

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: ***Обґрунтування конструкції свердла з центральним
твердосплавним наконечником для свердління отворів глибиною до 8×D***

Виконав: студент (ка) 6 курсу, групи МВм-61
напряму підготовки (спеціальності)
133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

		Нікітюк В.С. (прізвище та ініціали)
Керівник		Гагалюк А.В. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Кобельник В.Р. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри		Крупа В.В. (прізвище та ініціали)
Рецензент		 (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Крупа В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« » 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістра
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Нікітюку Василю Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Обґрунтування конструкції свердла з центральним твердосплавним
наконечником для свердління отворів глибиною до $8 \times D$.

Керівник роботи старший викладач кафедри ВІ, ГАГАЛЮК Андрій Валерійович, к.т.н
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «15» серпня 2025 року № 4/7-756.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 22 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Креслення свердла

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ, 1. Аналітичний розділ. 2. Проєктний розділ. 3. Дослідний розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки. Перелік посилань

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Тема і мета дослідження – 1 фА1, Інформаційно-патентний пошук – 5 фА1,

Проєктний розділ – 2 фА1, Дослідний розділ – 2 фА1

Загальні висновки – 1 фА1

Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Сеник А.А., к.т.н., ст. викл. каф. ВІ</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Теслюк В.М., в.о.проректора з АГРБ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Кобельник В.Р., к.т.н., доц. каф. ВІ</i>		

7. Дата видачі завдання 18 серпня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ, Аналітичний розділ</i>	<i>01.09.2025 р.</i>	
2.	<i>Дослідно-проектний розділ</i>	<i>27.11.2025 р.</i>	
3.	<i>Науково-дослідна частина</i>	<i>4.12.2025 р.</i>	
4.	<i>Охорона праці</i>	<i>7.12.2025 р.</i>	
5.	<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>7.12.2025 р.</i>	
6.	<i>Загальні висновки</i>	<i>11.12.2025 р.</i>	
7.	<i>Перелік посилань</i>	<i>15.12.2025 р.</i>	
8.	<i>Додатки, креслення та плакати</i>	<i>19.12.2025 р.</i>	

Студент _____
(підпис)

Нікітюк В.С. _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник роботи _____
(підпис)

ст. викл. каф. ВІ, к.т.н. Гагалюк А.В. _____
(вчений ступінь, посада, прізвище, ім'я, по батькові)

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1. Аналіз проблематики процесу свердління	10
1.2. Огляд свердл із змінними твердосплавними головками	15
1.3. Висновки, постановка мети та задач дослідження	29
2. ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ РОЗДІЛ	31
2.1. Методика проектування державки свердла із змінними твердосплавними головками	31
2.2. Розрахунок силових параметрів свердла із ЗТГ	33
3. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	38
3.1. Методика та план проведення наукових досліджень	38
3.2. Дослідження 3D – моделі свердла із ЗТГ	38
3.3. Обговорення та аналіз отриманих результатів* (*оприлюднені результати досліджень подаються в додатках)	44
3.4. Висновки за результатами наукового дослідження	44
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	47
4.1. Охорона праці при роботі на свердлильних верстатах.	47
4.2. Безпека при надзвичайних ситуаціях стосовно роботи на свердлильних верстатах та відповідні заходи для її забезпечення	52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	54
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	55
ДОДАТКИ	60

АНОТАЦІЯ

Нікітюк В.С. Обґрунтування конструкції свердла з центральним твердосплавним наконечником для свердління отворів глибиною до $8 \times D$. 133 – Галузеве машинобудування; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; м. Тернопіль, 2025 р.

Мета і завдання магістерської роботи – дослідити параметри конструкції свердла із змінити твердосплавним головками.

Завдання дослідження:

- виконати аналіз отворів;
- виконати аналіз конструкцій свердл;
- виконати огляд швидкозмінних твердосплавних головок для свердління;
- виконати аналітичний розрахунок корпусу свердла на кручення;
- виконати статичний аналіз 3D моделі корпусу свердла.

Об’єкт дослідження – корпус свердла збірної конструкції.

Предмет дослідження – конструктивні параметри свердла.

Методи дослідження. Проведення теоретичних досліджень ґрунтується на огляді літературних джерел та комп’ютерного моделювання, статичного аналізу конструкцій із використанням МСЕ, використання модуля генеративного проектування.

Загальні висновки:

- Отвори є одним із найбільш поширених конструктивних елементів деталей машин і суттєво впливають на працездатність та точність вузлів. Форма, розміри, глибина та вимоги до точності й шорсткості поверхні отворів визначають вибір способу їх виготовлення, тип верстатного обладнання та різального інструменту. Свердління залишається основним і найбільш економічно доцільним методом отримання отворів, однак забезпечення підвищеної точності та якості поверхні потребує застосування додаткових технологічних операцій.
- Для точних отворів 6 – 7 квалітетів свердла із ЗТГ забезпечити не

можуть, проте дозволяють отримувати отвори 10 – 9 квалітетів. Разом з тим вони, є набагато продуктивнішими за суцільні свердла, що дозволяє їх використовувати для попереднього свердління.

- На відміну від суцільних свердл, які більше схильні до відводу, свердла із ЗТП зберігають вісь, зумовлену геометричною частиною характерною для твердосплавних свердл. Вагомою перевагою свердл із ЗТГ є широкий набір головок та їх швидка заміна, за рахунок чого корпус свердла виконує роль державки подібно до токарних різців.
- Застосування свердл із ЗТГ дозволяє використовувати більш агресивні режими різання, що сприяє зростанню продуктивності приблизно на 20%, а використання свердл із трьохперовими ЗТГ піднімає продуктивність ще на 20%, що в кінцевому результаті здешевлює обробку і вартість технологічної операції загалом.

Nikityuk V.S. " Substantiation of the design of drills with a central carbide tip for drilling holes up to $8 \times D$ deep". 133 – Industrial engineering; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2025.

The purpose and objectives of the master's thesis are to investigate the design parameters of drills with modified carbide heads.

Objectives of the study:

- perform an analysis of holes;
- perform an analysis of drill structures;
- conduct an inspection of quick-change carbide inserts for drilling;
- perform an analytical calculation of the drill body for torsion;
- perform a static analysis of the 3D model of the drill body.

The object of the study is the drill body of a prefabricated structure.

The subject of the study is the design parameters of the drill.

Research methods. Theoretical research is based on a review of literary sources and computer modeling, static analysis of structures using MFE, and the use of the generative design module.

General conclusions:

- 1) Holes are one of the most common structural elements of machine parts and significantly affect the performance and accuracy of assemblies. The shape, size, depth and requirements for the accuracy and surface roughness of holes determine the choice of their manufacturing method, the type of machine equipment and cutting tools. Drilling remains the main and most economically feasible method of obtaining holes, however, ensuring increased accuracy and surface quality requires the use of additional technological operations.
- 2) For precise holes of 6-7 qualities, ZTG drills cannot provide, but they allow obtaining holes of 10-9 qualities. At the same time, they are much more productive than solid drills, which allows them to be used for preliminary drilling.
- 3) Unlike solid drills, which are more prone to deflection, ZTP drills retain the axis determined by the geometric part characteristic of carbide drills. A significant advantage of ZTG drills is a wide range of heads and their quick replacement, due to which the drill body acts as a holder similar to turning cutters.
- 4) The use of ZTG drills allows the use of more aggressive cutting modes, which contributes to an increase in productivity by approximately 20%, and the use of drills with three-prong ZTG increases productivity by another 20%, which ultimately reduces the cost of processing and the cost of the technological operation as a whole.

ВСТУП

Актуальність теми. Отвори мають саме різностороннє призначення в деталях машин, від монтажних до точних. Свердління отворів є основним методом і надзвичайно складним фізичним процесом. Свердло працює у важких умовах і з поганим охолодженням та іншими факторами. Альтернативи свердлінню немає, оскільки воно забезпечує найефективніше видалення матеріалу. Виробники постійно удосконалюють свердла. Одним із напрямів удосконалення інструменту є використання конструкцій зі змінними твердосплавними головками. Такі свердла поєднують міцний сталевий корпус із високопродуктивною різальною частиною. Застосування змінних головок створює додаткову гнучкість технологічного процесу, що дозволяє зменшити кількість інструментів у виробничій номенклатурі та знизити витрати на їх обслуговування. Разом із тим така конструкція висуває підвищені вимоги до жорсткості технологічної системи та ретельного вибору режимів різання. З'єднання між корпусом і головкою впливає на розподіл навантажень і точність обробки, що може обмежувати досяжні показники точності отворів. Тому актуальним є дослідження силових характеристик процесу свердління та аналіз впливу конструктивних особливостей інструменту на стабільність і якість обробки.

Отже, дослідження процесу свердління із застосуванням свердел зі змінними твердосплавними головками є важливим завданням, спрямованим на підвищення продуктивності, економічної ефективності та технологічної надійності механічної обробки отворів у сучасному машинобудуванні.

Мета і завдання кваліфікаційно роботи – дослідити параметри конструкції свердла із змінити твердосплавним головками.

Завдання дослідження:

- виконати аналіз отворів;
- виконати аналіз конструкцій свердл;
- виконати огляд твердосплавних головок для свердління;
- виконати аналітичний розрахунок корпусу свердла на кручення;

- виконати статичний аналіз 3D моделі корпусу свердла.

Об'єкт дослідження – корпус свердла збірної конструкції.

Предмет дослідження – конструктивні параметри свердла.

Методи дослідження. Проведення теоретичних досліджень ґрунтується на інформаційному дослідженні математичному апараті, МСЕ, використання вбудованих модулів САПР для розрахунку статичного аналізу дослідної 3D моделі.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано методику розрахунку свердел зі змінними твердосплавними головками.

Публікації. За темою кваліфікаційної роботи опубліковано тези конференції: А.В. Гагалюк, В.С. Нікітюк. Аналіз досліджень конструкції свердел з центральним твердосплавним наконечником для свердління отворів глибиною $8 \times D$. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 10-12 грудня 2025 року – Тернопіль: ТНТУ. – С. 69.

Структура роботи. Робота складається із вступу, 4 розділів, загальних висновків і переліку посилань із _____ джерел, додатків _____.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Аналіз проблематики процесу свердління

У залежності від конструкції та умов роботи отвори в деталях машин мають різноманітне функціональне призначення. Кожен тип отвору виконує конкретну роль у забезпеченні працездатності вузла. Від загальної кількості конструктивних елементів їх кількість може складати до 20% в серійному виробництві та до 30% у масовому [3]. Отвори можна класифікувати за декількома ознаками, а саме:

- за призначенням (табл.1);
- за виконанням;
- за методом отримання;
- за глибиною.

Таблиця 1.1 – Отвори за призначенням

№ з/п	Тип отвору	Приклад використання	Основне призначення
1	кріпильні	отвори під болти, гвинти, заклепки	з'єднання деталей між собою або закріплення
2	посадкові або напрямні	базування підшипників ковзання або кочення	визначають точність взаємного розташування деталей
3	для штифтів і шпонок	отвори для штифтів і шпонок	фіксація деталей, передавання крутного моменту
4	технологічні	отвори для виведення або доступу інструменту до оброблюваних поверхонь	полегшення обробки у важкодоступних місцях
5	монтажні/сервісні	отвори для регулювання або монтажу	полегшення монтажу, обслуговування або ремонту
6	полегшувальні / балансувальні	отвори в тілах обертання для досягнення балансу	зменшення маси в певних місцях деталі
7	для робочих середовищ	канали для рідин і газів	забезпечення циркуляції робочих рідин або газів

У залежності від методу обробки існують такі типи отворів (Рисунок 1.1):

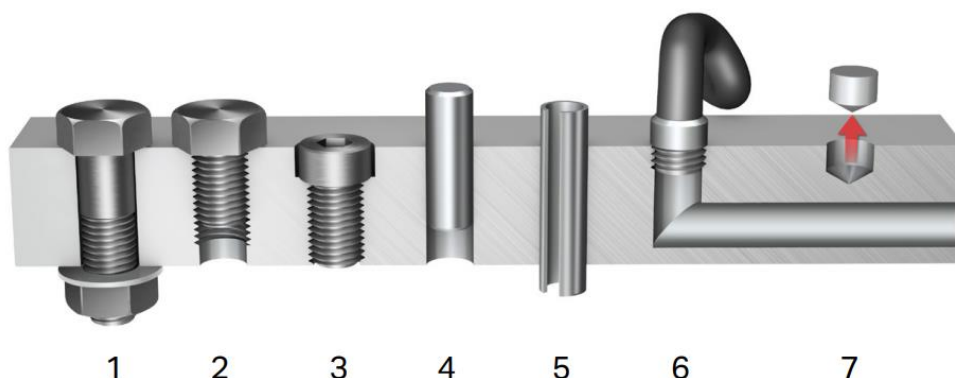


Рисунок 1.1 – Типові отвори: 1-3 – кріпильні отвори, 4, 7 – отвори для штифтів, 5 – отвір із вільною посадкою, 6 – отвір для рідин

Отвір, як поверхня має 3 параметри – глибину, діаметр і форму та якість поверхні. Точність геометричної форми та шорсткість характеризують якісні параметри. Вибір інструменту залежить не лише від характеристик отвору, а й його розміщення відносно інших поверхонь. Тому потрібно враховувати типи отворів (Рисунок 1.2 – Класифікація отворів Рисунок 1.2). Використання верстата також є важливим, адже його параметри впливають на вибір кріплення свердла, тому необхідно враховувати такі характеристики:

- стійкість верстату та шпинделя;
- можливість обробки малих діаметрів;
- підведення ЗОР через шпиндель (обсяг та тиск);
- розташування шпинделя, оскільки з горизонтальним шпинделем легше відводити стружку;
- потужність приводу та момент свердління.

Інструментальне оснащення впливають на продуктивність. Правильний підбір свердла обумовлює отримання якісних отворів. Різні типи отворів вимагають різних параметрів інструменту.

Призначення *кріпильних отворів* полягає у можливості точного монтажу та з'єднання деталей. Точність їх обробки відповідає 11 – 12 квалітету. Їх свердлять, в основному, на свердлильних верстатах.

Посадкові або напрямні (ступінчасті або гладкі отвори) в обертових деталях виготовляють на токарних верстатах свердлінням, розточуванням, зенкеруванням і розвертанням. До них ставляться вимоги 8, 7, іноді 6 квалітети точності. У важких корпусних деталях отвори отримують на розточних або спеціальних верстатах.

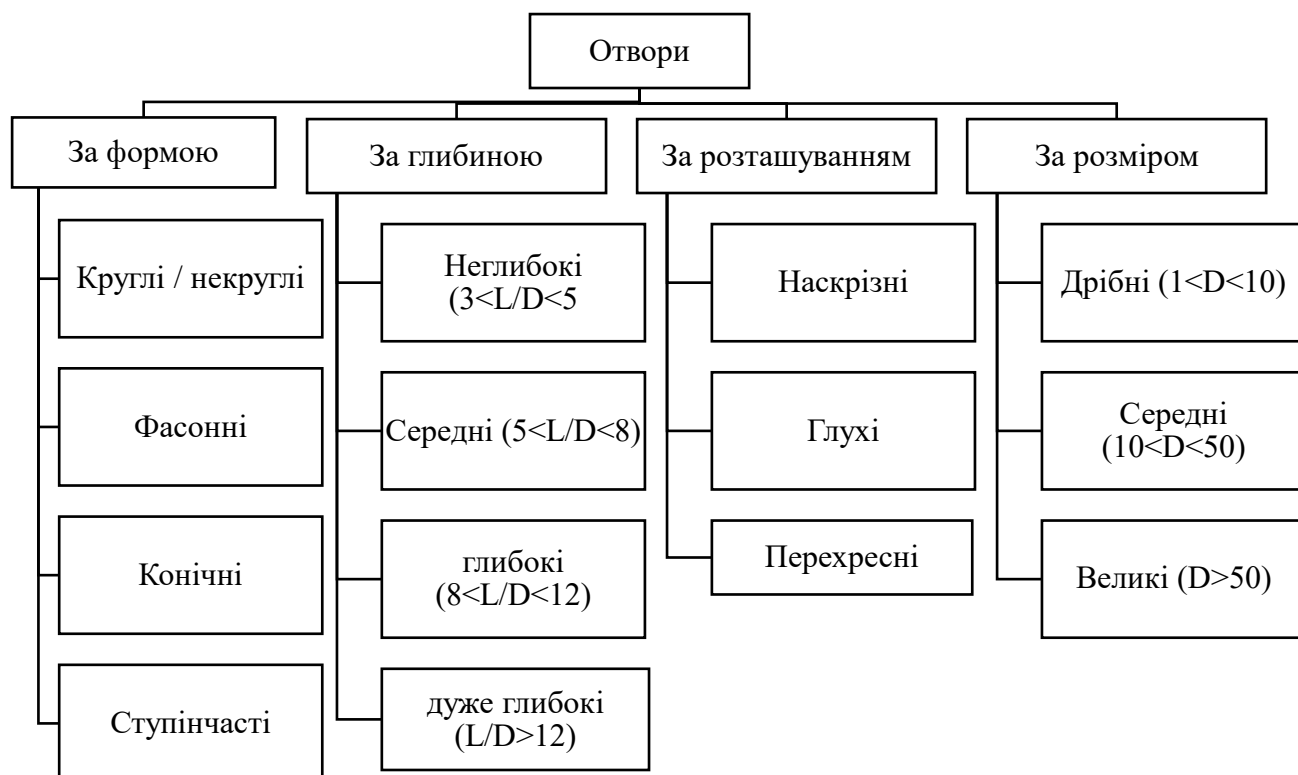


Рисунок 1.2 – Класифікація отворів

Отвори для робочих середовищ (глибокі отвори) мають довжину більше $8 \times D$, $10 \times D$, наприклад, отвори шпинделів металорізальних верстатів тощо.

Конічні й профільні отвори отримують інструментом з конічними або криволінійними різальними кромками або розточуванням методом копіювання.

Не круглі отвори виготовляють методом протягуванням, прошиванням і довбанням. Квадратні отвори можна отримати спеціальними триперовими свердлами Уатса.

Форма отвору та технічні вимоги до його точності та шорсткості поверхні визначають спосіб виготовлення і використовуваний інструмент [55]. Найпродуктивнішим методом отримання простих отворів ($\varnothing 0,25 - \varnothing 80$) мм є

свердління, частково фрезерування. Інструментом є спіральне свердло із двома різальними лезами (Рисунок 1.1), а для свердління ступінчастих отворів або отворів із фасками та площинами використовують спеціалізовані комбіновані інструменти – свердла-зенківки, свердла-цеківки тощо. Необхідно зауважити, що значна кількість кінцевих фрез працюють торцевою або периферійною частиною і погано працюють на засвердлювання (рис.1.2, б).

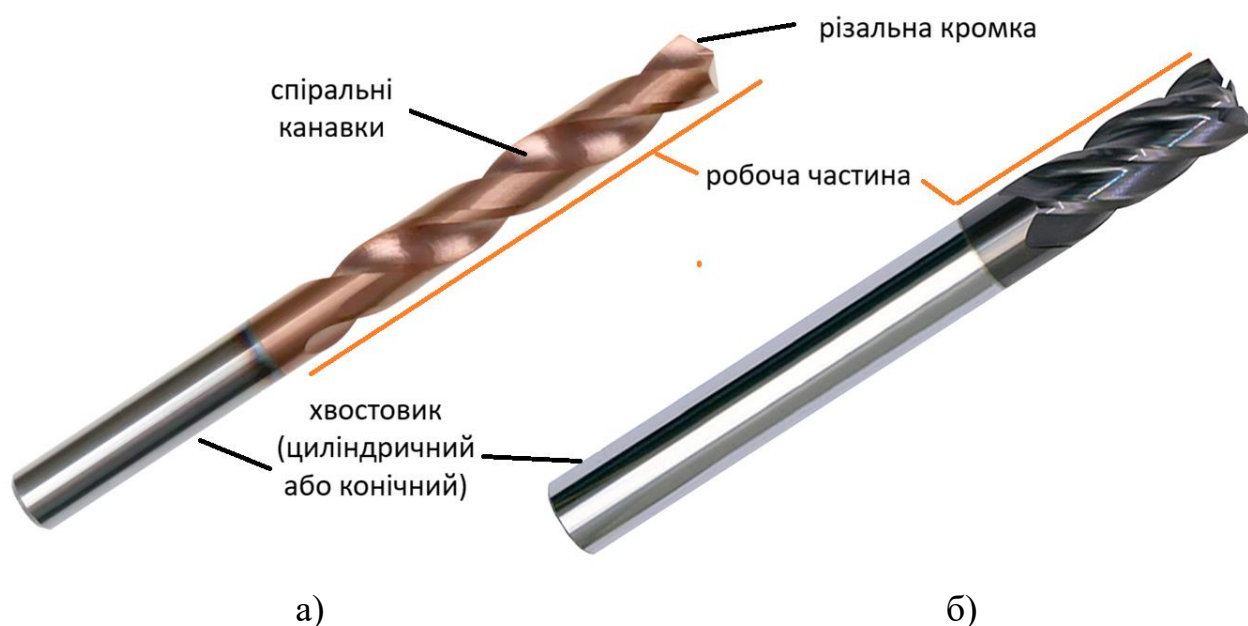


Рисунок 1.3 – Конструктивні елементи спірального свердла (а) і фрези (б)

Точний отвір набагато важче технологічно отримати, ніж відкриту поверхню із аналогічними технічними вимогами, що пояснюється легким доступом та можливістю використання великої кількості інструментів до останньої. Разом з цим, це робить свердління і свердла безальтернативним методом виготовлення отворів. Розфрезерування отворів є достатньо дорогим і не виправданим економічно, а електроерозійна обробка настільки точна, настільки й дорога, що робить застосування останньої виправданим лише на дорогих деталях [1].

Свердління без додаткових пристосувань здатне забезпечити максимальну досяжну точність 11 квалітету. Натомість, для отримання точніших отворів необхідно виконати додаткові технологічні операції та переходи, як попереднє свердління із подальшим і поступовим розсвердлюванням і зенкеруванням, що

може дати отвір 8 квалітету, а розвертання може забезпечити точність 6 і у деяких випадках 5 квалітету. Перелічені технологічні операції забезпечують наступну шорсткість:

- свердління і розсвердлювання – Ra 12,5...6,3 мкм;
- зенкерування – 9-8 квалітети, Ra 6,3...3,2 мкм;
- розвертання – 9-6 квалітети й Ra 1,25...0,32 мкм. Внутрішнє шліфування здатне забезпечити аналогічні показники якості (7 – 6 квалітет і Ra 0,2 мкм).

Розсвердлюванням збільшують діаметр опередньо просвердленого отвору за допомогою свердла більшого діаметра. Його часто застосовують для отримання отворів діаметром більше 25 мм. При розсвердлюванні процес різання проходить при менших навантаженнях, оскільки перемичка свердла не приймає участі у різанні, що зменшує осьову силу. Розсвердлювання дозволяє збільшити подачу до 1,5 разів у порівнянні із подачею при свердлінні [16].

Зенкерування можуть застосовувати замість розсвердлювання в певних випадках після лиття або штампування. Його використовують коли є вимога до круглості отвору і шорсткості (Ra 1,0...2,5) мкм, та точності 8 квалітету [1].

Розвертання – максимально досяжний метод лезової обробки отворів 6-го квалітету і шорсткістю Ra (1,25...0,32) мкм [55].

Отримання точних отворів є трудомістким процесом, який потребує поетапної обробки і виконання технологічних операцій, які обумовлені конструктивними особливостями спіральних свердл. Напрямна стрічка вздовж спіралей спрямовує свердло уздовж осі отвору, проте наявність зворотної конусності 0,02 мм / 100 мм довжини свердла дещо нівелює цю функцію. Надмірна подача створює вигин спірального свердла та пружні деформації [15].

Свердла є основним інструментом продуктивного видалення матеріалу, що робить їх доцільним і виправданим методом отримання отворів. Сучасні інструменти та обладнання, при певних умовах, дозволяють одразу отримувати 9 квалітет точності без попереднього зацентрування [27].

В технологічному процесі свердління отворів існують значні перспективи для

вдосконалення цього процесу. Окрім монолітних свердл отвори можна свердлити за допомогою свердл із твердосплавними головками або зі змінними пластинами. На ринку їх можна знайти у широкому спектрі діаметрів, різних компонентів та матеріалів. Технологія свердл зі змінними головками може мати деякі обмеження, як з точки зору своїх можливостей, так і практичного характеру технологічної операції, однак, при застосуванні до відповідного рельєфу, вона може стати єдино правильним рішенням.

1.2. Огляд свердл із змінними твердосплавними головками

Існує узагальнена думка, що свердління є технологічною операцією обробки, яка виконується найчастіше, незалежно від того, чи виконується вона на обробних центрах, токарних верстатах з ЧПК чи спеціалізованих свердлильних верстатах. Вибираючи відповідне свердло та спосіб, важливо враховувати вартість отвору, а також якість та вимоги до отвору. Використання свердл із головками чи пластинами дозволяє виконувати супутні дії, такі як розсвердлювання, зняття фасок, розточування та зенкування, за рахунок того, що всі інтегровані в один інструмент.

Серед виробників свердл із змінними пластинами та головками відомі світові бренди із як TaeguTec [28], Sandvik Coromant [29], Gühring [32], Dormer&Pramet [33], AMEC [34], Seco [35], HNCarbide (Huanatools) [36], Kyocera [37], Iscar [38]. Усі вони володіють значною науковою та матеріальною базою, що сприяє пошуку і розвитку нових продуктивних металообробних інструментів, зокрема і свердл.

TaeguTec [28] та ISCAR [38] входять в одну міжнародну групу IMC, що пояснює схожість інструменту. Для продуктивного отримання отворів ними розроблено ряд свердл із змінними твердосплавними головками (ЗТГ) різних довжин (табл.1.2), зокрема трьохперові, що дозволяє збільшити продуктивність обробки у порівнянні із двоперовими. Свердління отворів у сталі триперовим свердлом Ø12 мм дозволяє збільшити швидкість різання $v_{різ}$ з 80 м/хв до 100 м/хв і подачу з 0,2 мм/об до 0,6 мм/об у порівнянні із двоперовим свердлом із

аналогічного матеріалу. Це порівняння актуальне і для свердл із ЗТГ.

Sandvik виготовляє наконечники для корпусів свердл з чотирьох типами геометрії і трьома групами сплавів для матеріалів груп P, M, K, N і S (рис.1.3):

- PM, яку оптимізовано для матеріалів групи ISO-P (геометрія PM є універсальною і призначена для обробки низьколегованих та вуглецевих сталей, проте демонструє добру працездатність та стійкість при свердлінні отворів в аустенітних нержавіючих сталях та чавуні);
- MM, оптимізована для матеріалів групи ISO-M (геометрія MM має таку ж мікро-і макрогеометрію, що і PM, але при цьому має посилену перемичку, що підвищує стійкість, особливо при обробці дуплексної нержавіючої сталі).
- KM, оптимізована для ISO-K (геометрія KM має таку ж мікрогеометрію, що і PM. Однак відрізняється наявністю фаски на куточках, що дозволяє зменшити задирки на виході з оброблюваного матеріалу);
- GP для свердління попередніх отворів у будь-яких матеріалах. Геометрія GP базується на геометрії PM, але має більший кут при вершині та інший клас точності.

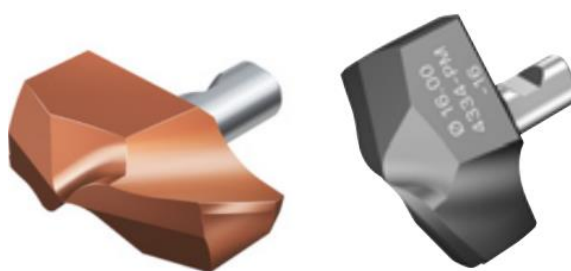


Рисунок 1.3 – Наконечники Sandvik для свердла Corodril 870

Щодо сплавів, то виробник виділяє три групи:

- GC4334 (покриття PVD (AlTiN) великої товщини у поєднанні з вищою надійністю країв гарантує стійкість до наростоутворення та викришування, має міцну дрібнозернисту основу з високим вмістом хрому для високої надійності та стійкості до викришування. Перший вибір для обробки матеріалів ISO P);

- GC3334 (багатошарове покриття PVD (AlTiCrN) з покращеною зносостійкістю із твердою дрібнозернистою основою для додаткового покращення зносостійкості. перший вибір для матеріалів ISO-K;
- GC2334 (тонке багатошарове покриття PVD (AlTiCrN) з покращеною стійкістю до відшаровування та викришування на допоміжній кромці. Має міцну дрібнозернисту основа з високим вмістом хрому для високої надійності та стійкості до викришування. Перший вибір для матеріалів ISO M.

Свердлильні системи зі змінними головками BT / HT від Guhring рекомендується використовувати на верстатах з ЧПК з тиском охолоджувальної рідини не менше 200 psi. Покриття на цих свердлах зі змінними головками забезпечує чудову зносостійкість, ефективне та недороге свердління, а також довший термін служби інструменту, особливо під час роботи з більшими деталями. На рис.1.3 – 1.4 зображено кріплення для свердлильної системи BT/HT 800 з змінні головки до нього.

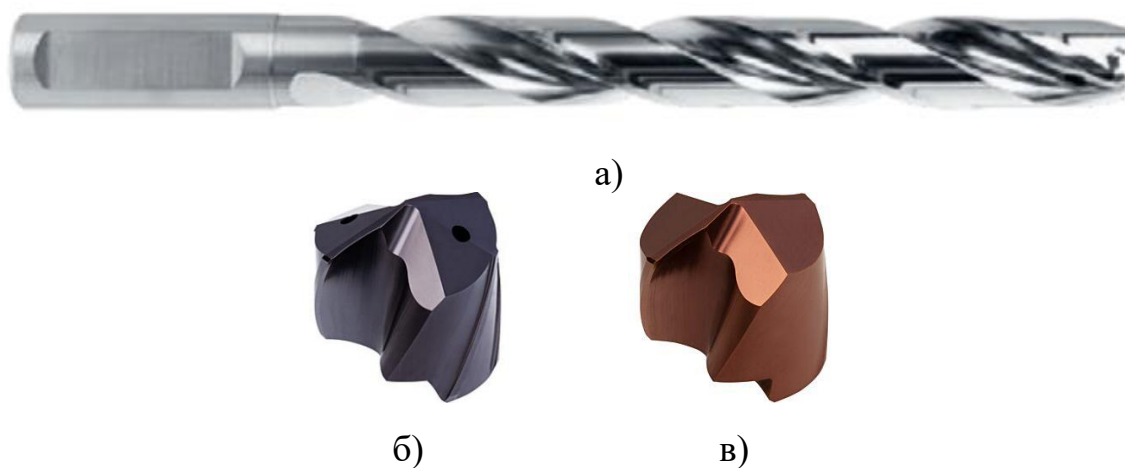


Рисунок 1.4 – Свердлильна система BT 800 для $\varnothing 10,00 - \varnothing 26,499$ мм:
а – корпус свердла $8 \times D$, головки із покриттям Nanofire (б) і Persistum (в)

Щоб відповідати цим критеріям, для сверدل зі змінними головками було розроблені нові конструкції поперечного перерізу каналів для подачі охолоджувальної рідини.

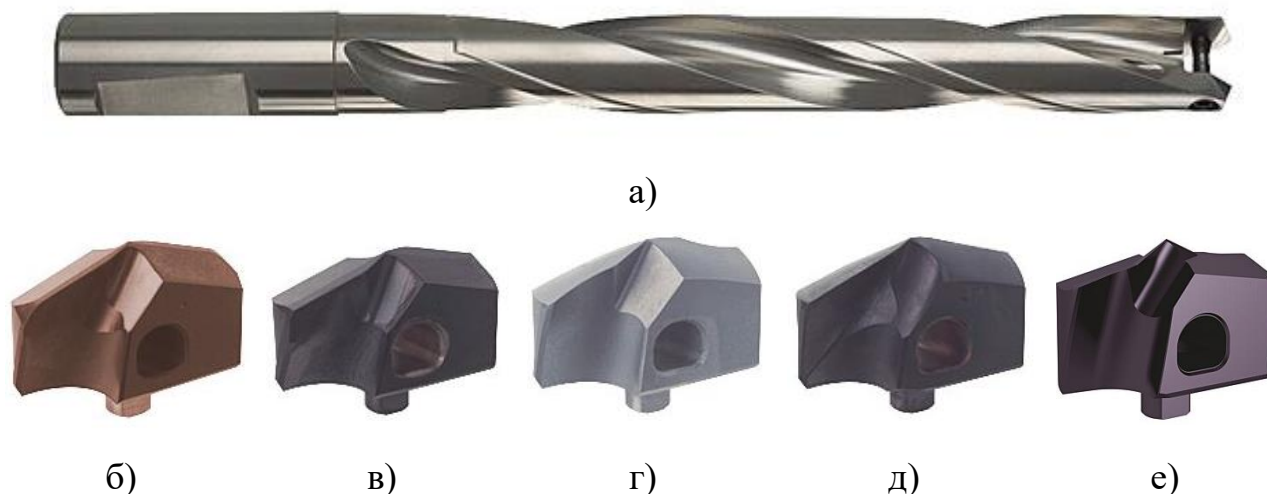


Рисунок 1.5 – Свердлильна система HT 800 для Ø11 – Ø40 мм:

а – кріплення (корпус свердла) $10 \times D$, головки: б – для чавуну, в – універсальна, г – для кольорових сплавів д – нержавіючих сталей, е – конструкційних сталей

Твердосплавні свердла зі змінними головками – це унікальний спіральнорифлений свердлильний інструмент для обробки нержавіючої високоякісної сталі. Нова форма каналів для подачі ЗОР максимізує об'єм охолоджувальної рідини, а також її швидкість та напрямок потоку, забезпечуючи значне розсіювання температури. На відміну від круглих каналів для подачі ЗОР, в цих каналах рідина спрямовується так, щоб досягати ділянок інструменту, які піддаються найбільшим напруженням, а саме різальної кромки та її кутів.

Dormer&Pramet виготовляє серію сверدل із головками Hydra drill. Hydra зі змінними твердосплавними головками з корпусами від $1,5 \times D$ до $12 \times D$ для глибокого свердління Змінні твердосплавні головки для обробки конструкційних та нержавіючих сталей та чавуну (рис. 1.5).

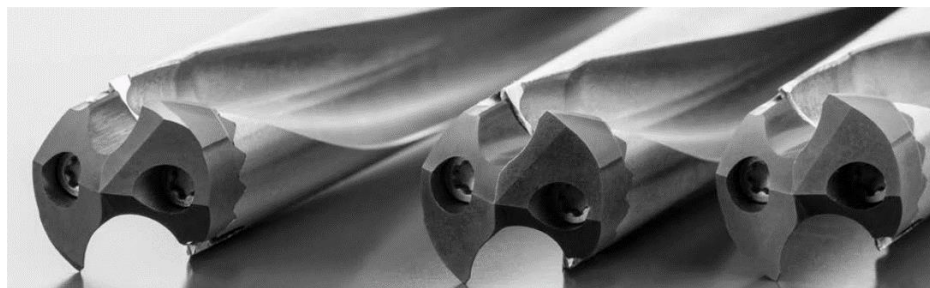


Рисунок 1.6 – Свердла Hydra drill

Дрібнозернистий твердий сплав забезпечує відмінне поєднання твердості та міцності, що дозволяє отримати високу зносостійкість та тривалий термін служби інструменту. корпус із швидкісної сталі з додаванням нікелю забезпечує високу зносостійкість та захист від корозії. Покриття на основі алюмонітриду титану (TiAlN) забезпечує високу міцність та стійкість до окислення, захист від абразивного зношування при обробці таких матеріалів, як чавун, висока твердість при високих температурах, що виникають при свердлінні чавунів. Свердла довжиною $1,5 \times D$, $3 \times D$, $5 \times D$, $8 \times D$ та $12 \times D$ з отворами для підведення СОЖ ефективно справляються з відведенням стружки та мають високу продуктивність:

- метричні розміри: від 12,00 до 42,00 мм;
- дюймові розміри: від 15/32 до 1.5/8 дюйма;
- найкращий результат досягається під час використання гідравлічних оправок. Свердла можна також встановлювати в цангові патрони та патрони типу Weldon (з лискою у верхній частині).

Конструкція стрічок збільшує стабільність процесу свердління та знижує зусилля, що виникають під час виходу свердла з поверхні заготовки. Це покращує якість поверхні на виході свердла та допомагає запобігти появі на ній сколів, які можуть виникнути під час свердління зернистих матеріалів.

Геометрія вершини хрестоподібно підточена вершина з кутом при вершині 140° , як і у всіх, забезпечує добре центрування та низькі осьові зусилля різання при свердлінні більшості видів матеріалів.

Важливим елементом конструкції є місце з'єднання головки з корпусом - на них виконано зубці, котрі дозволяють краще центрувати головку в корпусі. З технологічної точки зору таке рішення ускладнює виробництво самого корпусу, що неодмінно впливатиме на ціну свердла.

AMEC (Allied Machine & Engineering Company) – провідний виробник інструментальних систем для обробки отворів і чистової обробки. Свердла зі змінними головками, що виробляє Allied Machine Engineering, мають геометрії та покриття, які забезпечують високу продуктивність та ефективність, а ще й економлять кошти, усуваючи необхідність перешліфовування або заміни свердл.

Крім того, можливість заміни наконечників для різних матеріалів заготовок та вимог застосування призводить до зменшення кількості інструментів, які необхідно тримати в наявності. За даними компанії Allied Machine & Engineering їх оригінальні системи свердління T-A, у порівнянні з монолітними інструментами, пропонують значне скорочення часу простою. Система свердління T-A має високопродуктивні пластини та тримачі, які ідеально підходять для свердління отворів в блоках двигунів, колінчастих валів, поршнів та деталей підвіски. Порівняно з іншими доступними на ринку варіантами, вартість свердління отвору за допомогою системи T-A може бути на 25% - 50% дешевшою.

Свердла спеціально заточені для свердління чавуну так, що наконечники мають менші кути передньої поверхні, більш міцну різальну кромку і є більш стійкими до викришування.



Рисунок 1.7 – Свердлильні системи АМЕС

Запатентоване покриття AM200 є одним із передових, яким покриті свердла ТА. Воно підвищує продуктивність та збільшує термін служби інструменту. Для автомобільної галузі доступний широкий вибір марок пластин, таких, як карбід С3, який є зносостійким карбідом, що забезпечує найбільший термін служби сірого чавуну, та карбід С2, який є чудовим варіантом для алюмінію та інших

кольорових металів. Для автомобільної галузі свердло GEN2 TA, яке підходить до такого ж корпусу свердла, що й оригінальне TA, та забезпечує ще вищу продуктивність і довший термін служби інструменту. Також його можна використовувати для обробки сталі.

Свердла Kennametal [37] зі змінними головками. Вставка FEG розроблена спеціально для обробки отворів з плоским дном. Це конструктивне рішення дозволяє оминати процедури торцевого фрезерування, що дозволяє виконати роботу за одну операцію та заощадити як час, так і витрати на інструменти. Вони застосовні для конструкційної та нержавіючої сталей і чавуну. Вони мають ріжучу кромку на 180° та конічну центральну точку, яка слугує напрямною для забезпечення стабільного положення отвору та його прямолінійності. Свердла зі змінними наконечниками допомагають зберегти різальні леза, а також зменшити кількість вихідних задирок. Під час розрізання перерваних розрізів та поперечних отворів стабільність, що забезпечується чотирма крайовими фасками, є неоціненною.



Рисунок 1.8 – Свердло KenTIP FS 8×D, хвостовик із нержавіючої сталі

Таблиця 1.2 – Змінні головки для свердл KenTIP FS

№ з/п	Назва наконечника	Призначення
1	 GTP	<u>для універсального застосування (конструкційної, нержавіючої сталей та чавуну).</u> - геометрія з кутом при вершини 140°. - відмінні можливості центрування та низькі осьові сили. - подача ЗОР через корпус;

2	 DAV	<u>для вібраційного свердління стеків вуглепластику, кольорових металів та жароміцних сплавів;</u> подвійна кутова геометрія з кутами вершини 128° та 155° для мінімізації задирок на виході; подача ЗОР через корпус; алмазне покриття (опція);
3	 FEG	<u>для прямого свердління для глибоких отворів і для отворів, що потребують плоского дна;</u> кутова фаска для зменшення утворення задирок; 4 фаски для прямолінійності отвору та стабільності на похилих виходах;
4	 HPG	<u>для свердління без попереднього центрування</u> КСР15А – це моношарове покриття AlTiN, отримане методом PVD; Підвищена термостабільність. подача ЗОР через корпус
5	 HPC	<u>для всіх типів чавунів</u> 4-гранні фаски забезпечують прямолінійність отвору; великий радіус заокруглення запобігає утворенню сколів та зменшує кількість вихідних задирок під час свердління наскрізних отворів. КС7410™ – це багатошарове покриття AlCr, нанесене методом PVD;
6	 SPF	<u>для вуглецевого волокна</u> Подвійна кутова геометрія з кутами вершини 128° та 90° для запобігання розшаруванню волокна; подача ЗОР через корпус; алмазне покриття;
7	 HPL	<u>для нержавіючих сталей.</u> утворює 2 стружки на різальній кромці КСМС15– це моношарове покриття AlTiN, отримане методом PVD; запобігає наростанню на кромці, що забезпечує чудову якість отвору.

Свердла для свердління конструкційних і нержавіючих сталей, чавуну мають наноструктуроване покриття AlTiN та дрібнозернисту твердосплавну підкладку для забезпечення міцності і зносостійкості. Це забезпечує оптимальні результати

свердління. Діапазон діаметрів складає від 6 мм до 26 мм, і залежно від модульного корпусу свердла інструменту, можна свердлити на глибину до $12 \times D$.

Свердла Kyocera зі змінними наконечниками мають нову та креативну конструкцію інструменту, яка затискає головку свердла за допомогою гвинта. Цей затискний механізм вбудований у наконечники свердла. Це призводить до зменшення зносу корпусу свердла, а також спрощує заміну вставки, розташованої на наконечнику свердла. Крім того, для свердл Kyocera зі змінними наконечниками доступний широкий вибір розмірів. Іншими словами, корпус свердл зі змінними наконечниками можна використовувати для різних розмірів вставок, залишаючись однаковими. Оператор може змінювати свердла зі змінними наконечниками велику кількість разів, забезпечуючи при цьому надійне та безпечне затискання без ризику поломки наконечника свердла чи корпусу. Це призводить до економії коштів, і водночас затискання є не тільки точним, але й простим.

Таблиця 1.3 – наконечники і корпуси свердл від Kyocera

Тип головок	Діаметр і глибина отвору, мм	Твердосплав на головка	Корпуси
DRA	Ø7,94 – 25,50 1,5×D 3×D 5×D 8×D		 SS-DRA  SF-DRA  Пристосування для фасок
DRC	Ø7,94 – 25,99 3×D 5×D 8×D		 SS-DRC  SF-DRC  Пристосування для фасок

Нове свердло DRA має низьке зусилля різання та дуже добре самостійно центрується завдяки формі кінчика свердла. Оскільки воно має дуже крутий передній кут та більший діаметр перетинки, DRA здатне надзвичайно ефективно виконувати процес свердління, незважаючи на низьке зусилля різання.

Стосовно процесу свердління, то Sandvik визначає 4 способи свердління (Рисунок 1.9), а усі інші способи є похідними із наведених. Перед свердлінням отвору є декілька важливих параметрів, які необхідно враховувати оператору верстата, а саме:

- 1) отвір і його технологічні і геометричні характеристики;
- 2) матеріал і форма деталі, кількість отворів;
- 3) верстат;
- 4) інструментальне спорядження.

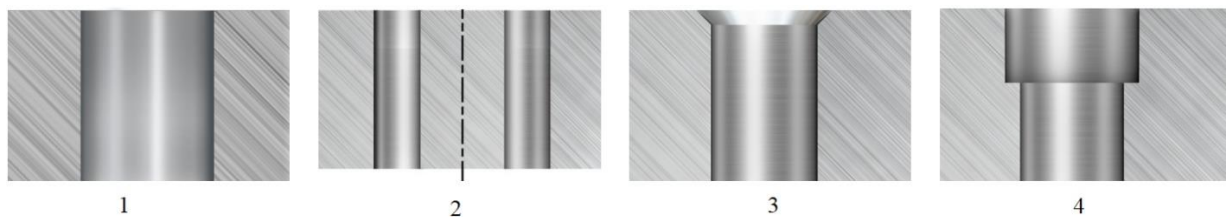


Рисунок 1.9 – Методи свердління отворів: 1 – звичайне свердління; 2 – корончасте свердління; 3 – свердління з фаскою; 4 – свердління ступінчастих отворів

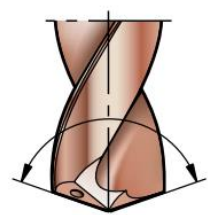
Для свердління малих і середніх отворів необхідно обирати між суцільно твердосплавними свердлами або свердлами зі змінними головками. Для свердління великих отворів найпродуктивнішим є використання змінних твердосплавних пластин, а при недостатній потужності верстата рекомендують використати корончасте свердління, розточування або фрезерування із гвинтовою інтерполяцією. Для глибоких отворів використовують пілотні свердла, тобто такі, після яких виконують розсвердлювання. Така процедура забезпечить точність та мінімального биття.

Монолітні твердосплавні свердла мають перевагу над свердлами із

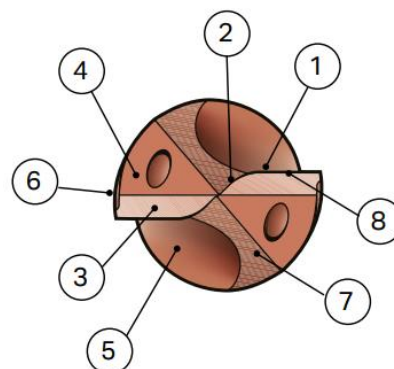
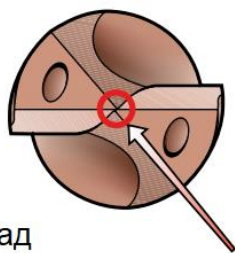
швидкорізальної сталі. Перетинка на перших значно менша або й відсутня зовсім [27], що зменшує осьову силу P_0 і як результат ліпше центрування та стабільне різання у центрі. Тому твердосплавні свердла використовують без попереднього центрування.

Продуктивність свердління залежить від хвилинної подачі $s_{хв.} (v_f)$ (Рисунок 1.11. При порівнянні схем різання видно, що монолітні свердла працюють в кращих умовах, оскільки різальні кромки симетричні, що врівноважує сили та крутний момент прикладений до свердла і є дві ефективні різальні кромки. Швидкість різання v_c для свердла змінюється від $v = max$ на периферії до $v = 0$ у центрі та мінімальних значень у районі перетинки свердла.

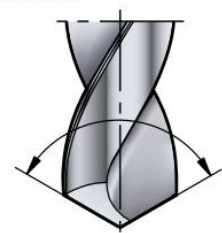
Суцільні твердосплавні свердла



Кут при вершині 140 град



Свердла із швидкорізальної сталі



Кут при вершині 118 град

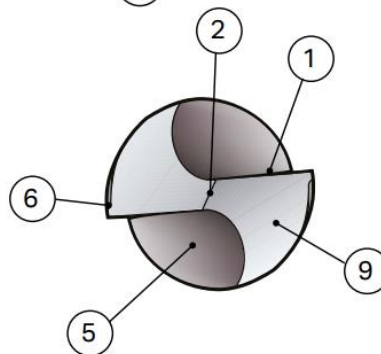
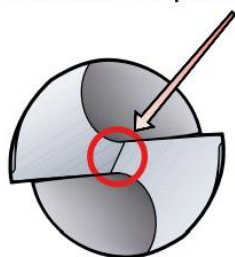


Рисунок 1.10 – Форма перетинки в свердлах із ТС та ШС: 1 – головна різальна кромка, 2 – перетинка, 3 – задня поверхня, 4 – допоміжна задня поверхня, 5 – стружкова канавка, 6 – стрічка, 7 – додаткова задня поверхня, 8 – від'ємна фаска, 9 – задня поверхня

Швидкість різання визначає стійкість інструменту і впливає на величину потужності різання P_z та крутний момент $M_{кр.}$. Висока швидкість різання створює

високу температуру в зоні обробки та прискорено зношує задню поверхню, особливо на периферії (у куточках), але також покращує процес формування стружки при обробці низьковуглецевої сталі.

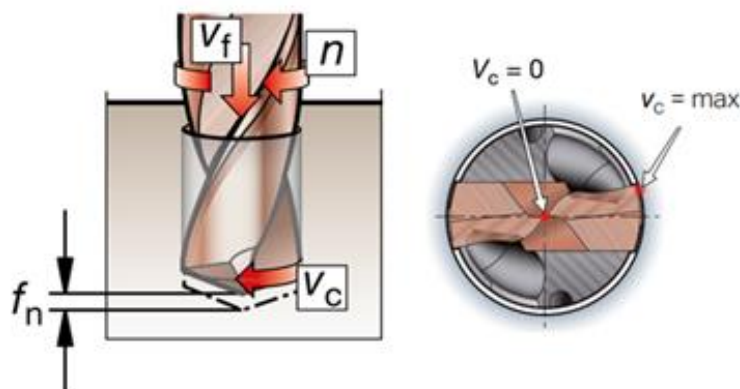


Рисунок 1.11 – Схема швидкості різання для монолітних сверدل із змінними головками: n – частота обертання шпинделя, мм/об.; s або f_n – подача на оберт, мм/об.; $s_{хв.} (v_f)$ – хвилинна подача, мм/хв.

Занизька швидкість різання утворює наріст на різальних кромках, погіршує виведення стружки, збільшення часу на обробку, зростання ризиків поломки свердла і погіршення якості отвору.

Впливу подачі на якість отворів висвітлено у працях викладачів кафедри ВІ, зокрема В.Р. Кобельника, В.В.Крупи [9-21]. Вплив подачі на оберт $s (f_n)$ змінює зусилля подачі F_f (Н), споживчу потужність P_c (кВт) та крутний момент $M_{кр.}$ (Нм). За допомогою величини подачі можна контролювати стружкоутворення, точність отвору, якість обробленої поверхні.

За дослідженнями TaeguTec [58] найбільш доцільним методом отримання отворів від Ø12,5 мм – Ø80 мм і глибиною до 4 – 8 діаметрів є обробка складаними свердлами із ЗТП із різними покриттями. Вони забезпечують дуже високу продуктивність, проте мають ряд недоліків, зокрема викришування пластин, яке зумовлене нерівномірним навантаженням на леза, адже вони асиметричні. Свердла із змінними головками, ж навпаки, поєднують переваги сверدل із монолітних твердосплавних та швидкорізальних сталей, про конструкції яких

описано вище, зокрема, серії свердл TCD, LCD для отворів $\varnothing 6$ мм – $\varnothing 25$ мм включно та 3ED для діаметрів – $\varnothing 12$ мм – $\varnothing 25$ мм (рис.1.12). Останні найбільш продуктивні за рахунок наявності трьох лез. Порошкова металургія дозволяє виготовити головки найрізноманітніших форм, за рахунок чого перетинка у твердосплавних свердлах виходить точною, ніж у свердл із швидкорізальних сталей.

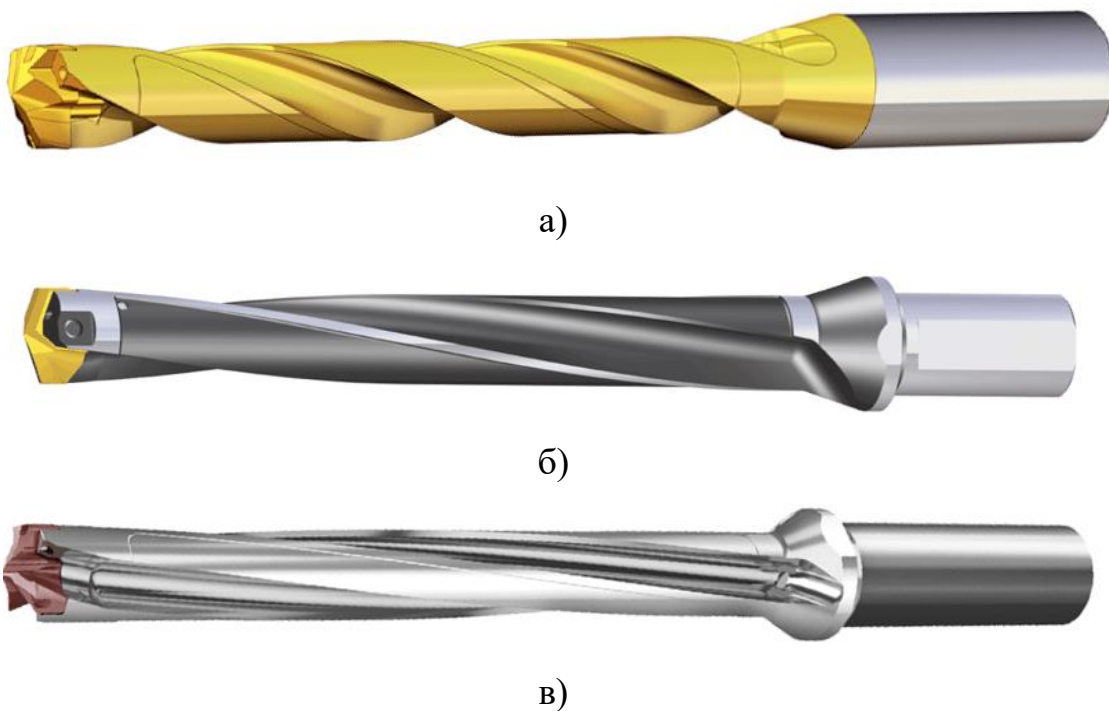


Рисунок 1.12 – Корпуси свердл TCD, LCD для отворів $\varnothing 6$ мм – $\varnothing 25$ мм включно, 3ED – $\varnothing 12$ мм – $\varnothing 25$ мм

Для головок свердл TCD, LCD для обробки нержавіючих та конструкційних сталей використовують сплав марки TT9080, а для групи кольорових сплавів – UF10. Для 3ED використовують сплав марки TT5130, характеристики яких подано у табл. 1.4

На основі цих характеристик, вважаємо необхідним виконати теоретичний розрахунок свердла для визначення силових параметрів, як будуть використанні для статичного аналізу 3D моделі.

Таблиця 1.4 – Режими різання для сплавів TaeguTec

Модель свердла	Сплав	Оброблювальний матеріал	Швидкість різання $V_{\text{різ}}$, м/хв	Подача f_n , мм/об
TCD LCD	TT9080	сталі (P) відпалені	80 – 140	0,25 – 0,45
		сталі (P) загартовані і відпущені	70 – 110	
		сталі (P) відпалені	40 – 80	
		нержавіючі сталі (m)	40 – 70	0,18 – 0,3
		чавуни (K)	90 – 150	0,35 – 0,6
	UF 10	кольорові сплави (N)	90 – 150 – 220	0,45 – 0,7
ED3	TT5130	сталі (P) відпалені	80 – 140	0,4 – 0,6
		сталі (P) загартовані і відпущені	40 – 90	0,35 – 0,5
		сталі (P) відпалені	50 – 90	0,35 – 0,6
		чавуни (K)	50 – 90	0,45 – 0,65

Узагальнивши вищеописане, варто виділити спільні риси свердл усіх виробників. До переваг і недоліків свердл із ЗТГ варто віднести:

Переваги:

1. Універсальність (один корпус підходить для встановлення різних діаметрів твердосплавних головок і як наслідок, зниження витрат на інструмент).
2. надійність та висока продуктивність, навіть після багаторазової зміни ЗТГ;
3. відносно проста та швидка заміна головок з мінімальним перериванням виробничого процесу не виймаючи свердло зі шпинделя;
4. точне поєднання змінної головки з корпусом свердла підвищує жорсткість інструменту, що дозволяє отримати отвори високої якості;
5. точність геометричних параметрів головок (плавна тонка перетинка) характерна для твердосплавних монолітних свердл.

Недоліки:

- Складна конструкція державки тобто корпусу свердла в зоні кріплення головки і саме кріплення.
- У зв'язку із патентним захистом на конструкції, виробники повинні змінювати способи і місця закріплення ЗТГ до корпус.
- Свердла з ЗТГ не забезпечують отворів точніших за 10 – 9 квалітет.

1.3. Висновки, постановка мети та задач дослідження

Узагальнивши усе вищеописане можна зробити декілька коротких, але важливих висновків з врахуванням переваг та недоліків, котрі дозволять сформулювати мету роботи та перелік завдань для її досягнення

- Отвори є одним із найбільш поширених конструктивних елементів деталей машин і суттєво впливають на працездатність та точність вузлів. Форма, розміри, глибина та вимоги до точності й шорсткості поверхні отворів визначають вибір способу їх виготовлення, тип верстатного обладнання та різального інструменту. Свердління залишається основним і найбільш економічно доцільним методом отримання отворів, однак забезпечення підвищеної точності та якості поверхні потребує застосування додаткових технологічних операцій.
- Для точних отворів 6 – 7 квалітетів свердла із ЗТГ забезпечити не можуть, проте дозволяють отримувати отвори 10 – 9 квалітетів. Разом з тим вони, є набагато продуктивнішими за суцільні свердла, що дозволяє їх використовувати для попереднього свердління.
- На відміну від суцільних свердл, які більше схильні до відводу, свердла із ЗТП зберігають вісь, зумовлену геометричною частиною характерною для твердосплавних свердл. Вагомою перевагою свердл із ЗТГ є широкий набір головок та їх швидка заміна, за рахунок чого корпус свердла виконує роль державки подібно до токарних різців.

Виходячи з вищеописаних переваг, недоліків та висновків метою роботи є дослідження параметрів конструкції корпусу свердла збірної конструкції з

подальшим теоретичним описом його міцності, жорсткості та протидії крученню і напружено-деформованого стану 3D моделі корпусу свердла. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання :

- виконати аналіз конструкцій свердл;
- виконати огляд змінних твердосплавних пластин для свердл;
- виконати аналітичний розрахунок свердл на кручення;
- виконати дослідження напружено-деформованого стану 3D моделі свердла.

Об'єктом дослідження – корпус свердла збірної конструкції.

Предмет дослідження – конструктивні параметри свердла.

Методи дослідження. Проведення теоретичних досліджень ґрунтується на інформаційно-патентному пошуку, МСЕ, використання модуля генеративного проектування,

2. ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ РОЗДІЛ

2.1. Методика проектування державки свердла із змінними твердосплавними головками

Для свердління отворів глибиною $8 \times D$ у загартованій і відпущеній сталі суцільними свердлами із твердого сплаву або швидкорізальної сталі діаметрами до 25 мм включно недоцільно. Найкращим варіантом є використання свердл збірної конструкції, про які описано вище. Тверді сплави із різними покриттями довели свою ефективність, особливо у тривалій обробці.

Методика проектування для свердл зазначеної конструкції поєднує розрахунки швидкорізальних спіральних свердл, оскільки корпус виконаний із легованої сталі, а наконечник із твердого сплаву. Тому необхідно враховувати особливості збірної конструкції і для забезпечення міцності необхідно розрахувати діаметр серцевини, яка має бути посиленою, врахувати наявність отворів для підводу ЗОР, які послаблюють конструкцію загалом, величину стрічки, форму і кут нахилу канавок, наявність стужколомів.

До профілю канавки свердла ставляться великі вимоги. Він повинен забезпечити:

- міцність свердла;
- раціональний розподіл металу по всьому перерізу для запобігання тріщин при термічній обробці;
- достатній простір для приміщення стружки;
- правильне утворення стружки на різучій кромці та легке відведення її з канавки.

Основними елементами профілю канавки є товщина серцевини, ширина канавки, форма різучої кромки, криві скруглень. Діаметр серцевини d_0 обирають у залежності від розміру свердла. З метою підвищення міцності діаметр свердла для діаметрів (13 – 80) мм призначають $d_0 = (0,145 - 0,125)$ діаметра свердла.

Для забезпечення міцності свердла діаметр *серцевини* Для свердл з вуглецевої сталі збільшують у напрямку до хвостовика на (1,4 – 1,5) мм, а для свердлів з швидкорізальної сталі (1,6 - 1,8) мм на кожні 100 мм довжини. Ширину канавки зазвичай приймають рівною ширині пера. Різальна кромка для стандартних свердл виконується прямолінійною, що полегшує контроль правильності заточування свердла.

Стрічка. Для зменшення тертя свердла до оброблюваної поверхні і зменшення теплоутворення, на пері по всій довжині роблять виїмку із залишенням невеликої стрічки біля різальної кромки. Стрічка призначена для спрямування в процесі різання. Ширина її повинна бути мінімальною, для свердл діаметром від 1 до 50 мм вона складає (0,2 – 2) мм. Перехідна ділянка (куток) між різальною і калібрувальною ділянками є найбільш напруженою через максимальну швидкість різання на периферії свердла і тепла.

Стружколоми. Для полегшення різання, особливо при важких роботах, наприклад при глибокому свердлінні, свердла діаметром від 12 мм і вище рекомендується оснащати стружколомами (рис.2.1), які подрібнюють стружки, полегшенню її відведення з канавок, зменшенню теплоутворення і дозволяють збільшити режим різання без зниження стійкості свердла.

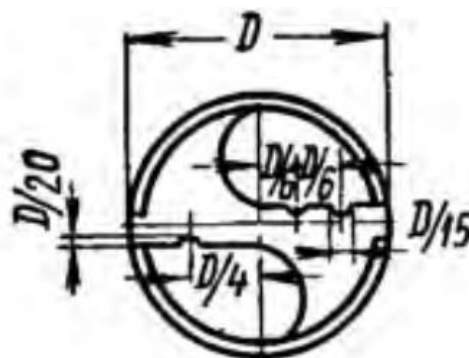


Рисунок 2.1 – Розташування стружколомів

Канавки для стружколомів виготовляються на передній поверхні уздовж усієї робочої частини свердла. Щоб уникнути горбків на оброблюваній поверхні стружколоми на обох різальних лезах зміщують один відносно одного. Для

уникнення заклинювання від стружки форма канавок для стружколомів напівкругла.

Для розрахунку використаємо дані наведені у табл.1.4.

2.2. Розрахунок силових параметрів свердла із ЗТГ

Вихідними даними для розрахунку є:

- діаметр отвору $D = 25$ мм,
- довжина отвору $L = 8 \times D = 8 \times 25 = 200$ мм;
- матеріал деталі загартовані і відпущені сталі (група ISO P1.9):
 $\sigma_p = 1200 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; твердість 350 HB (38 HRC);
- матеріал різальної частини свердла твердий сплав ТТ9080 [29].
 Оскільки характеристики є комерційною таємницею, то приймемо подібні для сплаву Т15К6: $\sigma_{зг} \approx 1200 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$; $\rho = 11,1 - 11,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$,
 твердість 90 HRA (~74 HRC).
- Геометричні параметри: головний кут $2\varphi = 150^\circ$, передній кут $\gamma = 30^\circ$, задній кут $\alpha = 8^\circ$, кут перетинки $\psi = 7^\circ$

Для силового розрахунку використаємо дані наведені у табл.1.4 і у [31]. Оскільки ми хочемо отримати максимальні результати для статичного аналізу конструкції, тому й обрали найтвердіший матеріал деталі для обробки сплавом ТТ9080.

Метою розрахунку є визначення міцнісних характеристик корпусу свердла, тому ми використаємо табличні значення подачі та швидкості від виробника:

$$v_c = 70 \frac{\text{м}}{\text{хв}}, \quad f_n = s = 0.45 \frac{\text{мм}}{\text{об}}.$$

Корпус свердла із ЗТГ розраховують на міцність на кручення, так само як вал (2.1):

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_{кр} \cdot 10^3}{0,2 \cdot [\tau]_{кр}}} \leq d_{свердла, мм} \quad (2.1)$$

де $M_{кр}$ – крутний момент шпинделі верстата, який передається на свердло;

$[\tau]_{кр} = (115 \dots 330) \text{ МПа}$ – допустимі напруження на кручення для легованих конструкційних сталей;

Для визначення і перевірки діаметра свердла та міцність необхідно обчислити необхідну споживчу потужність P_c і зусилля подачі F_t і крутний момент $M_{кр}$ (рис.2.2).

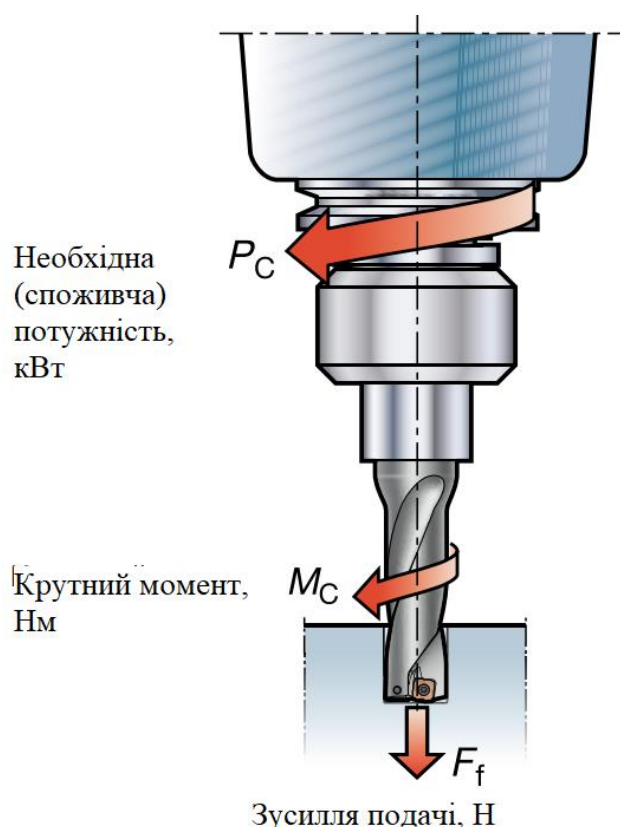


Рисунок 2.2 – Схема прикладання силових факторів

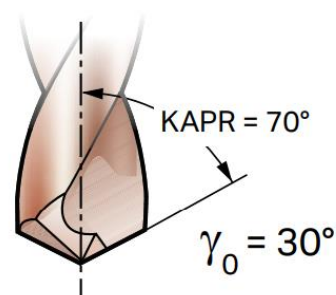


Рисунок 2.3 – Схема головного кута в плані

Виконуємо уточнений розрахунок необхідної потужності [31]:

$$P_c = \frac{f_n \times v_c \times D \times k_c}{240 \cdot 10^3}, \text{кВт} \quad (2.2)$$

де $k_c = k_{c1} \times (f_z \times \sin KARP)^{-m_c} \times \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$ – коефіцієнт, що залежить від питомої сили різання, котрий вибираємо з таблиці [31, Е12]

$k_{c1} = 2000 \text{ Н/мм}^2$ – питома сила різання для загартованої і відпущеної сталі;

$f_z = \frac{f_n}{2}$ – подача на кромку, $f_n = s = 0,45 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$;

$KARP = \varphi = 70^\circ$ - головний кут в плані;

$m_c = 0,25$ – показник;

$\gamma_0 = 30^\circ$ – передній кут;

Тоді

$$k_c = 2000 \times (0,45 \times \sin (70^\circ))^{-0,25} \times \left(1 - \frac{30}{100}\right) = 1822 \text{ Н}$$

Звідки за (2.2) необхідна потужність буде:

$$P_c = \frac{0,45 \cdot 90 \cdot 25 \cdot 1822}{240 \cdot 10^3} = 7.687 \text{ кВт}$$

Зусилля подачі розраховуємо за формулою:

$$F_t = 0,5 \cdot k_c \cdot \frac{D}{2} \cdot f_n \times \sin KARP, \text{Н} \quad (2.3)$$

$$F_t = 0,5 \cdot 1882 \cdot \frac{25}{2} \cdot 0,45 \cdot \sin 70^\circ = 3966 \text{ Н}$$

Попередньо для розрахунку крутного моменту необхідно розрахувати

частоту обертання шпинделя за відомою формулою (2.4):

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \text{ м/хв} \quad (2.4)$$

Звідки

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 90}{3,14 \cdot 25} = 1146,5 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Крутний момент знаходимо за формулою:

$$M_c = M_{\text{кр}} = \frac{P_c \cdot 30 \cdot 10^3}{\pi \cdot n}, \text{ Нм} \quad (2.4)$$

$$M_c = M_{\text{кр}} = \frac{7,687 \cdot 30 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 1146,5} = 64,022 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Свердло із ЗТГ в зоні кріплення має діаметр 30 мм, але параметр міцності матеріалу на кручення $[\tau]_{\text{кр}}$ занижений.

Розраховуємо мінімальний діаметр свердла виходячи із умови міцності на кручення:

$$d = \sqrt[3]{\frac{64,022 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 115}} = 14,067 \text{ мм}$$

Наше свердло відповідає усім вимогам міцності. Виконаємо розрахунок із використанням таблиць Excel для інших діаметрів та оброблювальних матеріалів.

3. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Методика та план проведення наукових досліджень

Статичний аналіз, проводимо з метою дослідження конструкції на міцність, визначення внутрішніх напружень, прогину та коефіцієнта запасу міцності. Основна мета полягає в ідентифікації зон прикладення сил та векторів їх поширення, а також визначенні впливу на інші елементи конструкції. Аналітично провести цей процес неможливо.

Після статичного аналізу важливим етапом нашого дослідження є модальний аналіз для визначення власних частот і форм коливань. Ці типи досліджень виконуємо з використанням САПР Autodesk Inventor 2025. Використання програмних модулів на основі МСЕ актуальне для дослідження об'єктів, які теоретично дослідити неможливо.

У контексті дослідження збірних свердел зі ЗТГ, дослідження напружено-деформованого стану ми фокусуємося на величині прогину головки свердла під час свердління.

3.2. Дослідження 3D – моделі свердла із ЗТГ

Для проведення статичного аналізу необхідно створюємо 3D модель корпусу свердла, згідно із вхідними даними. Особливістю цього дослідження є те, що ми досліджуємо усю збірку.

Без статичного аналізу конструкції не виконується жодна поректно-конструкторська робота. Важливо визначити поведінку моделі, внутрішні напруження та деформації, які виникають під впливом силових факторів або моментів. Основні цілі проведення статичного аналізу:

- визначення напружень: статичний аналіз показує розподіл напружень в різних частинах конструкції, що важливо для збереження міцності, безпеки та надійності конструкції.
- прогин конструкції: статичний аналіз визначити прогин частини або всієї конструкції під впливом силових навантажень. Це важливо для

уникнення неправильного функціонування конструкції та забезпечення її стійкості.

- визначенні коефіцієнта запасу міцності.
- оптимізація конструкції: результати статичного аналізу можуть стати передумовою для оптимізації конструкції., що включає в себе зміни форми, розмірів або матеріалів з метою покращення ефективності та ціни виробу.

Статичний аналіз показує поведінку конструкції під зовнішніми навантаженнями та приймати обґрунтовані рішення щодо її конструкції та підсилення, забезпечуючи безпеку та ефективність використання.

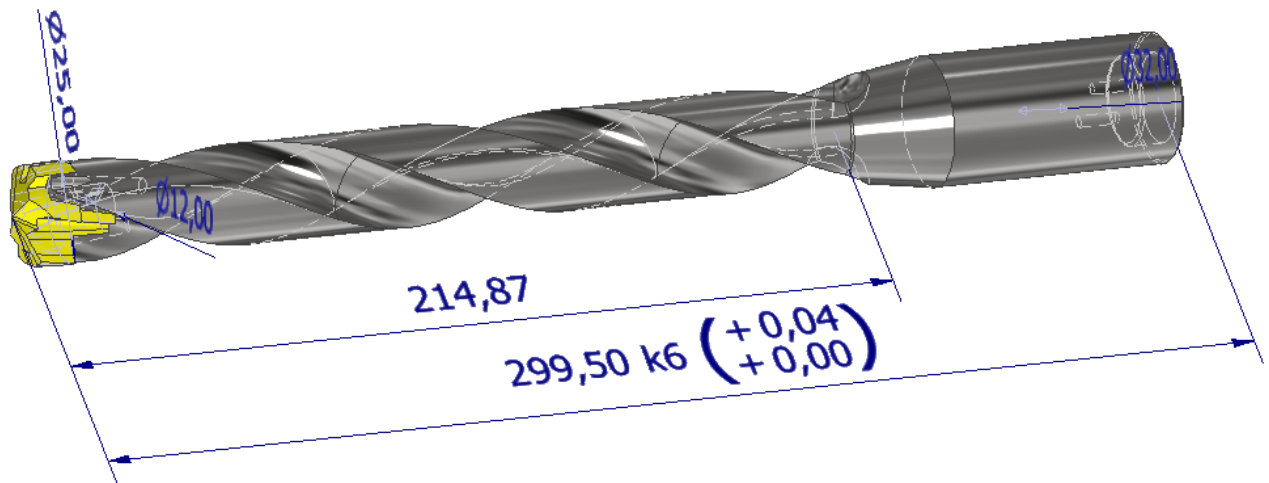


Рисунок 3.1 – 3D модель збірки свердла TCD

Виконання статичного аналізу збірки особливо важливе, оскільки дозволяє побачити, як саме взаємодіють деталі.

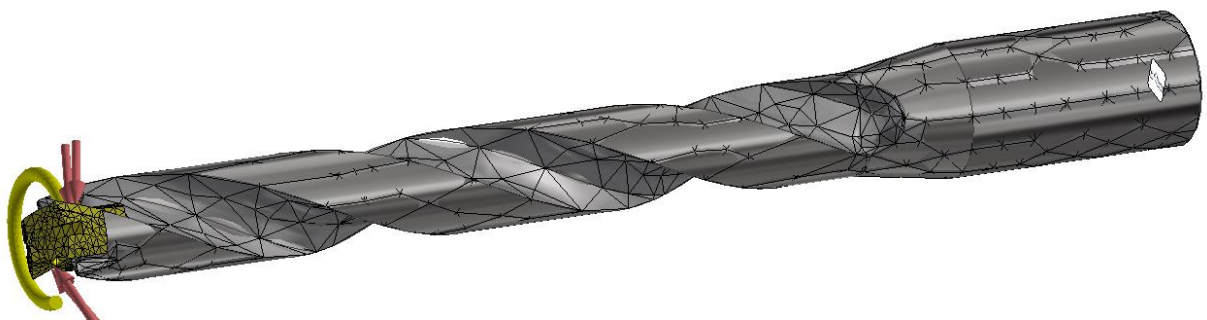


Рисунок 3.2 – Сітчаста модель і прикладені силові фактори

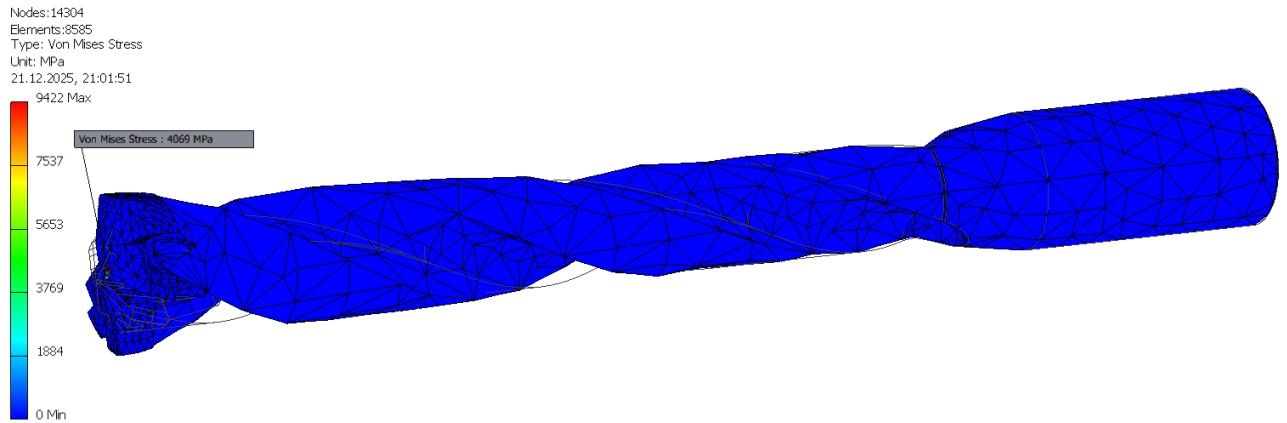


Рисунок 3.3 – Напруження за Мізесом

Еквівалентне напруження Мізеса враховує ефективність напружень, що пластично деформують модель. У певних випадках пластичної деформації матеріали можуть втратити свою форму без повернення в початковий стан. Як бачимо з рис.3.3 тільки не велика точка в області перетинки піддається напруженням. Для зручності виведено мітку. Це при тому, що для корпусу заданий матеріал вуглецева сталь. Сили прикладені до пер імітують протидію металу.

Напруження по фон Мізесу дозволяють оцінити критичні умови для пластичної деформації, не звертаючи уваги на конкретні напрямки головних напружень, і є корисним для визначення межі міцності матеріалу за умови пластичної деформації.

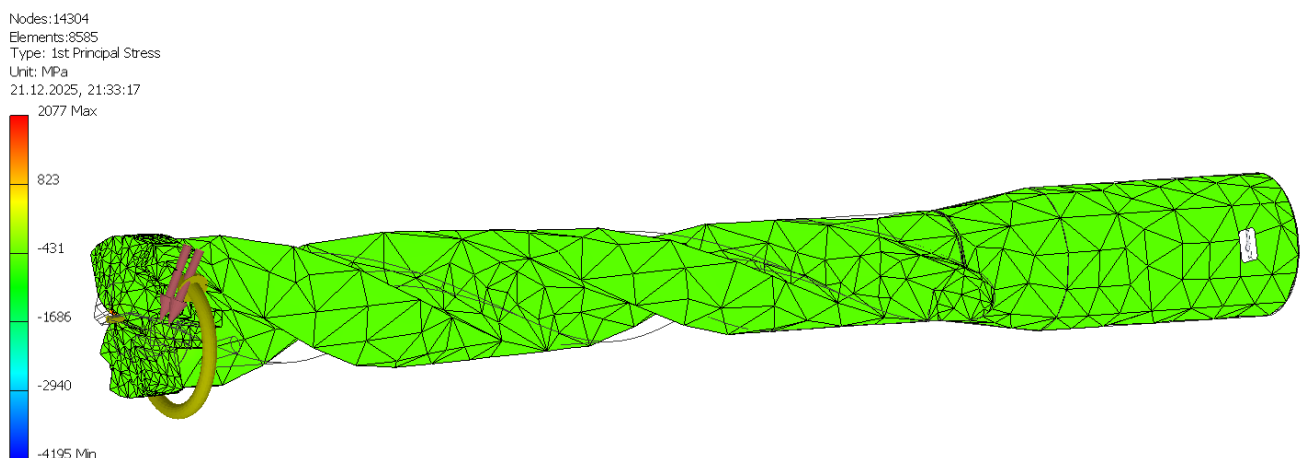


Рисунок 3.4 – Діаграма 1- го напруження

У контексті механіки матеріалів і теорії пружності розглядаються головні напруження, які визначаються за допомогою тензору напружень.

Головні напруження - це три максимальні інтенсивності напружень в певній точці тіла, орієнтовані вздовж головних напрямів. Вони позначаються як σ_1 , σ_2 та σ_3 . Перше напруження (σ_1) є максимальним серед цих головних напружень. Воно вказує на максимальне розтягнення або стискання в матеріалі в даній точці. Головні напруження грають важливу роль у визначенні міцності матеріалу та в прогнозуванні його поведінки під навантаженням.

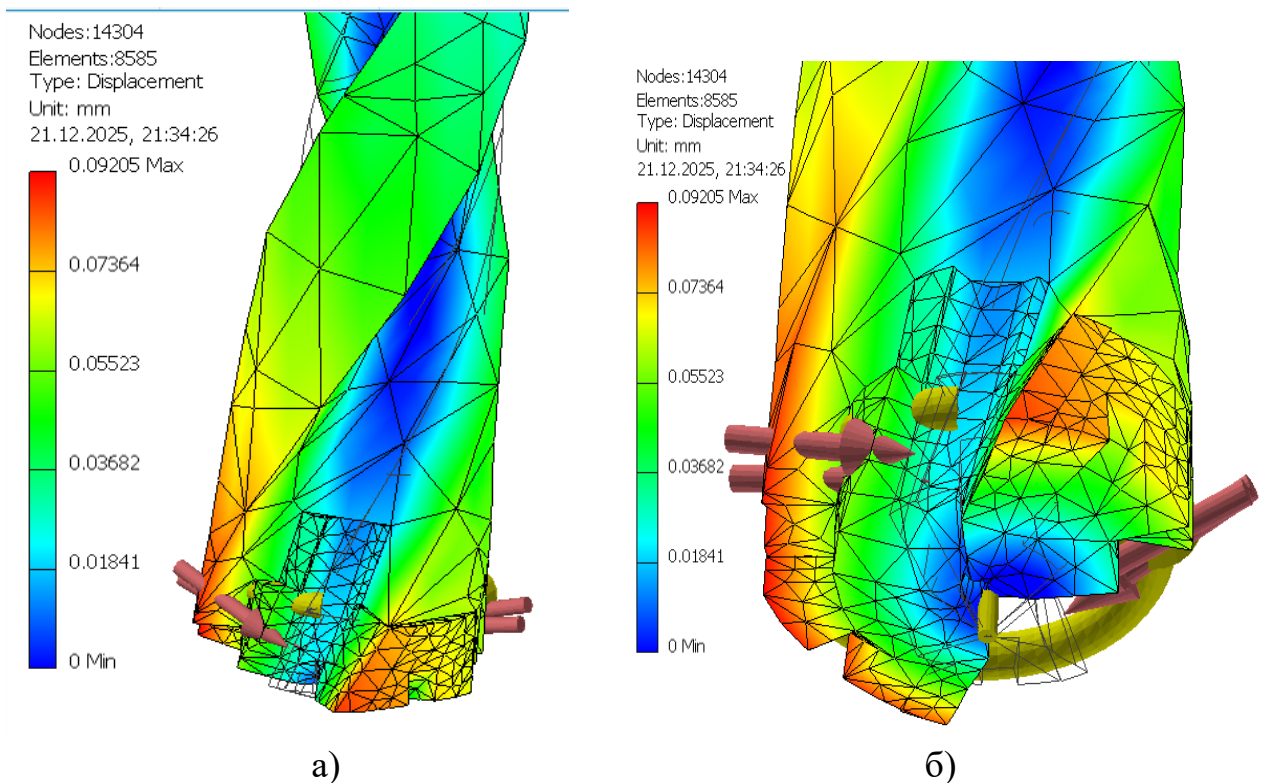


Рисунок 3.5 – Діаграм зміщення корпусу свердла в зоні різання

Важливим параметром при виконанні статичного аналізу є коефіцієнт запасу міцності, який завжди перевищує у декілька разів. При мінімальних вимогах дорівнювати 2 – він може бути рівним близько 20 і вище. Це означає 20 кратний запас міцності.

Іншим цікавим параметром є зміщення. Це важливий параметр, котрий для нас інженерів-верстатників може свідчити про причину виникнення похибок, якості оброблювальної поверхні та форми отвору.

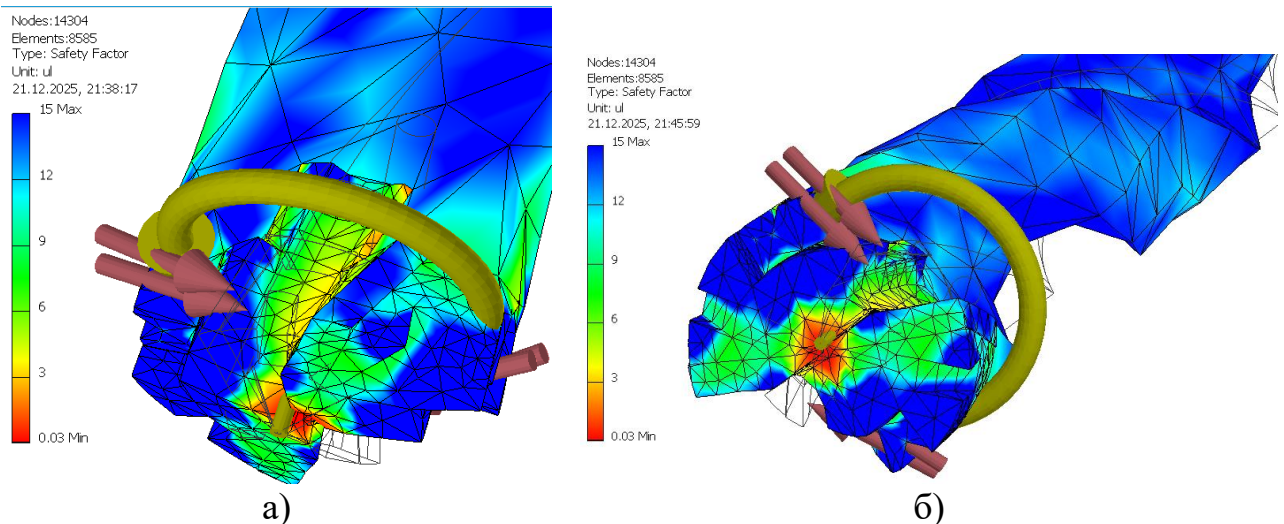


Рисунок 3.5 – коефіцієнт запасу міцності на перетинці при дії осової сили

$$F_t = 4000 \text{ Н і } M_{кр} = 1000 \text{ Н/мм}^2$$

Виконуємо модальний аналіз для визначення частот власних коливань. Він є важливим етапом інженерного дослідження конструкцій та механізмів. Проводиться він після статичного аналізу та орієнтований на вивчення динамічної поведінки системи. Основною метою модального аналізу є визначення власних частот і форм коливань конструкції.

Власні частоти. Модальний аналіз дозволяє визначити ті частоти, при яких конструкція приймає коливання від власних внутрішніх енергетичних резонансів. Це дозволяє уникнути роботи конструкції при цих частотах, що може призвести до небажаних наслідків.

Форми коливань: модальний аналіз також вказує на форми або шаблони, в яких конструкція коливається при різних частотах. Це інформація корисна для визначення впливу окремих частин конструкції на загальну динамічну стійкість.

Розрахунок амплітуд і фаз. Оцінювання амплітуд коливань: модальний аналіз може вказати на амплітуди коливань для кожної форми коливань та їх взаємодії. Це дозволяє інженерам оцінити потенційний вплив динамічних навантажень.

Взаємодія з окремими модами. Деякі конструкції можуть мати складні форми коливань, які взаємодіють між собою. Модальний аналіз дозволяє вивчати цю

взаємодію, що важливо при проектуванні складних систем.

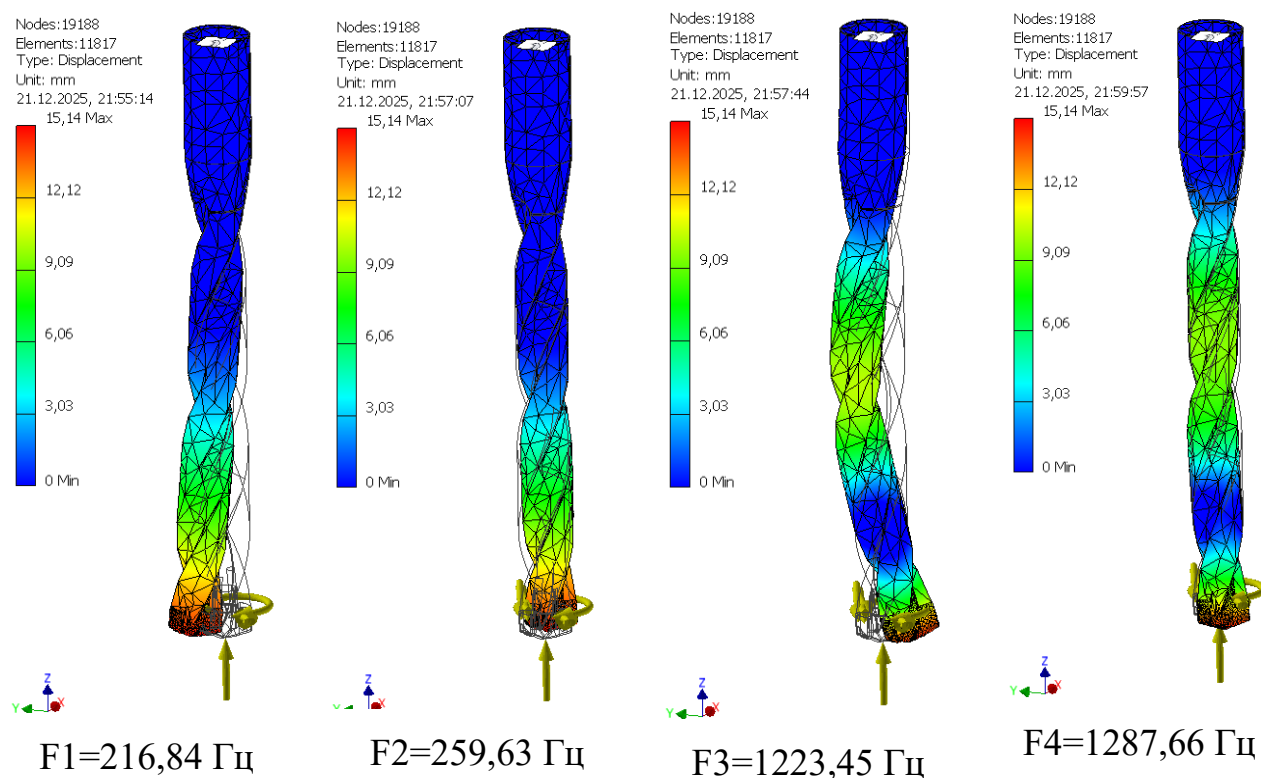


Рисунок 3.6 - частоти F1 - F4

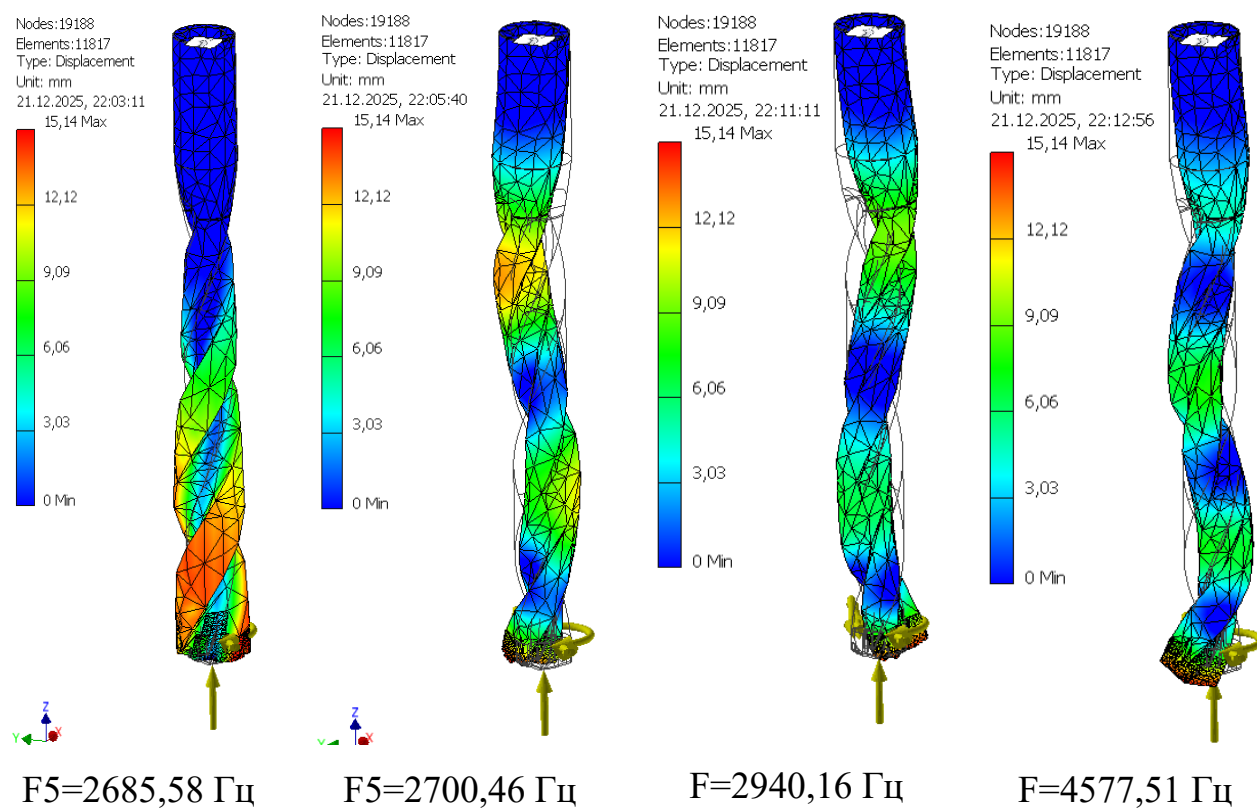


Рисунок 3.7 – частоти F5 = F7

Визначення динамічних зон послаблення. Оцінювання зон, які піддаються коливанням. Знання про форми коливань і власні частоти дозволяють визначити частини конструкції, які можуть бути особливо вразливими до динамічних навантажень.

Модальний аналіз є ключовим для розуміння динамічної поведінки конструкції та забезпечення її оптимальної працездатності та довговічності під динамічними умовами експлуатації. Результати цього аналізу дозволяють інженерам уникати небезпечних режимів коливань і оптимізувати конструкцію для досягнення найкращих динамічних характеристик

3.3. Обговорення та аналіз отриманих результатів* (*оприлюднені результати досліджень подаються в додатках)

В процесі виконання магістерського дослідження і проведених інформаційно-патентних пошуків, які передбачали вивчення перспектив використання технологій генеративного проектування та можливості впровадження їх у виробництві деталей верстатів було опубліковано тези [25]:

А.В. Гагалюк, В.С. Нікітюк. Аналіз досліджень конструкції свердел з центральним твердосплавним наконечником для свердління отворів глибиною $8 \times D$. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 10-12 грудня 2025 року – Тернопіль: ТНТУ. – С. 69.

3.4. Висновки за результатами наукового дослідження

На основі виконаного моделювання можна зробити наступні висновки:

1. Свердла із ЗТП є чудовим інструментом, який має значно ширші технологічні можливості, ніж звичайні двох перові спіральні свердла. Збірні свердла можуть мати різні конфігурації пластин, які дозволяють їм пристосовуватися до конкретних умов свердління. Наприклад, пластини можуть бути розташовані в специфічному порядку для

забезпечення кращої стійкості і зносостійкості.

2. Збірні свердла із пластинами із твердого сплаву можуть застосовуватися в різноманітних матеріалах, від м'яких до дуже твердих. Залежно від конкретного типу твердосплавного матеріалу і конструкції свердла, вони можуть бути ефективними для свердління отворів різного діаметру і глибини. Довговічність і вартість: Через високу твердість твердосплавних матеріалів, збірні свердла можуть бути довговічними. Однак вони можуть бути дорожчими порівняно зі звичайними свердлами, і їх вартість може залежати від використаного твердосплавного матеріалу та конструкції.
3. Збірні суцільні свердла можуть мати покриття, які забезпечують стійкість до зносу, що особливо важливо при обробці твердих і абразивних матеріалів. Проте Для задоволення високих вимог до точності і контролю глибини свердління, суцільні свердла можуть бути використані для створення отворів з високою точністю.
4. У деяких випадках суцільні збірні свердла можуть бути більш економічно вигідними порівняно зі збірними свердлами із пластинками із твердого сплаву, особливо якщо необхідна велика кількість однотипних отворів. Загалом, вибір між збірними суцільними свердлами із пластинками із твердого сплаву залежить від конкретних вимог завдання та умов обробки матеріалу. У багатьох випадках обидва типи свердл можуть знаходити своє застосування в металообробці.

Рекомендації:

1. Опрацювавши літературу можемо зауважити, що свердла із ЗТГ поєднують найкращі характеристики від обох типів свердл. Використання збірних свердл ефективне, якщо дотримуватися обґрунтованих рекомендацій.
2. Вони потребують ефективного охолодження і змащення під час свердління. Використання відповідних рідин зменшить тертя і відведе тепло, яке виникло під час процесу.

3. Встановлення оптимальних умов різання відповідно до типу матеріалу і розміру свердла. Неправильні налаштування призведуть до перегріву і зносу інструмента. Головки збірних свердл із спеціальними покриттями розроблені спеціально для обробки відповідних матеріалів, підвищують продуктивність. Ї
4. Зазвичай, після випадкової поломки свердл в отворах подальша експлуатація була неможлива, що потребувало нового інструменту. Конструктивні особливості суттєво здешевлюють свердло, адже є можливість швидкої заміни тих ділянок, які зазвичай піддаються руйнуванню. Таким чином решта тіла свердла залишається працездатною.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці при роботі на свердлильних верстатах.

Дія інструкції з охорони праці при роботі на свердлильному верстаті поширюється на всіх працівників навчального закладу, які при виконанні своїх посадових обов'язків використовують свердлильний верстат (інструкторів з праці, вчителів технології, педагогів додаткової освіти, робітників та ін.).

До роботи на свердлильних верстатах допускаються особи:

- які досягли 18 років, пройшли обов'язковий періодичний медичний огляд та не мають медичних протипоказань для роботи на свердлильних верстатах;
- отримали спеціальне навчання або мають відповідний досвід роботи;
- пройшли вступний інструктаж з електробезпеки з присвоєнням III групи допуску;
- ознайомлені з даною інструкцією, з вимогами інструкції з охорони праці у відповідному приміщенні (місці установки верстата).

Працюючий на свердлильному верстаті зобов'язаний суворо дотримуватися Правил внутрішнього трудового розпорядку та режиму роботи загальноосвітнього навчального закладу.

Під час роботи на свердлильному верстаті повинен використовуватися наступний спецодяг та засоби індивідуального захисту: халат бавовняний, берет, захисні окуляри від попадання стружки та пилу в очі. На підлозі біля верстата обов'язково має бути дерев'яна решітка з діелектричним килимком.

Працюючий на свердлильному верстаті зобов'язаний дотримуватися правил пожежної безпеки, знати місця розташування первинних засобів пожежогашіння.

Працюючий на верстаті зобов'язаний знати місце розташування аптечки та вміти надавати першу долікарську допомогу потерпілому. В процесі виконання роботи працівник зобов'язаний дотримуватися правил носіння спецодягу, користування засобами індивідуального і колективного захисту, дотримуватися правил особистої гігієни, утримувати в чистоті своє робоче місце. Свердлильний

верстат повинен бути обладнаний захисним огородженням, спеціальним склом або корпусом. Корпус свердлильного верстата повинен бути заземлений. Робоче місце і робоча зона повинні мати хороше освітлення. Світло не має бути занадто яскравим, щоб не сліпити очі співробітнику, який виконує роботу. Для зміни свердл, очищення верстата, прибирання робочого місця необхідно використовувати допоміжні інструменти (ключ, гачок, щітка, совок, скребок тощо). Про всі несправності свердлильного верстата працівник зобов'язаний негайно повідомити черговому адміністратору установи, зробити запис у журналі. У разі отримання травми працівник зобов'язаний негайно проінформувати про те, що трапилося, чергового адміністратора та шкільну медичну сестру, при необхідності – самостійно надати долікарську допомогу. За невиконання правил інструкції з охорони праці при роботі на свердлильному верстаті вчитель технології несе персональну відповідальність згідно з чинним законодавством.

Вимоги охорони праці перед початком роботи на свердлильному верстаті

Перед початком роботи на свердлильному верстаті необхідно надіти спецодяг, ретельно заправити волосся під головний убір та перевірити справність засобів індивідуального захисту (захисні окуляри; діелектричні килимки). Добре оглянути робоче місце, позбутися зайвих предметів, що заважають, переконатися у справності роботи системи вентиляції. Провести зовнішній огляд верстата і переконатися:

- у вільному доступі до пускового пристрою;
- працездатності гальмівного пристрою і блокувань (блокування має забезпечувати неприпустимість самостійного включення верстата при відкритій дверці огорожі);
- у справності педального механізму і маслосистеми (потрібної кількості масла в насосі, перевірити, чи немає витоку мастила);
- у правильній освітлення свого робочого місця.

Короткочасним включенням перевірити справність роботи свердлильного верстата. Якщо була виявлена несправність верстата або робочої системи вентиляції, працівник зобов'язаний негайно сповістити інженера з охорони праці, заступника директора з АГР, а за їх відсутності на робочому місці – директора школи або чергового адміністратора та зробити відповідний запис у журналі реєстрації заявок. Перед підключенням верстата до електромережі, при необхідності, стати на діелектричний килимок (якщо покриття підлоги виконане із струмопровідного матеріалу). Забороняється включати верстат в електричну мережу мокрими і вологими руками.

Не приступати до виконання роботи у разі виявлення відхилень від правил безпеки робочого місця, встановлених у цьому розділі інструкції, а також при неможливості виконання зазначених у даному розділі підготовчих до роботи дій.

Вимоги охорони праці під час роботи на свердлильному верстаті

Під час роботи на свердлильному верстаті необхідно суворо дотримуватися справжньої інструкції з охорони праці при виконанні робіт на свердлильному верстаті.

Наявність напруги в електромережі перевіряти тільки спеціальним покажчиком напруги. Стежити за справною роботою верстата, системи вентиляції, цілісністю ізоляції та наявності неушкодженого заземлення.

Працюючий на свердлильному верстаті зобов'язаний:

- виконувати роботу на свердлильному верстаті тільки у захисних окулярах та при включеній витяжній вентиляції;
- надійно закріплювати оброблювану деталь затискачами, а не тримати її руками;
- подачу свердла на деталь проводити плавно, без ривків;
- при обробці деталей великої довжини (понад 1,5 м.) користуватися спеціальними підставками;
- стружки із висвердленого отвору видаляти тільки за допомогою спеціальної щітки;

- не видаляти стружку при працюючому верстаті;
- матеріали та деталі акуратно складати у встановленому місці так, щоб вони не заважали подальшому виконанню роботи;
- не зупиняти і не гальмувати руками вимкнений, але ще продовжуючий обертатися шпиндель свердлильного верстата;
- особливу увагу і обережність приділяти наприкінці свердління (при виході свердла з матеріалу заготовки, зменшити подачу).

Під час виконання роботи на свердлильному верстаті забороняється:

- 1) перемикати електричні роз'єми при включеному електроживленні;
- 2) торкатися проводів та інших струмоведучих частин, які знаходяться під напругою;
- 3) продовжувати роботу на верстаті в разі його несправності, іскріння, задимлення, порушення ізоляції та заземлення;
- 4) закривати верстат папером, тканиною та сторонніми предметами, що може призвести до його несправності або отриманні травми робочим;
- 5) працювати на верстаті в не призначених для даного виду робіт рукавичках або рукавицях;
- 6) гальмувати руками патрон або обертове свердло верстата;
- 7) гальмувати шпиндель натисканням деталі;
- 8) нахилити голову близько до обертового шпинделя верстата і свердла;
- 9) тримати руками деталь при свердлінні, деталь повинна бути закріплена лише лежцями;
- 10) охолоджувати свердло під час роботи верстата за допомогою мокрих ганчірок;
- 11) залишати свердлильний верстат без нагляду, відкривати та знімати захисні огороження;
- 12) проводити самостійно розкриття та ремонт свердлильного верстата;
- 13) здувати стружку з верстата або прибирати її руками;
- 14) виконувати прибирання над і під працюючим свердлувальним

верстатом або в небезпечній близькості від його рухомих частин;

15) протирати рубильники та інші вимикачі струму;

16) збирати відходи, папір і промаслене ганчір'я в ящики, призначені для відходів ганчір'я, (для кожного виду відходів повинен бути окремий ящик).

Використання іонізаторів повітря допускається в приміщенні майстерні тільки під час перерв у роботі та за відсутності людей.

При відкритті вікон, необхідно простежити, щоб не було протягів, які можуть призвести до розбиття або пошкодження скла.

Вимоги охорони праці після закінчення роботи на свердлильному верстаті

Після закінчення роботи на свердлильному верстаті працівник зобов'язаний:

- відвести свердло від оброблюваної заготовки і відключити електроживлення в послідовності, встановленій інструкцією з експлуатації з урахуванням характеру виконуваних робіт;
- привести в порядок робоче місце, очистити верстат, устаткування біля верстата, проходи від стружок і сміття за допомогою спеціальної щітки;
- скласти у спеціальну шафу інструмент і пристосування, які використовувалися під час роботи на верстаті;
- прибрати у відведене місце засоби індивідуальної захисту;
- почистити спецодяг і взуття, прибрати в призначену для спецодягу шафу,
- ретельно вимити руки з милом.

Перекрити крани з водою, щільно закрити всі вікна, вимкнути освітлення.

При виявленні несправності обладнання, порушення цілісності вікон, негайно поставити до відома заступника директора з АГР, за його відсутності на робочому місці - чергового адміністратора школи та зробити відповідний запис у журналі заявок.

4.2. Безпека при надзвичайних ситуаціях стосовно роботи на свердлильних верстатах та відповідні заходи для її забезпечення

До небезпечних факторів при роботі на свердлильному верстаті відносяться:

- фізичні (висока напруга в електричній мережі; рухомі й обертові частини верстата; наявність задилок на заготовках, відлітаюча стружка при обробці крихких матеріалів; сильний шум; вібрація; система вентиляції);
- хімічні (пил);
- психофізіологічні (напруга уваги).

При виникненні аварійних ситуацій, негайно зупинити свердлильний верстат натисканням кнопки «стоп».

Якщо при роботі верстата відбувається перегрів двигуна, необхідно відключити його і дати охолонути. Охолоджувати двигун водою або вологою ганчіркою забороняється.

При появі різного стуку, вібрації, або зміни характерного шуму, перегріві робочого інструменту (свердла, підшипників), появі запаху горілого або диму, поломки свердла, а також при несправності заземлення корпусу верстата, негайно припинити роботу, відвести свердло від заготовки і відразу вимкнути свердлильний верстат. Повідомити про несправності заступнику директора з АГР, а в разі його відсутності – черговому адміністратору або директору школи. Роботу дозволяється продовжувати тільки після усунення несправності.

Працівник зобов'язаний вміти надавати долікарську допомогу. Така допомога надається негайно, на місці події у правильній послідовності. На початку необхідно усунути джерело травмування (вимкнути двигун, зупинити механізм тощо). Надання першої допомоги треба починати з самого головного, що загрожує здоров'ю або життю людини (при сильній кровотечі накласти джгут, вкласти записку із зазначенням часу накладення джгута, а потім перев'язати рану; при наявності закритого перелому – накласти шину; при відкритих переломах спочатку слід перев'язати рану, накласти шину; при опіках – накласти суху пов'язку), потім викликати швидку допомогу. При підозрі на ушкодження хребта,

покласти потерпілого на тверду поверхню та, якомога швидше, транспортувати до найближчого медичного закладу для надання допомоги.

Якщо сталося загоряння устаткування, негайно відключити свердлильний верстат від електроживлення, повідомити до пожежної охорони, директорів навчального закладу (за його відсутності – іншій посадовій особі), після чого приступити до гасіння пожежі наявними засобами, це може бути вогнегасник, пісок.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Отвори є одним із найбільш поширених конструктивних елементів деталей машин і суттєво впливають на працездатність та точність вузлів. Форма, розміри, глибина та вимоги до точності й шорсткості поверхні отворів визначають вибір способу їх виготовлення, тип верстатного обладнання та різального інструменту. Свердління залишається основним і найбільш економічно доцільним методом отримання отворів, однак забезпечення підвищеної точності та якості поверхні потребує застосування додаткових технологічних операцій.
2. Для точних отворів 6 – 7 квалітетів свердла із ЗТГ забезпечити не можуть, проте дозволяють отримувати отвори 10 – 9 квалітетів. Разом з тим вони, є набагато продуктивнішими за суцільні свердла, що дозволяє їх використовувати для попереднього свердління.
3. На відміну від суцільних свердл, які більше схильні до відводу, свердла із ЗТП зберігають вісь, зумовлену геометричною частиною характерною для твердосплавних свердл. Вагомою перевагою свердл із ЗТГ є широкий набір головок та їх швидка заміна, за рахунок чого корпус свердла виконує роль державки подібно до токарних різців.
4. Застосування свердл із ЗТГ дозволяє використовувати більш агресивні режими різання, що сприяє зростанню продуктивності приблизно на 20%, а використання свердл із трьохперовими ЗТГ піднімає продуктивність ще на 20%, що в кінцевому результаті здешевлює обробку і вартість технологічної операції загалом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: монографія/ [Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Шевченко О.В., Волошин В.Н.]. – К.: – Тернопіль: Тернограф, 2011. – 692 с.
2. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці: Навчальний посібник/ Н. С. Равська, П. Р. Родін, Т. П. Ніколаєнко, П. П. Мельничук. – Ж.: ЖІТІ, 2000. – 332с.
3. Щигельський Д.П. Дослідження використання саморегульованих свердел для роботи на багатошпиндельному свердлильному верстаті : кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю "133 — галузеве машинобудування" / Д.П. Щицельський. — Тернопіль: ТНТУ, 2022. — 94 с.
4. Гагалюк А.В., Паливода Ю.Є. Процеси виготовлення машин. Частина 1: технологічні основи машинобудування : навчальний посібник Тернопіль: Осадця Ю. В., 2025. – 308 с.
5. Гагалюк А.В., Смалій Ю.С., Смалій О.В. Обґрунтування параметрів розвертки для формування поверхневого шару посадкових отворів. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»* : зб. тез доп., м.Тернопіль, 11–12 груд. 2024 р. Тернопіль, 2024. С. 96. URL: https://m.tntu.edu.ua/storage/pages/00001070/TNTU_Aktualni_zadachi_suchasnyh_tehnologiy_2024.pdf
6. Крупа В.В. Теорія технічних систем: особливості побудови, створення та розвитку : навч. посіб. Тернопіль : ФОП Осадця, 2023. 308 с.
7. Крупа В.В., Кобельник В.Р. Призначення режимів різання при точінні табличним методом : Навчальний посібник - практикум. Тернопіль : ФОП ПАЛЯНИЦЯ, 2025. 144 с
8. Substantiation of parameters for three-cutter boring head with allowance and feed distribution and asymmetric cutter position / Petro Kryvyi, Volodymyr Krupa, Volodymyr Kobelnyk, Yaroslav Kosiv. // Scientific Journal of TNTU. —

- Ternopil : TNTU, 2019. — Vol 96. — No 4. — P. 57–69.
9. V. Krupa, N. Tymoshenko, V. Kobelnyk, I. Petrechko, Probability-statistical estimation method of feed influence on the tangential cutting force under turning, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 114/1 (2022) 22-31.
 10. Кобельник В.Р. Використання методу ітерацій для дослідження точності подач металорізальних верстатів / Кобельник В.Р, Крупа В.В., Тимошенко Н.М. // *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези допов.* – Краматорськ: ДДМА, 2018. С. 78-80.
 11. Кобельник В.Р. Ефективність керованого процесу свердління наскрізних отворів шляхом забезпечення зміни подачі / В.Р. Кобельник // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2012. – Вип. № 31. – С. 47–56.
 12. Кобельник В.Р. Жорсткість вертикально-свердлильних верстатів / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки.* – Житомир : ЖДТУ, 2007. – Вип. № 1 (40). – С. 34–40.
 13. Кобельник В.Р. Методика дослідження кінематичної точності механізму подач вертикально-свердлильних верстатів на прикладі верстата моделі 2Н118 / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні* : зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – Вип. 8. – С. 99–108.
 14. Кобельник В.Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: дис. канд. техн. наук: 05.03.01: / Кобельник Володимир Романович; Терноп. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. - Т., 2013. - 21 с.
 15. Кривий П.Д. Вплив головного заднього кута спірального свердла на осьове зусилля і крутний момент при свердлінні // П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник / *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : зб. наук. праць. – Краматорськ – Київ, 2006. – Вип. № 19. – С. 58–64.
 16. Кривий П.Д. Вплив головного заднього кута спірального свердла на осьове

- зусилля і крутний момент при свердлінні // П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник / Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ – Київ, 2006. – Вип. № 19. – С. 58–64.
17. Кривий П.Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення зменшення задирок при наскрізному свердлінні / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник // Всеукраїнська молодіжна конференція «Машинобудування України очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво, 22 – 25 жовтня 2012 р. : тези допов. – К. : КПІ, 2012. – Том 1. – С. 71–73.
 18. Кривий П.Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення процесу свердління наскрізних отворів / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2011. – Вип. № 28. – С. 77–85.
 19. Кривий П.Д. Методи вимірювання головного заднього кута спірального свердла / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник, В.І. Продан, В.Г. Яковлєв // Науковий вісник ХДМА : Науковий журнал. – Херсон : ХДМА, 2012. – № 2 (7). – С. 145–155.
 20. Кривий П.Д. Про характер зміни подачі при виході інструменту із тіла заготовки в процесі свердління наскрізних отворів / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник, М.І. Кузьмін // Вісник ТНТУ: Науковий журнал. – Тернопіль : ТНТУ, 2012. – № 4 (68). – С. 114–127.
 21. Уточнений метод апіорно-емпіричних функцій визначення закону розподілу та його характеристик на основі малої вибірки / П.Д. Кривий, Н.М. Тимошенко, В.О. Дзюра, В.Р. Кобельник // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 132–133.
 22. Шанайда В.В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках / В.В. Шанайда. Тернопіль: Видавництво ТДТУ, 2001. – 163 с.

23. G.G.Lakić, D.Kramar, J.Kopač. Metal Cutting. Theory and Applications. Banja Luka and Ljubljana, 2014. 215 p.
24. Я.О. Танавський, А. В. Гагалюк. Дослідження параметрів конструкції багатошпиндельної свердлильної головки. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». – Тернопіль, 6-7 грудня 2023 року. С. 83.
25. П.С. Нікітюк, А.В. Гагалюк. Дослідження параметрів свердла збірної конструкції. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 6-7 грудня 2023 року – Тернопіль: ТНТУ. – С. 84.
26. А.В. Гагалюк, В.С. Нікітюк. Аналіз досліджень конструкції свердел з центральним твердосплавним наконечником для свердління отворів глибиною $8 \times D$. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 10-12 грудня 2025 року – Тернопіль: ТНТУ. – С. 69.
27. SPADE-RUSH Head. URL: <https://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Grade.aspx?grade=TT9080&item=6300967&fnum=11025&mapp=DR&app=402>
28. TaeguTec. Hole Making. Drilling. <https://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Products.aspx?mapp=DR&app=77>
29. TaeguTec. Сплав TT9080. URL: <https://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Grade.aspx?grade=TT9080&item=4207959&fnum=1506&mapp=DR&app=77>
30. Каталог Sandvik-Coromant. Свердління (посвбник). URL: <https://polidecktech.com/all-catalogs/catalog-sandvik-coromant/>
31. Sandvik Coromant. Технологія обробки металів різанням. URL: https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2022/02/C-2920-40_compressed.pdf
32. Каталог Gühring. Interchangeable insert drilling systems for steel processing. URL: <https://guehring.com/en/products/drilling-tools/>

33. Каталог Dormer&Pramet. Holemaking 2021 – 2022. URL:
<https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2021/12/Dormer-Pramet-%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BA%D0%B0-%D0%BE%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B2-1.pdf>
34. Каталог Allied Machine & Engineering Company. Section A20. URL:
<https://nikas.com.ua/skachaty-katalog/NIKA-Allied-Machine-Drill.pdf>
35. Seco. Каталог + технічне керівництво 2020.1 URL:
<https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2021/12/2020.1-%D0%9E%D0%B1%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BA%D0%B0-%D0%BE%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B2-.pdf>
36. HNCarbide. Replaceable Tip Drill. <https://huanatools.com/replaceable-tip-drill/>
37. Kyocera Cutting Tools 2019-2020. <https://nikas.com.ua/skachaty-katalog/NIKA-Kyocera-2020.pdf>
38. Iscar. Holemaking. URL:
<https://www.iscar.com/eCatalog/Products.aspx?mapp=DR&app=77>
39. Kennametal. KenTIP™ FS Modular Drill System. URL:
<https://www.kennametal.com/ua/en/products/metalworking-tools/holemaking/modular-drills/kentip-fs-modular-drill-system.html>
40. Jiang, A., Liu, Z., & Zhao, J. (2024). A Novel Design Method for Chip Flute of Indexable Insert Drill Used at Large Drilling Depth. Metals, 14(12), 1351. <https://doi.org/10.3390/met14121351>
41. Zimon, M., Brock, G., Biermann, D. (2023). Експериментальні дослідження глибокого свердління отворів у Ti-6Al-4V за допомогою спіральних свердел. У: Liewald, M., Verl, A., Bauernhansl, T., Möhring, НС. (ред.) Виробництво на передовій технології. WGP 2022. Конспект лекцій з виробничої інженерії. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18318-8_23,

ДОДАТКИ