Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри машинобудування,
мехатроніки і робототехніки
канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти на тему
«Прогнозування експлуатаційних характеристик спіральних свердел малих діаметрів»
«Predicting the performance characteristics of small-diameter twist drills»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ГМ-22М-3
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

_____ Іщенко В. С.

Керівник проекту
канд. техн. наук, доцент

_____ Володимир СВЯЦЬКИЙ

Рецензент
канд. техн. наук, доцент

_____ Руслан ОСІН

м. Кропивницький 2024

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет: механіко–технологічний
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти: другий (магістерський)
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»
Освітньо-наукова програма: «Галузеве машинобудування»

Завідувач кафедри машинобудування,
мехатроніки і робототехніки
канд. техн. наук, доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
05 лютого 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
Іщенку Віталію Сергійовичу

1. Тема роботи: Прогнозування експлуатаційних характеристик спіральних свердел малих діаметрів
2. Керівник роботи: Святський Володимир Вячеславович
3. Строк подання роботи до захисту: 28 червня 2024 р.
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи.

Мета: збільшення довговічності і надійності різального інструменту при свердлінні малих діаметрів через прогнозування експлуатаційних характеристик.

Завдання: обгрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методику експериментальних досліджень зносу різального інструменту при свердлінні; опрацювати питання та виконати розрахунки з економічної частини.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
№ 4 «Економічна частина»	Журило І. В., канд. екон. наук, доцент	12.02.2024 р.	12.02.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	25.03.2024 р.	
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу	20.04.2023 р.	
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові	17.05.2023 р.	
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту	15.06.2023 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	20.06.2024 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	25.06.2024 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	28.06.2024 р.	

Дата видачі завдання
05 лютого 2024 р.

Підпис керівника
_____ Святський В. В.

Завдання прийнято до виконання
05 лютого 2024 р.

Підпис здобувача
_____ Іщенко В. С.

АНОТАЦІЯ

Іщенко В. С. «Прогнозування експлуатаційних характеристик спіральних свердел малих діаметрів», спеціальність 131 «Галузеве машинобудування», ОНП «Галузеве машинобудування», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024 рік.

Метою дослідження є збільшення довговічності і надійності різального інструменту при свердлінні малих діаметрів через прогнозування експлуатаційних характеристик.

Проведено аналіз методів і способів підвищення точності обробки отворів та розрахунків раціональних режимів обробки при заданих параметрах свердла для обґрунтованого прогнозування стійкості різального інструменту. Шляхом теоретичних досліджень з'ясовано вплив умов різання, матеріала властивостей матеріалу, діаметра свердла і геометрії свердла на період стійкості при свердленні. Прогнозування зносу інструменту під час свердління виконувалося за допомогою аналітичної моделі Такеяма-Мурата та оновлення геометрії різального інструменту під час процесу формування стружки. Запропоновано алгоритм розрахунку прогнозування експлуатаційних характеристик спіральних свердел.

комп'ютерне моделювання, свердло, інструмент, заточка, прогнозування, знос, ефективність

ANNOTATION

Vitalii ISHCHENKO. "Predicting the performance characteristics of small-diameter twist drills", specialty 131 "Industrial engineering", ONP "Industrial engineering", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of the study is to increase the durability and reliability of the cutting tool when drilling small diameters through the prediction of operational characteristics.

An analysis of methods and ways of improving the accuracy of hole processing and calculations of rational processing modes at given parameters of the drill for reasonable forecasting of the stability of the cutting tool was carried out. The effect of cutting conditions, material, material properties, drill diameter, and drill geometry on the period of stability during drilling was determined through theoretical studies. Prediction of tool wear during drilling was performed using the Takeyama-Murat analytical model and updating the geometry of the cutting tool during the chip formation process. An algorithm for calculating the forecasting of the operational characteristics of spiral drills is proposed.

computer simulation, crimp, tool, die, profile, effort, efficiency

ЗМІСТ

ВСТУП 5
РОЗДІЛ 1.
ОБГРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ . . . 8
1.1. Процес свердління. 8
1.2 Елементи спірального свердла 9
1.3 Зношування різального інструменту при свердлінні 13
1.4 Визначення сили різання при свердлінні 13
1.5 Ресурс свердел від параметрів свердління 15
1.6 Недолікі процесу та вдосконалення процесу свердління 18
РОЗДІЛ 2.
ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ПРИ СВЕРДЛЕННІ. 20
2.1. Експериментальне обладнання, оснащення та апаратура 20
2.2 Вплив параметрів процесу різання на осьову силу і крутний момент 27
РОЗДІЛ 3.
МЕТОДИКА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДІВ. 31
3.1. Математичне моделювання та сила різання при свердлінні . 31
3.2. Моделі зносу інструменту 33
3.3.Нелінійний статичний розрахунок допустимих силових характеристик. 33
3.4. Виконання симуляції проведених розрахунків вісесиметричним пуансоном 37

РОЗДІЛ 4.
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СПІРАЛЬНИХ СВЕРДЕЛ МАЛИХ ДІАМЕТРІВ. 47
4.1. Загальні вихідні дані. 47
4.2. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки отвору) 49
4.3 Розрахунок показників економічної ефективності 54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 59

ВСТУП

Актуальність теми

Свердління - це технологія, яка передбачає видалення матеріалів за допомогою багатокромкового інструменту для створення заданого отвору на заготовках. Це операція, що в авіабудуванні може виконуватись у процесі остаточного складання, коли використовуються гвинти для з'єднання компонентів разом, щоб отримати продукцію в її остаточному вигляді. Під час складання необхідно виконати мільйони отворів для заклепкових і болтових з'єднань в процесі виготовлення літака.

Погана якість отвору може призвести до появи тріщин в структурі планера та знижує надійність конструкції. Знос інструменту має значний вплив не тільки на термін служби різального інструменту, але й на якість обробки деталі з точки зору точності розмірів і цілісності поверхні.

У безперервних процесах утворення стружки поступове зношування різального інструменту відбувається внаслідок стирання, адгезії, дифузії, хімічної ерозії та гальванічної дії. Ці явища під час процесу утворення стружки залежать від обраних параметрів різання, таких як швидкість різання та швидкість подачі.

Крім того, під час механічної обробки важкооброблюваних матеріалів свердлінням малими діаметрами, виникають високі механічні та термічні навантаження, які можуть знизити продуктивність і різання.

В результаті, щоб підвищити точність висвердлених деталей знос різального інструменту під час операцій свердління повинен бути точно передбачений, щоб мінімізувати його.

У дослідженні розроблено застосування систем віртуальної обробки з метою прогнозування та мінімізації зносу різального інструменту під час операцій свердління інструментом малих діаметрів.

Мета дослідження

Збільшення довговічності і надійності різального інструменту при свердлінні малих діаметрів через прогнозування експлуатаційних характеристик.

Наукова новизна

Отримали подальший розвиток теоретичні дослідження геометричних параметрів свердла та режимів різання на знос та стійкість спірального свердла

Об’єкт та предмет дослідження

Об’єктом дослідження є вплив режимів механічної обробки на зношування свердла. Предметом дослідження є формотворний інструмент для отримання виробів методом свердління.

Методи дослідження:

метод кінцевих елементів.

Практичне значення отриманих результатів

Для прогнозування зносу інструменту під час свердління розраховуються сили різання та температура. Потім метод скінченних елементів використовується для прогнозування зносу інструменту за допомогою аналітичної моделі Такеяма-Мурата та оновлення геометрії різального інструменту під час процесу формування стружки.

Щоб мінімізувати знос різального інструменту під час свердління, визначити оптимальні параметри свердління – швидкості подачі та швидкості обертання шпинделя, отримуються за допомогою алгоритму аналізу поверхні відгуку на основі методу Тагучі.

1. Проведено аналіз методів і способів підвищення точності обробки отворів та розрахунків раціональних режимів обробки при заданих параметрах свердла для обґрунтованого прогнозування стійкості різального інструменту.

2. Шляхом теоретичних досліджень з’ясовано вплив умов різання, матеріала властивостей матеріалу, діаметра свердла і геометрії свердла на період стійкості при свердленні.

3. Запропоновано алгоритм розрахунку прогнозування експлуатаційних характеристик спіральних свердел.

Особистий внесок здобувача

Обгрунтування вибраного напрямку дослідження, постановка мети і задач дослідження, аналіз методів і способів підвищення точності обробки отворів та розрахунків раціональних режимів обробки при заданих параметрах свердла для обґрунтованого прогнозування стійкості різального інструменту, комп’ютерне проектування прогнозування експлуатаційних характеристик спіральних свердел, аналіз результатів чисельних експериментів.

Апрабація результатів магістерської роботи

Основні результати дослідження доповідалися на LVIII науково-технічній конференції студентів ЦНТУ.

РОЗДІЛ 1

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Процес свердління

Свердло - це різальний інструмент, призначений для виконання отворів у суцільних деталях, а також для збільшення отворів, які раніше були зроблені шляхом кування, штампування, лиття або свердління. Вони широко використовуються в машинобудуванні, займаючи за цією ознакою друге місце після різців.

Кінематика свердління складається з двох рухів: основним є обертання інструменту або заготовки та лінійний рух подачі вздовж осі інструменту. Свердла в основному розрізняють за конструкцією, відповідно до якої виділяють наступні основні типи:

1) лопаткові свердла;

2) спіральні свердла (з гвинтовими канавками);

3) спеціального типу (для свердління глибоких отворів, трепанаторів, комбінованих свердел тощо).

Різальну частину зазвичай виготовляють із швидкорізальної сталі. В останні роки набули поширення твердосплавні свердла різних конструкцій.

У нашому випадку буде використовуватися спіральне свердло.

Спіральні свердла мають найбільше застосування серед інших відомих видів свердел завдяки таким перевагам:

1) хороший відвід стружки з отвору за рахунок гвинтових канавок;

2) позитивні передні кути по більшій довжині кромок;

3) великий запас для переточування, який робиться на боках і може здійснюватися вручну або на спеціальних заточувальних верстатах, у тому числі автоматичних.

1.2 Елементи спірального свердла

Дві основні різальні кромки розташовані на конічній різальній частині з кутом загострення 2φ. Кромки є лініями перетину гвинтової грані та бока. Форму бокової поверхні визначають заточуванням. Ребро стрілки утворюється в результаті перетину двох бокових поверхонь. Край долота нахилений відносно основної різальної кромки під кутом φ. Ця кромка розташована на свердлі з номінальним діаметром d0=(0,15…0,25)d, де d – діаметр свердла.

Дві менші різальні кромки лежать на перетині передніх поверхонь і циліндричних країв, які спрямовують свердло в отвір і утворюють розмірну частину свердла. Кут між малими кромками та віссю свердла є кутом спіралі ω, який в основному визначає значення передніх кутів γ на головних різальних кромках. Граблі, як буде показано нижче, мають різний розмір у різних точках уздовж кромок.

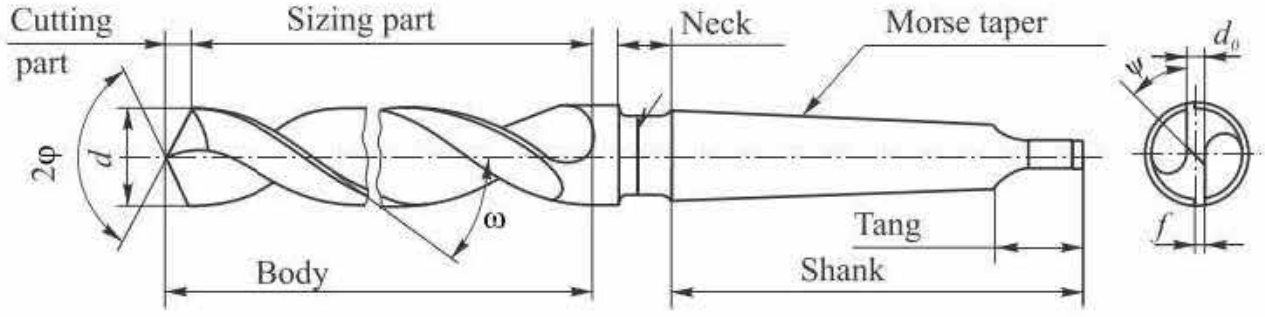


Рис. 1.1 Спіральне свердло

Спіральні свердла мають складну геометрію різальної частини, що зумовлено наявністю великої кількості кромок і складною конфігурацією передньої та бокової поверхонь.

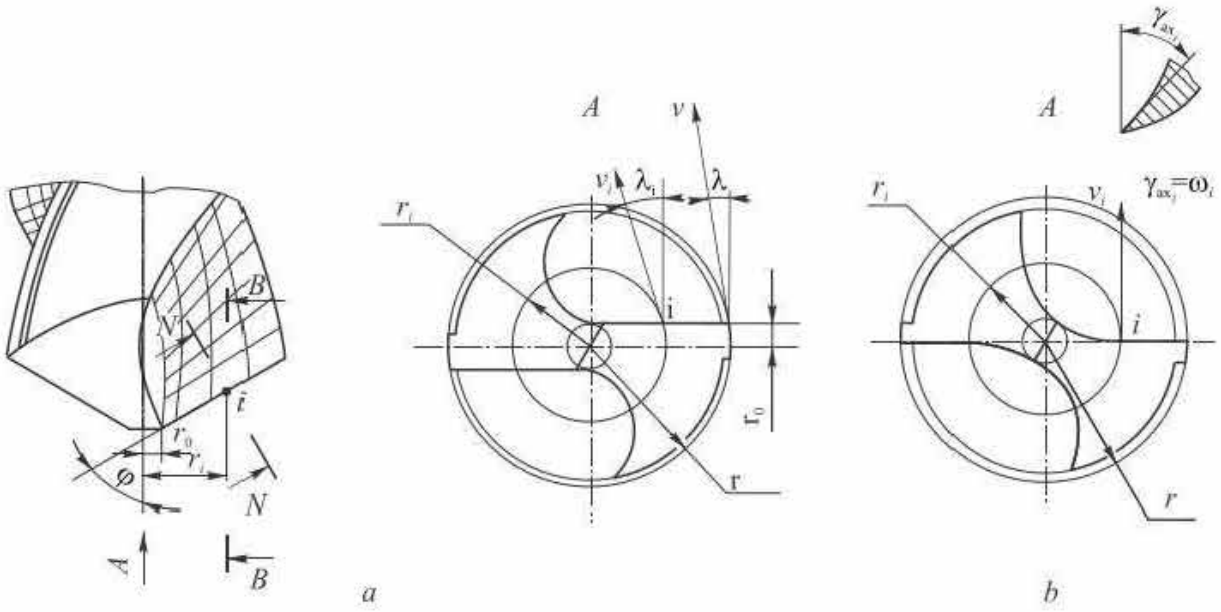


Рис. 1.2 Геометрія спірального свердла: (а) стандартне свердло; (б) свердло з кромками в осьовій площині

Кут в плані 2φ — подвійний кут різальної кромки, виміряний у базовій площині. Стандартні свердла мають 2φ =116…120°. Тут основні різальні кромки є лінійними та збігаються з твірною лінією гвинтової передньої поверхні.

Згідно з виробничим досвідом оптимальне значення кута 2φ рекомендується вибирати по відношенню до матеріалу заготовки, наприклад, при різанні конструкційних сталей 2φ =116…120°, для нержавіючих і високоміцних сталей 2φ =125… 150°, для чавуну та бронзи 2φ =90…100°, для чавуну високої твердості 2φ =120…125°, для кольорових металів (алюмінієвих сплавів, латуні, міді) 2φ =125…140° .

Кут гвинтових канавок, тобто кут спіралі ω, вимірюється на периферії свердла і є одним із найважливіших параметрів свердла. При розробці нових типів свердел для різання певних матеріалів ISO рекомендує застосовувати такі значення кута закручування ω: для різання сталі – 25...35°, для чавуну та

інших крихких матеріалів – 10…15%, для алюмінію, міді та інших вільнорізальних матеріалів – 35 …45°.

Кут нахилу спіралі спеціальних спіральних свердел збільшено до 40…60°, тому що цей кут має великий вплив на відведення стружки із зони різання. Однак із зменшенням кута ω поперечна жорсткість свердла та передній кут збільшуються, особливо на периферійних частинах різальних кромок, що може значно знизити міцність різального клина та зменшити термін служби свердла.

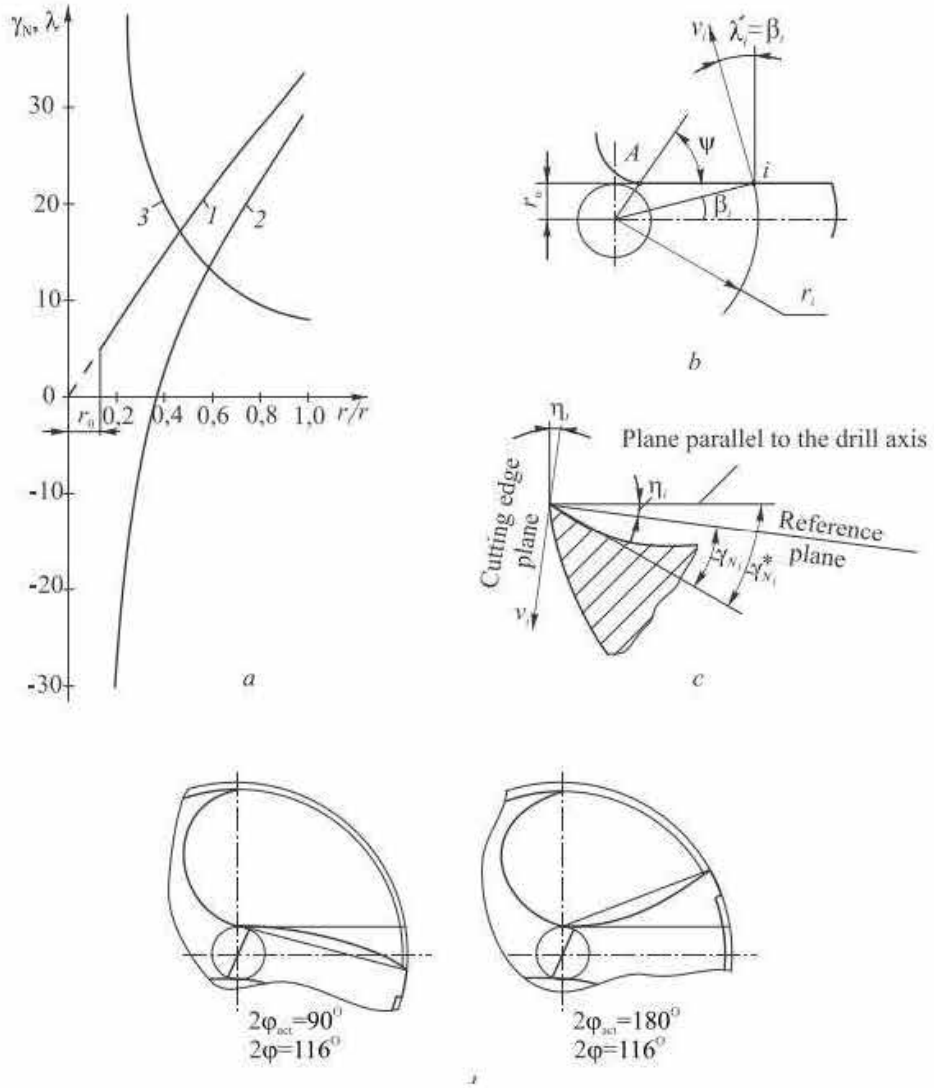


Рис. 1.3 Значення переднього кута γNi та кута нахилу λi вздовж кромок закрутки свердло: (а) 1 – γNi для аксіально-струганих кромок, 2 і 3 –

стандартне свердло γNi та λi відповідно; (b) напрям вектора швидкості різання вздовж кромок; (c) діаграма робочого переднього кута; (d) форму кромки відносно фактичного значення кута в плані 2φ

Передній кут γ спіральних свердел має змінну величину по довжині головних різальних кромок. Це пов'язано з тим, що передня поверхня свердла є гвинтоподібною лінійно-згорнутою, оскільки утворена гвинтовим рухом відрізка лінії, нахиленого до осі інструменту.

Задній кут α на кромках створюється шляхом шліфування п’ят свердла, які є бічними поверхнями і можуть мати форму частини плоских, конічних або гвинтових поверхонь. Задній кут спірального свердла зазвичай вимірюється в циліндричному перерізі, співвісному зі свердлом, як кут між площиною різальної кромки та дотичною до бічної поверхні. Перший — це площина, яка проходить через кромку перпендикулярно до осьової площини свердла (рис. 1.4, а).

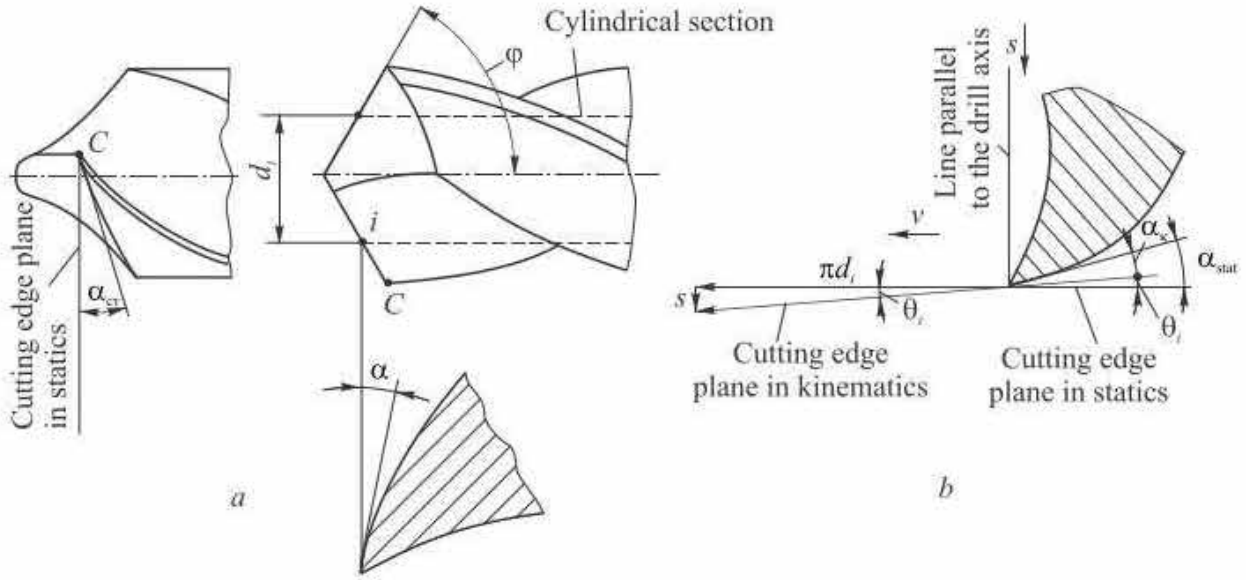


Рис. 1.4 Задні кути спірального свердла: (а) інструмент; (б) робочі

1.3 Зношування різального інструменту при свердлінні

Процес свердління здійснюється свердлами різних типів, зі спіральним свердлом HSS, яке є однією з найскладніших конструкцій багатьох інструментів, будучи найвищим і найважливішим.

Спіральні свердла мають змінні передні та задні кути вздовж різальних кромок, гвинтові передні та профільовані зазори, несприятливу геометрію різальних клинів і особливо в центрі свердла, невелику радіальну жорсткість через значний звис, складні умови відводу стружки, що разом мають найбільший вплив на схеми свердління.

Таким чином, умови формування стружки, теплові та силові навантаження, які впливають на знос і термін служби інструменту, різні в кожній точці вздовж різальних кромок свердла. Через малу радіальну жорсткість спіральних свердел і високі навантаження, що виникають через велику ширину стружки, застосування твердосплавного сплаву стикається з певними труднощами. Це значно знижує продуктивність свердління, особливо свердління високої міцності матеріалів.

1.4 Визначення сили різання при свердлінні

На відміну від точіння при свердлінні бере участь не одна, а три різальні кромки (дві кромки і одна долота), які разом визначають силове навантаження на свердло. Крім того, на крутний момент, необхідний для свердління, впливає тертя між краями свердла та стінками отвору, який просвердлюється.

Результуючу силу різання, прикладену до кромки свердла, можна визначити, яку перетворюючись, на три взаємно перпендикулярні складові:

1) PZ – тангенціальна, діє в напрямку швидкості різання;
2) PX – сила тяги паралельно осі свердла,

3) PY – радіально до осі свердла (рисунок 1.5).

Радіальні компоненти PY на кромках спрямовані в протилежні сторони і теоретично повинні бути збалансовані. Однак на практиці через помилки заточування та монтажу свердла, нерівномірне навантаження різання, викликане, наприклад, жорсткими плямами в роботі або іншими причинами, баланс радіальних компонентів PY порушується. У цьому випадку через появу неврівноваженої сили ΔPY виникають поперечні коливання свердла. Ці вібрації спричиняють завищення розміру отвору (небажане збільшення діаметра отвору), блукання свердла, які посилюються із збільшенням глибини свердління.

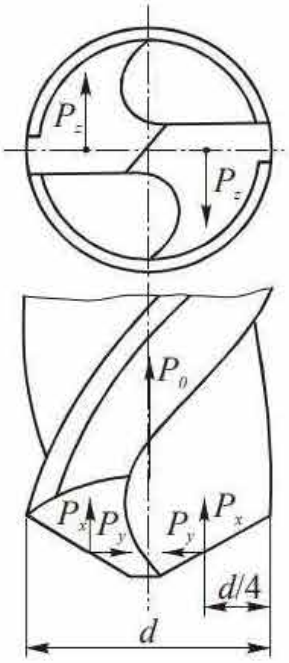


Рис. 1.5 Система сил, що діють на свердло

На практиці осьова сила і крутний момент розраховуються, відповідно, за такими рівняннями

$$PO = CPdXPfYp\ KP$$

$$MT = CWdXTsYTKT$$

де , CP, CW - коефіцієнти, що характеризують умови свердління і властивості еталонного матеріалу заготовки;

KP, KT – фактори, що характеризують умови свердління (спосіб заточування, потоншення перетинки, тощо).

Отже, потужність, споживана при свердлінні, дорівнює

$Ne = 1{,}6 \cdot 10{-}3MTn$, (kW)

1.5 Ресурс свердел від параметрів свердління

Під час свердління швидкість різання та переміщення тертя змінюються вздовж різання кромок. Стружка широка і тонка, тому спіральні свердла зношуються переважно на зазорах, що примикають до різальних кромок.

Зношування має форму зношуваних ділянок hF, які є змінними вздовж різальних кромок. При свердлінні крихких матеріалів зношування свердла відбувається на кутах кромок. При свердлінні пластичних матеріалів на високих швидкостях знос відбувається на передніх поверхнях у вигляді кратерів і на краях у вигляді зносу hC (рисунок 1.6).

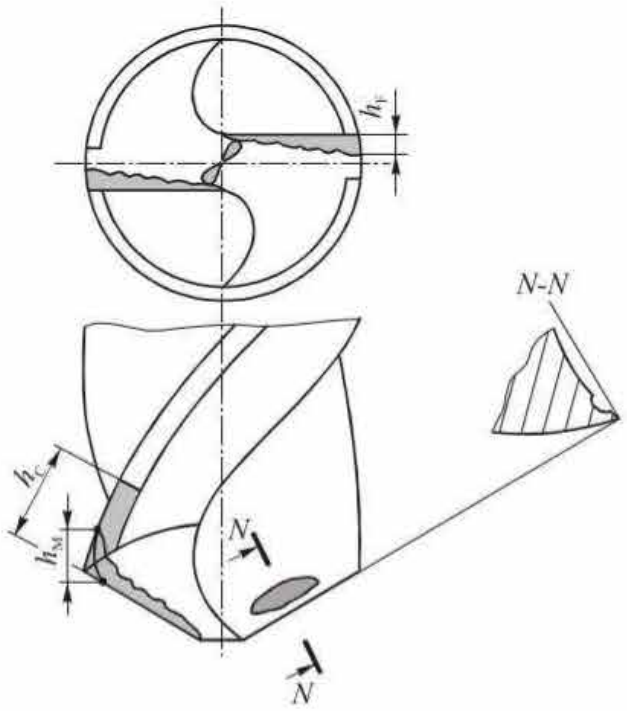


Рис. 1.6 Зношення передньої та зазорної поверхонь спірального свердла

Найбільш небезпечним є знос кутів кромок і країв, оскільки в цьому випадку для сильного зносу знадобиться відшліфувати значну кількість матеріалу інструменту. Тому при свердлінні не можна допускати катастрофічного зносу, у вигляді оплавлення кута кромки та руйнування країв.

Край через низькі швидкості тертя в центрі свердла зношується значно повільніше. Сильне зношування кромки долота різко збільшує тяговий тиск, а знос країв значно збільшує крутний момент. Інтенсивний знос вістря долота свідчить про порушення параметрів термообробки в процесі виготовлення.

Вплив різних факторів на знос краю свердла при різанні конструкційних сталей можна виразити наступним емпіричним рівнянням [1]:

$$v = \frac{C_v d^{x_v}}{T^m S^{y_v}} K_v ,$$

З рівняння випливає, що найбільший вплив на знос свердла має швидкість різання і значно менший – швидкість подачі. З цієї причини, з

точки зору ресурсу свердла, краще працювати з більшою швидкістю подачі та меншою швидкістю різання, оскільки для заданого ресурсу інструменту T це забезпечує більшу продуктивність процесу свердління.

Швидкість різання для свердління розраховується як:

$$v = \frac{C_v d^{x_v}}{T^m S^{y_v}} K_v ,$$

де Cv – коефіцієнт властивостей матеріалу заготовки, для конструкційних сталей ($C > 0{,}6\%$) $\sigma_в$=750МПа C_v= 89) і подачі f<0,2 мм/об - Cv =89, а для подачі f>0,2 мм/об - Cv=12,4; для чавуну (НВ 190) -Cv =20,6; m – показник степеня для цих матеріалів відповідно m=0,2 та m=0,125; Xv =0,4 і Xv =0,25; і Yv =0,6 і Yv =0,5 [2, 3]; Kv – коефіцієнт використовуваної охолоджувальної рідини, глибина свердління, спосіб заточування тощо $K_v = K_{\text{СОЖ}} K_l K_{\text{зат}}$

Основні недоліки спіральних свердел, які зменшують термін служби свердла, включають:

1) високі позитивні передні кути на периферії свердла;
2) несприятлива геометрія леза різця;
3) відсутність зазору на другорядних різальних кромках (полях).

Параметри різання для операції свердління призначаються в такому порядку:

1. Для досягнення максимальної продуктивності призначається максимально допустима подача f щодо міцності та жорсткості свердла [4]:

2. Далі, в залежності від глибини і типу (глухі або наскрізні) отворів, уточнюються розрахункові значення швидкості подачі.

3. Відносно заданих значень діаметра отвору d, подачі f і прийнятний термін служби інструменту, швидкість різання розраховується за

рівнянням (1.7). Після цього оберти свердла регулюються відповідно до налаштувань PRM машини,

4. Зусилля та потужність свердління розраховуються за рівнянням, а також перевірені з точки зору потужності головного приводу та міцності механізму подачі-приводу машини.

1.6 Недолікі процесу та вдосконалення процесу свердління

До основних недоліків геометрії стандартних спіральних свердел, які знижують ресурс і продуктивність свердла, відносяться:

1) нульові кути зазору на другорядних різальних кромках, які є полями;
2) негативні передні кути на кромках;
3) великі передні кути на периферійній частині кромок.

Для зменшення впливу цих недоліків на практиці широко використовуються такі способи:

1.Загострення краю з кутами зазору $\alpha 11=6\ldots 8°$ і невеликим нерозрізом (рис.1.7, а). Це зменшує сили тертя на краях і усуває адгезію дрібної стружки під час свердління сталі, в результаті чого збільшується термін служби інструменту.

2. Застосовуються різні методи потоншення перетинки, що зменшує силу тяги, покращує умови початку отвору та підвищує продуктивність свердління, дозволяючи збільшити швидкість подачі. Деякі способи розрідження павутини показано на рис. 1.7, b і c.

3. Застосовується подвійне конусне вістря заточування свердла (рис. 1.7, d). Тут $2\varphi=116°$, $2\varphi 1=70\ldots 90°$. Це зменшує знос найбільш вразливих ділянок периферійних різальних кромок свердла, де швидкість різання найбільша, а передні кути менше 7...8°.

На практиці використовуються інші способи заточування вістря свердла, щоб збільшити термін служби свердла та покращити продуктивність свердла.

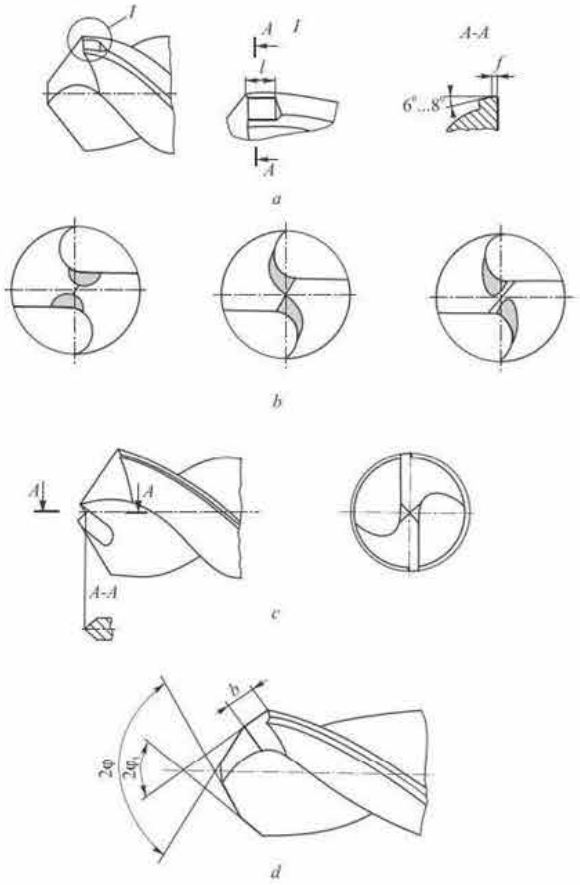


Рис. 1.7 Корекція геометрії спірального свердла: (a) шліфування краю; (b) і (c) розрідження павутини; (d) кут подвійної точки

РОЗДІЛ 2

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ПРИ СВЕРДЛЕННІ

Процес свердління протікає в важких умовах різання, серед яких :

- затруднене відведення стружки і підведення охолоджуючої рідини;
-

спостерігається значне тертя стружки по поверхні канавок свердла, тертя стружки і самого свердла по обробленої поверхні;

- швидкість різання уздовж ріжучої кромки змінюється від максимальної до нуля;
- внаслідок збільшення V і γ в точках різальної кромки від центру до периферії свердла деформація зрізаного шару, відповідно, зменшується.

У стандартних спіральних свердлах із за великого негативного переднього кута γ на поперечної кромці -57 ° ...- 60 ° замість різання має місце зминання, видавлювання і скріблення металу, в результаті чого під час свердління стандартним спіральним свердлом підвищується температура, погіршується якість обробки, створюються несприятливі умови різання, знижується стійкість свердла.

У традиційного спірального свердла при обробці передній кут різний в різних точках ріжучого леза. Швидкість різання не постійна і змінюється від нуля в центрі свердла до певного максимального значення на периферії свердла.

Знос свердла по задній поверхні виникає внаслідок збільшення температури в зоні різання . Знос перемички свердла найбільш часто виникає при обробці твердих матеріалів або при високій швидкості різання. Найбільш значний знос свердла виникає по передній поверхні, при глибокому свердлінні. Знос ділянки стрічки примикає до ріжучої частини свердла залежить від деформації і відведення свердла, а також від інших факторів.

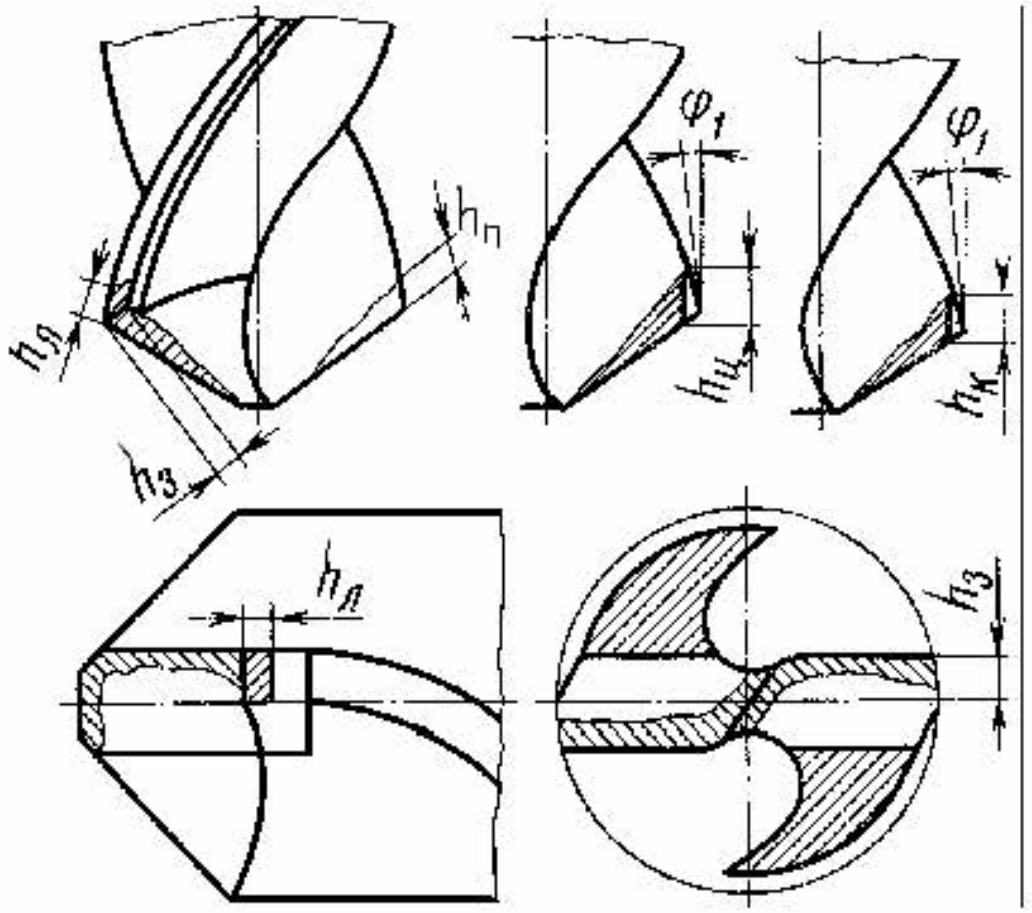


Рис. 2.1 Види зносу свердел Геометричні форми зносу свердла зображені на рис. 2.1.1. $h_З$ – знос свердла по задній поверхні, $h_л$ – знос по стрічці, $h_п$ – знос по передній поверхні, $h_ц$ - знос циліндричної ділянки, $h_к$ – знос конічної ділянки.

При свердлінні рівнодіюча сили різання, прикладені до ріжучих кромок свердла, розкладаються на три взаємно перпендикулярні складові сили: осьові сили $P_{ок}$, тангенціальні сили $P_{тг}$, радіальні сили $P_р$.

Осьова сила $P_{ок}$ долає опір матеріалу впровадженню свердла. Тангенціальні сили виникають за рахунок опору матеріалу заготовки відділенню зрізаного шару створюють на свердла крутний момент. Радіальні сили на двох ріжучих кромок спрямовані в протилежні сторони і взаємно врівноважуються, якщо вони рівні за величиною (інакше сприяють

відведенню свердла). Крім усього, на свердло діють сили опору, що виникають на поперечної ріжучої кромці $P_{оп}$, які складають до 65-80%, сили тертя на стрічках РТ - 3%, осьові сили на ріжучих кромок - 17-32%.

При свердлінні отворів спіральними свердлами з поперечної кромкою, крім діючих сил опору процесу різання, на деталь в зоні поперечної кромки присутні додаткові сили від дії підвищеної температури (рисунок 2.1.2).

$Р_{тг}$ - тангенціальна сила різання, що діє на ріжучі кромки; $Р_{уд}$ - питома сила розпирання і деформації отвору;

$Р_{ре}$ - сумарна радіальних питомих сил; $Р_{ОЕ}$ - сумарна осьових питомих сил; $Р_{ру}$ - результуюча питомих сил;

$Р_{ок}$ - осьова сила, що діє на ріжучі кромки; $Р_{ф}$ - радіальна сила, що діє на ріжучі кромки;

$Р_{оп}$ - осьова сила, що діє на поперечну кромку.

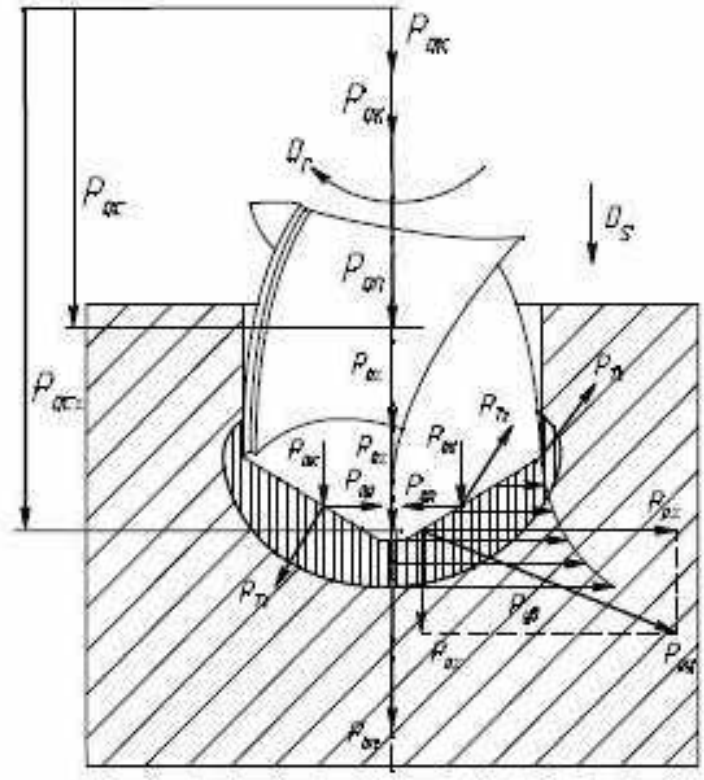


Рис. 2.2 Модель діючих сил на спіральне свердло з поперечної кромкою з урахуванням механічних і теплових впливів.

Осьові складові сили, від розширення оброблюваного матеріалу, збільшують сумарну осьову силу. Радіальні складові сил, що виникають від розширення аномально нагрітого матеріалу за рахунок дії поперечної кромки, призводять до похибки формоутворення, зміни форми і погіршення шорсткості поверхні отвори.

В результаті виділення великої кількості тепла на поперечної кромці (заштрихована зона на малюнку 2.1.1) через теплові розширення виникають додаткові сили, що діють на свердло. $P_{РУ}$ - результуюча питомих сил $P_{уд}$ (умовно показані на одній стороні від осі свердла; вони розподілені рівномірно по колу); Результуюча питомих сил розкладається на складові $P_{р\Sigma}$ і $P_{о\Sigma}$, крім того, $P_{р\Sigma} = \Sigma P_{уд}$ викликає «розпирання», деформацію отвори в радіальному напрямку.

Різання під час свердління здійснюється п'ятьма кромками свердла: двома головними ріжучими кромками, перемичкою (поперечної кромкою) і двома допоміжними кромками напрямних стрічок. На кожній з них діють три складових сили, аналогічних точіння. Загальна рівнодіюча сил різання під час свердління складається зі складових сил, що діють на всіх кромок свердла (рис. 2.1.3.).

Для свердла розглядаються наступні технологічні напрямки складових сил: паралельно осі свердла (напрямку подачі) - осьові складові ($P_{хг}$ - сили на головної різальної кромки, $P_{ХП}$ - сили на поперечної кромці, $P_{ХЛ}$ - сили тертя на стрічках); сили, спрямовані перпендикулярно осі свердла (перпендикулярно обробленої поверхні) - $P_{уг}$ і окружні сили на головних різальних кромках – $P_{zг}$, $P_{zп}$ - сили на обох частинах поперечної кромки і сили тертя на напрямних стрічках - $P_{zл}$. Сили $P_{zг}$ і $P_{zс}$ спрямовані по дотичній до окружності в кожній точці різальних кромок. Суму всіх вертикальних сил, що перешкоджають просуванню свердла в заготовку, називають осьовою силою $P_о$ або зусиллям подачі:

$$P_о = P_{ХП} + 2P_{ХГ} + 2P_{ХЛ},$$

Вимірювання показують, що осьова сила на перемичці $P_{ХП}$ становить 57% від P_o, вертикальні складові сили на головних різальних кромках ($2P_{хг}$) - 40% і вертикальні складові сил тертя на стрічках ($2P_{хс}$) - близько 3%.

Суму всіх радіальних сил, спрямованих перпендикулярно осі свердла, - P_y, звичайні не розглядають, так як вважають, що вони взаємно врівноважені при симетричному розташуванні ріжучих кромок і однакових параметрах геометрії свердла. У разі відхилення, від симетрії, в геометрії свердла (наприклад, різна довжина головних різальних кромок) з'являється неврівноважена складова сили $\Delta P_У$, яка призводить до відведенню свердла від осі свердління і розбивці отвори.

Окружні сили P_z створюють сумарний крутний момент опору різання, який складається з моменту від сил $P_{zг}$, моменту від сил скобленя і тертя на поперечної кромці - $M_п$ і моменту від сил тертя на стрічках - $M_л$, тобто:

$M_{кр} = M_{гл} + M_п + M_л$,

Вимірювання показують, що 80% припадає на $M_{гл}$, 8% - на $M_п$ і 12% - на $M_л$.

Для практичних розрахунків необхідно знати значення осьової сили P_o і крутного моменту $M_{кр}$. При конструюванні верстата механізм подачі розраховується за максимальною осьової силі P_o.

Сумарний момент опору різання $M_{кр}$ з одного боку повинен бути менше, або, в крайньому випадку, дорівнювати обертальному моменту $M_{кр\ ст}$, що розвивається електродвигуном верстата на даному ступені частоти обертання шпинделя, але з іншого - менше, або, в крайньому випадку, дорівнювати максимальному крутному моменту $M_{кр\ ст}$, що допускається слабкою ланкою механізму головного руху верстата (щоб уникнути його поломки), тобто

$M_{кр} < M_{кр\ ст}$. Момент $M_{кр\ ст}$ розраховують при конструюванні верстата і вказані зазвичай в його паспорті.

При розрахунку робочого пристосування на зусилля закріплення заготовки при свердлінні також необхідно знати P_o і $M_{кр}$.

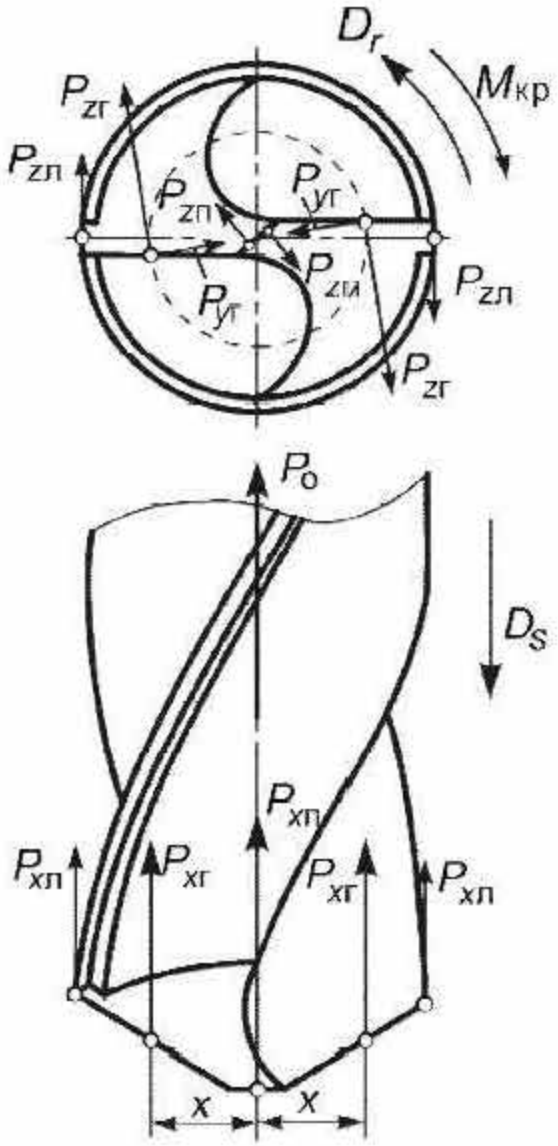


Рис 2.3 Сили, що діють на окремі ріжучі кромки свердла

За силою P_o і моменту $M_{кр}$ можна розрахувати необхідну (потрібну) потужність електродвигуна свердлильного верстата.

Потужність, що витрачається на різання, буде складатися з потужності, що витрачається на обертання, і потужності, що витрачається на рух подачі, тобто

$$N_{рез} = N_{вр} + N_{под},$$

Потужність, що витрачається на обертання, кВт.

$$N_{вр} = \frac{M_{кр}^{n}}{9750}$$

де $M_{кр}$ - крутний момент від сил опору різанню, Нм; n - частота обертання свердла, об / хв.

Потужність, що витрачається на подачу свердла, кВт,

$$N_{под} = \frac{P_o S n}{60 \cdot 1000 \cdot 1000}$$

де P_o- осьова сила, Н.

Розрахунки показують, що, як і при токарній обробці, потужність, що витрачається на рух подачі, становить 0,5-1,5% потужності, що витрачається на обертання свердла, і нею можна знехтувати.

Знаючи потужність, затрачену на різання, легко підрахувати і необхідну (потрібну) потужність електродвигуна верстата N_e.

2.2 Вплив параметрів процесу різання на осьову силу і крутний момент

Чим більше діаметр свердла і величина подачі, тим більше площа поперечного перерізу зрізаного шару, більше обсяг деформованого металу і опір стружкоутворення, тим більше осьова сила і крутний момент від сил опору різання. Але, якщо подача впливає на параметри P_o і $M_{кр}$ приблизно однаково, то діаметр свердла впливає на крутний момент більше, ніж на осьову силу. Останнє пояснюється тим, що при збільшенні діаметра

збільшується і плече, на якому діють дотичні сили. Різний вплив діаметра свердла і подачі враховується показниками ступеня в формулах для підрахунку осьової сили P_o і моменту $M_{кр}$.

Геометричні параметри свердла роблять істотний вплив на P_o і $M_{кр}$. Так, зі зростанням кута нахилу гвинтової канавки ю (рис. 2.2.1 а) збільшується передній кут у, а, значить, полегшується процес стружкоутворення і зменшуються P_o і $M_{кр}$.

Кут 2φ впливає на P_o і $M_{кр}$ аналогічно кутку в плані токарного різця, змінюючи співвідношення між шириною і товщиною зрізаного шару.

Зі збільшенням φ $M_{кр}$ зменшується, а P_o зростає (рис. 2.2.1 б).

Довжина поперечної кромки К надає більший вплив на P_o, ніж на $M_{кр}$ (рис. 2,2,1 в). Для зменшення P_o виконують спеціальні підточування перемички.

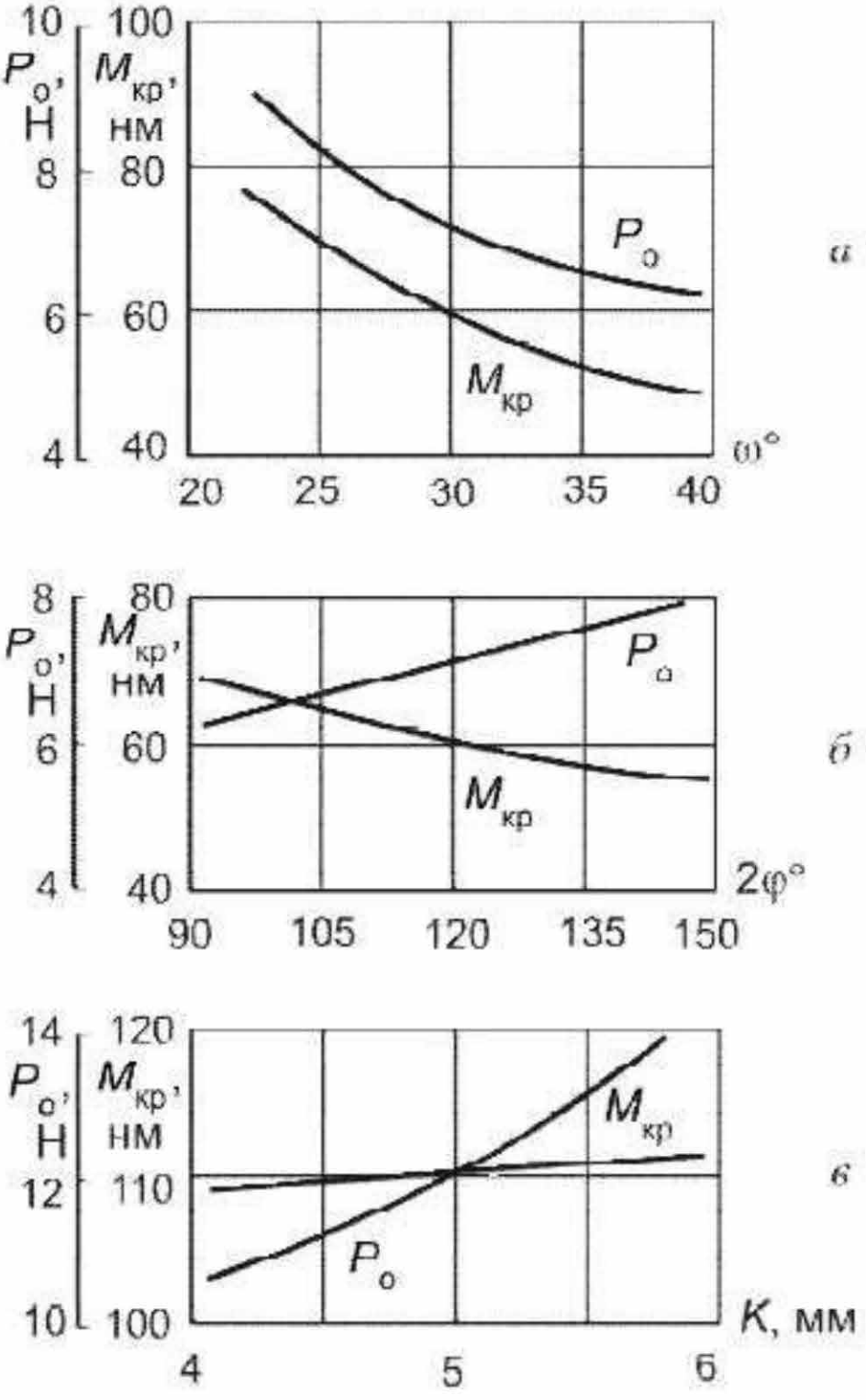


Рис 2.2.1 - Залежність Ро і Мкр під час свердління від кута нахилу гвинтової канавки ω (а), кута при вершині 2φ (б) і довжини поперечної кромки (в)

Опрацьований матеріал. Чим вище межа міцності R_m або твердість НВ оброблюваного матеріалу, тим більше осьова сила і крутний момент при свердлінні.

Ці залежності можуть бути виражені наступними рівняннями:
при обробці стали свердлами зі швидкорізальної сталі:

$$P_o = C_1 R^{0,75};\ M_{кр} = C_2 R^{0,75}$$

при обробці сірих чавунів свердлами, оснащеними твердим сплавом:

$$P_o = C_3 HB^{0,6};\ M_{кр} = C_4 HB^{0,6}$$

Змащувально-охолоджувальніа рідина. Застосування під час свердління змащуючі-охолоджуючих рідин, як правило, рекомендується і викликає в порівнянні з обробкою всуху зменшення осьової сили й крутного моменту на 10-30% при обробці сталей, на 10-18% при обробці чавунів і на 30 - 40% при обробці алюмінієвих сплавів.

Глибина свердління. Зі збільшенням глибини свердління умови різання погіршуються. Відведення стружки і підведення свіжої ЗОР ускладнюється, тепловиділення збільшується. Все це приводе як до зниження стійкості свердла, так і до підвищення осьової сили і крутного моменту.

Знос свердла. Зі збільшенням зносу свердла по задній поверхні сила P_o і момент $M_{кр}$ збільшуються; затуплене свердло в порівнянні з гострим підвищує ці параметри на 10-16%.

Для розрахунку осьової сили, Н, і моменту при свердлінні, Нм, використовують емпіричні формули:

$$P_o = 9,8 C_p D^{zp} S^{yp} K_p;$$

$$M_{рез} = 9,8 C_m D^{zm} S^{ym} K_M;$$

де $C_р$ і $C_м$ - коефіцієнти, що характеризують матеріал і умови його обробки; D- діаметр свердла, мм; S - подача, мм / об; $z_р$; $y_р$; $z_м$; $y_м$ - показники ступенів; $K_р$; $K_м$ - загальні поправочні коефіцієнти на зміну умов обробки.

У табл. 2.2.4 наводяться значення C_p, $C_м$, z_p, y_p, $z_м$, $y_м$ для свердел з нормальною заточуванням ріжучої частини при обробці різних металів з заданими Rm, НВ, з охолодженням (в разі обробки стали) і в суху (в разі обробки сірого чавуну).

Таблиця 2.2.1 - Коефіцієнти і показники ступеня в формулах для розрахунку осьової сили і моменту від сил опору різання під час свердління

Материал заготовки	Материал інструмента	P	См	Ур	Ум	zp	zм
Сталь конструкційна НВ=215 Rm = 750 МПа	Р6М5	68	0,0345	0,7	0,8	1,0	2,0
Чавун сірий НВ 190	ВК8	42	0,012	0,75	0,8	1,2	2,2

За інших умов обробки необхідно вводити поправочні коефіцієнти K_p і $K_м$, якими, як правило, враховується тільки міцність або твердість оброблюваного матеріалу.

Таким чином проведений аналіз робіт в сфері вивчення зносу різальних інструментів при свердлінні підтвердив актуальність цієї теми. Підвищення стійкості інструменту у виробництві може значно поліпшити точність і продуктивність обробки, що в свою чергу призведе до збільшення рентабельності виробництва та якості отриманої продукції. Це важливе завдання привертає увагу вчених по всьому світу, і хоча було розроблено багато методик дослідження зносу різального інструменту, актуальність цієї проблеми залишається високою.

РОЗДІЛ 3.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДІВ

3.1 Математичне моделювання та сила різання при свердлінні

Математичне моделювання та експериментальне дослідження сил різання під час свердління представлено [5]. Диференціальні компоненти сили різання в трьох напрямках радіального, тангенціального та зенітного розраховуються наступним чином.

Розділ включає розгляд різних видів зносу різальних інструментів але в основному спірального свердла та його геометричних параметрів та сил різання.

Зауважується, що існує багато методів діагностики, проте їх широке впровадження в виробництво наразі не спостерігається. Це пов'язано з істотними недоліками існуючих методів, такими як високі витрати на діагностичне обладнання, зниження жорсткості обробки, чутливість до зовнішніх впливів (акустичних шумів, вібрації), а також складність установки первинних перетворювачів.

де Krc, Ktc і $K\Psi c$ константи сили різання в радіальний, тангенціальний і зенітний напрямки.

dA - ділянка стружки, зрізаної рифленням j інструмента, яку можна представити як [1].

$dA = \Delta bhj(t))$

Δb - диференціальна ширина стружки, як $\Delta b \quad dz$.

$\cos k$

Крім того, $hj(t)$-товщина недеформованої стружки, на якій виступає канавка j інструмента за одне обертання, яке є комбінацією «статичного» і «динамічного» товщини стружки як [1].

$hj(t) = [fz + uz(t) - uz(t - T)] \sin(k)$

де f -швидкість подачі на канавку, а T - час проходження канавки як T = 60 .

Ntn

Таким чином, можна представити компоненти диференціальних сил, створених впливом демпфування в трьох напрямках: радіальному, тангенціальному та зенітному, як [5]

де $[Cd]$– матриця демпфування фактора як [5].

де $Crkj$, $Ctkj$, і $C\Psi kj$ описують демпфування різання компоненти в радіальному, тангенціальному та зенітному напрямках.

Як наслідок, заготовка була піддана сумарним диференціальним напруженням зсуву та диференціальним силам демпфування в радіальному, тангенціальному та зенітному напрямках як [5].

Три диференціальні компоненти сили різання x, y, та осі z характеризуються наступним чином[5]:

Загальні сили різання можна розрахувати таким чином[5]:

де Fp є додатковою силою, яка додається до Fz.

Крім того, Fp для заготовки зі сплаву Ti6-Al4V отримано експериментальними роботами [5]:

$Fp = (0.0032V3 - 1.825V2 + 374Vf - 9786)S$ (16)

$f \quad f$

де $Vf = fn$ - швидкість подачі (мм/хв), а S – перетин екструдованої стружки.

3.2 Моделі зносу інструменту

Для моделювання швидкості зношування різального інструменту з урахуванням температури різання модель Такеяма-Мурата представлений як[6]:

$dW = Aexp(-Ea)$ + абразивний термін

$dt \quad RT$

де А- попередня експоненціальна постійна, Е -енергія активації, R - універсальна газова стала, а Т - температура різання в градусах Кельвіна.

Абразивний термін розраховується з урахуванням швидкості подачі та швидкості ковзання під час процесу формування стружки.

Згідно з моделлю, контактна нормальна напруга та швидкість ковзання між ріжучим інструментом і стружкою пов'язані зі швидкістю зношування інструменту як[6]:

де А – попередня експоненціальна стала, W - одиниця об'єму, s-відстань ковзання, R - постійна і Е-енергія активації.

Отже, в даному розділі було розглянуто методику розробки математичної моделі, також були використаний метод оптимізації і модель для визначення впливу деформації.

В дослідженні розроблено застосування систем віртуальної обробки та методологія мінімізації зносу представлено у розділі.

3.3 Нелінійний статичний розрахунок допустимих силових характеристик

Метод нелінійного розрахунку полягає в покроковому прикладанню навантажень. При розрахунку навантаження не враховуються одночасно, а додаються поступово, а потім виконуються розрахунки станів рівноваги.

Нелінійне стан конструкції може бути обумовлено одним елементом простої конструкції (конструктивна або матеріальна нелінійність) або нелінійним відношенням сил-деформацій по всій конструкції (геометрична нелінійність).

До конструктивної нелінійності можуть привести такі нелінійні елементи:

- стиснуті та розтягнуті елементи;
- вантові елементи;
- нелінійні зв'язки (тобто односторонні зв'язку або опори, зняття зв'язків, сумісні вузли з призначеними жорсткими параметрами);
- пластичність матеріалу;
- нелінійні шарніри.

Параметри геометричної нелінійності

Параметри геометричної нелінійності дозволяють враховувати справжні ефекти вищого порядку і часто покращують збіжність розрахункового процесу для конструкції, що включає нелінійні елементи.

Розрахунок P-дельта

Цей тип розрахунку враховує другорядні ефекти, такі як змінна жорсткість елемента, що знаходиться під впливом напруженого стану елемента. Також він враховує створення моментів, обумовлене дією вертикальних сил у вузлах, зміщених горизонтально.

Розрахунок великих переміщень

У розрахунку цього типу враховуються ефекти третього порядку, наприклад, додаткова поперечна жорсткість і напруги, викликані деформацією або обертанням. Цей ефект враховує збільшення додаткових сил в деформованої конструкції (наприклад, в балці з закріпленими опорами на двох кінцях, навантаженої вертикальним навантаженням, поздовжні сили зростають, а згини зменшуються).

Ці параметри розрахунку дозволяють поліпшити збіжність процесу розрахунку, оскільки вони враховують справжні ефекти вищого порядку. Це

особливо зручно при роботі з конструкціями, що містять нелінійні елементи. Для вирішення системи нелінійних рівнянь можна використовувати два методи: інкрементальний метод і метод довжини дуги.

Інкрементальний метод

Якщо конструкція включає нелінійні елементи (наприклад, ванти, односторонні опори, матеріальну пластичність), автоматично виконуються розрахунки із застосуванням інкрементального методу.

В інкрементальному методі правий вектор (вектор навантаження) ділиться на "n" рівних частин, які називаються "приріст". Послідовні збільшення навантаження прикладаються до конструкції після досягнення стану рівноваги для попереднього збільшення. Норма для неврівноважених сил вказується для кожного кроку, що дозволяє регулювати відносини сил і деформацій.

На рисунку 3.1 показаний приклад нелінійного процесу з використанням процесу збільшення. Тут показані величини, використовувані для нелінійних розрахунків.

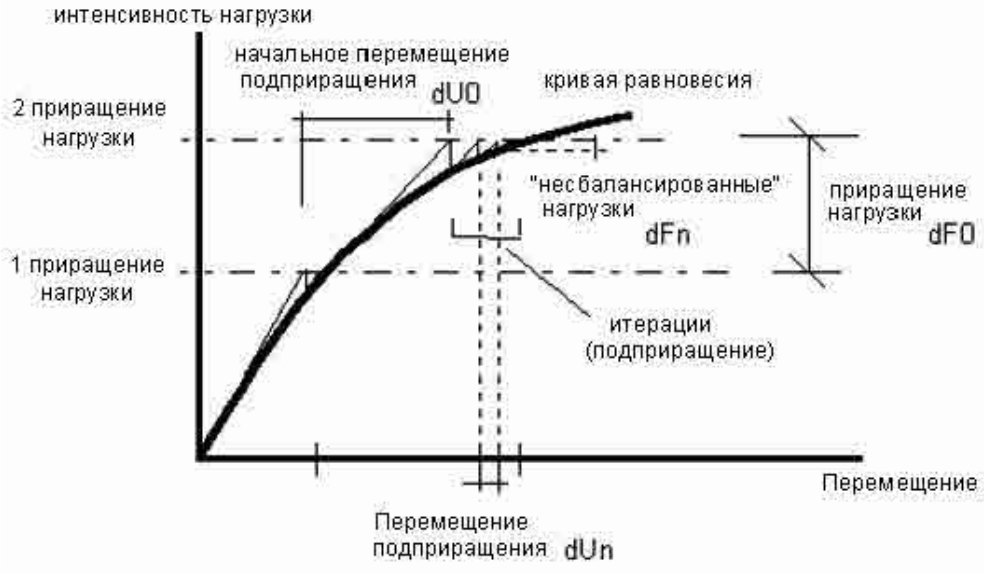


Рис 3.1 –Приклад нелінійного процесу.

Збільшення навантаження використовуються при її розподілі на більш дрібні сегменти. У складних конструкцій, де значно вплив нелінійних факторів, розрахунки можуть не зійтися для навантажень, прикладених одноразово. Кількість збільшень навантаження впливає на кількість ітерацій розрахунку. Чим більше кількість збільшень, тим вище ймовірність того, що розрахунки досягнуто точки збіжності.

Метод довжини дуги

Метод довжини дуги (управління зміщенням) слід застосовувати, коли алгоритми розв'язання рівнянь методу збільшень (управління силою) не сходяться.

Метод довжини дуги застосовується при нелінійному розрахунку на перекидання. Він особливо рекомендується, коли нелінійні атрибути конструкції визначаються в її моделі [31].

Мета розрахунку переконатися що інструмент витримує потрібні навантаження для нашої роботи. Аналіз з деформацією показує ділянки з високою напругою. Якщо такі ділянки присутні то ми їх використовуємо для більш ретельного вивчення та врахування лінійних напруг.

При визначенні напруги використовуємо критерій максимального викривлення (критерій фон Мізеса).

Критерій максимального напруження по Мізесу ґрунтується на теорії Мізез-Хенкі (Mises-Hencky), також відомої як теорія енергії формозміни.

Теорія стверджує, що пластичний матеріал починає пошкоджуватися в місцях, де напруга по Мізесу стає рівною граничній напрузі. У більшості випадків, межа текучості використовується в якості граничного напруження. Однак, програма дозволяє використовувати граничне розтягування або ставити своє власне максимальне напруження [32].

3.4 Виконання симуляції проведених розрахунків

При розрахунку використовуємо графік обсягу з шкалою кольору, на якій відображаються діапазони значень змінної. Результати які відображаються червоним кольором, містять дані про високу напругу або значну деформацію або свідчать про низький запасі міцності.

У кожному наборі результатів представлена інформація про вплив навантаження на деталь.

Вибираємо в меню − симуляцію подій (event simulation). Нам потрібно визначити, як модель реагує на різний тип зовнішнього впливу, а також навантаження (рисунок 3.2).

Потрібно зрозуміти як реагує наш інструмент на ті чи інші силові характеристики. При налаштуванні симуляції розбиваємо нашу модель на сітку. Задаємо налаштування сітки кінцевих елементів. Ставимо розмір 2,5 мм. Потім робимо вибір матеріалу (рисунок 3.3).

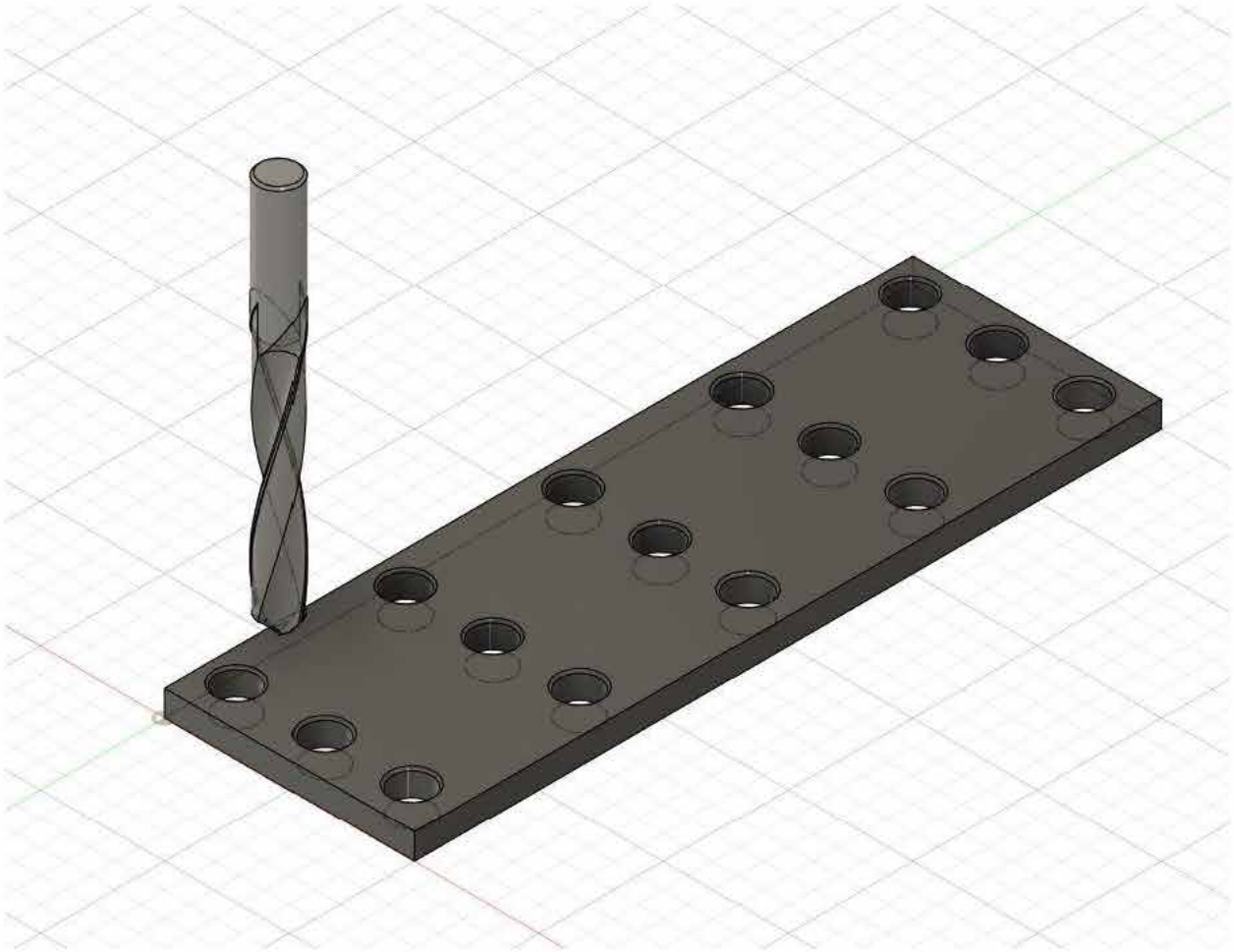


Рис 3.2 Симуляція подій

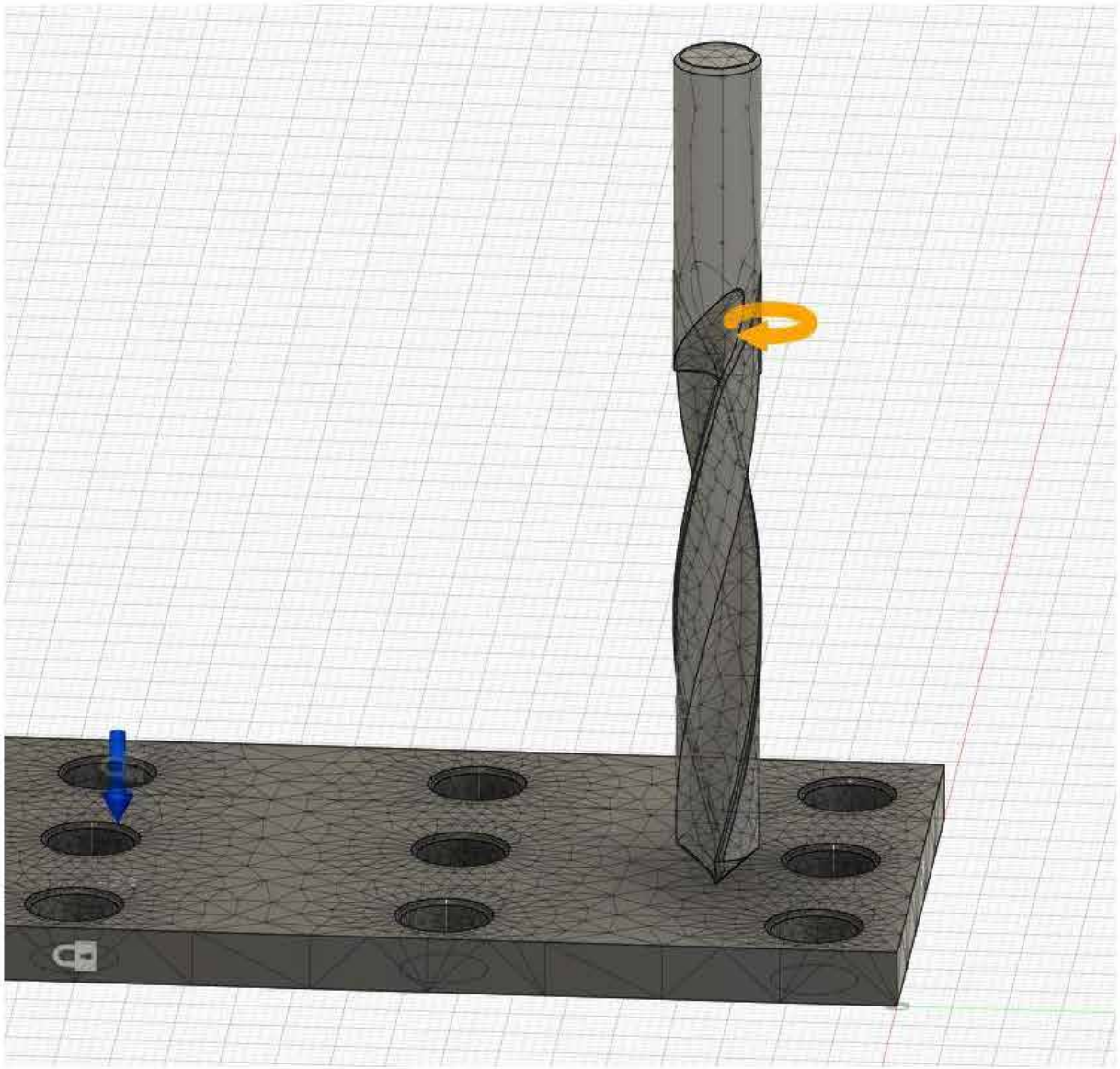


Рисунок 6.3 – Налаштування сітки кінцевих елементів

Також показуємо як буде рухатись наш інструмент та закріплюємо його (рисунок 6.4).

Задаємо граничні умови.

Визначаємо площині на яких будемо фіксувати нашу деталь. Задаємо контактні взаємодії. До того ж можна поставити облік контакту деталі з собою, фіксуємо.

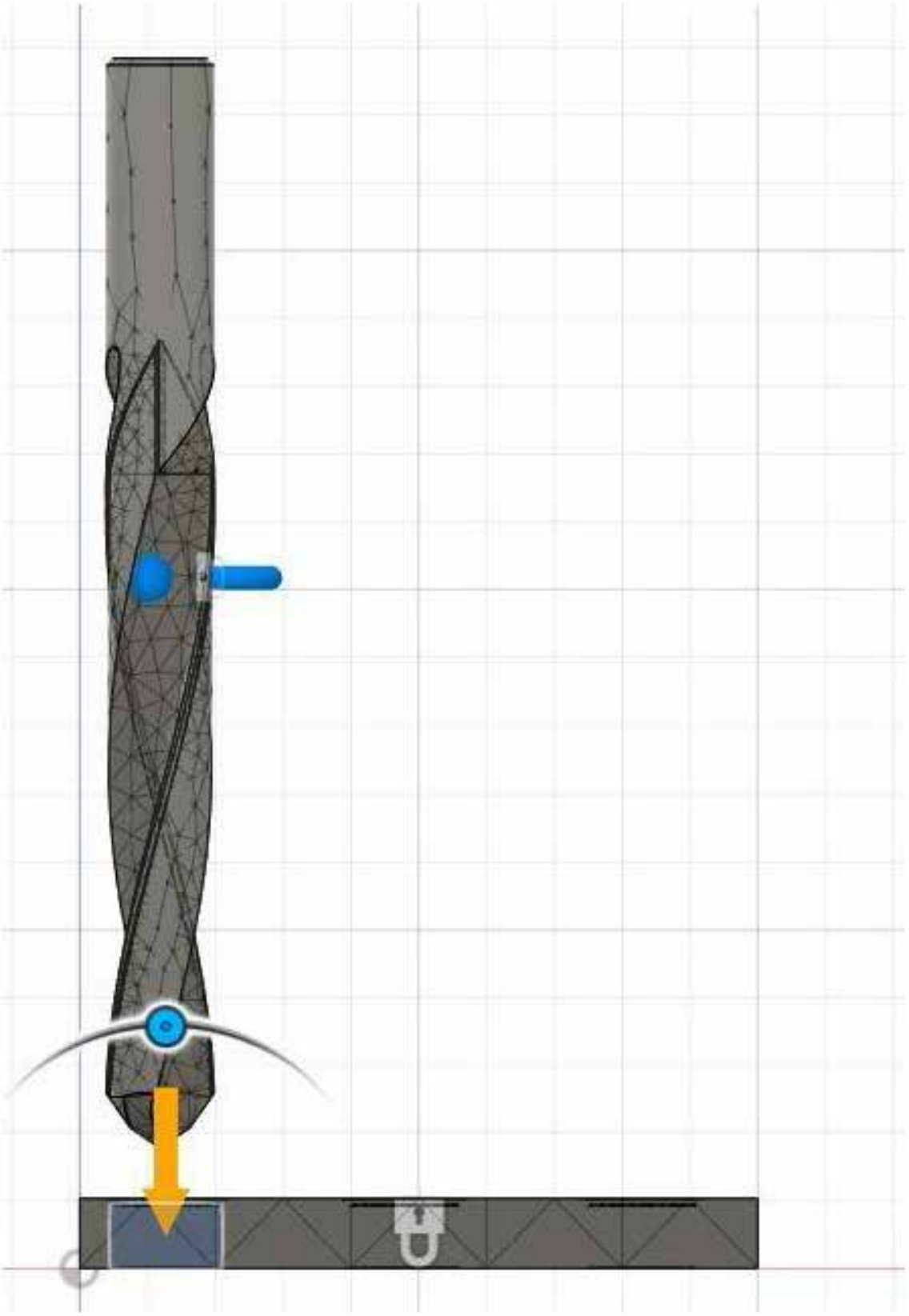


Рисунок 6.4 – Напрямок різальної частини Ділянки PI, що отримують навантаження (рисунок 6.5)

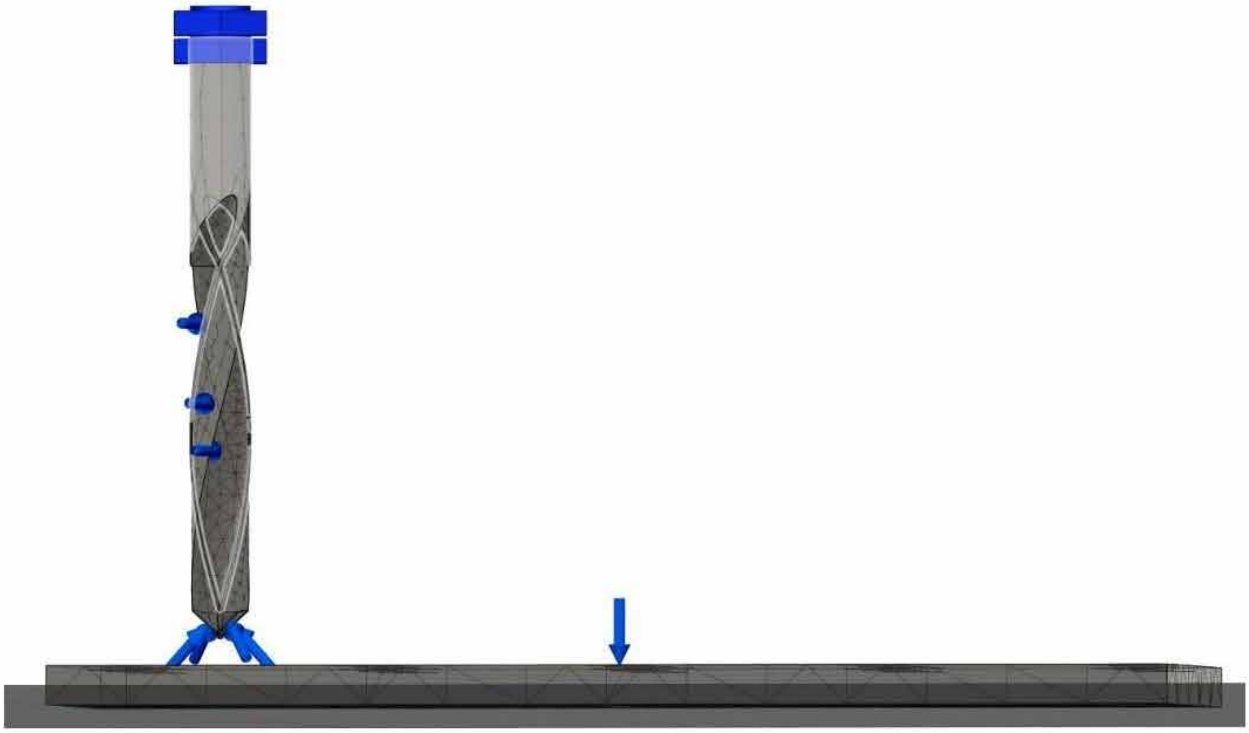


Рисунок 6.5 – Вибір ділянок для навантаження

Перевірка на міцність і стійкість. Створюємо граничні умови. Та робимо навантаження (рисунок 6.6).

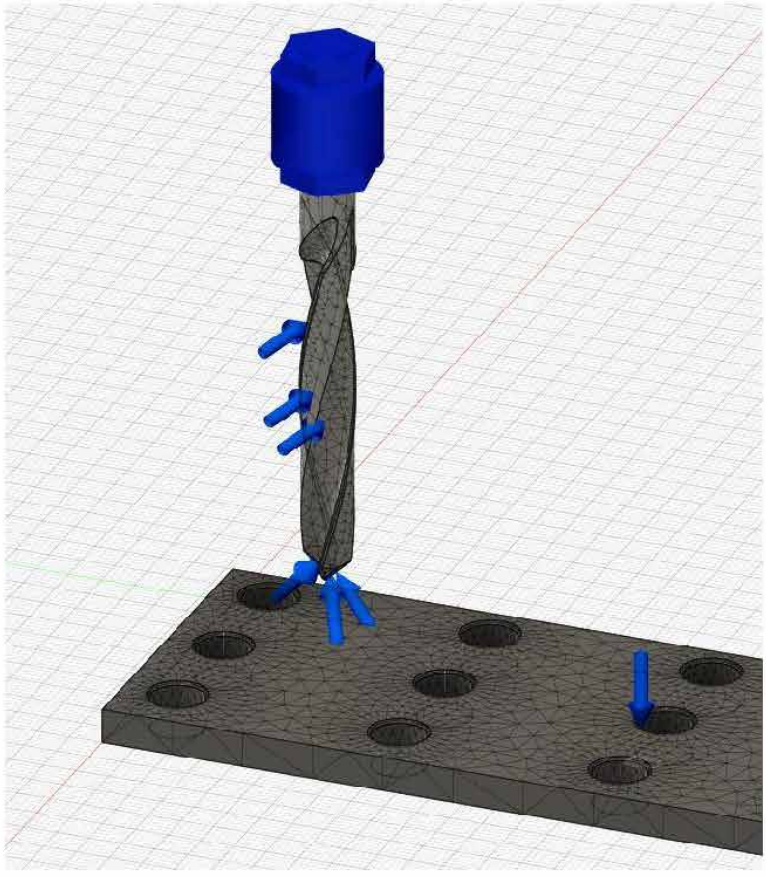


Рисунок 6.6 – Розподіл навантаження на PI

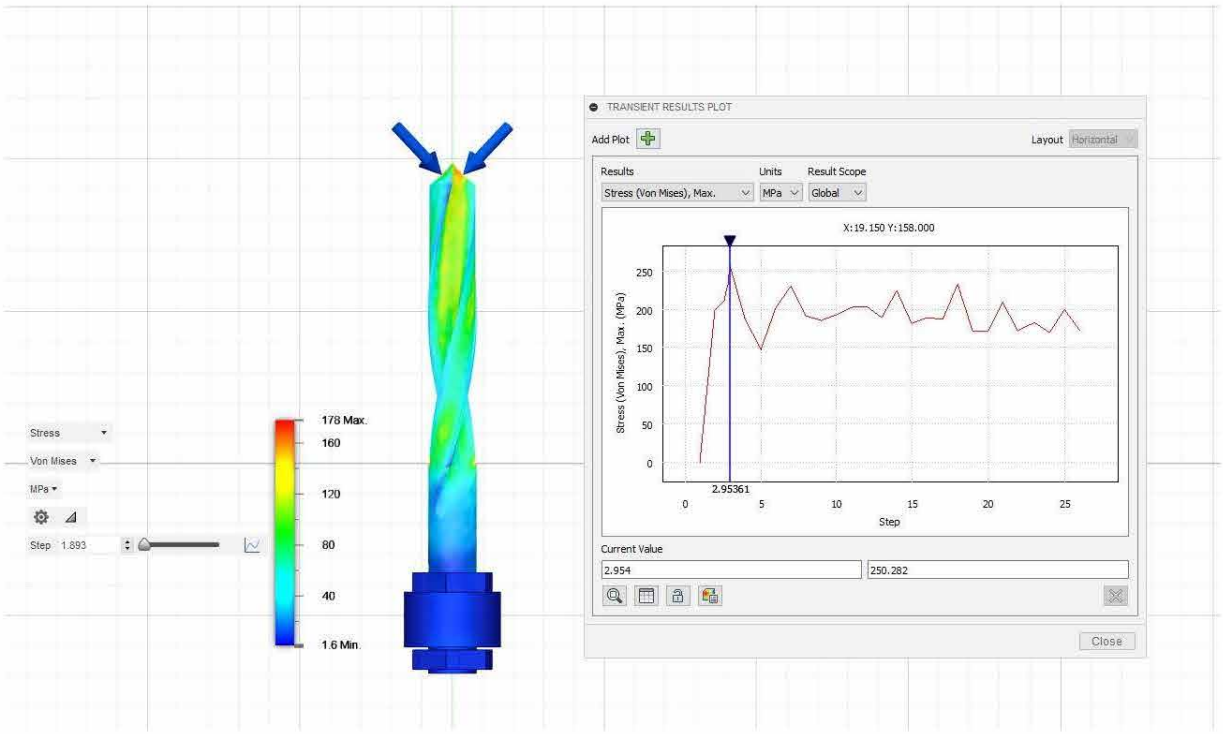


Рисунок 6.7 – Визначення напруги

Після чого проводимо випробування на зсув (рисунок 6.8).

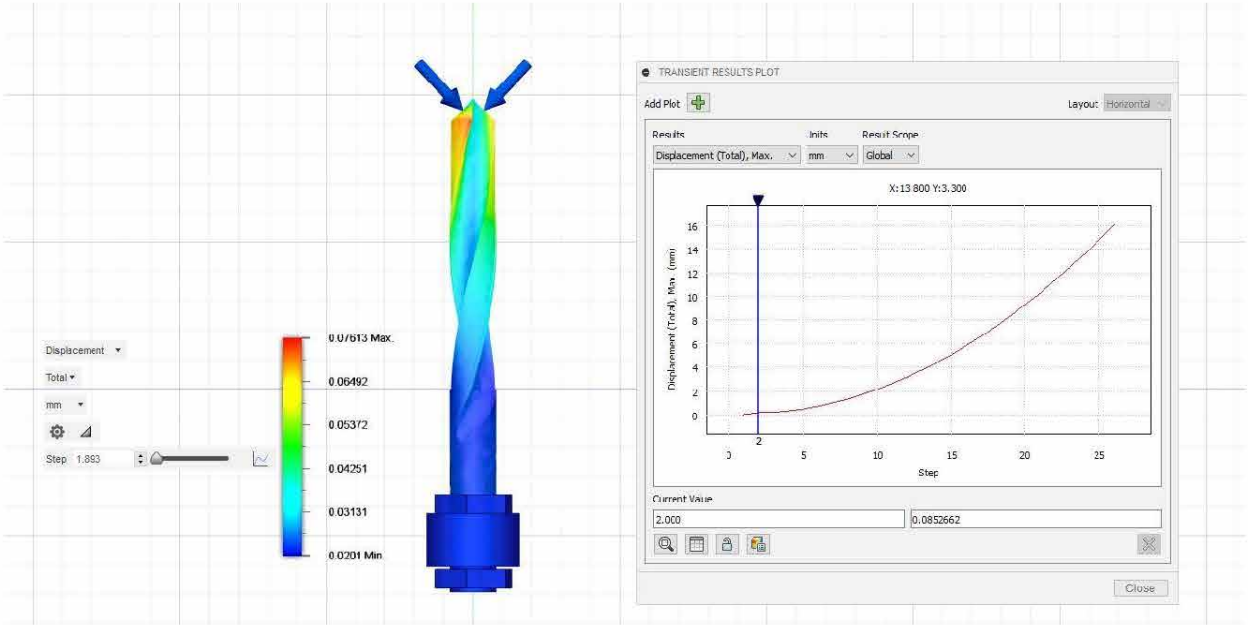


Рисунок 6.8 – Випробування на зсув Визначення сил реакції свердла показано на рисунку 6.9.

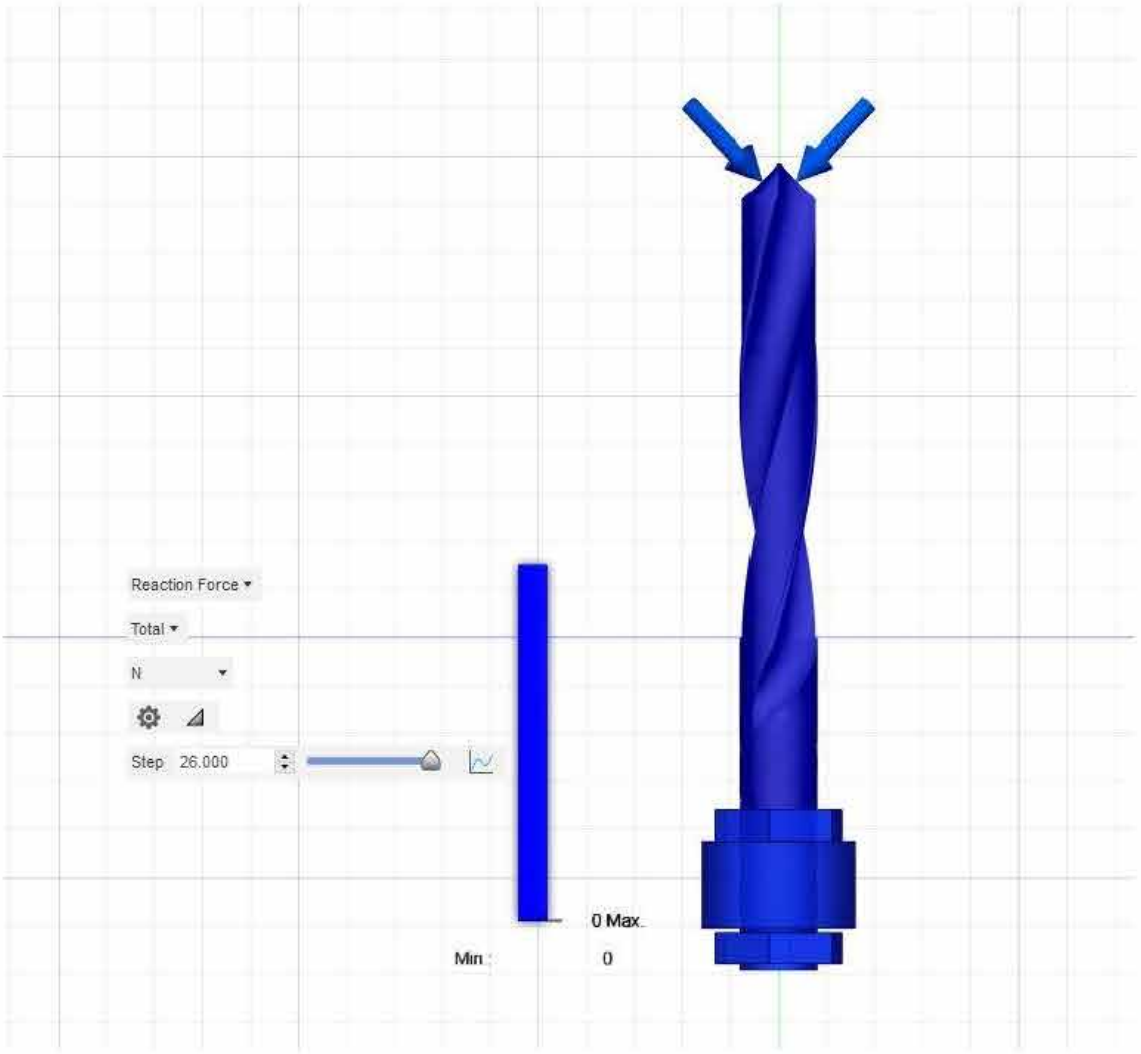


Рисунок 6.9 – Сила реакції PI На рисунку 6.10 зображено процес натягу.

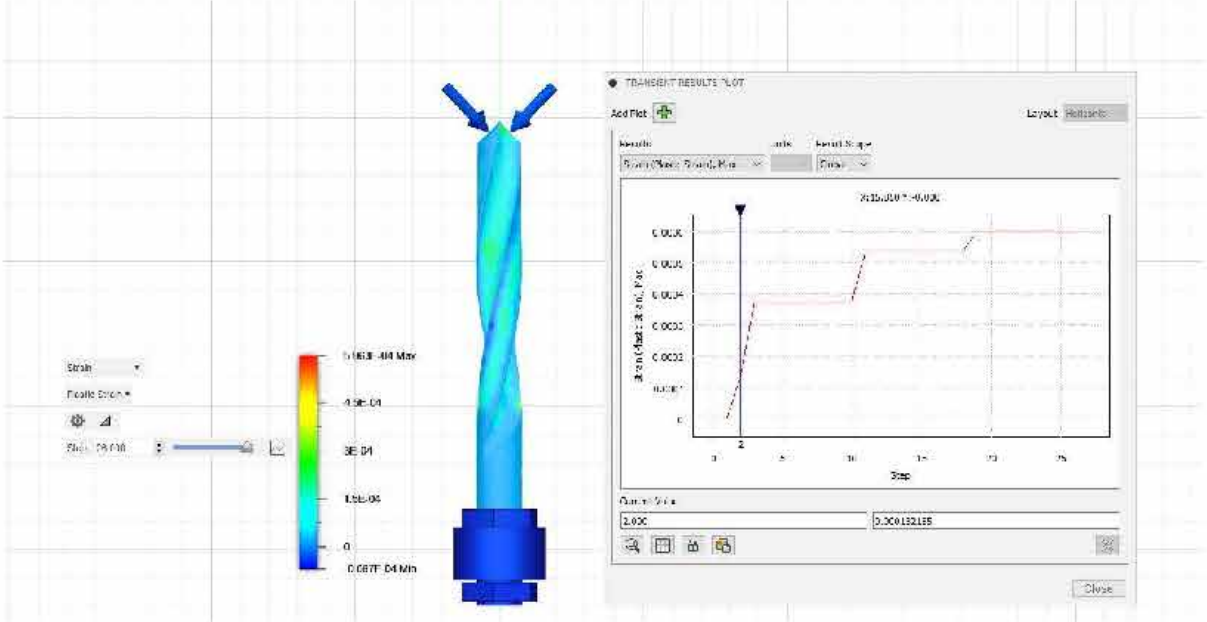


Рисунок 6.10 – Натяг

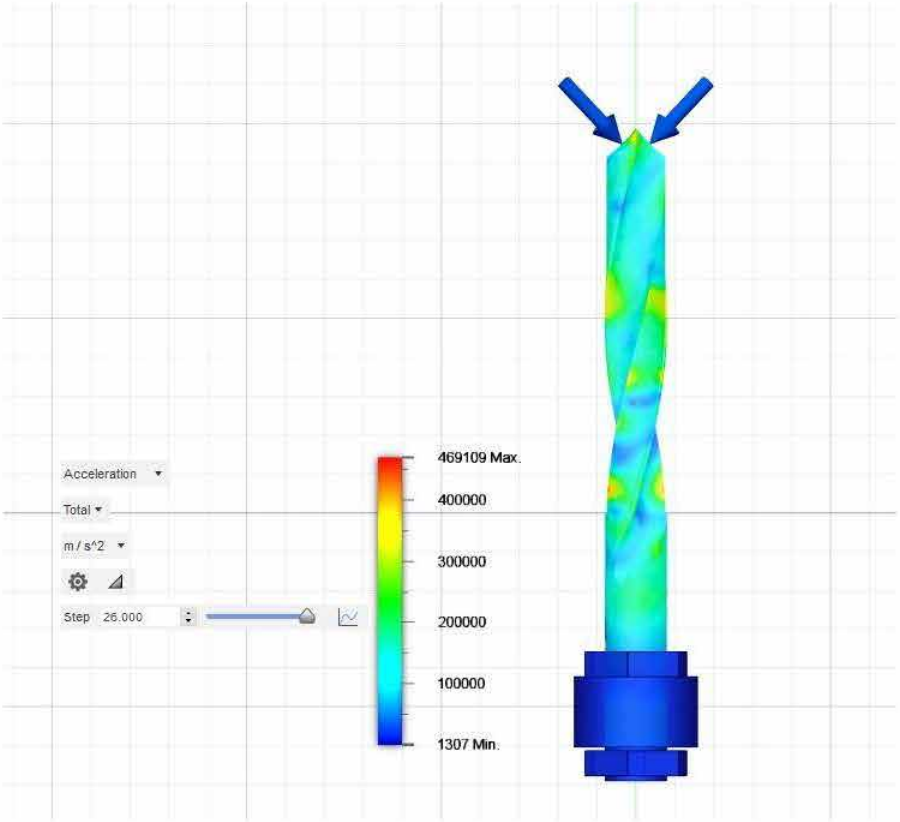


Рисунок 6.11 – Прискорення інструменту

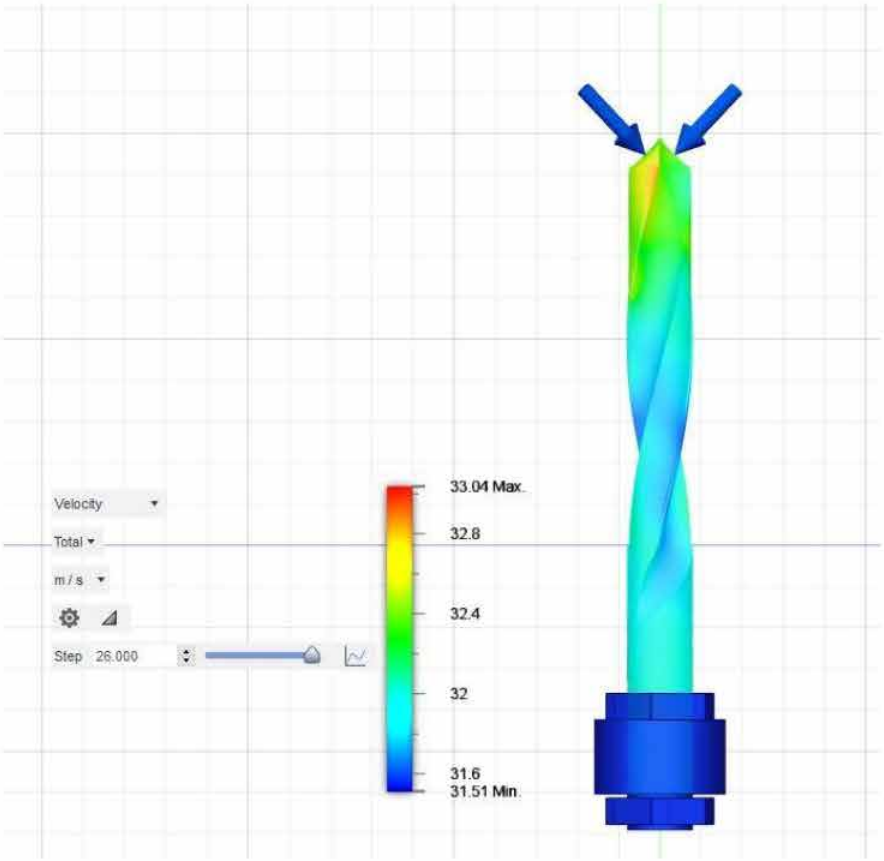


Рисунок 6.12 – Швидкість свердла

Процес розподілу вектору напруги зображено на рисунку 6.13.

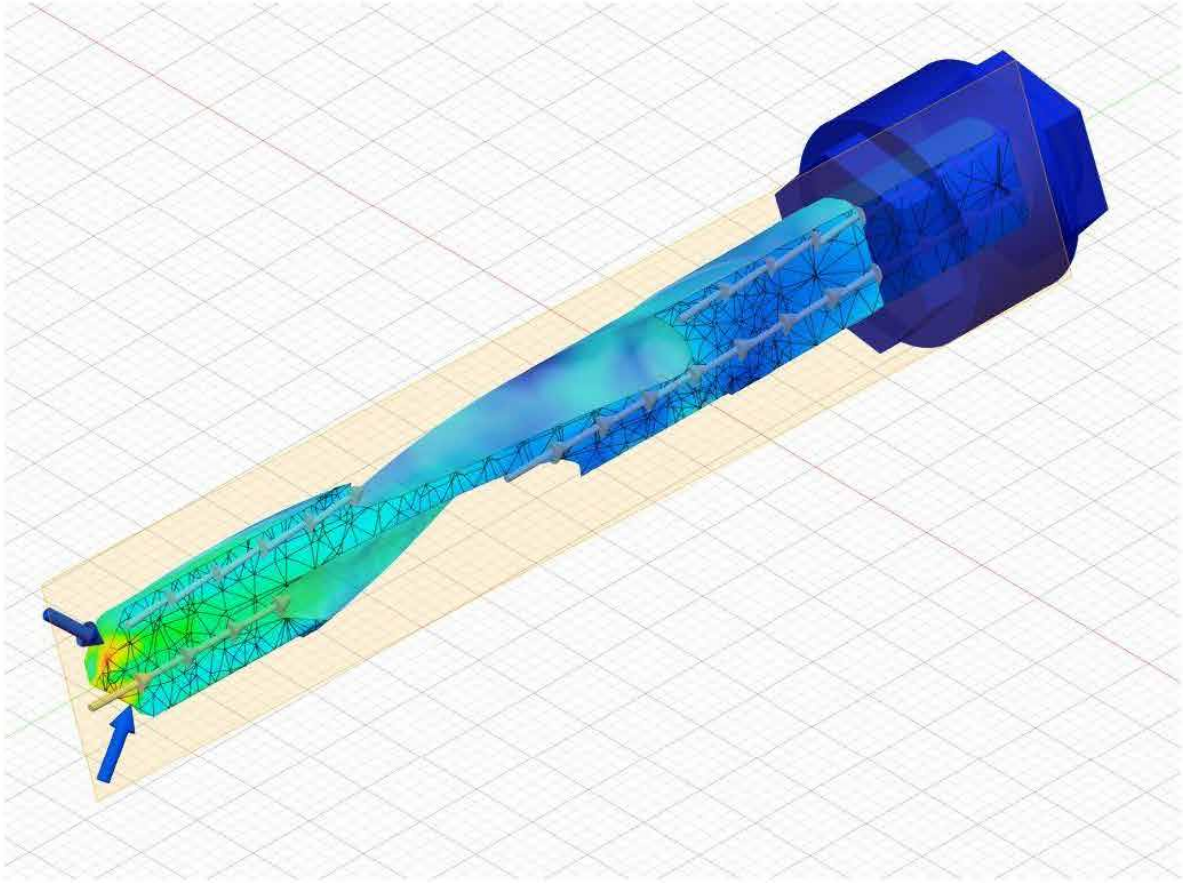


Рисунок 6.13 – Розподіл векторів напруги

Етапи критичних та оптимальних силових характеристик що діють при виконанні отворів в деталях з ВПКМ представлено на рисунку 6.14 та 6.15

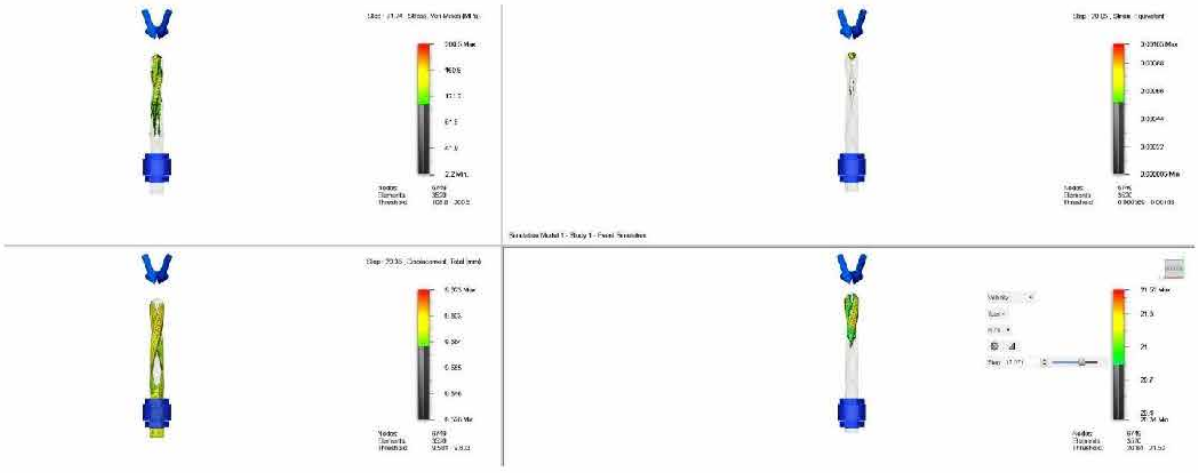


Рисунок 6.14 – Критичні силові характеристики

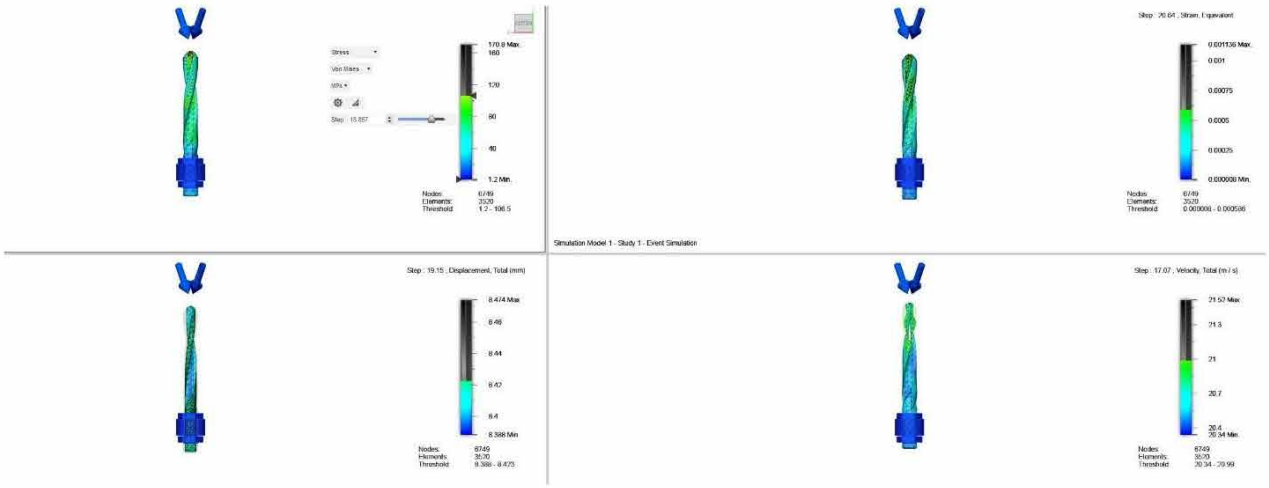


Рисунок 6.15 – Оптимальні силові характеристики

Судячи з запасу міцності інструмент підходить для подальшого користування. І йому не загрожує втратити міцність при критичної напруги. Щоб перевірити стійкість робимо перерахунок деталі.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СПІРАЛЬНИХ СВЕРДЕЛ МАЛИХ ДІАМЕТРІВ

4.1 Загальні вихідні дані

Для вирішення питання про економічну ефективність використання інноваційного спірального свердла з алмазним покриттям в якості бази для порівняння приймаємо спосіб свердління наскрізних отворів в текстолітових платах на координатно-розточувальному верстаті стандартним спіральним свердлом Ø3 мм.

Не зважаючи на необхідності збільшення часу обробки отвору новим свердлом порівняно з базовим (за рахунок попереднього переходу надсвердлення та зменшення подачі для запобігання утворенню вирв), даний інноваційний спосіб свердлення має ряд суттєвих техніко-економічних переваг, а саме:

– алмазне покриття забезпечує високу твердість, зносостійкість і, відповідно, триваліший строк служби інструменту;

– отримання якіснішого отвору;

– запобігання браку через злам текстоліту під час свердлення

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою:

$$k_i = \frac{N_д \cdot T_{нор} \cdot \gamma \cdot к_{вт}}{t_е \cdot (1+p)}, \qquad (4.1)$$

$N_д$ – кількості отворів, яку необхідно свердлити на рік, отв./рік;

$T_{нор}$ – штучний час свердлення одного отвору, хв.;

γ – питоме значення машинного часу в загальному його варіанті;

$к_{вт}$ – коефіцієнт випадкової втрати інструменту;

$t_е$ – економічна стійкість інструменту, хв.;

p – кількість переточок інструменту до повного зносу.

Потреба у базовому інструменті:

$$к_б = \frac{500000 \cdot 0,083 \cdot 0,6 \cdot 1,25}{45 \cdot (60+1)} = 12 \text{ шт.}$$

Потреба у свердлах в проєктному варіанті:

$$к_б = \frac{500000 \cdot 0,117 \cdot 0,6 \cdot 1,1}{70 \cdot (60+1)} = 9 \text{ шт.}$$

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_р = \frac{N_д \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot к_в}, \quad (4.2)$$

де $F_{дрм}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.;

$к_в$ – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Розрахункова кількість обладнання в проектному варіанті:

$$Q_{р.пр} = \frac{500000 \cdot 0,117}{3680 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,26 \text{ (приймаємо один верстат)}$$

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Кількість свердлень отворів на рік	отв./рік	500000	500000
2.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1
3.	Потреба в інструменті1	шт./рік	12	9
4.	Штучний час обробки деталі	хв.	0,083	0,117
5.	Площа, яку займає обладнання	$м^2$	1,15	1,15
6.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	1,7	1,7

7.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частин верстата	УРО	21/13	21/13
8.	Розряд роботи верстатника	розряд	4	4
9.	Оптова ціна: - обладнання - інструменту	 грн. грн.	 76800 15,0	 76800 23,0

4.2 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки отвору)

Експлуатаційні витрати із застосування свердел у базовому та проектному варіантах визначаємо за формулою:

$$B_{\text{е}} = \sum_{i=1}^{m} B_{\text{і}}\,, \qquad (4.3)$$

де $B_з$ – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування основних робітників, грн.;

$B_е$ – витрати на силову електроенергію, грн.;

$B_{мд}$ – витрати на допоміжні матеріали. грн.;

$B_р$ – витрати на ремонт обладнання, грн.;

$B_п$ – витрати на утримання приміщення, грн.;

$B_{ір}$ – витрати на ріжучий інструмент, грн.;

$B_а$ – витрати на амортизацію обладнання, грн.;

$B_{бр}$ – втрати від браку, грн. (в базовому варіанті);

Витрати на заробітну плату виробничих робітників основну, додаткову та відрахування на соціальні заходи:

$$B_{\text{з}} = C_{\text{г}} \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot \left(1 + K_{\text{д}}\right) \cdot \left(1 + K_{\text{с}}\right), \qquad (4.4)$$

де $С_г$ – годинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, грн/год;

$Т_{нор}$ – час обробки деталі, хв.;

$К_д$, $К_с$ – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальне страхування відповідно.

В базовому варіанті:

$$В_{зп}^{б} = 77,98 \cdot \frac{0,083}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 0,1448 \text{ грн};$$

В проєктному варіанті:

$$В_{зп}^{пр} = 77,98 \cdot \frac{0,117}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 0,2041 \text{ грн}.$$

Витрати на електроенергію силову:

$$В_е = \frac{N_в \cdot К_о \cdot К_N \cdot К_д}{\eta_м \cdot \eta_с} \cdot \frac{Т_{нор}}{60} \cdot Ц_{ел}, \quad (4.5)$$

де $N_в$ – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

$К_о$ – коефіцієнт одночасної роботи моторів ($К_о$=0,65...0,8);

$К_N$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для свердлильних верстатів $К_N$=0,5...0,6);

$К_д$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом($К_д$=0,3...0,5);

$\eta_с$ – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів($\eta_с$=0,86...0,9);

$\eta_м$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства($\eta_м$=0,92...0,96);

$Ц_{ел}$ – ціна 1 кВт-год силової електроенергії, грн.

$$В_{ел}^{б} = \frac{1,7 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{0,083}{60} \cdot 7,5 = 0,0506 \text{ грн};$$

$$В_{ел}^{б} = \frac{1,7 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{0,117}{60} \cdot 7,5 = 0,0713 \text{ грн}.$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{нор}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (4.6)$$

де $M_{\text{гв}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів верстатів, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $K_{\text{п}} = 1{,}0$).

$$B_{\text{дм}}^{б} = \frac{78{,}5 \cdot 21{,}0 \cdot 0{,}083}{60 \cdot 100} \cdot 1{,}0 = 0{,}0228 \text{ грн};$$

$$B_{\text{дм}}^{пр} = \frac{78{,}5 \cdot 21{,}0 \cdot 0{,}117}{60 \cdot 100} \cdot 1{,}0 = 0{,}0321 \text{ грн}.$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot Г_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot Г_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.7)$$

де $Г_{\text{вм}}$, $Г_{\text{ве}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин вузла, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата (при двозмінному режимі роботи для серійного виробництва – 3980 год.).

$$B_{\text{р}}^{б} = \frac{21 \cdot 880 + 13 \cdot 720}{3680} \cdot \frac{0{,}083}{60} = 0{,}0105 \text{ грн};$$

$$B_{\text{р}}^{пр} = \frac{21 \cdot 880 + 13 \cdot 720}{3680} \cdot \frac{0{,}117}{60} = 0{,}0148 \text{ грн};$$

Витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту:

$$B_{ip} = \frac{(S_u + p \cdot S_{пер}) \cdot \gamma \cdot T_{нор}}{t_e (p+1)} K_{вт},$$

(4.8)

де S_u – первісна вартість ріжучого інструменту, грн.;

$S_{пер}$ – вартість однієї переточувань, грн.;

$$B_{ip}^{б} = \frac{(15,0 + 60 \cdot 3,32) \cdot 0,6 \cdot 0,083}{45 \cdot (1+60)} \cdot 1,25 = 0,0049 \text{ грн};$$

$$B_{ip}^{б} = \frac{(23,0 + 60 \cdot 3,32) \cdot 0,6 \cdot 0,117}{70 \cdot (1+60)} \cdot 1,25 = 0,0038 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60},$$

(4.9)

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м^2;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [1];

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м^2 виробничого приміщення, грн./м^2.

$$B_{\text{уп}}^{б} = \frac{1,15 \cdot 4,0 \cdot 0,083}{3680 \cdot 60} \cdot 780 = 0,0014 \text{ грн};$$

$$B_{\text{уп}}^{пр} = \frac{1,15 \cdot 4,0 \cdot 0,117}{3680 \cdot 60} \cdot 780 = 0,0019 \text{ грн};$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_{\text{а}} = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60},$$

(4.10)

де $H_{\text{а}}$ – норма амортизації, %;

$\Phi_{\text{бал}}$ – балансова вартість верстата, грн.

Балансову вартість верстатів знайдемо за формулою:

$$Ф_{бал} = Ц_{опт} \cdot \left(1 + К_{тр} + К_{м} + К_{Ф}\right), \quad (4.11)$$

де $Ц_{опт}$ – оптова ціна верстата, грн.;

$К_{тр}$, $К_{м}$, $К_{ф}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

$$Ф_{бал} = 76800 \cdot \left(1 + 0,08 + 0,06 + 0,05\right) = 91392 \text{ грн.},$$

$$B_{а}^{б} = \frac{91392 \cdot 20 \cdot 0,083}{3680 \cdot 60 \cdot 100} = 0,0069 \text{ грн};$$

$$B_{а}^{пр} = \frac{9132 \cdot 20 \cdot 0,117}{3680 \cdot 60 \cdot 100} = 0,0097 \text{ грн};$$

Втрати від браку в базовому варіанті в середньому складають 50% від собівартості обробки одного отвору

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне познач.	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні заходи	$B_з$	0,1448	0,2041
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	0,0506	0,0713
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	0,0228	0,0321
4.	Ремонт обладнання	$B_р$	0,0105	0,0148
5.	Універсальний ріжучий інструмент	$B_{ір}$	0,0049	0,0038
6.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	0,0014	0,0019
7.	Амортизація обладнання	$B_а$	0,0069	0,0097
8.	Собівартість свердлення отвору (Σ ст. 1-7)	$C_{св}$	0,2419	0,3377
9.	Втрати від браку (50% від $C_{св}$)	$B_{бр}$	0,1089	–

Загальна сума	B_e	0,3508	0,3377

4.3 Розрахунок показників економічної ефективності

4.3.1 Річний економічний ефект від експлуатації свердла розрахуємо за формулою:

$$E_{р.сп} = \left(B_e^{б} - B_e^{пр}\right) \cdot N_д - E_н \cdot K_{сп},$$

де $K_{сп}$ – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$К_{сп} = Ц_i^{пр} \cdot К_i^{пр} - Ц_i^{б} \cdot К_i^{б},$$

де $Ц_i^{пр}$, $Ц_i^{б}$ – вартість інструменту відповідно в проектному та базовому варіантах;

$K_i^{пр}$, $K_i^{б}$ – потреба в інструменті відповідно в проектному та базовому варіантах.

$$К_{сп} = 30 \cdot 9 - 15 \cdot 12 = 90 \text{ грн};$$

$$Е_{р.сп} = \left(0,3629 - 0,3377\right) \cdot 500000 - 0,16 \cdot 90 = 12600 \text{ грн}.$$

4.3.2 Строк окупності додаткових капітальних вкладень:

$$Т_{ок} = \frac{К_{сп}}{\left(В_e^{б} - В_e^{пр}\right) \cdot N_д} = \frac{90,0}{\left(0,3629 - 0,3377\right) \cdot 500000} = 0,01 \text{ року} = 2 \text{ дні}$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1.	Кількість свердлень отворів на рік	отв./рік	500000	500000	–
2.	Потреба в свердлах у споживача	шт/рік	12	9	-25,0
3.	Штучний час свердлення отвору	хв.	0,083	0,117	+41,0
4.	Оптова ціна свердла	грн	15,0	23,0	+53,3

5.	Собівартість обробки одного отвору з урахуванням втрат від браку	грн	0,3629	0,3377	-6,9
6.	Річний економічний ефект	грн.	–	12600	–
7.	Строк окупності додаткових капітальних витрат у споживача	дн.	–	2,0	–

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Свердло - це різальний інструмент, призначений для виконання отворів у суцільних деталях, а також для збільшення отворів, які раніше були зроблені шляхом кування, штампування, лиття або свердління. Вони широко використовуються в машинобудуванні, займаючи за цією ознакою друге місце після різців.

Кінематика свердління складається з двох рухів: основним є обертання інструменту або заготовки та лінійний рух подачі вздовж осі інструменту. Свердла в основному розрізняють за конструкцією, відповідно до якої виділяють наступні основні типи:

1) лопаткові свердла;

2) спіральні свердла (з гвинтовими канавками);

3) спеціального типу (для свердління глибоких отворів, трепанаторів, комбінованих свердел тощо).

Різальну частину зазвичай виготовляють із швидкорізальної сталі. В останні роки набули поширення твердосплавні свердла різних конструкцій.

Спіральні свердла мають найбільше застосування серед інших відомих видів свердел завдяки таким перевагам:

1) хороший відвід стружки з отвору за рахунок гвинтових канавок;

2) позитивні передні кути по більшій довжині кромок;

3) великий запас для переточування, який робиться на боках і може здійснюватися вручну або на спеціальних заточувальних верстатах, у тому числі автоматичних.

Теоретичні дослідження впливу геометричних параметрів, режимів різання та величини зношування на глибину розшарування та шорсткість обробленої поверхні при свердлінні показав, що:

кут при вершині свердла, величина зношування різальної кромки та подача найбільш сильно впливають на силові характеристики та глибину розшарування, викликаючи їх значне збільшення;

передній та задній кути свердла викликають помірне зменшення осьової сили та значне зменшення глибини розшарування;

На підставі проведених досліджень прийнято геометричні параметри та режими різання, які дозволяють значно зменшити появу розшарування при свердлінні вуглепластика, при цьому, визначено дві величини подачі, які дозволяють, в залежності від задач, або отримати високу продуктивність оброблення або низьку шорсткість обробленої поверхні, при вісіх інших рівних умовах.

В процесі виконання кваліфікаційної роботи було зроблено наступне:

- розглянуто умови збільшення продуктивності і визначені ефективні умови реалізації процесу свердління,
- наведені сучасні конструкції ріжучого інструменту для обробки отворів,
- розглянуті різні методики завдання режимів різання і розрахунку сил різання під час свердління,
- приділено увагу аналізу факторів, що впливають на знос свердел.
- наведено діаграми залежності стійкості свердла від умов різання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дібнер Л.Г., Шкурін Ю.П. Заточення спіральних свердл. - М.: Машинобудування, 1967. - 156 с.
2. Кожевніков Д.В., Кулешова І.В., Левін В.І. та ін Сучасні конструкції збірного інструменту з багатогранними пластинами, що не переточуються: Огляд. - М.: НДІмаш, 1979. - 56 с.
3. Механіка обробки металів різанням. В.П. Астахов, 1998, 320 с.
4. Гінзбург Є.Г., Халебський Н.Т. Виробництво зубчастих коліс. - Л.: Машинобудування, 1978. - 136 с.
5. Glaa N, Mehdi K and Zitoune R, Numerical modeling and experimental analy sis of thrust cutting force and torque in drilling process of titanium alloy Ti6AI4V. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2018; 96:28 15-2824.
6. Takeyama H and Murata R. Basic investigation of tool wear. 1963.
7. JiC, LiY, QinX, et al. 3D FEM simulation of helical milling hole process for titanium alloy ti-6Al-4V. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2015; 81:1733-1742.
8. He A, Xie G, Zhang H, et al. A comparative study on Johnson-Cook, modified Johnson-Cook and Arrhenius-type constitutive models to predict the high temperatureflow stress in 20CrMo alloy steel. Materials & Design(1980-2015) 2013; 52: 677-685.
9. Lin Y and Chen X-M. A combined Johnson—Cook and Zerilli-Armstrong model for hot compressed typical high-strength alloy steel. Comput Mater Sci 2010; 49: 628-633.
10. Ren J, CaiJ, ZhouJ, et al. Inverse determination of improved constitutive equation for cutting titanium alloy Ti-6Al-4V based on finite element analysis.
11. The InternationalJournal of Advanced Manufacturing Technology 2018;3671- 3682.

12. Bement TR. Taguchi techniques for quality engineering. Taylor & Francis, 1989.
13. Yang X and Richard Liu C. Machining titanium and its alloys. Mach Sci Technol 1999; 3: 107-139.
14. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с
15. Калюжний О. В. Аналіз обтиску з протитиском в сферичній матриці порожнистих заготовок з дном з забезпеченням постійної товщини стінки / О. В. Калюжний // Наукові нотатки. - 2013. - Вип. 40. - С. 102-111. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2013_40_22.
16. Калюжний О. В. Аналіз обтиску з протитиском в сферичній матриці порожнистих заготовок з дном з забезпеченням постійної товщини стінки / О. В. Калюжний // Наукові нотатки. - 2013. - Вип. 40. - С. 102-111. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2013_40_22.
17. Калюжний О.В. Аналіз силових режимів та якості виробів при обтиску трубчатих заготовок в конусній матриці // Вісник НТУУ «КПІ», серія Машинобудування, 2011, вип. 62. С. 63-67.
18. Романов П. В. Напряженно-деформированное состояние полой цилиндрической оболочки при обжиме // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №12.
19. Калюжний В.Л. Вплив радіуса заокруглення матриці на формоутворення обтиском з протитиском виробів з горловиною / Калюжний В.Л., Вихованець І.В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» - 2011. – 46. С. 27-34.
20. Калюжний В.Л. Спосіб обтиску горловини типу балон: Патент України № 59190: МПК B21B26/02// Калюжний В.Л., Калюжний О.В, Піманов

В.В., Паляничко Є.М.; Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». Опубл. 10.05.2011, бюл. №9.

21. Калюжний О.В. Пристрій для обтиску горловини типу балон: Патент України №68396: МПК B21B26/02// Калюжний О.В, Піманов В.В., Солонуха В.М. та ін.; Заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». Опубл. 26.03.2012, бюл. №8.
22. Марьин С. Б. Сравнительный анализ технологических методов раздачи трубчатой заготовки / С.Б. Марьин, Д.А. Потянихин, В.А. Пхьо, М.К. Хлайнг // Инженерный журнал: наука и инновации, № 10 (106), 2020, С. 4.
23. Веселов А.А. Определение размеров концов труб после раздачи методом пластического деформирования // Морской вестник. 2012. № 1. С. 15-16.
24. Калюжний В. Л. Розрахунково-експериментальний аналіз відкритої роздачі трубчастих заготовок / Калюжний В. Л., Олександренко Я. С., Куліков І. П. // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць. – 2014. – № 1(70). – С. 63–68. – Бібліогр.: 5 назв.
25. Наказ Державного Комітету України з нагляду за охороною праці від 15.11.2004 № 255. Про затвердження Типового положення про службу охорони праці [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z1526-04 (дата звернення 15.11.2023 р.). — Назва з екрана.
26. Наказ Державного Комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 22.02.2008 № 35. Про Рекомендації щодо побудови та впровадження системи управління охороною праці [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://www.uazakon.com/documents/date_bu/pg_gwwuxm.htm (дата звернення 15.11.2023 р.). — Назва з екрана.

27. Закон України. Про охорону праці [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/2694-12 (дата звернення 15.11.2023 р.). — Назва з екрана.
28. Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 19.12.2013 № 968. Правила охорони праці під час ковальсько-пресових робіт [Електронний ресурс] — Режим доступу: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0017-14 (дата звернення 15.11.2023 р.). — Назва з екрана.
29. Охорона праці в ковальсько–пресовому виробництві: навчальний посібник / І.Л. Марченко, О.М. Бакланов. – Краматорськ: ДДМА. 2009. – 208 с.
30. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Трегубов В.И. Теория и технология штамповки анизотропных материалов / под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2012. 400 с.
31. Яковлев С.П., Кухарь В.Д. Штамповка анизотропных заготовок. М.: Машиностроение, 1986. 136 с.
32. Min Ko Hlaing, Phone Htet Kyaw, Maryn B.N. Defect Analysis of Operating Hydro-Gasified Piping System. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, vol. 1, pp. 885
33. Maryin S.B., Phyo Wai Aung. Working Body for Deformation of Thin-Walled Pipe Billets. Materials Science Forum, 2019, vol. 945, pp. 628-633.
34. Харсеев В. Е. Макроскопические феноменологические модели и теории разрушения обработки металлов давлением / В. Е. Харсеев // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 3 (36). – С. 90–96.
35. Guntram Ruf. Modeling ductile damage of a Ni-base alloy considering the microstructure evolution during hot working / Ruf Guntram, Sommitsch Christof, Bruno Buchmayr // Steel Grips. Journal of Steel and Related Materials. – 2006. – № 4. – S. 56–63.

ISSN 2076-2151. Обработка материалов давлением. 2017. № 2 (45) 29