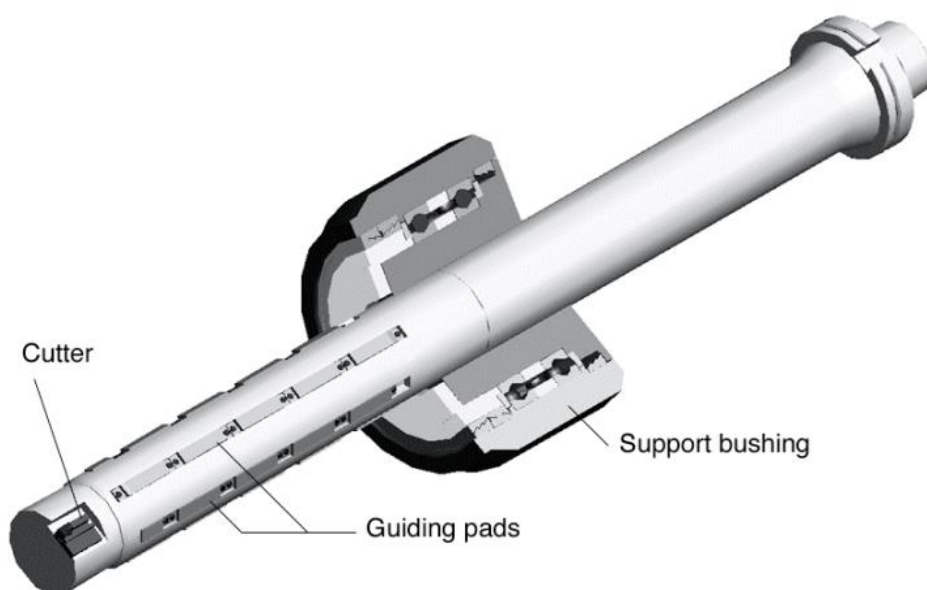


Рисунок 1.6 - Розточний інструменти із напрямними опорами [28]

У роботі [29] проведено дослідження параметрів розточних інструментів, використовуючи метод кінцевих елементів та програмне забезпечення MSC Nastran® FE solver. Модель розточного інструменту показано на рис. 1.7. Результати моделювання показано на рис. 1.8.

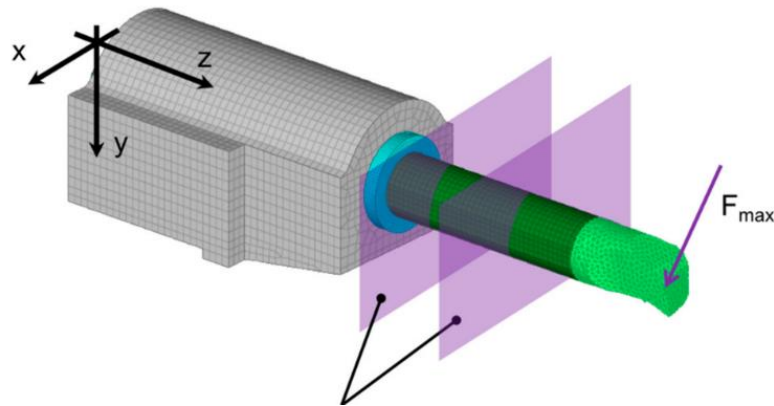


Рисунок 1.7 – Модель розточного інструменту для дослідження методом кінцевих елементів [29]

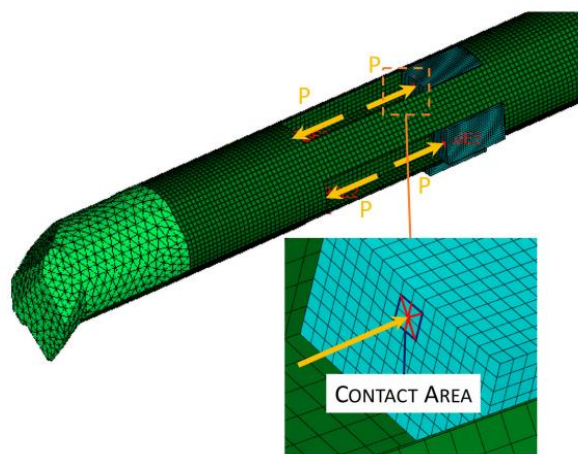


Рисунок 1.8 – Результати моделювання розточної оправки при використанні методу кінцевих елементів [29]

У роботі [30] проведено дослідження методом кінцевих елементів процесу розточування отворів в жорстких заготовках великого розміру, розміщених на столі верстата, використовуючи обертовий розточний інструмент. При обробленні отворів великого діаметра конструкція інструмента є складнішою і його не можна моделювати як окрему балку.

У прийнятній моделі процесу розточування (рис. 1.9) розглянуто структурну систему розточного інструмента, що обертається із кутовою швидкістю n та здійснює лінійні переміщення в напрямку подачі v_f , як набір чотирьох пружних елементів - прутків Ейлера-Бернуллі (E-BBs), елементи демфування (SDEs), процес різання, елементи спряження (CE).

Тому поведінка структурної системи, одержаної вказаним способом, описується вектором в узагальнених координатах q у локальній декартовій системі координат x_{e1} , x_{e2} , x_{e3} для кожного пружного елемента. Відносно малі швидкості обертання розточної оправки (менше 1000 об/хв) дозволяють нехтувати впливом гіроскопічного ефекту на динамічні властивості процесу.

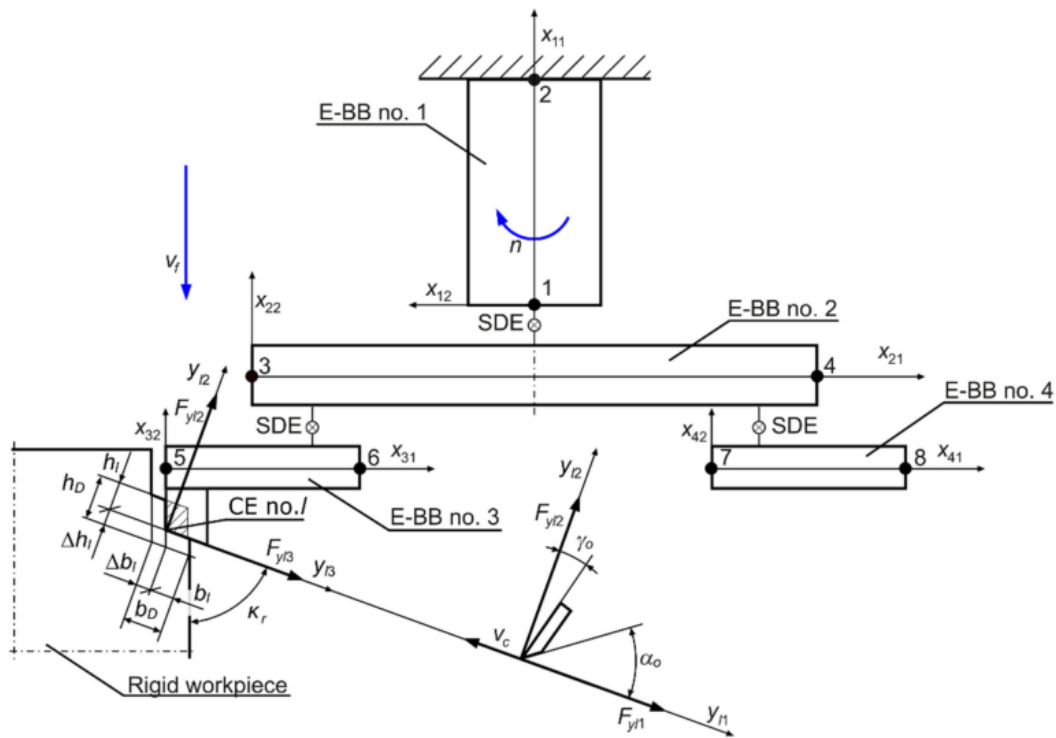
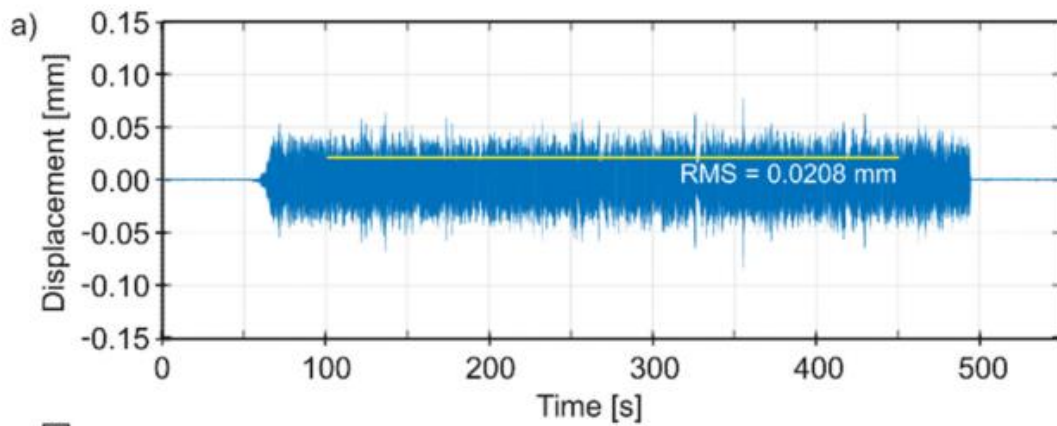
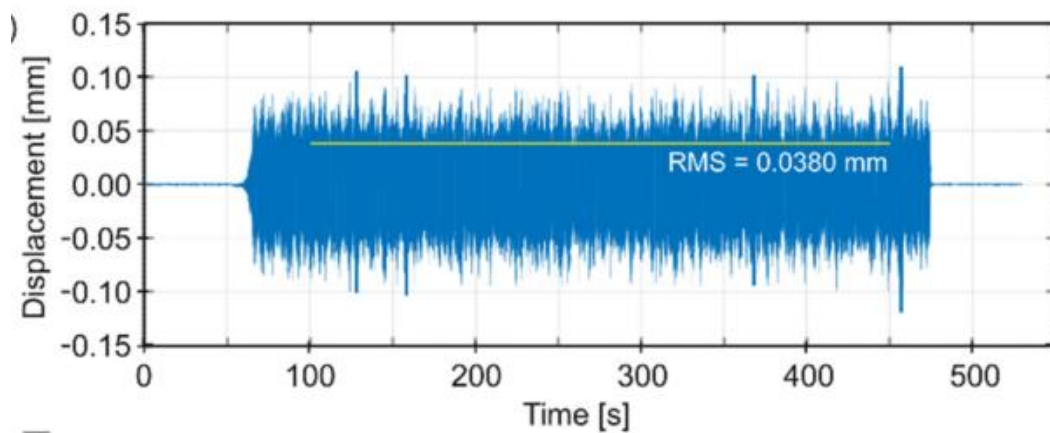


Рисунок 1.9 – Структурна схема розточного інструмента в межах динамічної моделі [30]

На рисунку 1.10 представлено результати моделювання у вигляді графіків зміни деформації ріжучої кромки інструмента в радіальному напрямку для найкращої швидкості різання 120 об/хв із найменшими вібраціями і для найгіршої швидкості різання 125 об/хв із найбільшими вібраціями



a)



б)

Рисунок 1.10 – Графіки зміни деформації ріжучої кромки інструмента в радіальному напрямку при: а) частоті обертання 120 об/хв; б) частоті обертання 125 об/хв [30]

1.2. Висновки та постановка завдань

В результаті аналізу літературних джерел встановлено, що для підвищення точності процесу розточування, покращення якості обробленої поверхні та підвищення його продуктивності виробники розточних інструментів використовують різноманітні технічні рішення. Серед яких є підвищення жорсткості розточної оправки інструмента. Одним із методів підвищення жорсткості розточних інструментів є встановлення додаткових опор на технологічному оснащенні та верстаті.

Низька жорсткість розточної оправки також є причиною зміни сили різання під час розточування отвору. Радіальна складова сили різання призводить до відхилення оправки, що зменшує дійсну глибину різання та одержаний діаметр обробленого отвору. Зношення ріжучої кромки твердосплавної пластини призводить до поступового зростання радіальної складової сили різання та виникнення відхилення від циліндричності обробленого отвору. Тому проектування процесу розточування, що буде стабільним щодо автоколивань, стружкоутворення, стійкості ріжучих пластин, шорсткості та точності обробленої поверхні є актуальним завданням.

У кваліфікаційній роботі потрібно вирішити такі завдання:

1. Представити схему процесу розточування отвору розточною оправкою із ріжучою пластиною та напрямними опорами.
2. Розробити розрахункову схему для дослідження деформації розточної оправки із напрямними опорами.
3. Вивести та розв'язати диференціальне рівняння деформації розточної оправки з пружними напрямними опорами. Результати представити у вигляді графіків.
4. Провести дослідження методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану розточної оправки із напрямними опорами.
5. Вдосконалити відомий технологічний процес виготовлення корпусу 738196.112.

2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1. Дослідження деформації розточної оправки із напрямними опорами

В результаті літературного аналізу, експериментальних досліджень визначено, що жорсткість, конструкція, величини деформації при зовнішньому силовому навантаженні на ріжучу пластину розточної оправки мають значний вплив на якість обробленого отвору, зокрема на точність та шорсткість обробленої поверхні. Одним із методів підвищення жорсткості розточної оправки при обробленні глибоких глухих отворів є застосування додаткових напрямних опор 4 (рис. 2.1), що розміщуються на розточній оправці 2 і є у взаємодії із поверхнею розточеного отвору заготовки 1. Процес різання матеріалу виконується шестигранною ріжучою твердосплавною пластиною 3.

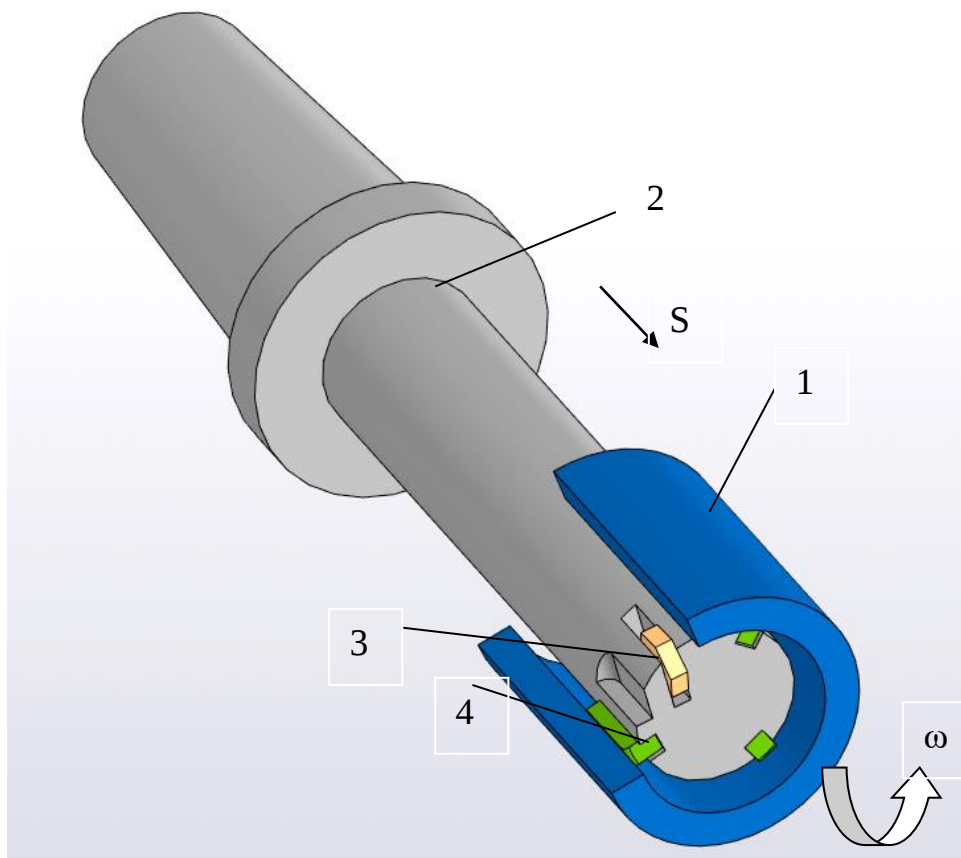


Рисунок 2.1 – Схема процесу розточування отвору розточною оправкою із ріжучою пластиною та напрямними опорами

Головними рухами при розточуванні є обертання заготовки із частотою ω та подача інструменту S . Для дослідження впливу параметрів конструктивних елементів розточної оправки а також зовнішнього навантаження у вигляді сили різання на величину деформації оправки розроблено розрахункову схему, що представлена на рис. 2.2.

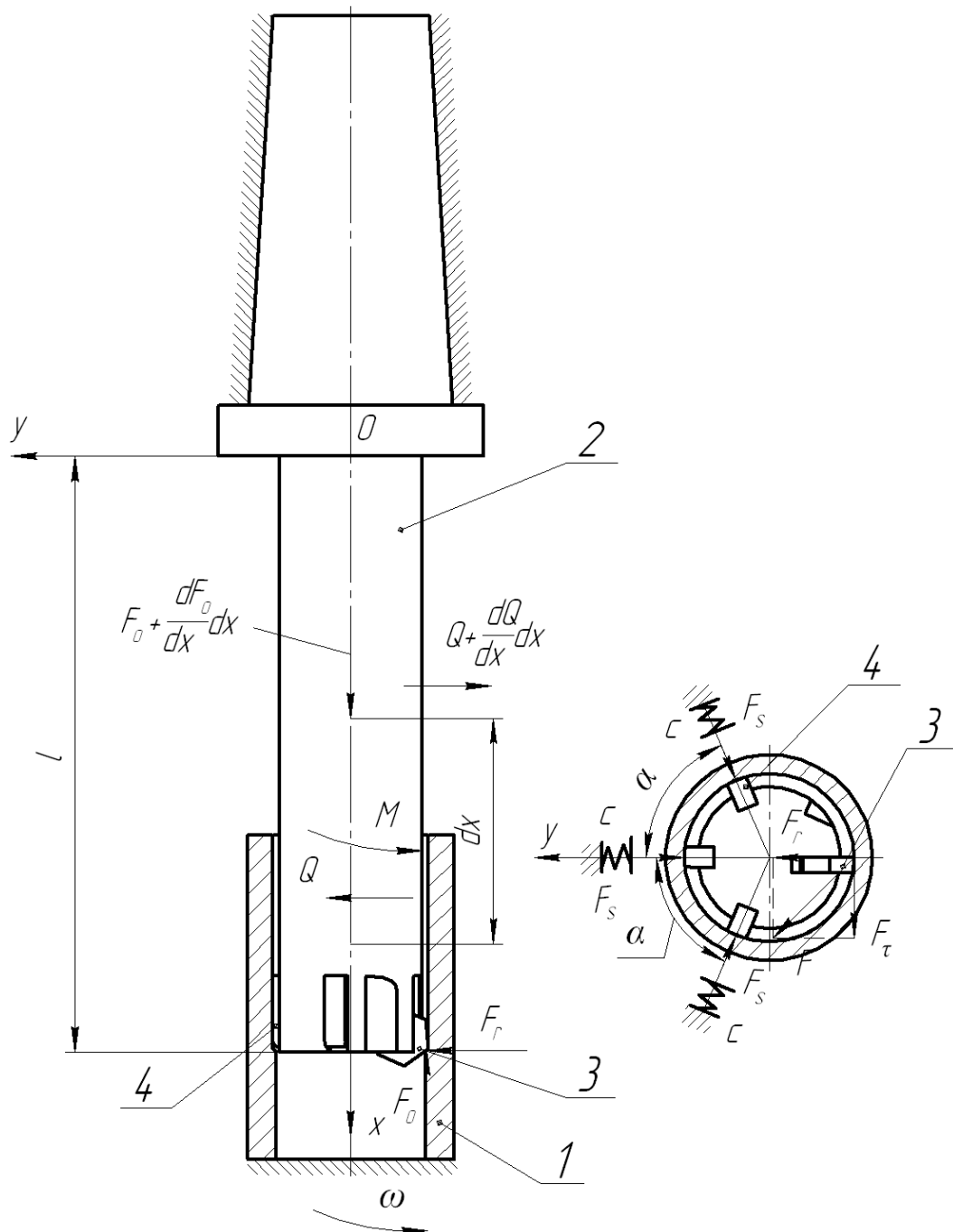


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема для дослідження деформації розточної оправки із напрямними опорами: 1 – заготовка; 2 – оправка; 3 – ріжуча пластина; 4 – напрямна опора

На розрахунковій схемі рис. 2.2 виділено малий елемент довжиною dx , що розташований на вертикальній вісі x . Обертний рух здійснює заготовка із постійною частотою обертання ω . При дії радіальної F_r , тангенціальної F_τ , та осьової F_0 складових сили різання відбувається деформація розточної оправки.

Залежність радіальної F_r , тангенціальної F_τ , та осьової F_0 сили різання від режимів різання описують емпіричними степеневими рівняннями [16]:

$$P_r = V_1^{n_r} S^{y_r} t_1^{z_r} K_t; \quad (2.1)$$

$$P_\tau = V_1^{n_\tau} S^{y_\tau} t_1^{z_\tau} K_t; \quad (2.2)$$

$$P_0 = V_1^{n_0} S^{y_0} t_1^{z_0} K_t, \quad (2.3)$$

де S – подача;

t_1 – глибина різання;

n_r, n_τ, n_0 – показники степені, що визначають вплив швидкості різання на радіальну, тангенціальну та осьову складові сили різання;

y_r, y_τ, y_0 – показники степені, що визначають вплив подачі різання на радіальну, тангенціальну та осьову складові сили різання;

z_r, z_τ, z_0 – показники степені, що визначають вплив глибини різання на радіальну, тангенціальну та осьову складові сили різання;

K_t - коефіцієнт, що визначає вплив геометрії ріжучої пластини на радіальну, тангенціальну та осьову складові сили різання.

Дію пружних напрямних опор на величину деформації розточної оправки описано лінійним співвідношенням:

$$F_s = c\Delta, \quad (2.4)$$

де c - еквівалентна жорсткість пружної напрямної опори;

Δ - значення деформації розточної оправки у точці дії пружної напрямної опори.

Із розрахункової схеми рис. 2.2 прийнято, що максимальна деформація розточної оправки відбувається у площині xOy на величину $y(x,t)$ в момент часу t . При цьому положення розточної оправки визначається геометричним місцем

центрів поперечних перерізів оправки. Тоді дія пружних напрямних опор на величину деформації розточної оправки визначається співвідношенням

$$F_s = cy(x, t). \quad (2.5)$$

На рисунку 2.2 для виведення диференціального рівняння деформованої частини розточної оправки виконано такі позначення [31]: Q – перерізує зусилля, що виникає у розточній оправці на координаті x , $Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx$ – перерізує зусилля, що виникає у розточній оправці на координаті $x+dx$. При деформації розточної оправки виникає кут нахилу θ_1 вісі Ox , дотичної до середньої лінії нормальних перерізів на координаті x ; кут нахилу θ_2 вісі Ox , дотичної до середньої лінії нормальних перерізів на координаті $x+dx$ вісь Ox .

Відповідно до розрахункової схеми на рис. 2.2 диференціальне рівняння деформації розточної оправки довжиною dx з трьома пружними напрямними опорами має вигляд:

$$-F_0 \sin \theta_1 - \frac{\partial Q}{\partial x} dx + \left(F_0 + \frac{\partial F_0}{\partial x} dx \right) \sin \theta_2 - cy(1 + 2 \cos \alpha) dx + F_r dx = m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx, \quad (2.6)$$

де α - кут розміщення пружних напрямних опор відносно осі y ;

$m(x)$ - погонна маса розточної оправки в напрямку осі x .

При малих переміщеннях елементів розточної оправки $\frac{\partial y}{\partial x}$, θ_1 , θ_2 будуть малими величинами, для яких можна використати рівняння [31] $\sin \theta_1 = \frac{\partial y}{\partial x}$,

$$\sin \theta_2 = \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx.$$

Підставляємо прийняті спрощення у диференціальне рівняння (2.6), скорочуємо на dx та отримаємо:

$$-\frac{\partial Q}{\partial x} + F_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial F_0}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x} - cy(1 + 2 \cos \alpha) dx + F_r = m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (2.7)$$

Зв'язок між моментом згину M та перерізуючим зусиллям Q визначаємо із відомої залежності [32]:

$$Q = \frac{dM}{dx} - F_0 \frac{\partial y}{\partial x}. \quad (2.8)$$

Підставляємо рівняння (2.8) у рівняння (2.7) і після перетворень отримуємо:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dM}{dx} - F_0 \frac{\partial y}{\partial x} \right) + F_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial F_0}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x} - cy(1 + 2 \cos \alpha) dx + F_r = m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (2.9)$$

Моментом згину M визначається співвідношенням:

$$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (2.10)$$

де E - модуль Юнга матеріалу розточної оправки;

I – осьовий момент інерції поперечного перерізу розточної оправки.

Момент інерції круглого поперечного перерізу розточної оправки [32]:

$$I = \frac{\pi D^4}{64}, \quad (2.11)$$

де D – діаметр поперечного перерізу оправки.

Підставляємо рівняння (2.10), (2.11) та одержуємо:

$$-E \frac{\pi D^4}{64} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + F_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - cy(1 + 2 \cos \alpha) + F_r = m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}; \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{E \pi D^4}{4m(x)} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - \frac{F_0}{m(x)} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{cy(1 + 2 \cos \alpha)}{m(x)} = \frac{F_r}{m(x)}. \quad (2.13)$$

Для розв'язку диференціального рівняння (2.13) виконуємо поєднання методів Фур'є [31] та чисельного методу Рунге-Кутта.

Граничні умови для розв'язку диференціального рівняння (2.13) будуть такими: $y(0,t) = 0$; $y(\mu l, t) = 0$, $y(x, 0) = 0$; $y'(x, 0) = 0$, де μ - коефіцієнт довжини, визначається способом закріплення розточної оправки [32]. Для консольної розточної оправки закріпленої у шпинделі $\mu = 2$ [32].

Розв'язок рівняння (2.13) згідно методу Фур'є представимо у вигляді добутку [32]

$$y(x, t) = X(x)T(t), \quad (2.14)$$

де $T(t)$ - функція що залежить тільки від t ;

$X(x)$ - функція, що залежить тільки від x .

Підставляємо рівняння (2.14) у рівняння (2.13):

$$T''(t)X(x) = -\frac{E\pi D^4}{4m(x)} X^{IV}(x)T(t) + \frac{F_0 X''(x)T(t)}{m(x)} - \frac{cX(x)T(t)(1+2\cos\alpha)}{m(x)} + \frac{F_r}{m(x)}. \quad (2.15)$$

Ділимо рівняння (2.15) на добуток $X(x)T(t)$:

$$\frac{T''(t)}{T(t)} = -\frac{E\pi D^4}{4m(x)} \frac{X^{IV}(x)}{X(x)} + \frac{F_0 X''(x)}{m(x)X(x)} - \frac{c(1+2\cos\alpha)}{m(x)} + \frac{F_r}{m(x)X(x)}. \quad (2.16)$$

Рівняння (2.16) дійсне при змінних параметрах $0 < x < l$, $t > 0$. Використовуючи метод Фур'є, одержуємо:

$$\frac{T''(t)}{T(t)} = -\frac{E\pi D^4}{4m(x)} \frac{X^{IV}(x)}{X(x)} + \frac{F_0 X''(x)}{m(x)X(x)} - \frac{c(1+2\cos\alpha)}{m(x)} + \frac{F_r}{m(x)X(x)} = -\lambda, \quad (2.17)$$

де λ – константа розділення змінних.

Із співвідношення (2.17) після розділення змінних одержано диференціальні рівняння функцій $X(x)$ та $T(t)$ [31]:

$$T''(t) + \lambda T(t) = 0; \quad (2.18)$$

$$-E \frac{\pi D^4}{4} X^{IV}(x) + F_0 X''(x) - c(1 + 2 \cos \alpha) X(x) + F_r X(x) + \lambda m(x) X(x) = 0. \quad (2.19)$$

Для визначення постійної величини λ необхідно розв'язати задачу Штурма-Ліувілля. Корені диференціального рівняння (2.18) є уявними $p = \pm i\sqrt{\lambda}$, тому загальний розв'язок такого рівняння буде мати вигляд [31]:

$$T(t) = A_1 e^{i\sqrt{\lambda}t} + A_2 e^{-i\sqrt{\lambda}t} = C_1 \cos(\sqrt{\lambda}t) + C_2 \sin(\sqrt{\lambda}t), \quad (2.20)$$

де A_1, A_2, C_1, C_2 – сталі інтегрування, що визначаються із початкових умов.

Похідна рівняння (2.20) буде мати вигляд [31]:

$$T'(t) = \sqrt{\lambda} \left(-C_1 \sin(\sqrt{\lambda}t) + C_2 \cos(\sqrt{\lambda}t) \right). \quad (2.21)$$

Розв'язок диференціального рівняння (2.19) проведено чисельним методом Рунге-Кутта із такими початковими умовами: при $x=0$, $X(x)=0$, $X' = 0$, $X'' = 0$.

Погонну масу розточної оправки в напрямку осі x визначено за формулою:

$$m(x) = \frac{\rho \pi D^2}{4} x, \quad (2.22)$$

де ρ – густина матеріалу, з якого виготовлено розточну оправку.

Результати розв'язку диференціального рівняння 2.19 з початковими граничними умовами представлено у вигляді графіків на рисунках 2.3, 2.4, 2.5 та 2.6.

Із графіків рис. 2.3 можна побачити, що при збільшенні радіальної сили різання F_r від 500 Н до 900 Н при діаметрі розточної оправки $D=28$ мм без застосування напрямних опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,075 мм до 0,135 мм.

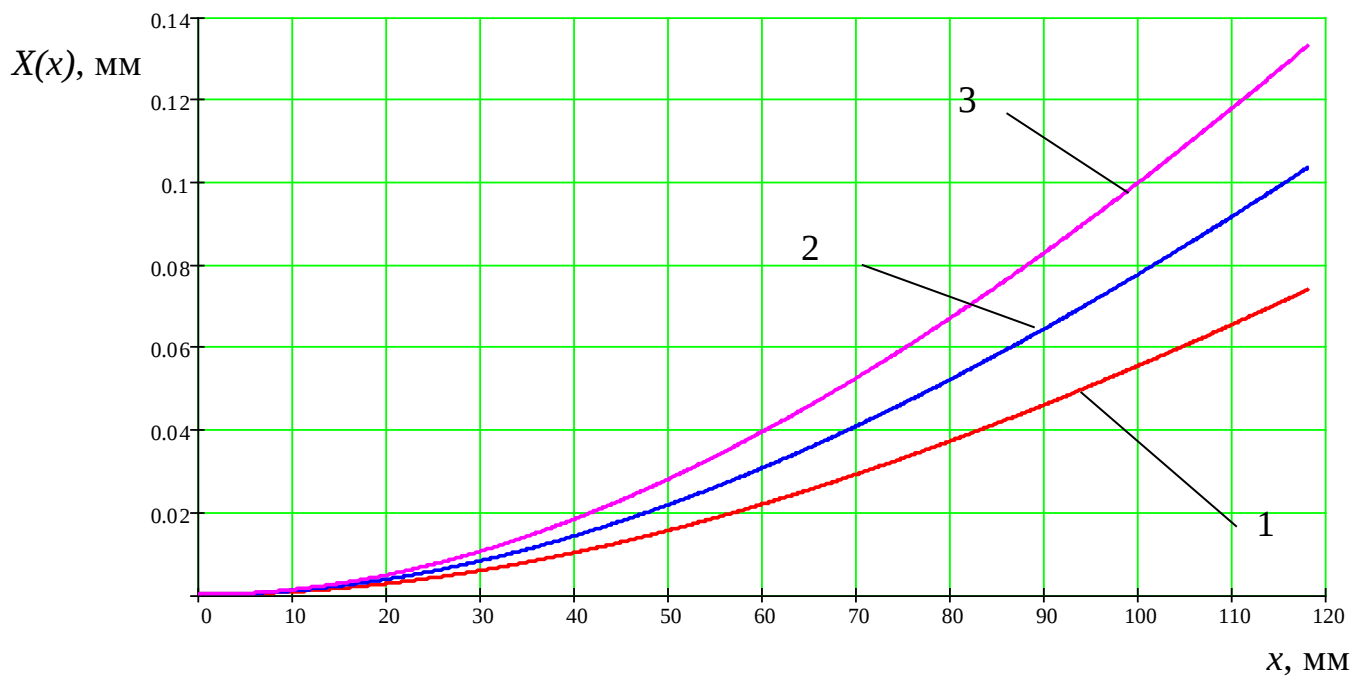


Рисунок 2.3 – Крива деформації середньої лінії розточної оправки без напрямних опор $D=28$ мм: 1) $F_r=500$ Н; 2) $F_r=700$ Н; 3) $F_r=900$ Н

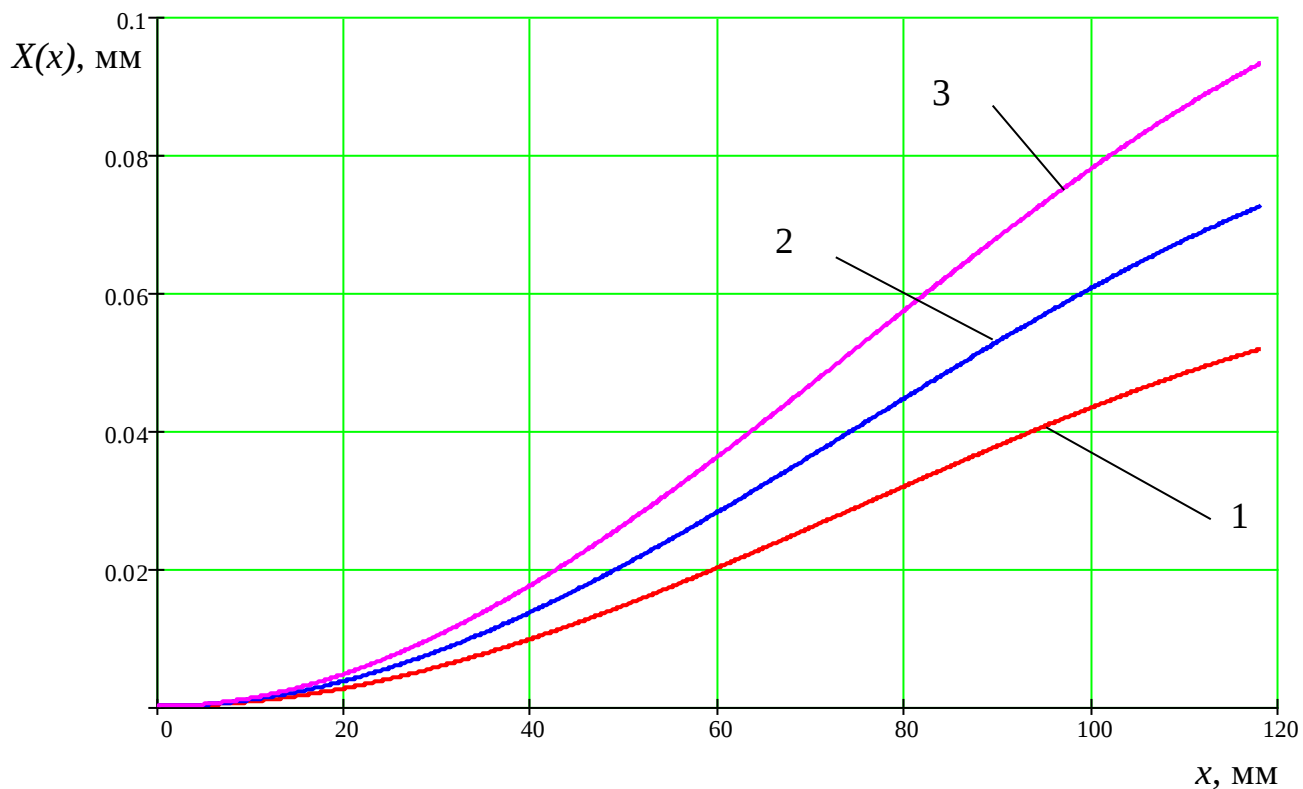


Рисунок 2.4 – Крива деформації середньої лінії розточної оправки із застосуванням напрямних опор $D=28$ мм:
1) $F_r=500$ Н; 2) $F_r=700$ Н; 3) $F_r=900$ Н

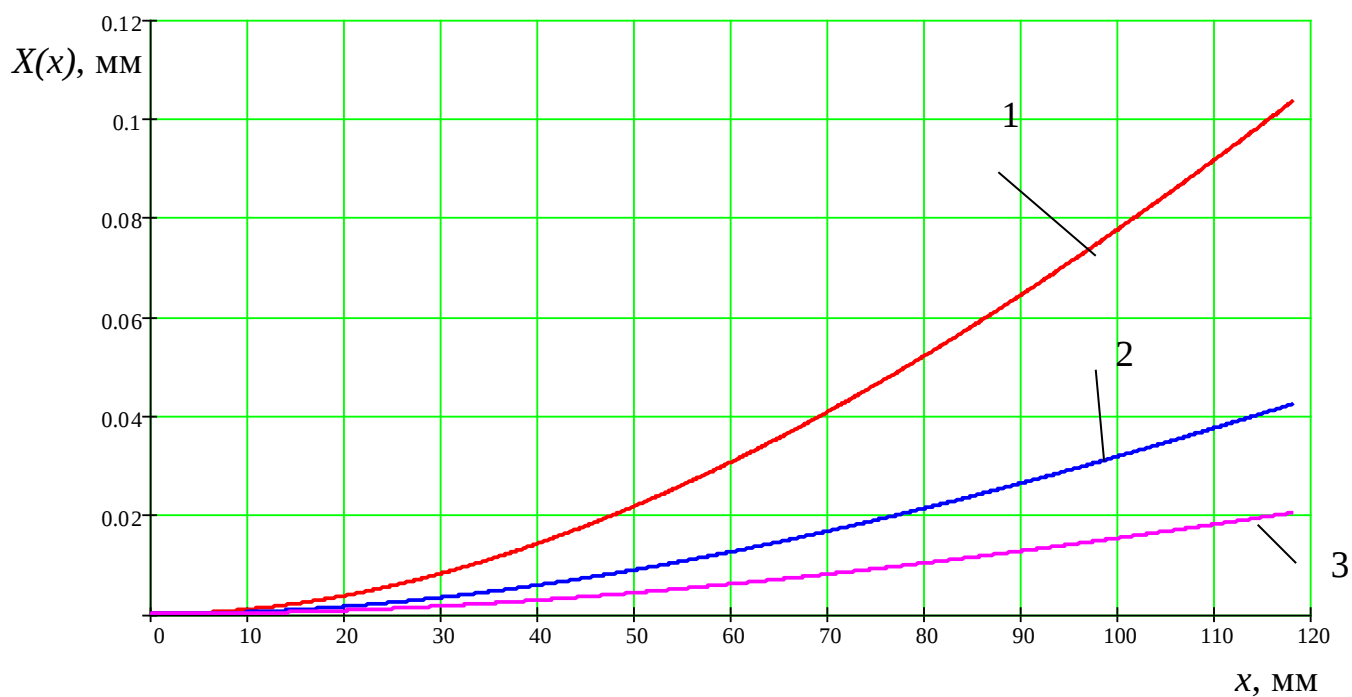


Рисунок 2.5 – Крива деформації середньої лінії розточної оправки без напрямних опор $F_r=700$ Н: 1) $D=28$ мм; 2) $D=35$ мм; 3) $D=42$ мм

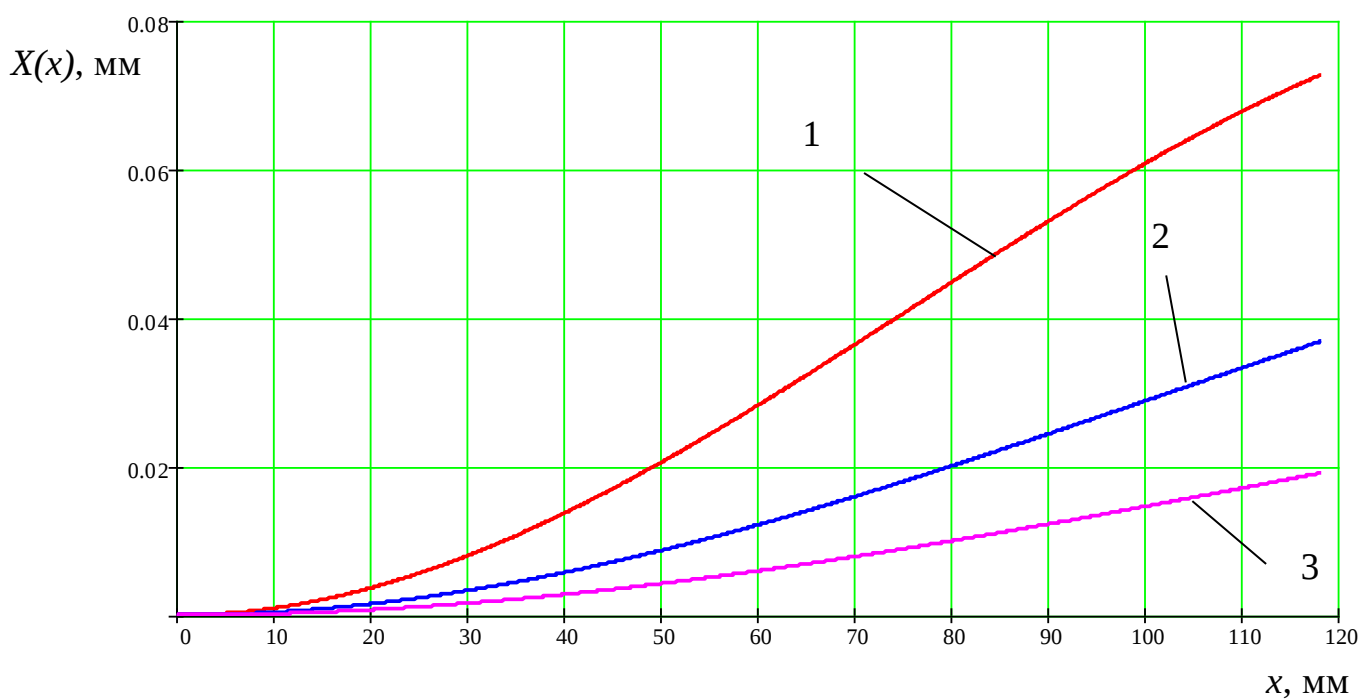


Рисунок 2.6 – Крива деформації середньої лінії розточної оправки із застосуванням напрямних опор $F_r=700$ Н: 1) $D=28$ мм; 2) $D=35$ мм; 3) $D=42$ мм

Із графіків рис. 2.4 можна побачити, що при збільшенні радіальної сили різання F_r від 500 Н до 900 Н при діаметрі розточної оправки $D=28$ мм із застосуванням напрямних опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,05 мм до 0,09 мм.

Отже, порівнюючи графіки рис. 2.3 та рис. 2.4, встановлено, що застосування напрямних опор на розточній оправці діаметром $D=28$ мм і довжиною $l=118$ мм дозволяє зменшити величину деформації оправки у 1,5 рази та підвищити якість обробленої поверхні.

Із графіків рис. 2.5 встановлено, що при збільшенні діаметра розточної оправки D від 28 мм до 42 мм при радіальній силі різання $F_r = 700$ Н без застосування напрямних опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,02 мм до 0,105 мм.

Із графіків рис. 2.6 встановлено, що при збільшенні діаметра розточної оправки D від 28 мм до 42 мм при радіальній силі різання $F_r = 700$ Н із застосуванням напрямних опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,018 мм до 0,07 мм.

Отже, порівнюючи графіки рис. 2.5 та рис. 2.6, встановлено, що застосування напрямних опор на розточній оправці діаметром $D=28$ мм і довжиною $l=118$ мм дозволяє зменшити величину деформації оправки у 1,5 рази, діаметром $D=35$ мм - у 1,2 рази, діаметром $D=42$ мм - у 1,11 рази. Тому використання напрямних опор доцільно застосовувати на розточних оправках малого діаметру та жорсткості.

2.2. Дослідження методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану розточної оправки із напрямними опорами

Під час проектування розточної оправки із напрямними опорами здійснено її просторове комп'ютерне моделювання із застосуванням прикладного програмного забезпечення (рис. 2.1). Це забезпечило виконання наступного етапу проектування - дослідження методом кінцевих елементів напружено-

деформованого стану розточної оправки із напрямними опорами при дії сил різання під час розточування отвору.

Під час досліджень виконувалось проектування різних розточних оправок із напрямними опорами з вибором оптимального варіанту. Після цього здійснено вибір матеріалів оправки, ріжучої пластини та напрямних опор, накладання обмежень на кінцеву частину розточної оправки, що закріплюється у шпинделі верстата, пружних властивостей направляючих опор та силового навантаження на ріжучу кромку пластини в трьох ортогональних напрямках декартової системи координат (рис. 2.7), генерування кінцево-елементної сітки моделі розточної оправки (рис. 2.8). В результаті проведених розрахунків програмним забезпеченням одержали графічне відображення величин напружень (рис. 2.9, рис. 2.10, рис. 2.11) та деформацій (рис. 2.12, рис. 2.13, рис. 2.14) в розточній оправці із напрямними опорами, а також місць, що мають найменший запас міцності (рис. 2.15, рис. 2.16, рис. 2.17) для трьох випадків моделювання: при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою (рис. 2.9, рис. 2.12, рис. 2.15); при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості (рис. 2.10, рис. 2.13, рис. 2.16); при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою великої жорсткості (рис. 2.11, рис. 2.14, рис. 2.17).

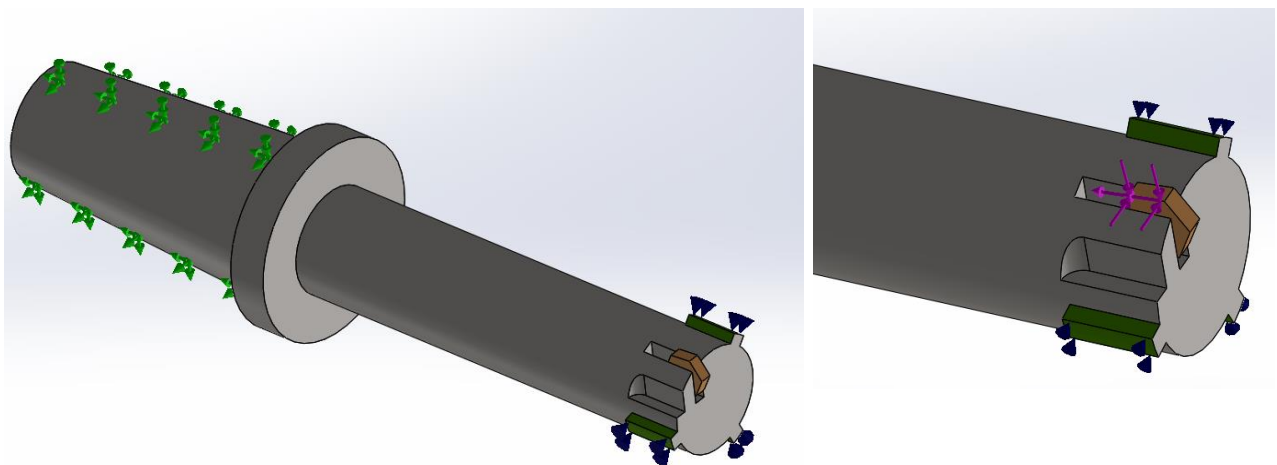


Рисунок 2.7 - Накладання обмежень на кінцеву частину розточної оправки, що закріплюється у шпинделі верстата, пружних властивостей напрямних опор та силового навантаження на ріжучу кромку пластини

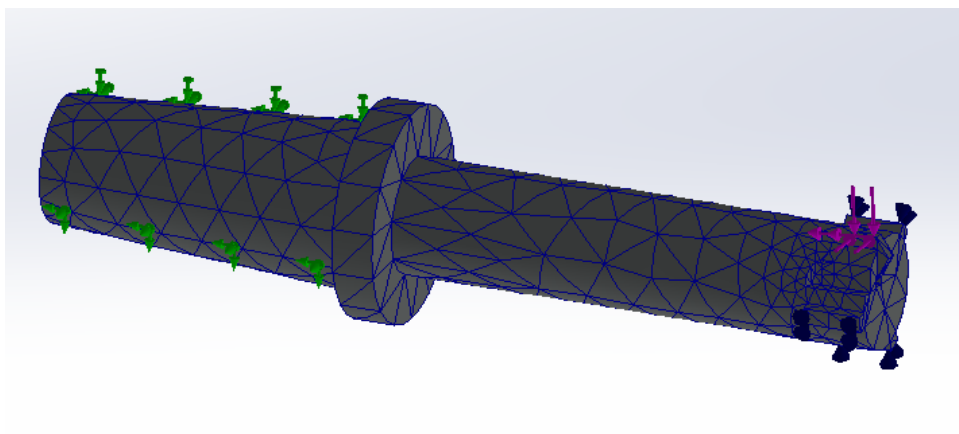


Рисунок 2.8 - Генерування кінцево-елементної сітки моделі розточної оправки

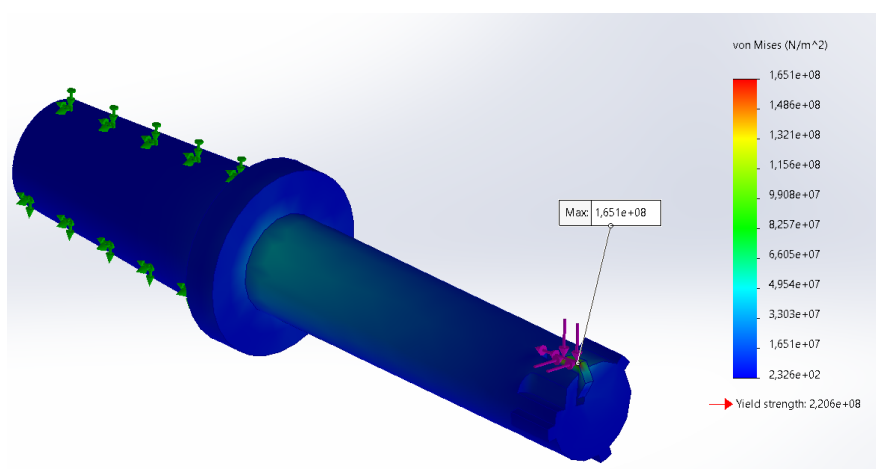


Рисунок 2.9 – Величини напружень, що виникають в розточній оправці при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою

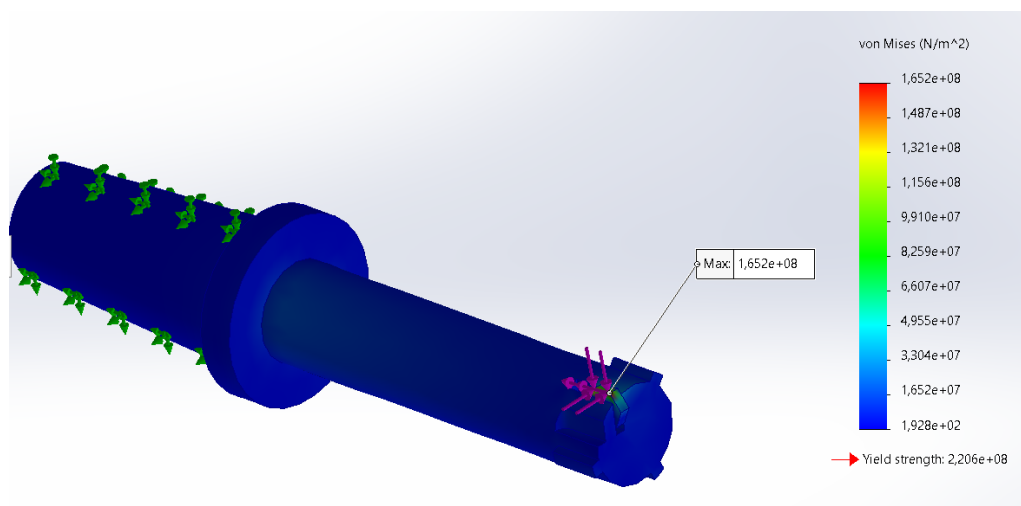


Рисунок 2.10 – Величини напружень, що виникають в розточній оправці при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості

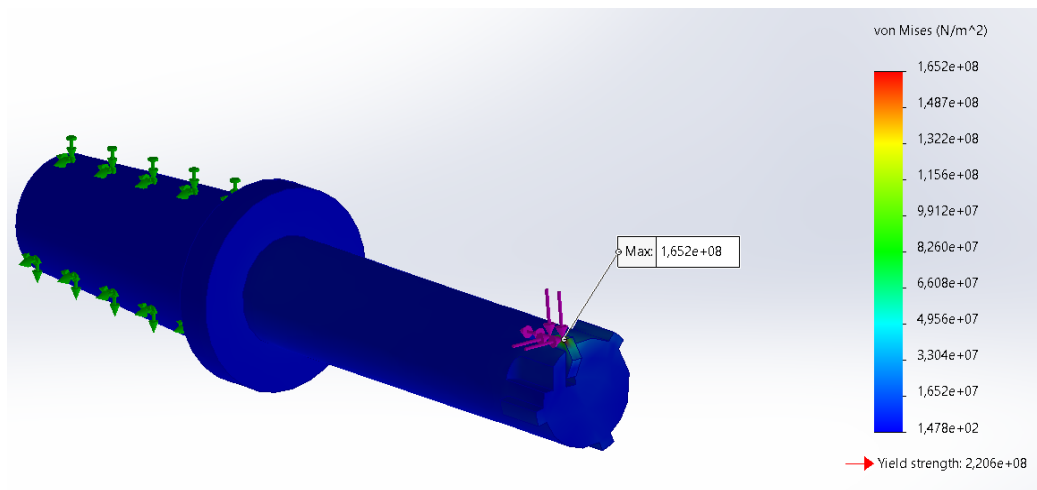


Рисунок 2.11 – Величини напружень, що виникають в розточній оправці при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою великої жорсткості

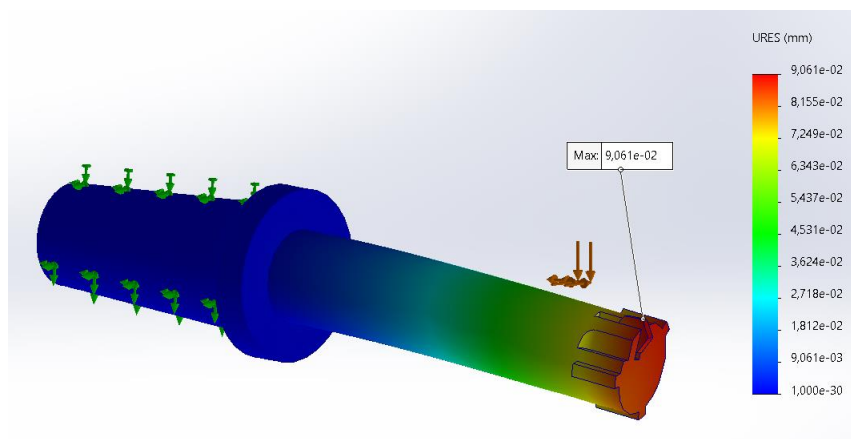


Рисунок 2.12 – Величини деформацій розточної оправки при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою

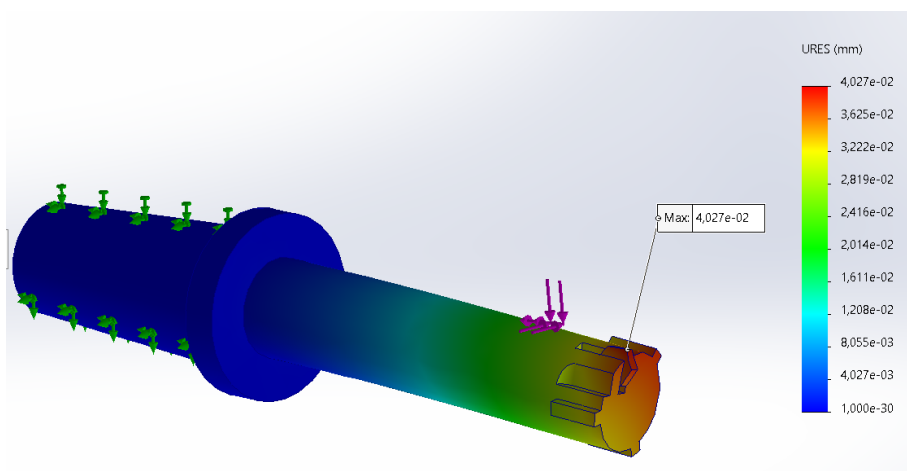


Рисунок 2.13 – Величини деформацій розточної оправки при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості

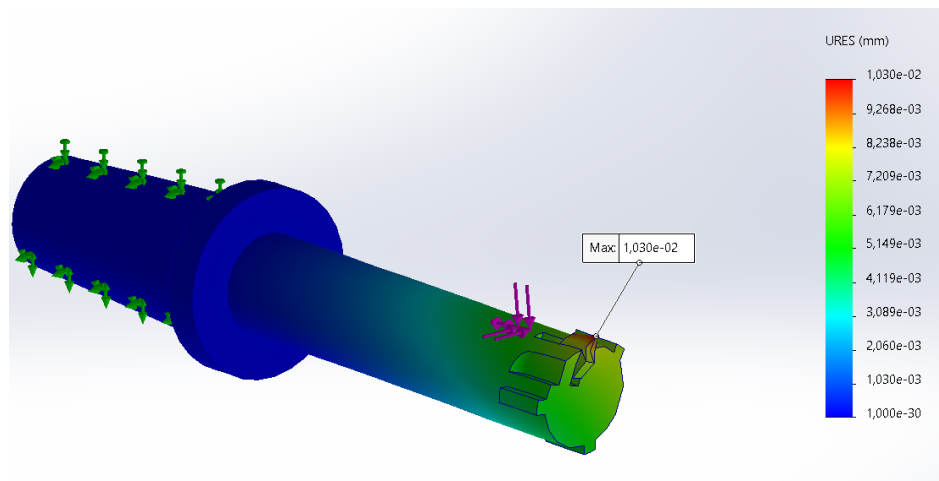


Рисунок 2.14 – Величини деформацій розточної оправки при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою великої жорсткості

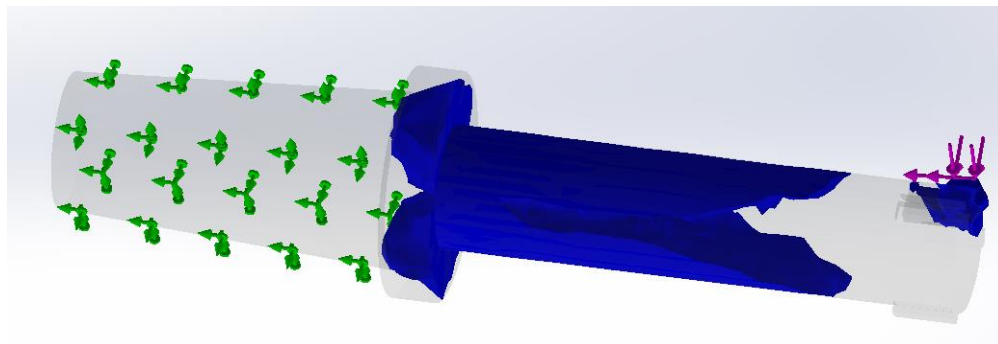


Рисунок 2.15 – Визначення місць розточної оправки, що мають найменший запас міцності при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою

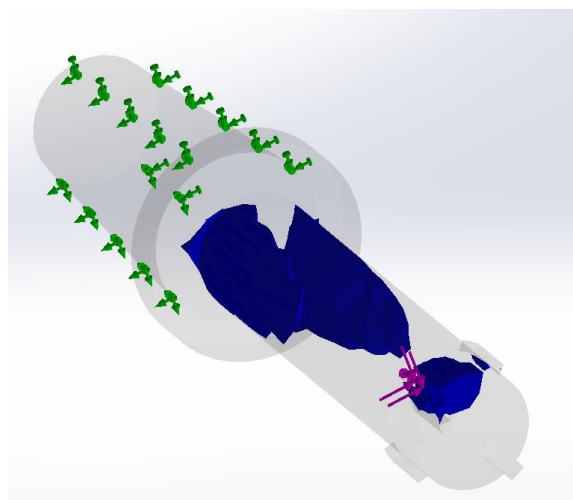


Рисунок 2.16 – Визначення місць розточної оправки, що мають найменший запас міцності при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості

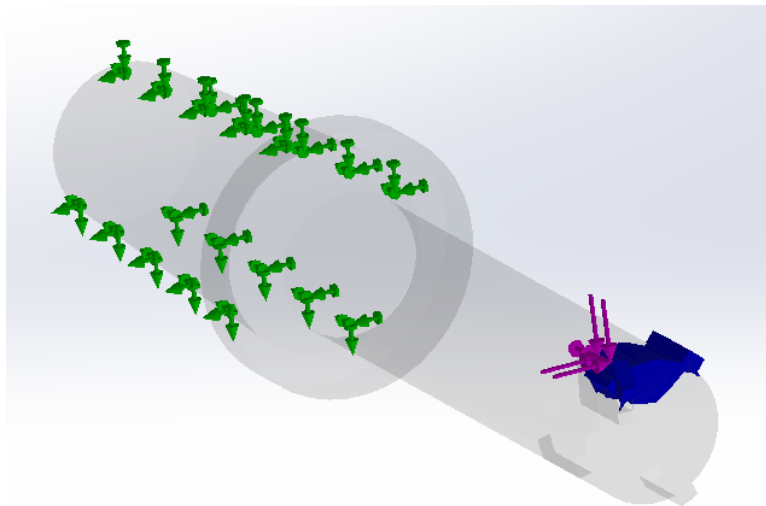


Рисунок 2.17 – Визначення місць розточної оправки, що мають найменший запас міцності при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою великої жорсткості

На основі аналізу результатів моделювання рис. 2.9 – рис. 2.14 визначено, що при зовнішньому радіальному навантаженні 500 Н, тангенціальному – 770 Н, та осьовому 200 Н максимальні напруження виникають на ріжучій кромці твердосплавної пластини і становлять 165 МПа.

При відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою максимальні деформації розточної оправки дорівнюють 0,0906 мм, а максимальні напруження при основі оправки - 82 МПа.

При контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості максимальні деформації розточної оправки дорівнюють 0,0402 мм, а максимальні напруження при основі оправки - 49 МПа.

При контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою великої жорсткості максимальні деформації розточної оправки дорівнюють 0,0103 мм, а максимальні напруження при основі оправки - 20 МПа.

Отже, в результаті моделювання встановлено, що застосування направляючих опор на розточній оправці дозволяє зменшити величину деформації оправки від 2,25 рази до 8,79 рази, при цьому максимальні напруження для трьох випадків є однаковими і виникають на ріжучій кромці

твердосплавної пластини (165 МПа).

При зміні радіальної складової сили різання від 400 Н до 700 Н, та тангенціальної складової від 670 Н до 970 Н одержали графіки залежності максимальних напружень на ріжучій кромці твердосплавної пластини (рис. 2.18) та максимальних деформацій розточної оправки при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою (рис. 2.19) та при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості (рис. 2.20).

На основі графіків рис. 2.18 – 2.20 встановлено, що величини напружень та деформацій у розточній оправці прямопропорційно залежать від величини радіальної складової сили різання. Мінімальна величина напружень на ріжучій кромці твердосплавної пластини дорівнює 144 МПа, а максимальна – 210 МПа. Мінімальна величина деформацій розточної оправки при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою дорівнює 0,077 мм, а максимальна – 0,119 мм. Мінімальна величина деформації розточної оправки при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості дорівнює 0,034 мм, а максимальна – 0,053 мм.

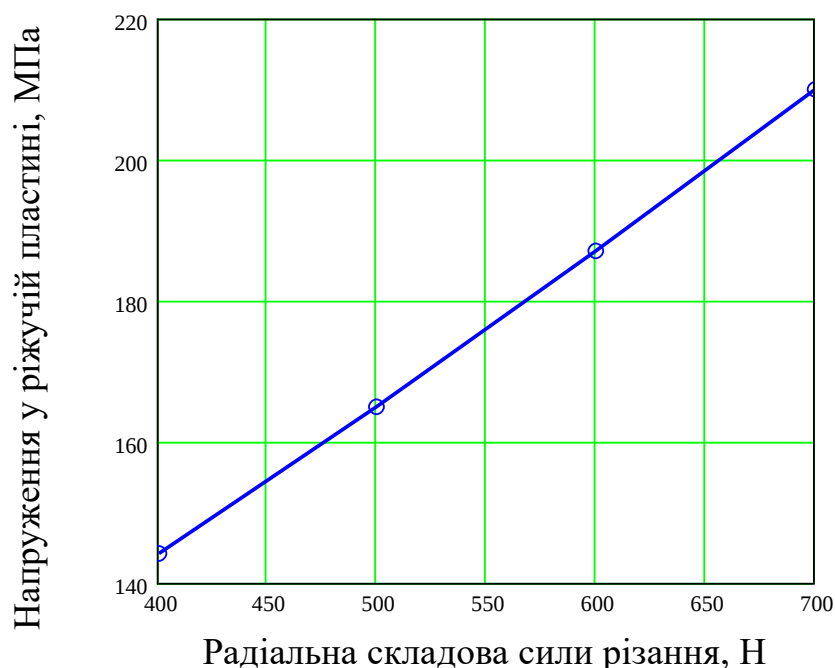


Рисунок 2.18 - Графік залежності максимальних напружень, що виникають у ріжучій кромці твердосплавної пластини від радіальної складової сили різання

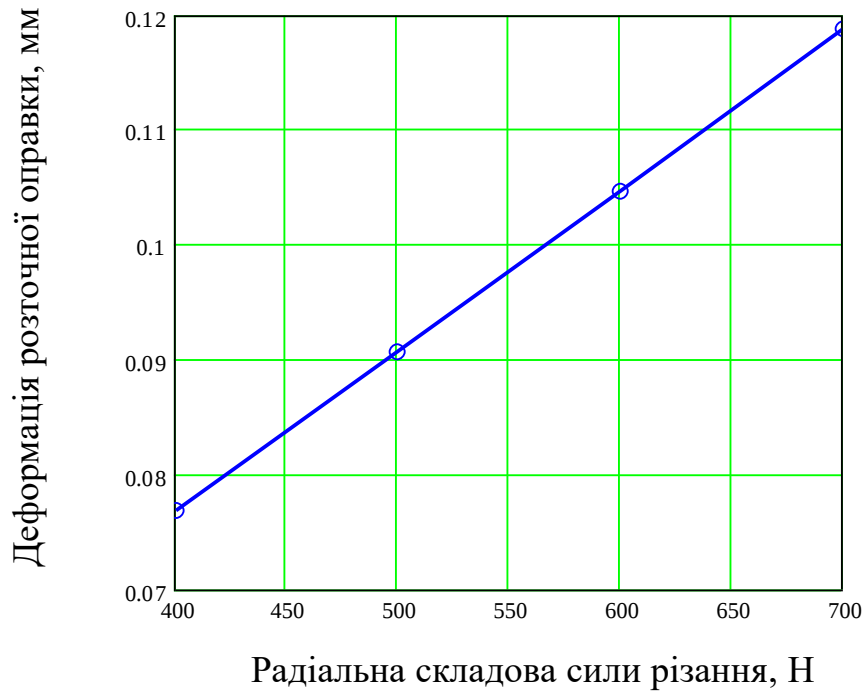


Рисунок 2.19 - Графік залежності максимальних деформацій розточної оправки від радіальної складової сили різання при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою

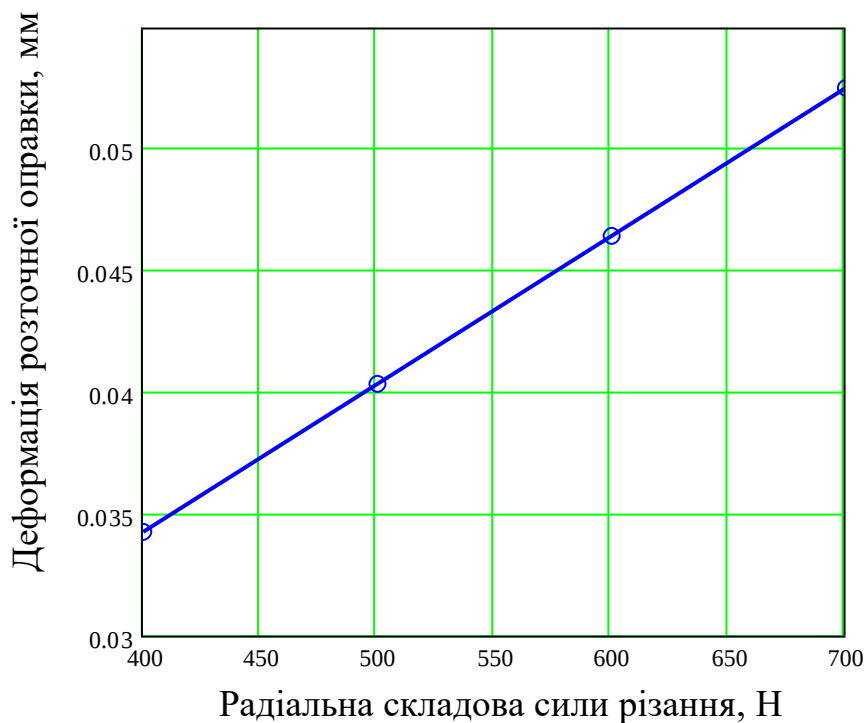


Рисунок 2.20 - Графік залежності максимальних деформацій розточної оправки від радіальної складової сили різання при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості

2.3. Висновки

У розділі представлено схема процесу розточування отвору розточною оправкою із ріжучою пластиною та напрямними опорами, розроблено розрахункову схему для дослідження деформації розточної оправки із напрямними опорами. Виведено диференціальне рівняння деформації розточної оправки з трьома пружними напрямними опорами як геометричне місце центрів поперечних перерізів оправки. Розв'язок диференціального рівняння виконано поєднанням методів Фур'є, чисельного методу Рунге-Кутта із розв'язком задачі Штурма-Ліувілля. Результати розв'язку з початковими граничними умовами представлено у вигляді графіків. При цьому визначено, що при збільшенні радіальної сили різання F_r від 500 Н до 900 Н при діаметрі розточної оправки $D=28$ мм без застосування направляючих опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,075 мм до 0,135 мм.

При збільшенні радіальної сили різання F_r від 500 Н до 900 Н при діаметрі розточної оправки $D=28$ мм із застосуванням направляючих опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,05 мм до 0,09 мм. Встановлено, що застосування направляючих опор на розточній оправці діаметром $D=28$ мм і довжиною $l=118$ мм дозволяє зменшити величину деформації оправки у 1,5 рази та підвищити якість обробленої поверхні.

При збільшенні діаметра розточної оправки D від 28 мм до 42 мм при радіальній силі різання $F_r = 700$ Н без застосування направляючих опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,02 мм до 0,105 мм.

При збільшенні діаметра розточної оправки D від 28 мм до 42 мм при радіальній силі різання $F_r = 700$ Н із застосуванням направляючих опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,018 мм до 0,07 мм.

Встановлено, що застосування направляючих опор на розточній оправці діаметром $D=28$ мм і довжиною $l=118$ мм дозволяє зменшити величину деформації оправки у 1,5 рази, діаметром $D=35$ мм - у 1,2 рази, діаметром $D=42$

мм - у 1,11 рази. Тому використання направляючих опор доцільно застосовувати на розточних оправках малого діаметру та жорсткості.

Проведено дослідження методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану розточної оправки із напрямними опорами.

Визначено, що при зовнішньому радіальному навантаженні 500 Н, тангенціальному – 770 Н, та осьовому 200 Н максимальні напруження виникають на ріжучій кромці твердосплавної пластини і становлять 165 МПа.

При відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою максимальні деформації розточної оправки дорівнюють 0,0906 мм, а максимальні напруження при основі оправки - 82 МПа.

При контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості максимальні деформації розточної оправки дорівнюють 0,0402 мм, а максимальні напруження при основі оправки - 49 МПа.

При контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою великої жорсткості максимальні деформації розточної оправки дорівнюють 0,0103 мм, а максимальні напруження при основі оправки - 20 МПа.

Отже, в результаті моделювання встановлено, що застосування направляючих опор на розточній оправці дозволяє зменшити величину деформації оправки від 2,25 рази до 8,79 рази, при цьому максимальні напруження для трьох випадків є однаковими і виникають на ріжучій кромці твердосплавної пластини (165 МПа).

Встановлено, що величини напружень та деформацій у розточній оправці прямопропорційно залежать від величини радіальної складової сили різання. Мінімальна величина напружень на ріжучій кромці твердосплавної пластини дорівнює 144 МПа, а максимальна – 210 МПа. Мінімальна величина деформацій розточної оправки при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою дорівнює 0,077 мм, а максимальна – 0,119 мм. Мінімальна величина деформації розточної оправки при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості дорівнює 0,034 мм, а максимальна – 0,053 мм.

3 ТЕХНОЛОГІЧНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Службове призначення деталі

Деталь “Корпус” 738196.112 є базовим елементом прожектора, призначеного для освітлення сучасних стадіонів (футбольних полів) та інших спортивних об’єктів та великих споруд.

Основними поверхнями деталі “Корпус” 738196.112 є: два отвори $\varnothing 8H7(^{+0,015})$, Ra1,6 є посадочною поверхнею (встановлення вісі); чотири різеві отвори M4-7H; $10\pm 0,2$; $173\pm 0,5$; $64\pm 0,2$; Ra 6,8 – кріплення електронної апаратури; три різеві отвори M20 $\times$ 1,5-7H; $102\pm 0,3$; $65\pm 0,3$; Ra 6,8 – кріплення сальників; вісім різевих отворів M4-7H; $58,5\pm 0,3$; $173\pm 0,5$; $64\pm 0,2$; Ra 6,8; чотири різеві отвори M6-7H; $\varnothing 215\pm 0,2$; 90°; Ra 6,8 – для кріплення електричних компонентів світильника; чотири різеві отвори M6-7H; $204\pm 0,2$; $82\pm 0,2$; Ra 6,8 – для кріплення корпусу пуско-регулюючої апаратури.

Аналіз технічних вимог до деталі представлено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Аналіз технічних вимог

Номер поверхні	Назва поверхні	Квалітет	Шорсткість
1	2	3	4
1- 4	Чотири торцеві поверхні $35\pm 0,3$; $80\pm 0,2$; $204\pm 0,2$	14	Ra 12,1
5-8	Чотири глухих отвори $\varnothing 4,95^{+0,26}$; $l=15^{+1,1}$ під різь M6-7H; $80\pm 0,2$; $204\pm 0,2$	13	Ra 6,8
9-12	Чотири внутрішні фаски $0,5\times 45^\circ$; $80\pm 0,2$; $204\pm 0,2$	14	Ra 12,1
13-16	Чотири різеві отвори M6-7H; $l=10\text{min}$; $80\pm 0,2$; $204\pm 0,2$	(7)	Ra 6,8
17-19	Три отвори $\varnothing 18,43^{+0,3}$; $l=6$ під різь M20 $\times$ 1,5-7H; $102\pm 0,3$	13	Ra 6,8
20-22	Три внутрішні фаски $1\times 45^\circ$; $102\pm 0,3$	14	Ra 12,1

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
23-25	Три різеві отвори M20×1,5-7H; l=6; 102±0,3	(7)	Ra6,8
26, 27	Два глухих отвори Ø3,3 ^{+0,16} ; l=10 ^{+1,1} ; 58,5±0,3; 45° під різь M4-7H	13	Ra 6,8
28-31	Вісім глухих отворів Ø3,3 ^{+0,16} ; l=14 ^{+1,1} ; 173±0,5; 64±0,2 під різь M4-7H	13	Ra 6,8
32, 33	Два глухих отвори Ø3,3 ^{+0,16} ; l=10 ^{+1,1} ; 41±0,3; 23±0,2; 15±0,2 під різь M4-7H	13	Ra 6,8
34-41	Вісім внутрішніх фасок 0,5×45°	14	Ra 12,1
42, 43	Два глухих різевих M4-7H; l=8min; 58,5±0,3; 45°	(7)	Ra6,8
44-47	Чотири глухих різевих отвори M4-7H; l=10min; 173±0,5; 64±0,2	(7)	Ra6,8
48, 49	Два глухих різевих отвори M4-7H; l=8min; 41±0,3; 23±0,2; 15±0,2	(7)	Ra6,8
50, 51	Два глухих отвори Ø3,7 ^{+0,16} ; l=10 ^{+1,1} ; 44,5±0,2	14	Ra 12,1
52, 53	Дві внутрішні фаски 0,5×45°	14	Ra 12,1
54-57	Чотири глухих отвори Ø4,95 ^{+0,26} ; l=15 ^{+1,1} під різь M6-7H; Ø215±0,2	13	Ra 6,8
58-61	Чотири внутрішні фаски 0,5×45°	14	Ra 12,1
62-65	Чотири різеві отвори M6-7H; l=10min; Ø215±0,2	(7)	Ra6,8
66	Наскрізний отвір Ø5 ^{+0,3} ; l=28; 15±0,2	14	Ra 12,1
67	Отвір Ø8,43 ^{+0,3} ; l=23 ^{+1,6} ; 15±0,2	13	Ra 6,8
68	Внутрішня фаска 1,5×45°	14	Ra 12,1
69	Внутрішній різевий отвір M10-7H; l=14min; 15±0,2	(7)	Ra6,8
70, 71	Два наскрізні отвори Ø8H7(^{+0,015}); l=10; 17±0,2; 157±0,2; 119,5 _{-0,87}	7	1,6

Закінчення таблиці 3.1

1	2	3	4
72	Зовнішня циліндрична поверхня $\varnothing 296 \pm 0,8$	Не підлягає обробці різанням	Rz50
73	Прямокутна зовнішня поверхня $125 \pm 0,6; 339,5 \pm 0,8$	Не підлягає обробці різанням	Rz50
74, 75	Два виступи $119,5 \pm 0,6; 408,5 \pm 0,9$	Не підлягає обробці різанням	Rz50
76, 77	Дві плоскі поверхні $119,5_{-0,87}$	14	Ra 12,1

3.2. Вибір способу одержання заготовки

Матеріалом деталі “Корпус” 738196.112 є алюмінієвий сплав АК12, що характеризується добрими ливарними властивостями. Під час аналізу способів виготовлення заготовок розглянуто такі два способи:

- 1) лиття в піщані форми із їх механізованим формуванням;
- 2) лиття під тиском.

Оскільки форма деталі є складною, визначення маси заготовки використано формулу:

$$Q = q + m_{\text{пр}}, \quad (3.1)$$

$q = 1,9$ кг – маса деталі;

$$m_{\text{пр}} = V_{\text{пр}} \cdot \rho. \quad (3.2)$$

Чисельні дані про припуски і поверхні деталі, що піддаються механічній обробці подано у таблиці 3.2.

Ескізи варіантів способів виготовлення заготовок корпуса представлено на рис. 3.1, 3.2.

Розраховуємо об’єми припусків для двох альтернативних варіантів:

Таблиця 3.2 – Припуски деталі “Корпус” 738196.112

Оброблювана поверхня, її розмір, точність	Параметр шорсткості деталі, мкм	Допуск заготовки, мм	Загальний припуск, мм	Розмір заготовки із граничними відхиленнями
1	2	3	4	5
1) лиття в піщані форми із їх механізованим формуванням				
Чотири торцеві поверхні 35±0,3	Ra 12,1	2,2	2,8	37,8±1,1
Три отвори Ø18,43 ^{+0,3} ; l=6 під різь M20×1,5-7H; 102±0,3	Ra 6,8	2,0	2,4 × 2 = 4,8	Ø13,63±1,0
2) лиття під тиском				
Чотири торцеві поверхні 35±0,3	Ra 12,1	0,9	1,1	36,1±0,45
Три отвори Ø18,43 ^{+0,3} ; l=6 під різь M20×1,5-7H; 102±0,3	Ra 6,8	0,8	1,0 × 2 = 2,0	Ø16,43±0,4

- лиття в піщані форми із їх механізованим формуванням:

$$V_{\text{пр1}} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2 \cdot 1,1}{4} = 34540 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр2}} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot (20^2 - 13,61^2) \cdot 6}{4} = 3034,7 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр3}} = \frac{\pi \cdot (277^2 - 273^2) \cdot 3,5}{4} = 6044,5 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр4}} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 4^2 \cdot 14}{4} = 703,36 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр5}} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 4^2 \cdot 10}{4} = 502,4 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр6}} = 8 \cdot \frac{\pi \cdot 6^2 \cdot 15}{4} = 3391,2 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр7}} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 8^2 \cdot 20}{4} = 2009,6 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\text{пр}} = \sum V_{\text{прi}}.$$

$$\sum V_{\text{пр1}} = 34540 + 1837,7 + 6044,5 + 703,36 + 502,4 + 3391,2 + 2009,6 = \\ = 49028,76 \text{ мм}^3 = 49,03 \text{ см}^3.$$

- ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ:

$$V_{\text{пр1}} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 10^2 \cdot 1,1}{4} = 34540 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр2}} = 3 \cdot \frac{\pi \cdot (20^2 - 16,43^2) \cdot 6}{4} = 1837,7 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр3}} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 4^2 \cdot 14}{4} = 703,36 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр4}} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot 4^2 \cdot 10}{4} = 502,4 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр5}} = 8 \cdot \frac{\pi \cdot 6^2 \cdot 15}{4} = 3391,2 \text{ мм}^3;$$

$$V_{\text{пр6}} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 8^2 \cdot 20}{4} = 2009,6 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\text{пр}} = \sum V_{\text{пр}_i}.$$

$$\sum V_{\text{пр2}} = 34540 + 1837,7 + 703,36 + 502,4 + 3391,2 + 2009,6 = 42984,26 \text{ мм}^3 = \\ = 43,0 \text{ см}^3.$$

Загальні маси припусків:

— лиття в піщані форми із їх механізованим формуванням:

$$m_{\text{пр1}} = 49,03 \cdot 2,6 = 127,5 \text{ г} = 0,13 \text{ кг}.$$

— лиття під тиском:

$$m_{\text{пр2}} = 43,0 \cdot 2,6 = 111,8 \text{ г} = 0,112 \text{ кг}.$$

Визначаємо маси заготовок:

– лиття в піщані форми із їх механізованим формуванням:

$$Q_1 = 1,9 + 0,13 = 2,03 \text{ кг.}$$

– лиття під тиском:

$$Q_2 = 1,9 + 0,112 = 2,012 \text{ кг.}$$

Коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_{\text{в.м.}} = \frac{q}{Q}, \quad (3.3)$$

– лиття в піщані форми із їх механізованим формуванням:

$$K_{\text{в.м.1}} = \frac{1,9}{2,03} = 0,93.$$

– лиття під тиском:

$$K_{\text{в.м.2}} = \frac{1,9}{2,012} = 0,94.$$

Вибираємо для умов середньосерійного типу виробництва а також характеристик поверхонь деталі “Корпус” 738196.112 спосіб виготовлення заготовки - литво під тиском.

3.3. Формування технологічного процесу

На основі вказаних вище даних проводимо проектування технологічного процесу механічної обробки деталі “Корпус” 738196.112.

005. Програмна з ЧПК

1. Фрезерувати чотири торцеві поверхні 1-4, витримуючи розміри $35 \pm 0,3$; $80 \pm 0,2$; $204 \pm 0,2$.

2. Центрувати чотири отвори 5-8 під різь М6-7Н послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 1,0^{+0,10}$; $\varnothing 2,12^{+0,12}$; 1,3; $0,97^{+0,06}$; $80 \pm 0,2$; $204 \pm 0,2$.

3. Свердлити чотири отвори 5-8 під різь М6-7Н послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 4,95^{+0,26}$; $l=15^{+1,1}$; $80 \pm 0,2$; $204 \pm 0,2$.

4. Зенкувати чотири фаски 9-12 послідовно по програмі, витримуючи розміри $0,5 \times 45^\circ$; $80 \pm 0,2$; $204 \pm 0,2$.

5. Нарізати різь 13-16 послідовно по програмі, витримуючи розміри M6-7H; $l=10\text{min}$; $80 \pm 0,2$; $204 \pm 0,2$.

6. Розсвердлити три отвори 17-19 послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 18,43^{+0,3}$; $l=6$ під різь M20 $\times$ 1,5-7H; $102 \pm 0,3$.

7. Зенкувати три фаски 20-22 послідовно по програмі, витримуючи розміри $1 \times 45^\circ$; $102 \pm 0,3$.

8. Нарізати різь 23-25 послідовно по програмі, витримуючи розміри M20 $\times$ 1,5-7H; $l=6$; $102 \pm 0,3$.

9. Перевірити розміри: $35 \pm 0,3$; $15^{+1,1}$; M6-7H; $l=10\text{min}$; $80 \pm 0,2$; $204 \pm 0,2$; $0,5 \times 45^\circ$; M20 $\times$ 1,5-7H; $l=6$; $1 \times 45^\circ$; $102 \pm 0,3$. Контроль 30%.

010. Програмна з ЧПК

1. Центрувати чотирнадцять отворів 26-33, 50-51, 54-57 послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 1,0^{+0,10}$; $\varnothing 2,12^{+0,12}$; 1,3; $0,97^{+0,06}$; $58,5 \pm 0,3$; 45° ; $173 \pm 0,5$; $64 \pm 0,2$; $41 \pm 0,3$; $23 \pm 0,2$; $15 \pm 0,2$; $44,5 \pm 0,2$; $\varnothing 215 \pm 0,2$.

2. Свердлити вісім отворів 26-33 під різь M4-7H послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 3,3^{+0,16}$; $l=10^{+1,1}$; $58,5 \pm 0,3$; 45° ; $l=14^{+1,1}$; $173 \pm 0,5$; $64 \pm 0,2$; $41 \pm 0,3$; $23 \pm 0,2$; $15 \pm 0,2$.

3. Свердлити два отвори 50-51 послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 3,7^{+0,16}$; $l=10^{+1,1}$; $44,5 \pm 0,2$.

4. Свердлити чотири отвори 54-57 під різь M6-7H послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 4,95^{+0,26}$; $l=15^{+1,1}$; $\varnothing 215 \pm 0,2$.

5. Зенкувати чотирнадцять фасок 34-41, 52-53, 58-61 послідовно по програмі, витримуючи розміри $0,5 \times 45^\circ$.

6. Нарізати різь 42-49 в восьми глухих отворах послідовно по програмі, витримуючи розміри M4-7H; $l=8\text{min}$; $58,5 \pm 0,3$; 45° ; $l=10\text{min}$; $173 \pm 0,5$; $64 \pm 0,2$; $41 \pm 0,3$; $23 \pm 0,2$; $15 \pm 0,2$.

7. Нарізати різь 62-65 в чотирьох глухих отворах послідовно по програмі, витримуючи розміри M6-7H; $l=10\text{min}$; $\varnothing 215\pm 0,2$.

8. Перевірити розміри: $\varnothing 3,7^{+0,16}$; $l=10^{+1,1}$; $44,5\pm 0,2$; $0,5\times 45^\circ$; M4-7H; $l=8\text{min}$; $58,5\pm 0,3$; 45° ; $l=10\text{min}$; $173\pm 0,5$; $64\pm 0,2$; $41\pm 0,3$; $23\pm 0,2$; $15\pm 0,2$; M6-7H; $l=10\text{min}$; $\varnothing 215\pm 0,2$. Контроль 30%.

015. Програмна з ЧПК

1. Центрувати отвір 66, витримуючи розміри $\varnothing 1,0^{+0,10}$; $\varnothing 2,12^{+0,12}$; 1,3; $0,97^{+0,06}$; $15\pm 0,2$.

2. Свердли́ти отвір 66, витримуючи розміри $\varnothing 5^{+0,3}$; $l=28$; $15\pm 0,2$.

3. Розсвердли́ти отвір 67, витримуючи розміри $\varnothing 8,43^{+0,3}$; $l=23^{+1,6}$; $15\pm 0,2$.

4. Зенкувати фаску 68, витримуючи розміри $1,5\times 45^\circ$.

5. Нарізати різь 69, витримуючи розміри M10-7H; $l=14\text{min}$; $15\pm 0,2$.

6. Перевірити розміри: $\varnothing 5^{+0,3}$; $l=28$; $1,5\times 45^\circ$; $l=23^{+1,6}$; M10-7H; $l=14\text{min}$; $15\pm 0,2$.

Контроль 30%.

020. Горизонтально-фрезерна

1. Фрезерувати одночасно дві площини 76, 77, витримуючи розміри $119,5_{-0,87}$, $151_{-0,1}$.

2. Перевірити розміри: $119,5_{-0,87}$, $151_{-0,1}$.

Контроль 30%.

025. Свердлильна з ЧПК

1. Центрувати отвір 70, витримуючи розміри $\varnothing 1,6^{+0,25}$; $\varnothing 3,35^{+0,3}$; $3,52\pm 0,1$; $17\pm 0,2$; $157\pm 0,2$; $119,5\pm 0,6$.

2. Свердли́ти отвори 70, 71, витримуючи розміри $\varnothing 7,49^{+0,15}$; $l=10$; $17\pm 0,2$; $157\pm 0,2$; $119,5\pm 0,6$.

3. Розвернути попередньо отвори 70, 71, витримуючи розміри $\varnothing 7,845^{+0,036}$; $l=10$; $17\pm 0,2$; $157\pm 0,2$; $119,5\pm 0,6$.

4. Розвернути остаточно отвори 70, 71, витримуючи розміри $\varnothing 8^{+0,015}$; $l=10$; $17\pm 0,2$; $157\pm 0,2$; $119,5\pm 0,6$.

5. Перевірити розміри: $\varnothing 8^{+0,015}$; $l=10$; $17\pm 0,2$; $157\pm 0,2$; $119,5\pm 0,6$.

Контроль 30%.

030. Контроль.

3.4. Визначення припусків на оброблення

Розрахунки припусків проведено аналітичними та табличними методами, оформлено вигляді таблиці 3.4.

Габаритні розміри заготовки: $\varnothing 296 \pm 0,8 \times 77 \pm 0,55$.

Послідовність оброблення поверхні $\varnothing 8H7$ із припусками та допусками представлено на рис. 3.3.

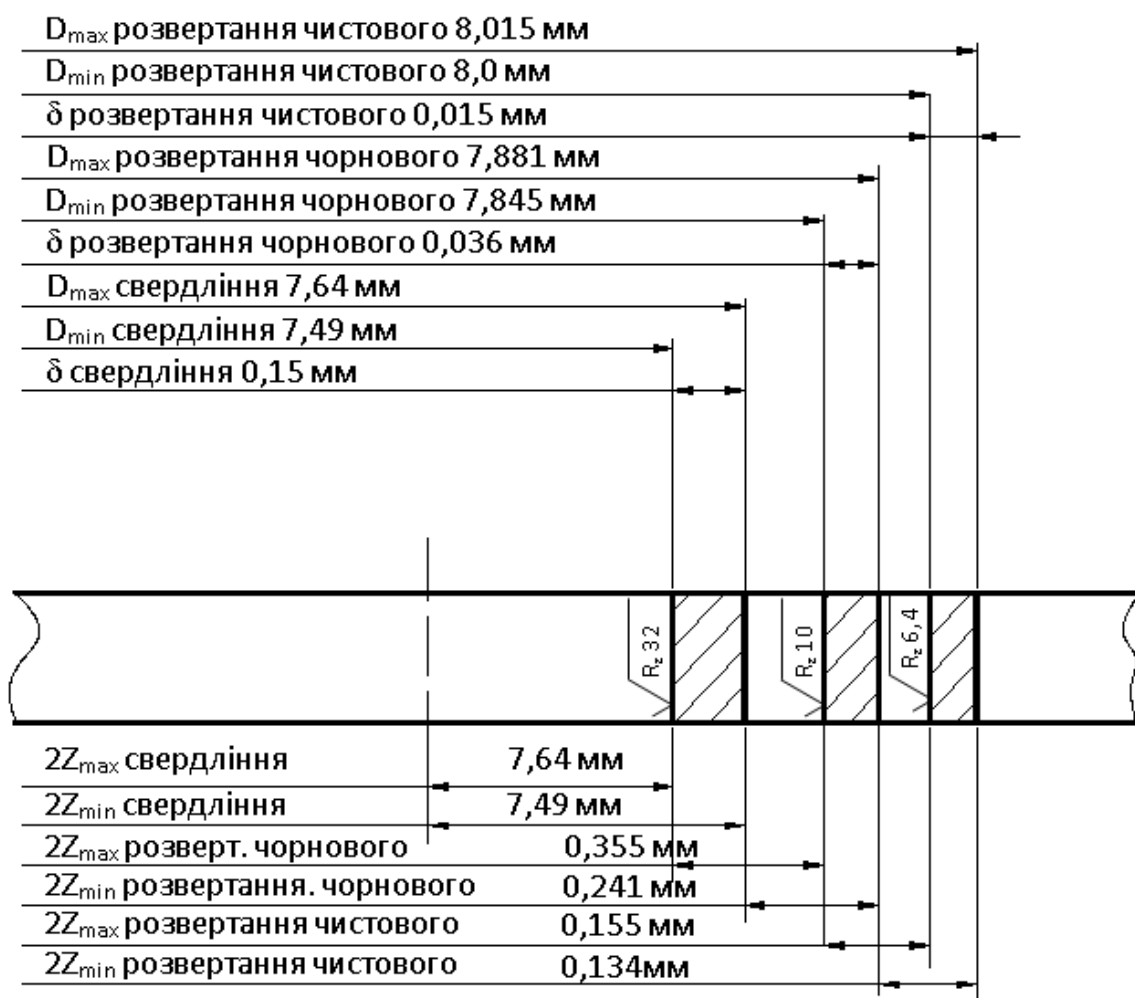


Рисунок 3.3 – Послідовність оброблення поверхні $\varnothing 8H7$ із припусками та допусками

Таблиця 3.4 – Розрахункові припущення деталі “Корпус” 738196.112

Технологічні операції і переходи обробки поверхонь деталі	Квалітет (ступінь точності)	Шорсткість, мкм	Допуск, мм	Припуск, мм	Операційні (проміжні) розміри із граничними відхиленнями
1	2	3	4	5	6
Чотири торцеві поверхні 35±0,3					
Фрезерування чорнове торцевою фрезою	14	Ra12,1	0,6	1,1	35±0,3
Заготовка	7-мий кл.	Rz50	0,9	—	36,1±0,45
Три отвори Ø18,43 ^{+0,3} під різь M20×1,5-7H					
Розсвердлювання	13	Ra6,8	0,3	1,0 × 2 = 2,0	Ø18,43 ^{+0,3}
Заготовка	7-мий кл.	Rz50	0,8	2,0	Ø16,43±0,4

3.5. Визначення режимів різання

Розрахунки режимів різання технологічного процесу виготовлення деталі “Корпус” 738196.112 проведено аналітичними та табличними методами, оформлено у вигляді таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Режими різання технологічного процесу виготовлення деталі “Корпус” 738196.112

[illegible]

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Центрувати чотири отвори 5-8 під різь М6-7Н послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 1,0^{+0,10}$; $\varnothing 2,12^{+0,12}$; 1,3; $0,97^{+0,06}$; $80 \pm 0,2$; $204 \pm 0,2$	0,5	5,27	4	15	0,12	2501	26	325	0,067	0,16
Перехід 4 Свердлити чотири отвори 5-8 під різь М6-7Н послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 4,95^{+0,26}$; $l=15^{+1,1}$; $80 \pm 0,2$; $204 \pm 0,2$	2,5	19	4	15	0,13	1401	23	183	0,419	1,9
Перехід 5 Зенкувати чотири фаски 9-12 послідовно по програмі, витримуючи розміри $0,5 \times 45^\circ$; $80 \pm 0,2$; $204 \pm 0,2$	0,5	3	4	15	0,1	1401	35,4	141	0,095	0,09
Перехід 6 Нарізати різь 13-16 послідовно по програмі, витримуючи розміри М6-7Н; $l=10\text{min}$; $80 \pm 0,2$	0,866	27	4	20	1,0	561	10,7	561	0,194	0,07
Перехід 7 Розсвердлити три отвори 17-19 послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 18,43^{+0,3}$; $l=6$ під різь М20 $\times$ 1,5-7Н; $102 \pm 0,3$	1,0	14	3	30	0,5	1001	53	501	0,085	0,11
Перехід 8 Зенкувати три фаски 20-22 послідовно по програмі, витримуючи розміри $1 \times 45^\circ$; $102 \pm 0,3$	1,0	4	3	15	0,1	451	35,4	46	0,28	0,11
Перехід 9										
Нарізати різь 23-25 послідовно по програмі, витримуючи розміри М20 $\times$ 1,5-7Н; $l=6$; $102 \pm 0,3$	1,299	23	3	20	1,5	251	15,8	376	0,185	0,07

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Операція 010. Програмна з ЧПК										
Перехід 2 Центрувати чотирнадцять отворів 26-33, 50-51, 54-57 послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 1,0^{+0,10}$; $\varnothing 2,12^{+0,12}$; 1,3; $0,97^{+0,06}$; $58,5 \pm 0,3$; 45° ; $173 \pm 0,5$; $64 \pm 0,2$; $41 \pm 0,3$; $23 \pm 0,2$; $15 \pm 0,2$; $44,5 \pm 0,2$; $\varnothing 215 \pm 0,2$	0,5	5,27	14	15	0,12	2501	26	325	0,229	0,16
Перехід 3 Свердлити вісім отворів 26-33 під різь М4-7Н послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 3,3^{+0,16}$; $l=10^{+1,1}$; $58,5 \pm 0,3$; 45° ; $l=14^{+1,1}$; $173 \pm 0,5$; $64 \pm 0,2$; $41 \pm 0,3$; $23 \pm 0,2$; $15 \pm 0,2$	1,65	11,7 17,5	4 4	15	0,16	2001	20,8	321	0,146 0,219	0,04
Перехід 4 Свердлити два отвори 50-51 послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 3,7^{+0,16}$; $l=10^{+1,1}$; $44,5 \pm 0,2$	1,85	14	2	15	0,16	2001	23,3	321	0,094	0,04
Перехід 5 Свердлити чотири отвори 54-57 під різь М6-7Н послідовно по програмі, витримуючи розміри $\varnothing 4,95^{+0,26}$; $l=15^{+1,1}$; $\varnothing 215 \pm 0,2$	2,5	19	4	15	0,13	1401	23	183	0,419	1,81
Перехід 6										
Зенкувати чотирнадцять фасок 34-41, 52-53, 58-61 послідовно по програмі, витримуючи розміри $0,5 \times 45^\circ$	0,5	3	14	15	0,1	1401	35,4	141	0,32	0,09

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Перехід 7 Нарізати різь 42-49 в восьми глухих отворах послідовно по програмі, витримуючи розміри M4-7H; l=8min; 58,5±0,3; 45°; l=10min; 173±0,5; 64±0,2; 41±0,3; 23±0,2; 15±0,2	0,606	20,1 24,1	4 4	10	0,7	641	8,2	449	0,18 0,4	0,06
Перехід 8										
Нарізати різь 62-65 в чотирьох глухих отворах послідовно по програмі, витримуючи розміри M6-7H; l=10min; Ø215±0,2	0,866	25	4	20	1,0	561	10,7	561	0,19	0,07
Операція 015. Програмна з ЧПК										
Перехід 2 Центрувати отвір 66, витримуючи розміри Ø1,0 ^{+0,10} ; Ø2,12 ^{+0,12} ; 1,3; 0,97 ^{+0,06} ; 15±0,2	0,5	5,27	1	15	0,12	251	26	325	0,021	0,16
Перехід 3 Свердлити отвір 66, витримуючи розміри Ø5 ^{+0,3} ; l=28; 15±0,2	2,5	34,5	1	15	0,13	1401	23	183	0,21	1,9
Перехід 4 Розсвердлити отвір 67, витримуючи розміри Ø8,43 ^{+0,3} ; l=23 ^{+1,6} ; 15±0,2	1,715	29	1	20	0,15	2501	68	376	0,09	1,4
Перехід 5 Зенкувати фаску 68, витримуючи розміри 1,5×45°	1,5	7,5	1	20	0,13	2001	78,7	261	0,04	0,11
Перехід 6 Нарізати різь 69, витримуючи розміри M10-7H; l=14min; 15±0,2	1,299	34,5	1	15	1,5	451	14,2	676	0,051	0,11

Закінчення таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Операція 020. Горизонтально-фрезерна										
Перехід 2 Фрезерувати одночасно дві площини 76, 77, витримуючи розміри 119,5 _{-0,87} , 151 _{-0,1}	1,0	40	1	100	0,2	801	403	161	0,26	2,51
Операція 025. Свердлильна з ЧПК										
Перехід 2										
Центрувати отвір 70, витримуючи розміри $\varnothing 1,6^{+0,25}$; $\varnothing 3,35^{+0,3}$; $3,52 \pm 0,1$; $17 \pm 0,2$; $157 \pm 0,2$; $119,5 \pm 0,6$	0,8	6,52	1	15	0,12	2001	26	241	0,04	0,16
Перехід 3 Свердлити отвори 70, 71, витримуючи розміри $\varnothing 7,49^{+0,15}$; $l=10$; $17 \pm 0,2$; $157 \pm 0,2$; $119,5 \pm 0,6$	3,75	28,5	1	20	0,1	251	7	26	1,15	0,01
Перехід 4 Розвернути попередньо отвори 70, 71, витримуючи розміри $\varnothing 7,845^{+0,036}$; $l=10$	0,1775	132,5	1	20	0,55	321	9	177	0,76	0,15
Перехід 5 Розвернути остаточно отвори 70, 71, витримую- чи розміри $\varnothing 8^{+0,015}$; $l=10$	0,0775	132,5	1	20	0,35	481	12	169	0,8	0,12

Розрахунки технічних норм часу технологічного процесу виготовлення деталі “Корпус” 738196.112 проведено аналітичними та табличними методами подано у вигляді таблиці 3.6 та на графіку завантаження обладнання (рис. 3.4).

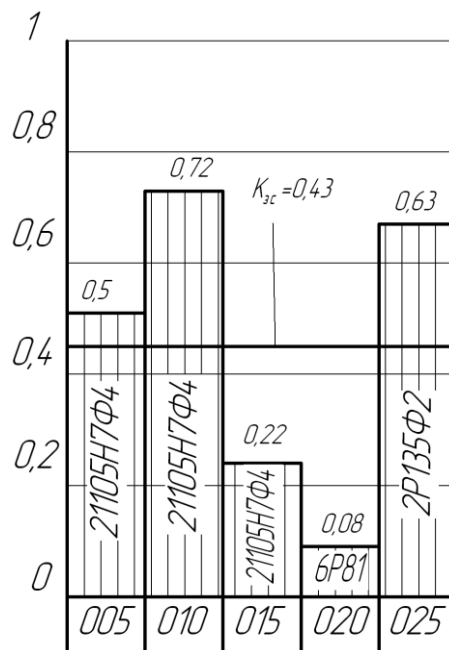


Рисунок 3.4 – Графік завантаження обладнання

Таблиця 3.6 – Розрахунки технічних норм часу технологічного процесу виготовлення деталі “Корпус” 738196.112

Номер та назва операції	T _о , хв	Допоміжний час, T _д хв			T _{оп} , хв	Час обслуговування, T _{об} , хв			T _{шт} , хв.	T _{п.з.} , хв.	n, шт	T _{шт.к.} , хв
		T _{у.}	T _{пер}	T _{вим}		T _{тех.об.}	T _{орг.об.}	T _{відп.}				
005 Програмна ЧПК	1,364	0,33	0,44	0,84	3,174	0,444			3,62	51,36	127	4,02
010 Програмна ЧПК	1,981	0,33	—	—	—	—	—	—	—	—		5,78
015 Програмна ЧПК	0,38	0,33	—	—	—	—	—	—	—	—		1,78
020 Горизонтально-фрезерна	0,25	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—		0,63
025 Свердлильна з ЧПК	2,71	0,33	—	—	—	—	—	—	—	—		5,23

3.6. Розрахунок пристосування

З метою закріплення та базування деталі “Корпус” 738196.112 на 005 програмній з ЧПК операції на свердлильно-фрезерно-розточному верстаті з ЧПК спроектовано спеціальне універсально-скаладальне пристосування.

Базування заготовки здійснюється у пристосуванні по торцю на площину пневмоблока 1 та по зовнішній циліндричній поверхні з орієнтацією по прямокутних ділянках контуру за допомогою шести планок 16.

Затиск здійснюється за допомогою двох пневмоциліндрів 1 через шпильки 23 двома прихватами 17 з упором на гвинти із сферичними поверхнями 11.

Креслення запропонованого пристрою відображено у графічній частині роботи та у додатках.

Для визначення похибки установки заготовки у вказаному пристрої застосовано відоме рівняння [11]:

$$\Delta \epsilon_y = \sqrt{\Delta \epsilon_6^2 + \Delta \epsilon_3^2 + \Delta \epsilon_{\text{пр}}^2} . \quad (3.4)$$

На операції 005 програмній з ЧПК при обробленні отворів і площин бобишок потрібно забезпечити їх точне взаємне розташування та розміщення в межах допуску відносно контуру корпусу. Точність взаємного розміщення отворів забезпечуються точністю позиціонування верстата з ЧПК. Точність розміщення отворів в межах допуску відносно контуру корпусу визначається 14 квалітетом і дорівнює відхиленню до 0,5 мм.

Розглядаючи конструкцію пристосування та базування заготовки, похибка базування $\Delta \epsilon_{61}$ дорівнює максимальній сумі допусків зовнішніх ділянок заготовки, по яких проходить базування та допуску на базуючі планки. Оскільки базуючі планки виготовляється із розміром $R10h7_{-0,015}$, а розмір базової поверхні виконаний із допуском 0,4мм, то похибка базування в боковому напрямку дорівнює $\Delta \epsilon_{61}=0,415\text{мм}$.

Допуск торцевої поверхні $65 \pm 0,25 \text{ мм}$ визначає похибку базування в осьовому напрямку: $\Delta \epsilon_6 = 0,5 \text{ мм}$.

Похибка закріплення $\Delta \epsilon_3 = 90 \text{ мкм}$.

Похибка пристосування $\Delta \epsilon_{\text{пр}} = 0,02 \text{ мм}$.

Підставляючи дані у рівняння (3.4), одержуємо:

$$\Delta \epsilon_y = \sqrt{\Delta \epsilon_6^2 + \Delta \epsilon_3^2 + \Delta \epsilon_{\text{пр}}^2} = \sqrt{0,415^2 + 0,09^2 + 0,02^2} = 0,425 \text{ мм}.$$

Допустима похибка установки $\Delta \epsilon_{\text{у.доп.}}$ корпуса визначається 14 квалітетом і дорівнює відхиленню до 0,5 мм.

$$\Delta \epsilon_{\text{у.доп.}} = 0,5 \text{ мм}. \quad (3.5)$$

Отже, $\Delta \epsilon_y = 0,425 \text{ мм} < \Delta \epsilon_{\text{у.доп.}} = 0,5 \text{ мм}$. і при цьому забезпечується необхідна точність оброблення корпуса на програмній з ЧПК операції.

Розрахункову схему затиску деталі “Корпус” 738196.112 на 005 програмній з ЧПК операції при нарізанні різі $M20 \times 1,5-7H$ представлено на рис. 3.5.

Момент різання $M_{\text{різ}}$ має бути меншим-рівним за момент тертя $M_{\text{тр}}$ при закріпленні заготовки для забезпечення її надійного затиску із коефіцієнтом запасу K .

Записуємо рівняння рівноваги заготовки згідно схеми рис. 3.5:

$$P_{\text{зат1}} \cdot f_1 \cdot R + P_{\text{зат2}} \cdot f_1 \cdot R + \frac{2P_{\text{зат}} f_2 \cdot (R_2^3 - R_1^3)}{3(R_2^2 - R_1^2)} = K \cdot M_{\text{різ}}, \quad (3.6)$$

де $f_1 = 0,2$;

$R = 129 \text{ мм}$;

$f_2 = 0,2$;

$R_1 = 139 \text{ мм}$;

$R_2 = 141,5 \text{ мм}$.

Коефіцієнт запасу $K = 3,89$ [16].

Під час нарізання різі M20×1,5-7H визначаємо крутний момент різання за формулою [16]:

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{кр.табл.}} \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (3.7)$$

де $M_{\text{кр.табл.}} = 12 \text{ Н} \cdot \text{м}$ [16];

$K_1 = 2,7$ [16].

$K_2 = 0,4$. Для сплаву АК12 [16].

$$M_{\text{кр}} = 12 \cdot 2,7 \cdot 0,4 = 12,96 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отже, сила затиску визначаємо із рівняння (3.6), при умові, що сили затиску на двох прихватах однакові:

$$P_{\text{зат}} = \frac{K \cdot M_{\text{різ}}}{2 \cdot f_1 \cdot R + 2f_2 \cdot \frac{R_2^3 - R_1^3}{3(R_2^2 - R_1^2)}}, \quad (3.8)$$

$$P_{\text{зат}} = \frac{3,89 \cdot 12960}{2 \cdot 0,2 \cdot 129 + 2 \cdot 0,2 \cdot \frac{141,5^3 - 139^3}{3(141,5^2 - 139^2)}} = 632,9 \text{ Н}.$$

Сила штовхання на штоці пневмоциліндра [11]:

$$F_{\text{шт.тяг.}} = 0,785 \cdot D_{\text{ц}}^2 \cdot p \cdot \eta, \quad (3.9)$$

$$F_{\text{шт.тяг.}} = 0,785 \cdot 0,08^2 \cdot 0,4 \cdot 10^6 \cdot 0,9 = 1808,6 \text{ Н}.$$

Сила затиску заготовки від пневмоциліндра через важільний механізм [11]:

$$W = \frac{F_{\text{шт.тяг.}}}{l_1 + l_2} \cdot l_1 \cdot \eta, \quad (3.10)$$

де $l_1 = 30 \text{ мм}$;

$l_2 = 40 \text{ мм}$; $\eta = 0,9$.

$$\text{Тоді } W = \frac{1808,7}{30 + 40} \cdot 30 \cdot 0,9 = 697 \text{ Н}.$$

При умові $W = 697 \text{ Н} > P_{\text{зат}} = 632,9 \text{ Н}$, забезпечено вимогу надійного закріплення заготовки на 005 операції.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Характеристика ділянки механічної обробки деталі, що проектується з точки зору охорони праці

На ділянці виготовлення деталі “Корпус” 738196.112 порядок розташування устаткування і відстані між верстатами визначені розмірами верстатів, технологічними вимогами і вимогами техніки безпеки. До устаткування, що має електропривід є вільний підхід з усіх сторін шириною 1м зі сторони робочої зони та 0,6м – зі сторони неробочої зони.

При розробці плану виробничої ділянки враховані наступні вимоги:

1. Технологічне устаткування розміщено таким чином, що забезпечується потоковість виробничого процесу.

2. Розміщення технологічного устаткування, проходів та проїздів гарантує зручність та безпеку праці, можливість монтажу, демонтажу та ремонту устаткування.

3. Технологічне устаткування розміщено у відповідності із запроектованими підйомно-транспортними засобами.

4. Робочі місця оснащені згідно з вимогами наукової організації праці. Передбачені місця для міжопераційного накопичування заготовок та напівфабрикатів.

5. На робочих місцях передбачена площа, на якій розміщуються стелажі, тара, столи.

Дана ділянка спроектована так, що дає можливість реконструкції та технічного переоснащення виробництва, зміни технологічних процесів та переходу на нові види продукції.

Будівля відноситься до категорії робіт II а, для якої ступінь вогнестійкості III а.

Ширина виходу з приміщення 1,2м, а висота 2,2м. Ширина основних проходів всередині ділянки 1,5м, а ширина проїздів 2,5м.

Двері, що ведуть безпосередньо назовні, обладнані тамбуром (повітряними

завісами).

З метою запобігання травматизму на ділянці застосовується попереджувальне фарбування будівельних конструкцій та знаки безпеки.

Для захисту внутрішніх поверхонь конструкції приміщення від дії вологи використовується олійна фарба.

Підлога виробничого приміщення щільна, зносостійка, вогнестійка, через неї в інші приміщення не повинна проникати вода, мастила, шкідливі речовини, гази.

Мікрокліматичні умови на ділянці:

- температура повітря $t = (20..25)^{\circ} \text{C}$;
- відносна вологість $\Theta = (40..60) \%$;
- барометричний тиск $P = (0,9... 1,06) \cdot 10^5 \text{ Па}$;
- швидкість руху повітря $V = 0,2 \text{ м/с}$ в холодний період року, $V = 0,3 \text{ м/с}$ в теплий період року;
- інтенсивність тепловою опромінення від нагрітих поверхонь технологічного обладнання, освітлених установок 70 Вт/м^2 .

У виробничому та допоміжному приміщеннях передбачена вентиляція, яка забезпечує вищеперелічені параметри мікроклімату. В даному випадку застосована витяжна вентиляція загальнообмінна, так як на ділянці відсутні шкідливі виділення і необхідна мала кількість повітрообміну. Крім того, на ділянці є природна організована вентиляція.

На ділянці для компенсування втрат тепла спроектована центральна водяна система опалення низького тиску.

Вибір системи природного освітлення визначено об'ємно-планувальним рішенням будівлі, характеристиками технологічного процесу та зорової роботи, що виконується в приміщенні, а саме на ділянці 2-х стороннє бокове освітлення. При цьому ширина вікон $4,5 \text{ м}$, висота підвіконника $1,5 \text{ м}$.

Штучне освітлення передбачається як на даній ділянці так і у побутових приміщеннях для компенсації нестачі природного світла та для освітлення приміщень у темний період доби. Загальне освітлення становить $E_p = 300 \text{ лк}$;

евакуаційне освітлення $E_{\text{св}} = 0,5$ лк, аварійне освітлення $E_{\text{ав.}} = 2$ лк в середині приміщення, та $E_{\text{ав.}} = 1$ лк на території, охоронне освітлення $E = 0,5$ лк на рівні землі.

На кожному верстаті встановлено місцеве (штучне) освітлення лампами розжарювання.

Забороняється при виконанні робіт користуватися тільки місцевим освітленням.

Джерелом штучного освітлення є газорозрядні лампи низького (люмінесцентні) тиску. Для механічних цехів використовують газорозрядні лампи високого тиску типу ДРЛ, при цьому використовують світильники прямого світла ЛСП06. В даному випадку використані лампи ДРЛ-65.

Експлуатація технологічного оснащення пов'язана з виникненням шумів та вібрацій різної частоти та інтенсивності, а вони справляють несприятливий вплив на організм людини. На ділянці параметри шуму та вібрацій на робочих місцях відповідають допустимим нормам.

Все технологічне обладнання заземлене. Захист від прямих ударів блискавок та вторинного прояву атмосферної електрики забезпечено влаштуванням блискавковододів та заземленням обладнання, яке знаходиться на ділянці. Захист будівлі від прямих ударів блискавок виконано окремо розташованими стержневими (тросовими) блискавковододами, які встановлені на будівлі. На ділянці заземлювачі захисного заземлення технологічного обладнання об'єднані з захистом від прямого удару блискавок.

Протипожежний водогін об'єднаний з господарсько-житловим (виробничим) водогоном. Втрати води на гасіння пожежі для сиринклерних установок, внутрішніх пожежних кранів та зовнішніх гідрантів розраховано на тривалість гасіння пожежі – 2 год., при цьому прийнято протипожежний водогін низького тиску.

На ділянці на випадок пожежі передбачена евакуація людей через евакуаційні виходи, які розташовані розосереджено. В нашому випадку спроектовано 2 евакуаційні виходи.

4.2. Підвищення стійкості виробничих об'єктів

Під стійкістю роботи виробничих об'єктів розуміють здатність об'єкта виготовляти встановлені види продукції в обсязі і номенклатурі, що відповідають вимогам певних планів в умовах надзвичайних ситуацій, а також пристосованість цього об'єкта до відновлення в умовах його ушкодження. Для об'єктів, які не пов'язані з виробництвом матеріальних цінностей, стійкість визначається їх здатністю виконувати свої функції.

Більш підготовленими до стійкої роботи будуть ті об'єкти, які реально оцінять чинники, що можуть формувати стан об'єкта і розвиток подій в умовах надзвичайних ситуацій.

Підвищення стійкості технічних систем і об'єктів досягається здебільшого організаційно-технічними заходами, яким завжди передували дослідження стійкості конкретного об'єкта.

На першому етапі дослідження аналізують стійкість і уразливість його елементів в умовах надзвичайних ситуацій, а також оцінюють небезпеку виходу з ладу чи руйнування елементів, чи всього об'єкта в цілому. На цьому етапі аналізують: надійність устаткування і технологічних комплексів; наслідки аварій окремих систем виробництв; розповсюдження вибухової хвилі по території підприємства під час вибухів посудин, комунікацій, ядерних зарядів; розсівання речовин, що звільняються під час надзвичайних ситуацій; можливість вторинного утворення токсичних, пожежо- і вибухонебезпечних сумішей тощо

Кожного разу для виявлення впливів небезпечних чинників необхідно виявити склад тих елементів, на які впливають ті небезпеки, чи які беруть участь у формуванні впливів.

На другому етапі досліджень розробляються заходи з підвищення стійкості і підготовки об'єкта до відновлення його дії після надзвичайних ситуацій. У плані зазначаються об'єм і кошторис планованих робіт, джерела фінансування,

основні матеріали та їх кількість, машини і механізми, робоча сила, відповідальні виконавці, термін виконання тощо.

Дослідження стійкого функціонування об'єкта починається задовго до початку його експлуатації. На стадії проектування це якоюсь мірою робить проєктант. Таке саме дослідження об'єкта проводиться відповідними службами на стадії технічних, економічних, екологічних та інших видів експертиз. Кожна реконструкція чи розширення об'єкта також потребує нових досліджень щодо його стійкості. Отже, дослідження стійкості — це не одноразова дія, а тривалий, динамічний процес, який потребує постійної уваги з боку керівництва, технічного персоналу, служб цивільної оборони.

Будь-який виробничий об'єкт містить наземні будівлі і споруди основного і допоміжного виробництва, складські приміщення та приміщення адміністративно-побутового призначення. У будинках та спорудах основного і допоміжного виробництва розміщується типове технологічне обладнання, мережі газо-, тепло-, електропостачання. Між собою приміщення і споруди з'єднані мережею внутрішнього транспорту, мережею енергоносіїв і системами зв'язку й управління. На території виробничих об'єктів можуть бути розташовані споруди автономних систем електро- і водопостачання, а також окремі технологічні пристрої, що знаходяться окремо від інших будівель і споруд. Будинки і споруди побудовані за типовими проєктами з уніфікованих матеріалів. Проєкти виробництва виконуються за єдиними нормами технологічного проєктування, що зумовлює середній рівень щільності забудови (звичайно 30—60 %). Все це дає підстави вважати, що для всіх об'єктів, незалежно від профілю виробництва і призначення, характерні загальні чинники, що впливають на стійкість об'єкта, його роботу в умовах НС.

На працездатність виробничого об'єкта мають негативний вплив специфічні умови і перш за все — район його знаходження. Він визначає рівень і вірогідність впливу небезпечних чинників природного походження (сейсмічний вплив, селі, зсуви, тайфуни, цунамі, кількість гроз, липневих дощів та ін.). Тому велика увага приділяється дослідженню й аналізу району розташування об'єкта.

Одночасно з'ясовуються метеорологічні умови району (кількість опадів, напрямки дії пануючих вітрів, максимальна і мінімальна температура найбільш спекотного та найбільш холодного місяців, вивчається рельєф місцевості, характер ґрунту, глибина залягання ґрунтових вод, їх хімічний склад). На стійкість об'єкта впливають: характер забудови території (структура, тип, щільність забудови), наявність розташованих поблизу об'єкта суміжних виробництв, транспортні магістралі, природничі умови місцевості (лісові масиви — джерела пожеж; водні об'єкти — можливі транспортні комунікації, вогнеогороджуючі зони і одночасно джерела повеней та ін.).

Район розташування може відігравати роль головного чинника в забезпеченні захисту і працездатності об'єкта в умовах необхідного виходу з експлуатації штатних шляхів подання сировини чи енергоносіїв. Наприклад, наявність річки поблизу об'єкта дозволяє при порушенні шляхових і трубопровідних магістралей здійснити подачу матеріалів, сировини і комплектуючих водним транспортом.

Під час вивчення стійкості об'єкта дають характеристику будинкам основного і допоміжного виробництва, а також будинкам, які не беруть участь у виробництві основної продукції у випадках НС. Визначають основні особливості їх конструкції, технічні відомості, поверховість, розміри, вид каркасу, стикові заповнення, світові прорізи, покрівлю, перекриття, ступень зношення, вогнетривкість будинків, кількість робітників і службовців, які одночасно працюють у приміщеннях (найбільша робоча зміна), наявність убудованих в будинок сховищ чи сховищ, які знаходяться поблизу від основних будинків, наявність в будинках засобів евакуації та їх пропускну здатність.

Під час оцінки внутрішнього планування території об'єкта визначається хинники прогнозування наслідків таких процесів: витікання тяжких і легких газів чи токсичного диму; розсіювання продуктів горіння у внутрішніх приміщеннях; пожежі цистерн, колодязів, фонтанів; нагрівання і випаровування рідини в басейнах та місткостях; вплив на людину продуктів горіння та інших хімічних речовин; радіаційного теплообігу під час пожеж; утворення ударної

хвилі в результаті вибухів пари, посудин, що працюють під тиском, вибухів у зачинених і відчинених приміщеннях; розповсюдження полум'я в будинках і спорудах об'єкта тощо.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлено схема процесу розточування отвору розточною оправкою із ріжучою пластиною та напрямними опорами, розроблено розрахункову схему для дослідження деформації розточної оправки із напрямними опорами. Виведено диференціальне рівняння деформації розточної оправки з трьома пружними напрямними опорами як геометричне місце центрів поперечних перерізів оправки. Розв'язок диференціального рівняння виконано поєднанням методів Фур'є, чисельного методу Рунге-Кутта із розв'язком задачі Штурма-Ліувілля. Результати розв'язку з початковими граничними умовами представлено у вигляді графіків. При цьому визначено, що при збільшенні радіальної сили різання F_r від 500 Н до 900 Н при діаметрі розточної оправки $D=28$ мм без застосування направляючих опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,075 мм до 0,135 мм.

При збільшенні радіальної сили різання F_r від 500 Н до 900 Н при діаметрі розточної оправки $D=28$ мм із застосуванням направляючих опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,05 мм до 0,09 мм. Встановлено, що застосування направляючих опор на розточній оправці діаметром $D=28$ мм і довжиною $l=118$ мм дозволяє зменшити величину деформації оправки у 1,5 рази та підвищити якість обробленої поверхні.

При збільшенні діаметра розточної оправки D від 28 мм до 42 мм при радіальній силі різання $F_r = 700$ Н без застосування направляючих опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,02 мм до 0,105 мм.

При збільшенні діаметра розточної оправки D від 28 мм до 42 мм при радіальній силі різання $F_r = 700$ Н із застосуванням направляючих опор максимальна величина деформації оправки зростає від 0,018 мм до 0,07 мм.

Встановлено, що застосування направляючих опор на розточній оправці діаметром $D=28$ мм і довжиною $l=118$ мм дозволяє зменшити величину деформації оправки у 1,5 рази, діаметром $D=35$ мм - у 1,2 рази, діаметром $D=42$ мм - у 1,11 рази. Тому використання направляючих опор доцільно застосовувати

на розточних оправках малого діаметру та жорсткості.

Проведено дослідження методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану розточної оправки із напрямними опорами.

Визначено, що при зовнішньому радіальному навантаженні 500 Н, тангенціальному – 770 Н, та осьовому 200 Н максимальні напруження виникають на ріжучій кромці твердосплавної пластини і становлять 165 МПа.

При відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою максимальні деформації розточної оправки дорівнюють 0,0906 мм, а максимальні напруження при основі оправки - 82 МПа.

При контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості максимальні деформації розточної оправки дорівнюють 0,0402 мм, а максимальні напруження при основі оправки - 49 МПа.

При контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою великої жорсткості максимальні деформації розточної оправки дорівнюють 0,0103 мм, а максимальні напруження при основі оправки - 20 МПа.

Отже, в результаті моделювання встановлено, що застосування направляючих опор на розточній оправці дозволяє зменшити величину деформації оправки від 2,25 рази до 8,79 рази, при цьому максимальні напруження для трьох випадків є однаковими і виникають на ріжучій кромці твердосплавної пластини (165 МПа).

Встановлено, що величини напружень та деформацій у розточній оправці прямопропорційно залежать від величини радіальної складової сили різання. Мінімальна величина напружень на ріжучій кромці твердосплавної пластини дорівнює 144 МПа, а максимальна – 210 МПа. Мінімальна величина деформацій розточної оправки при відсутності контакту напрямних опор розточної оправки із заготовкою дорівнює 0,077 мм, а максимальна – 0,119 мм. Мінімальна величина деформації розточної оправки при контакті напрямних опор розточної оправки із заготовкою середньої жорсткості дорівнює 0,034 мм, а максимальна – 0,053 мм.

Розроблено технологічний процес виготовлення корпусу 738196.112.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кухарський О. М., Кушак І. В. Методичний посібник до курсового проекту по курсу “Технологія машинобудування”. Тернопіль, 2001. 58 с.
2. Пилипець М.І., Комар Р.В. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин. Тернопіль, 2019. 58 с.
3. Паливода Ю. Є. Заготовки у машинобудівному виробництві : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. 148 с.
4. Боженко Л. І. Технологія виробництва заготовок у машинобудуванні. Київ: НМК ВО, 1990. 264 с.
5. Добрянський С. С., Малафєєв Ю. М. Методичні вказівки до лабораторних занять та самостійної роботи з дисципліни «Проектування та виробництво заготовок» Частина І. Розробка креслення та технології виготовлення литої заготовки. К.: НТУУ «КПІ», 2012. 71 с.
6. Кухарський, О. М., Кузьмін М. І. Визначення припусків табличним методом. Тернопіль : Видавництво ТДТУ, 2004. 135 с.
7. Паливода Ю. Є., Кухарський О. М. Визначення припусків розрахунково-аналітичним методом, Тернопіль, 2003. 81 с.
8. Розмірні ланцюги: навчально-методичний посібник / Укладачі : Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Капаціла Ю.Б, Ткаченко І.Г. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 132 с.
9. Паливода Ю. Є., Ткаченко І. Г., Капаціла Ю. Б., Гевко Ів. Б. Технологія оброблення корпусних деталей : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 156 с.
10. Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з дисциплін “Теоретичні основи технології виробництва деталей та складання машин ” та “Технологія машинобудування” для студентів спеціальностей 131 “Прикладна механіка” і 133 “Галузеве машинобудування” на тему “Структура технологічного процесу. Принципи побудови технологічних операцій” / Укладачі : Паливода Ю.Є., Дячун А.Є. - Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 53 с.

11. Дячун А. Є. Методичний посібник з виконання курсового проекту з дисципліни «Технологія обробки типових деталей та складання машин» / А. Є. Дячун, Ю. Б. Капаціла, Ю. Є. Паливода, І. Г. Ткаченко. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 75 с.
12. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge-old/boring/how-to-apply-boring>
13. Жидецький В. Ц., Джигирей В. Ц., Мельников О. В. Основи охорони праці : навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 350 с.
14. Жидецький В. Ц. Практикум із охорони праці : Навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 349 с.
15. Li, C. J., Ulsoy, A. G., Endres, W. J. The effect of flexible-tool rotation on regenerative instability in machining. J. Manuf. Sci. Eng. 2003. 125(1). P. 39-47.
16. Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. Інструментальні матеріали, режими різання і технічне нормування механічної обробки : навчальний посібник. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.
17. Маслянка В.М., Кубах В.-Н.В., Волинець С.Я. Дослідження крутного моменту нарізання торцевої канавки. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій": 11-12 грудня 2024 р.: тези доп. Тернопіль: вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2024. С. 125.
18. <https://mapal.com/en-int/products-and-solutions/reaming-fineboring/tools-with-guide-pads>
19. Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning. Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. IV. DSMIE 2021. Springer, Cham. P. 385-394.
20. Дичковський М. Г. Технологічна оснастка. Проектно-конструкторські розрахунки пристосувань: навч. посіб. Тернопіль : ТДТУ, 2001. 277 с.
21. Andriy Diachun, Vasyl Vasylykiv, Oleg Korol, Volodymyr Myhailiuk, Ivan Golovaty, Andriy Kuras. Investigation of geometrical parameters in screw surfaces whirling process. Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2021. №

1(101). С. 68–78.

22. Oleg Lyashuk, Andrii Diachun, Ivan Kuchvara, Yuriy Vovk, Volodymyr Dzyura. Study of power parameters of forming profile elliptical screw workpieces. The International Journal of Integrated Engineering. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia Publisher's Office, 2021. Vol. 13 No. 4. P. 142-151.

23. Ляшук О.Л., Дячун А.Є., Третьяков О.Л. Дослідження деформації заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок пристроєм із декількома різцями. Перспективні технології та прилади. Зб. наук. праць. Луцьк, 2018. Вип. 12. С. 105-110.

24. Rivin E, Kang H. Enhancement of dynamic stability of cantilever tooling structures. Int. J. of Machine Tools and Manufacture. 1992. 32. P. 539–561.

25. Rahman M, Matin MA. Effect of tool nose radius on the stability of turning processes. J. of Materials Processing technology 1991. 26. P. 13-21.

26. Landers RG, Ulsoy AG. Nonlinear feed effect in machining chatter analysis. Transactions of ASME J. of Manufacturing Science and Engineering. 2008. 130.

27. Altintas Y. Manufacturing automation, Cambridge University Press. 2000.

28. Pasek, Z. J., Min, B. K., Koren, Y., Ulsoy, A. G., Szuba, P. Strategies to enhance agility and machining accuracy in line boring. IFAC Proceedings Volumes. 2002. 35(2). P. 563-568.

29. Grossi, N., Croppi, L., Scippa, A., Campatelli, G. A dedicated design strategy for active boring bar. Applied Sciences. 2019. 9(17). 3541.

30. Kaliński, K.J., Galewski, M.A., Mazur, M.R., StawickaMorawska, N. An Improved Method of Minimizing Tool Vibration during Boring Holes in Large-Size Structures. Materials. 2021. 14. 4491.

31. Яким І. С. Підвищення якості виготовлення тришаршкових бурових доліт : дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2016. 250 с.

32. Довбуш Т.А., Хомик Н.І., Бабій А.В., Цюнь Г.Б., Довбуш А.Д. Опір матеріалів: навчальний посібник до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.