Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інженерної механіки та робототехніки
Кафедра нафтогазових машин та обладнання

Гулимчук Роман Любомирович

УДК 622.24.051.62

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ВИКОНАНЬ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ОЗБРОЄННЯ PDC ДОЛІТ

(назва роботи)

Обладнання нафтових і газових промислів
(назва освітньої програми)
185 – «Нафтогазова інженерія та технології»
(шифр і назва спеціальності)

Р. Л. Гулимчук
(підпис, ініціали та прізвище виконавця роботи)

Науковий керівник к.т.н., доцент Романишин Любомир Іванович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту
доцент 23.12.25 Федорович Я. Т.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент
ст. викладач Мосора Ю. Р.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2025

ВСТУП

Сучасний стан технології буріння нафтових і газових свердловин характеризується підвищенням усіх техніко-економічних показників процесу спорудження свердловин. Встановлено, що зростання глибин свердловин по всьому світу призводить до збільшення загальної вартості буріння. Практичний досвід свідчить, що буріння глибоких та надглибоких свердловин супроводжується суттєвим зменшенням механічної швидкості буріння та стійкості доліт, що, у свою чергу, спричиняє зростання вартості одного метра проходки. Одним із важливих методів підвищення якості бурових робіт є розроблення та ефективне застосування породоруйнівного інструменту для буріння в конкретних геологічних умовах.

Вибір оптимального типорозміру породоруйнівного інструменту є однією з найважливіших проблем, що постає перед буровими підрядниками на етапі планування проекту спорудження свердловин. Раціональний вибір долота дає змогу зменшити капітальні витрати на буріння нафтогазових свердловин. Відтак, оптимізація процесів буріння нерозривно пов’язана із застосуванням нових типів та конструкцій бурових доліт.

На сьогоднішній день, в загальносвітовій практиці спостерігається збалансоване співвідношення між обсягами буріння шарошковими і долотами типу PDC (Polycrystalline Diamond Compact). Незважаючи на те, що шарошкові долота більш універсальні, світові та вітчизняні тенденції вказують на збільшення обсягів застосування доліт PDC. Прогнозується, що найближчим часом використання доліт PDC в Україні досягне показника 75 % від загального обсягу проходки. Це зростання пояснюється їхніми перевагами перед іншими типами доліт. Разом з тим, долота PDC постійно вдосконалюються з метою підвищення їхньої ефективності, проходки на долото та стійкості. Відтак аналіз конструктивних виконань та подальше вдосконалення озброєння долота зумовить підвищення механічної швидкості буріння.

Актуальність роботи.

Впровадження безопорних доліт стало важливим етапом розвитку технологій буріння свердловин. Застосування цього типу породоруйнівного інструменту суттєво збільшує проходку на долото порівняно з тришарошковими долотами, підвищує механічну швидкість буріння та скорочує витрати часу на виконання спуско-підіймальних операцій. Крім того, спостерігається зменшення кількості аварій і ускладнень, пов’язаних із проведенням СПО, а також загальне покращення якості стовбура свердловини. У гірничо-геологічних розрізах, представлених породами м'якої та середньої твердості, долота PDC є основним типом породоруйнівного інструменту.

Водночас значна частина гірничо-геологічних розрізів України характеризується породами середньої твердості, а також твердими середньоабразивними породами. Для буріння таких інтервалів основним типом породоруйнівного інструмента залишаються шарошкові долота, оскільки використання доліт PDC супроводжується інтенсивним зношуванням периферійного озброєння. Ключовим чинником зношування алмазно-твердосплавних різців є вплив вібрацій. Обмежена проходка на одне долото за таких умов (не більше 300 м) у поєднанні з високою вартістю доліт PDC знижує техніко-економічні показники процесу буріння.

Інтенсивний вплив динамічних факторів у процесі роботи бурового інструменту формує невизначеність щодо фактичних експлуатаційних навантажень. Це, у свою чергу, ускладнює обґрунтоване визначення раціональних параметрів режиму руйнування гірських порід. За таких умов часто знижують режимні параметри буріння або використовують у межах одного інтервалу кілька типів доліт, що спричиняє додаткові витрати часу на виконання спуско-підіймальних операцій та зменшує загальну ефективність буріння.

Сучасні тенденції розвитку долотного виробництва дедалі більше орієнтовані на адаптацію доліт PDC до ефективної роботи в середніх за твердістю та твердих гірських породах. Виробники пропонують широкий спектр конструктивних рішень щодо підсилення озброєння, основним призначенням

яких є зниження рівня вібраційних навантажень на долото. Проте під час розроблення технологічних програм буріння в умовах розбурювання порід зазначених категорій питання вибору посиленого антивібраційного озброєння в конструкції долота PDC нерідко залишається недостатньо вивченим. Таким чином, вдосконалення озброєння PDC доліт з посиленим антивібраційним захистом безумовно є актуальним питанням.

Метою магістерської роботи є підвищення техніко-економічних показників буріння шляхом вдосконалення конструкції різця полікристалічного алмазного долота.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні **завдання**:

- аналіз умов роботи полікристалічних алмазних доліт;
- критичний огляд серійних моделей PDC доліт;
- аналіз чинників, що зумовлюють виникнення вібрацій під час роботи PDC доліт;
- проєктування конструкції різця для зменшення впливу вібрацій;
- розрахунок потреби та вибір доліт для спорудження свердловини.

Об’єкт дослідження. Процес зношування різців PDC доліт під час механічного буріння.

Предмет дослідження. Проєктування конструкції різця PDC для зменшення негативного впливу вібрацій на роботу долота.

Методи дослідження. У ході теоретичних досліджень були застосовані класичні методи математичної статистики, а також сучасні трибологічні підходи, що описують закономірності процесів тертя та зношування. Для збору, оброблення та аналізу даних використовувалося сучасне програмне забезпечення й обчислювальна техніка. Під час проєктування конструкцій алмазно-твердосплавних різців застосовано системи автоматизованого конструкторського проєктування.

Структура магістерської роботи. Робота складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який містить 28 найменувань праць. Основна частина роботи викладена на 69 сторінках і містить 49 рисунків та 2 таблиці.

1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДОЛІТ PDC

На сьогоднішній день, полікристалічні алмазні долота PDC (Polycrystalline Diamond Compact) є одним із найпоширеніших типів бурових доліт, що застосовуються під час спорудження нафтових і газових свердловин. Основне призначення PDC доліт – руйнування гірських порід у широкому діапазоні твердості та абразивності з мінімальними енерговитратами та високою механічною швидкістю буріння. Цей тип доліт розроблений ще в 1970-х роках як альтернатива традиційним шарошковим долотам. Полікристалічні алмазні долота характеризуються стабільністю роботи, прогнозованою поведінкою в процесі буріння та тривалим ресурсом експлуатації за умови дотримання оптимальних режимів навантаження. Крім того, вони значно довговічніші за інші типи доліт завдяки використанню синтетичних алмазів.

Долота PDC доцільно використовувати для руйнування м'яких, середніх та частково твердих порід, де відсутні високі ударні навантаження та надмірна абразивність (наприклад, щільні пісковики з високим вмістом кварцу). Найбільшу ефективність долота PDC показують під час буріння глинистих сланців, вапняків, доломітів та м'яких алевролітів. У випадку проходки м’яких порід механічна швидкість буріння може досягати значень 50-100 м/год. Ці долота широко використовують для похило-скерованого та горизонтального буріння, оскільки забезпечують кращий контроль траєкторії свердловини. Застосування доліт PDC дозволяє зменшити кількість рейсів та, як наслідок, тривалість спуско-підіймальних операцій, оптимізувати компоновку низу бурильної колони, підвищити техніко-економічні показники буріння нафтових і газових свердловин.

Особливістю роботи доліт PDC є механізм руйнування гірської породи, що суттєво відрізняється від шарошкових доліт, які здійснюють дроблячу або дроблячо-сколюючу дію на породу. Полікристалічні алмазні долота руйнують гірську породу ріжучо-сколюючою дією. На відміну від шарошкових, PDC долота не мають рухомих частин, що робить їх більш надійними та менш

схильними до відмов. Для створення ріжучої дії на породу необхідно створювати менше осьове навантаження на долото, ніж для шарошкових доліт.

Ефективність роботи PDC доліт залежить від параметрів режиму буріння (осьового навантаження на долото, частоти обертання) та конструкції різця (кут нахилу різця). Недостатнє навантаження може призвести до проковзування та передчасного зносу різця, тоді як надмірне навантаження зумовлює ударні руйнування або термічний перегрів різця. Таким чином, успішна експлуатація PDC доліт залежить від аналізу геолого-технічних умов спорудження свердловини та вибору оптимального режиму буріння.

Основними перевагами полікристалічних алмазних доліт є:

- висока механічна швидкість буріння, особливо в м'яких та середніх за твердістю породах;

- відсутність в конструкції долота рухомих частин, що зменшує ризик виникнення аварійної ситуації, пов'язаної із залишенням елементу долота на вибої свердловини;

- висока стійкість до абразивного зносу, як наслідок, більший термін роботи долота;

- менше осьове навантаження на долото;

- стабільність траєкторії свердловини у випадку похило-скерованого буріння.

Проте слід зазначити, що застосування доліт PDC для буріння середніх, твердих та особливо абразивних порід на сьогодні досить обмежене. Аналіз експлуатаційних характеристик доліт у різних геолого-технічних умовах свідчить про нерівномірний характер їх зношування, а в окремих випадках – про руйнування ріжучих елементів вздовж профілю долота. Це зумовлено як підвищеними механічними навантаженнями, так і впливом неоднорідності порід, термічних та абразивних факторів. У зв'язку з цим раціональний вибір породоруйнівного інструменту для конкретних умов буріння є важливим завданням, яке потрібно вирішувати під час розроблення технічного проекту на спорудження нафтової або газової свердловини.



1 – корпус; 2 – кільце; 3 – матриця; 4 – гідромоніторна насадка; 5 – різець

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд PDC долота

Як відомо, механізм роботи доліт PDC ґрунтується на зрізанні тонкого шару гірської породи (рис. 1.2), що нагадує процес різання металу на токарному верстаті. Такий принцип забезпечує безперервну ріжучу дію на породу та характеризується високою енергоефективністю. Саме цим PDC-долота принципово відрізняються від шарошкових, де руйнування породи відбувається дроблячо або дроблячо-сколюючої дією (рис. 1.3).

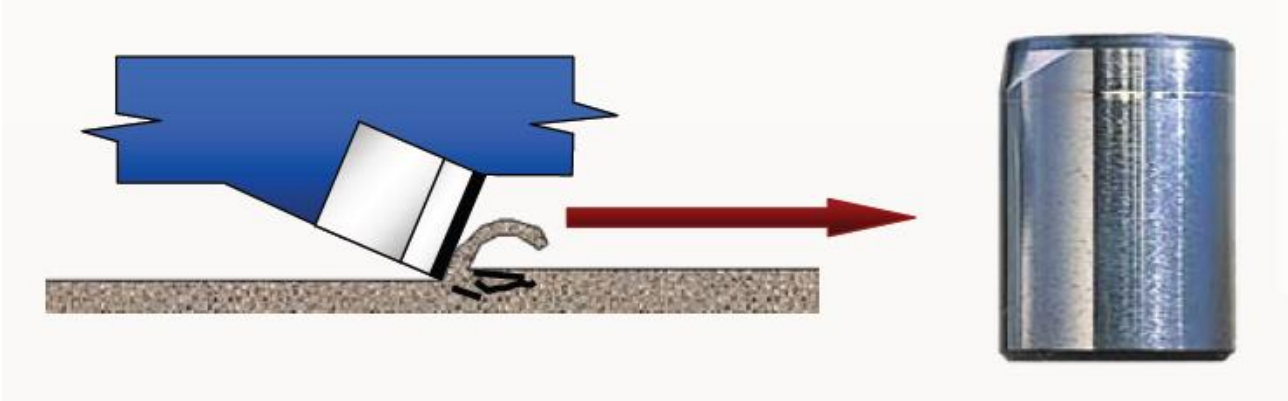


Рисунок 1.2 – Принцип руйнування гірської породи PDC долотом

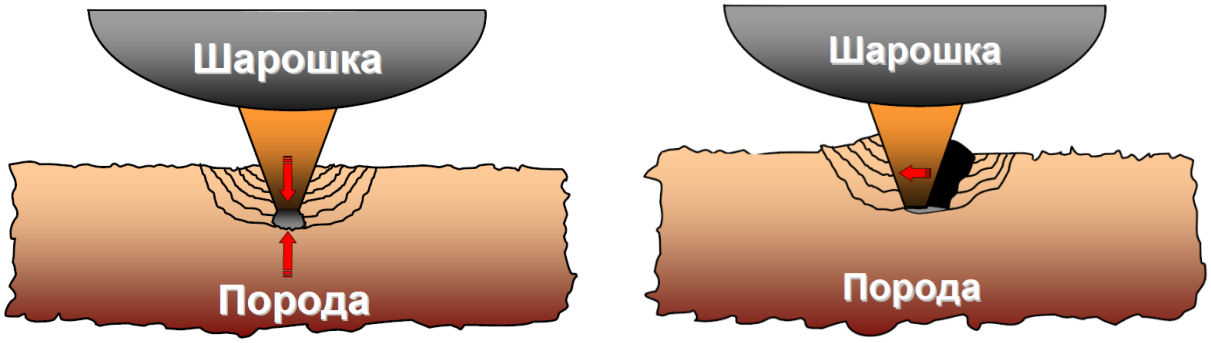


Рисунок 1.3 – Принцип руйнування гірської породи шарошковим долотом

Розглянемо детальніше процес руйнування породи різцем PDC (рис. 1.4). Основним фактором, що забезпечує ріжучу дію, є нормальна сила, спрямована перпендикулярно до фронтальної поверхні різця. Її величина та напрям змінюються у процесі буріння внаслідок зміни пружно-пластичних та міцнісних характеристик гірської породи. Додатковий вплив на характер руйнування спричиняють тріщинуватість порід, а також пружні коливання елементів бурового інструмента. Оскільки товщина зруйнованого шару породи не є сталою, зміна глибини врізання різця призводять до коливань величини зусилля різання. Це, у свою чергу, сприяє виникненню крутильних коливань бурильної колони та потенційно знижує стабільність роботи долота.

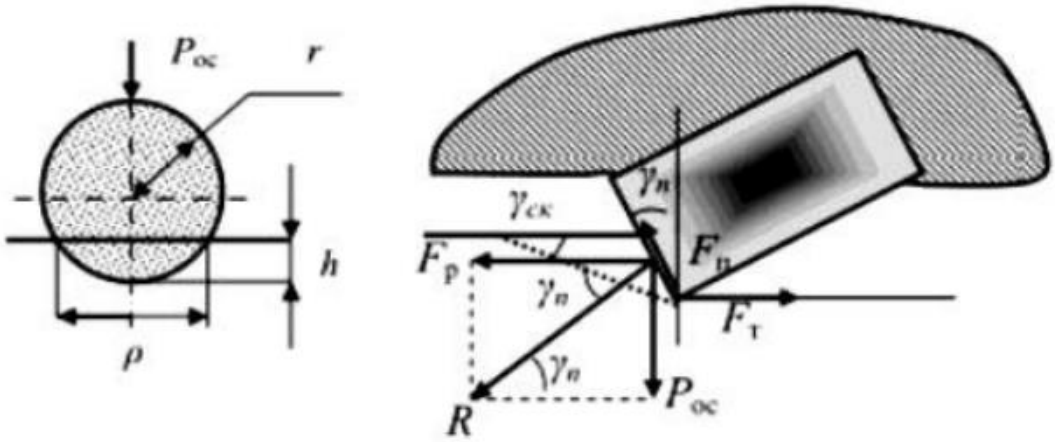


Рисунок 1.4 – Схема процесу руйнування гірської породи різцем PDC

Для глибшого розуміння механізму руйнування породи результуючу (нормальну) силу, що діє на різець, доцільно розкласти на дві складові:

тангенціальну та осьову силу. Тангенціальна сила безпосередньо зрізає шар породи, тоді як осьова руйнує породу шляхом стискання та видавлювання. Якщо результуюча сила спрямована перпендикулярно до фронтальної поверхні різця, її проекція на площину різця дорівнює нулю (рис. 1.5, а). У разі, коли результуюча сила нахилена вниз відносно площини різця (рис. 1.5, б), виникає сила тертя, що порушує рівновагу та спричиняє заглиблення різця (глибина різання зростає від h до h_n). У такому випадку можливе збільшення товщини зрізаного шару породи.

Навпаки, коли результуюча сила орієнтована вверх (рис. 1.5, в), це може спричинити зменшення глибини різання. Різець частково «вибивається» із зони контакту, і товщина зрізаного шару зменшується від h до h_n. Таким чином, напрямок результуючої сили визначає баланс дійних сил під час руйнування породи та безпосередньо впливає на величину глибини різання.

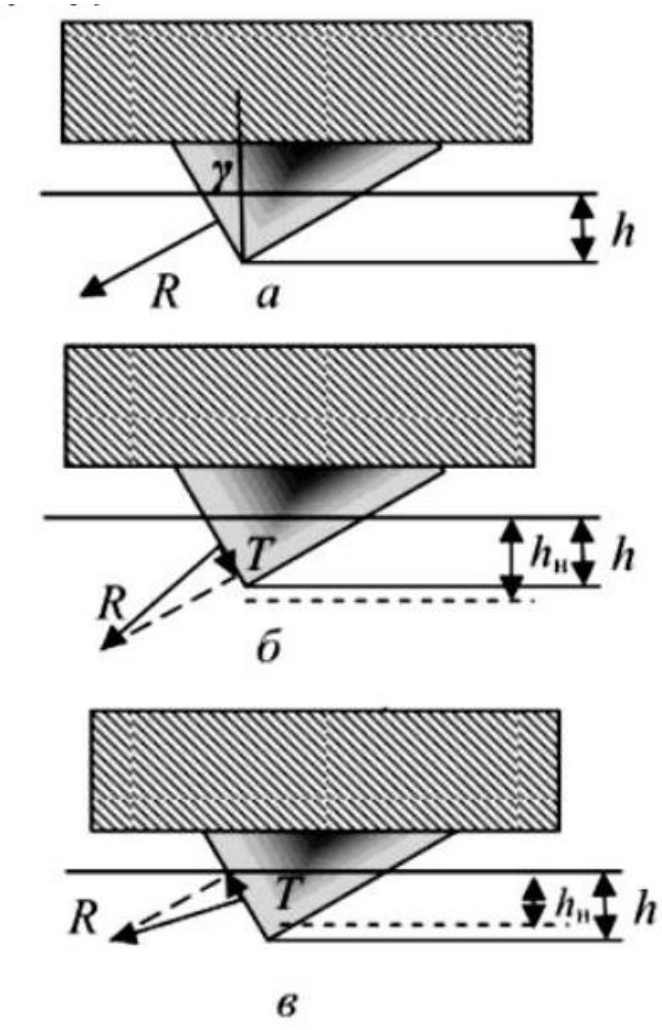


Рисунок 1.5 – Механіка різання породи різцями PDC

Кут різання характеризує нахил робочої поверхні різця відносно горизонтальної площини [15] і є одним із ключових параметрів, що визначають ефективність процесу руйнування породи. Аналіз промислових даних експлуатації доліт свідчить, що оптимальні значення переднього кута різця залежать від типу твердосплавної матриці. Для твердого сплаву ВК8 рекомендовано застосовувати передній кут не менше 20°, для двокарбідного сплаву Т5К10 – не менше 30°, тоді як для трикарбідного сплаву ТТ10К8Б цей показник має становити не менше 15°. Зі зменшенням переднього кута покращуються умови зрізання шару породи, оскільки різець легше проникає у породу, а опір різанню знижується. Це, у свою чергу, призводить до зменшення необхідного обертового моменту та осьового навантаження на долото. Водночас вибір кута різання повинен враховувати міцнісні властивості матеріалу різця й умови буріння, оскільки надто малий кут може спричиняти підвищені механічні навантаження на ріжучу кромку та її прискорений знос.

Слід зазначити, що долота PDC мають певні недоліки. Найвагомішим серед них є їхня висока вартість, спричинена дорогими матеріалами та складністю технологічного процесу виготовлення як ріжучих елементів, так і всього долота загалом. Під час роботи такі долота зазнають інтенсивного зношування, насамперед через пошкодження, спричинені ударними навантаженнями. Таким чином, до основних причин неефективної роботи полікристалічних алмазних доліт належать надмірний обертовий момент та нестабільне спрямоване буріння.

Аналіз умов роботи PDC доліт дозволив визначити їх основні переваги та недоліки порівняно з іншими типами доліт, а також раціональну сферу застосування. Останні тенденції буріння свердловин в Україні вказують на постійне зростання обсягів проходки саме долотами PDC. Це підкреслює їхній потенціал та актуальність подальших досліджень, спрямованих на вибір ефективних конструкцій для буріння нафтових і газових свердловин в Україні.

Аналіз статистичних показників роботи полікристалічних алмазних доліт на свердловинах АТ «Укргазвидобування» дає змогу об’єктивно оцінити

техніко-економічну ефективність їх застосування під час буріння нафтових і газових свердловин в Україні [18–20]. Бурові роботи виконувалися на глибини до 6000 м із використанням доліт переважно іноземного виробництва. Основну частку інтервалів становили породи середньої твердості, зокрема кам'яні солі, доломіти, аргіліти, вапняки, пісковики та мергелі, які розбурювалися як турбінним, так і роторним способами.

Статистичний аналіз результатів відпрацювання полікристалічних алмазних доліт на родовищах України свідчить, що основними видами їхнього спрацювання є: абразивне зношування різальних елементів (17%), поломка різців (30%), сколювання робочої поверхні різців (31%), випадання різців (3%). У 19% випадків спрацювання долота не спостерігалося (рис. 1.6).

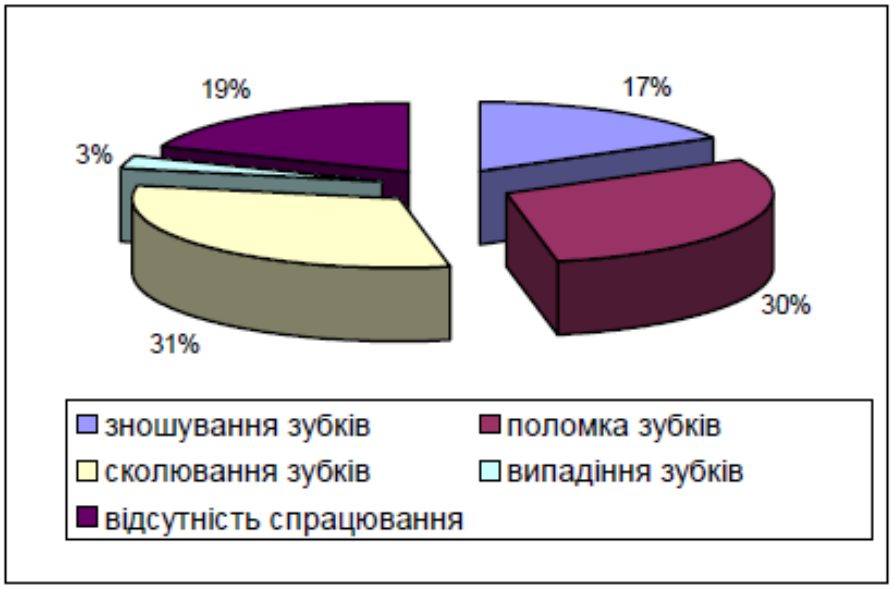


Рисунок 1.6 – Основні характеристики спрацювання PDC-доліт

Основні фактори, що зумовлювали підйом доліт зі свердловини, розподілилися таким чином: 19% – необхідність заміни компоновки низу бурильної колони (КНБК), 3% – ускладнення у стовбурі свердловини, 3% – зниження механічної швидкості буріння, 3% – виконання ремонтних робіт на буровій установці, а 72% – досягнення проєктної глибини (рис. 1.7).

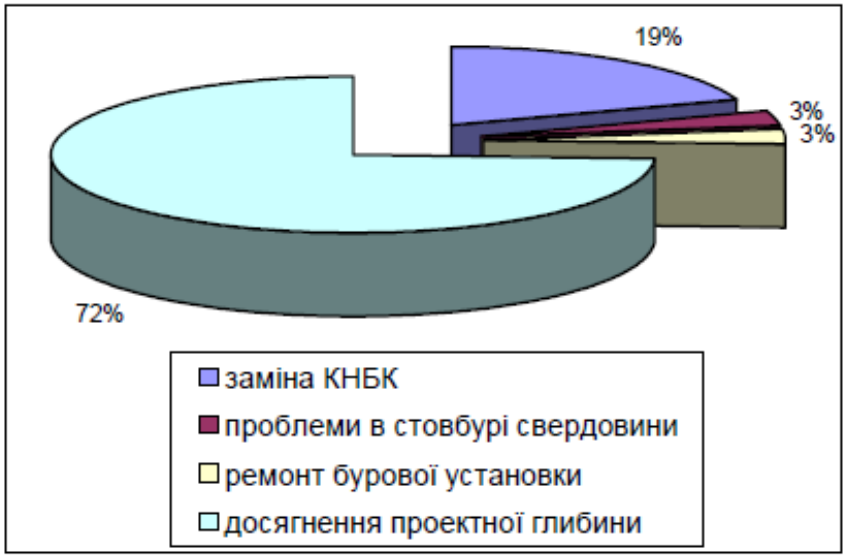


Рисунок 1.7 – Основні причини підйому PDC-доліт

Для побудови графічних залежностей використано дані відпрацювання PDC-доліт, отримані виключно під час буріння свердловин на родовищах України. Інформація щодо експлуатації полікристалічних алмазних доліт на закордонних родовищах не залучалася через істотні відмінності у показниках їх роботи. Зокрема, середня проходка доліт PDC за даними компанії Smith Inc. становить близько 1067 м [19], що суттєво перевищує відповідні показники, зафіксовані під час буріння в українських геолого-технічних умовах.

Найвищі показники ефективності відпрацювання спостерігаються у біцентричних доліт. Зокрема, для долота BC75PX Bicentric зафіксовано проходку 4474 м при середній механічній швидкості буріння 13,3 м/год, а для іншого долота цього типу – проходку 2310,7 м при швидкості 24,2 м/год. Інші різновиди доліт демонструють значно ширший діапазон показників – від 120 до 2250 м, що залежить від конструктивних особливостей доліт та регіону буріння.

2 КРИТИЧНИЙ ПОРІВНЯЛЬНИЙ ОГЛЯД СЕРІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДОЛІТ PDC

На сьогодні серійним виробництвом PDC доліт займаються понад 20 компаній. Стабільно високий технічний рівень та якість продукції демонструють такі виробники як Baker Hughes, Schlumberger, Halliburton, National Oilwell Varco та Ulterra. В Україні виробництвом доліт займається ТОВ «Універсальна бурильна техніка», що переважно спеціалізується на шарошкових долотах різних конструкцій для буріння від м’яких до надтвердих порід. Підприємство також працює над створенням нових моделей PDC-доліт, однак серійне виробництво поки що не запущене.

Компанія Baker Hughes представлена на ринку широким асортиментом PDC-доліт, серед яких ключове місце займають серії Dynamus та Talon Strike [24]. Долота серії Talon Strike орієнтовані на підвищенні ефективності буріння в м’яких і середніх за твердістю породах. Завдяки конструктивним особливостям ріжучих елементів та покращеним гідравлічним характеристикам ці долота характеризуються високою механічною швидкістю буріння та стабільністю роботи у змінних геологічних умовах. Натомість долота серії Dynamus призначені для роботи в більш складних умовах, зокрема у середніх та твердих породах, де зносостійкість та довговічність інструмента є критично важливими. Основною перевагою цієї серії є збільшений ресурс роботи, що досягається застосуванням матеріалів із підвищеною стійкістю до абразивного зношування, удосконаленим профілям різців та посиленим конструктивним елементам матричного корпусу. Більший термін роботи доліт Dynamus дозволяє зменшити кількість спуско-підіймальних операцій, що, у свою чергу, знижує загальний час і вартість спорудження свердловини.

Конструкція долота Dynamus (рис. 2.1) містить удосконалену ріжучу структуру, що зменшує величину вібрацій, мінімізує ризик пошкодження різців та сприяє стабільності роботи інструмента. Важливою особливістю є застосування технології AntiWalk, що істотно обмежує неконтрольоване

проковзування долота по вибою, величина якого у певних геологічних умовах може досягати до 50 % часу механічного буріння. Використання AntiWalk дає змогу точніше визначати просторове положення долота в стовбурі свердловини, підтримувати задану траєкторію та забезпечувати високу якість профілю стовбура. Застосування технології AntiWalk у поєднанні з оптимізованою ріжучою структурою сприяє підвищенню механічної швидкості буріння, покращенню стабільності проходки та скороченню загального часу спорудження свердловини. Додаткове озброєння, розміщене на зовнішній поверхні лопатей, виконує стабілізуючу функцію, адже обмежує відхилення інструмента, забезпечує точне дотримання траєкторії та підвищує ефективність руйнування породи.

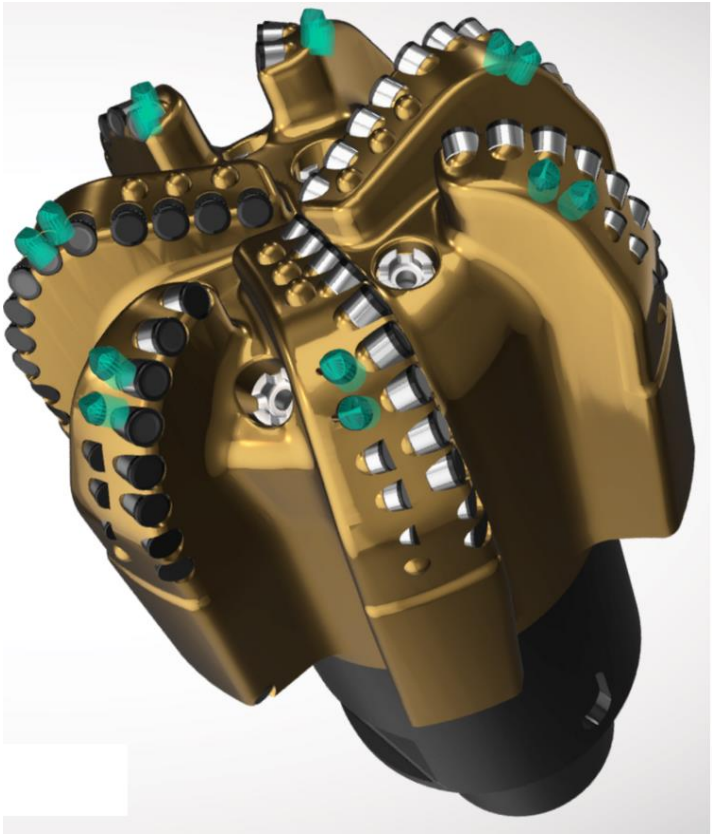


Рисунок 2.1 – Долото серії Dynamus

На сьогодні компанія Halliburton здійснює виробництво доліт PDC двох основних класів – Premium та Performance [23]. Кожен із класів включає низку серій, зокрема MegaForce, SteelForce, FX Series та IQ Series. Зазначені серії охоплюють широкий спектр конструктивних виконань, що відрізняються за

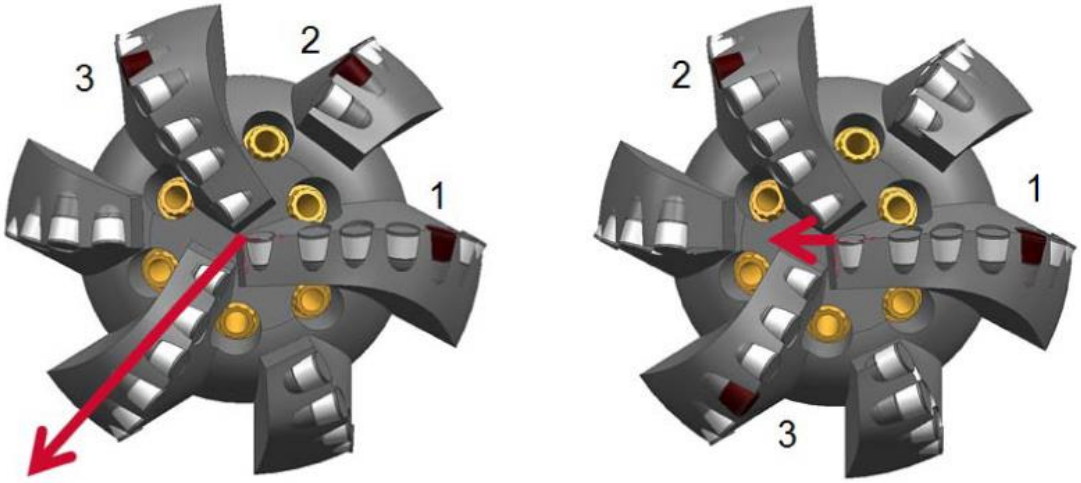
типом ріжучої структури, матеріалами корпусу, стійкістю до вібраційних навантажень та призначенням для певних гірничо-геологічних умов.

Характерною ознакою доліт серії MegaForce (рис. 2.2) є застосування ріжучих елементів PDC, виготовлених за сучасною технологією SelectCutter. Полікристалічні алмазні різці SelectCutter вирізняються підвищеною стійкістю до абразивного зношування та високою ударною міцністю, що забезпечує можливість їх ефективного використання у найскладніших гірничо-геологічних умовах. Підвищена абразивна стійкість сприяє зменшенню втрат алмазного шару, завдяки чому робоча поверхня різця тривалий час зберігає гостроту. Висока ударна міцність визначає здатність різця витримувати значні динамічні навантаження без руйнування, що позитивно впливає на процес різання.

Багаторівневий баланс сил (рис. 2.3) забезпечує підвищену стабільність роботи долота під час буріння інтервалів із змінними фізико-механічними властивостями гірських порід. Такий підхід дозволяє ефективно долати перешарування міцних, абразивних та менш стійких порід, зменшує ризик виникнення вібрацій і покращує керованість інструмента.



Рисунок 2.2 – Долото серії MegaForce



а б

Рисунок 2.3 – Стандартний (а), багаторівнений (б) баланс сил

Бурові долота серії SteelForce забезпечують одні з найвищих механічних швидкостей буріння серед інструментів свого класу. Такий результат досягається завдяки низці конструктивних та технологічних рішень. Збільшена висота лопатей сприяє формуванню більшого міжлопатевого простору, що покращує умови гідродинамічного очищення вибою. У долотах SteelForce реалізована технологія протидії сальникоутворенню, яка полягає у штучному створенні негативного електричного заряду на поверхні долота. Застосоване твердосплавне покриття марки К1 забезпечує значне підвищення довговічності інструмента: стійкість до абразивного зношування зростає приблизно на 100 %, а опір ерозійному впливу – на 30 %.

Бурові долота серії FX (рис. 2.4) призначені для буріння твердих та абразивних порід. У долотах серії FX застосовані різці, виготовлені за технологією X Series, яка забезпечує підвищену зносостійкість робочого торця різця. Завдяки менш інтенсивному стиранню алмазного шару ріжуча кромка зберігає гостроту протягом більш тривалого часу. Удосконалена геометрія лопатей передбачає оптимальне просторове розташування різців і гідромоніторних насадок. Це покращує умови очищення вибою, підвищує рівномірність навантаження на ріжучу структуру та мінімізує ризик виникнення вібраційних коливань під час буріння твердих порід.



Рисунок 2.4 – Долото серії FX

Компанія Schlumberger [25] пропонує широкий діапазон бурових доліт PDC, орієнтований на різні умови буріння та типи геологічних розрізів. До номенклатури підприємства входять долота для похило-скерованого та горизонтального буріння, долота серії SHARC з підвищеною стійкістю до абразивного зношування, долота серії Spear для буріння глинистих та пластичних порід, стандартні долота PDC універсального призначення, долота Kinetic з матричним корпусом.

Долота для похило-скерованого буріння (рис. 2.5) відзначаються підвищеною стабільністю роботи, меншими навантаженнями, а також мінімізацією явищ проковзування під час проходження інтервалів із різною міцністю та абразивністю порід. Такі конструктивні особливості значно знижують кількість випадків, коли через високий рівень вібрацій та ударних впливів виникає необхідність проведення додаткових спуско-підіймальних операцій.



Рисунок 2.5 – Долото для похило-скерованого буріння компанії Shlumberger

Долота серії SHARC (рис. 2.6) характеризуються удосконаленою конструкцією ріжучої структури, у якій на лопатях встановлені два ряди різців. Конструкція долота забезпечує взаємне підсилення рядів та підвищує довговічність найбільш навантажених зон долота. Два ряди різців орієнтовані так, що постійно підтримують ефективну гідравлічну систему очищення вибою та охолодження долота. Ця особливість важлива не лише під час буріння абразивних піщаних порід, але й при роботі у верхніх інтервалах із високими механічними швидкостями, а також за умов обмеженої гідравлічної енергії, зокрема при використанні вибійних двигунів. Важливим чинником забезпечення довговічності долота та досягнення високої механічної швидкості буріння є підтримання стійкості долота в різних свердловинних умовах. Долота серії SHARC спроектовані із застосуванням інтегрованої системи проєктування бурових доліт IDEAS. Основна увага приділяється усуненню вібрацій долота. Тому долота даної серії характеризуються високою стійкістю до динамічних навантажень та зносостійкістю.



Рисунок 2.6 – Долото SHARC компанії Shlumberger

Долота PDC серії Spear (рис. 2.7) оптимізовані для буріння глинистих порід, тому запобігають утворення сальників на долоті та накопичення вибуреної породи навколо лопатей. Завдяки характерній кулеподібній формі та сталевому корпусу невеликого діаметра між корпусом та стінкою свердловини створюється більший зазор. Відтак, покращується винесення вибуреної породи на поверхню та закупорювання насадок долота.



Рисунок 2.7 – Долото Spear компанії Shlumberger

Долота серії Kinetic (рис. 2.8) належать до імпрегнованих алмазних доліт і призначені для високообертового буріння в надтвердих та високоабразивних породах. Ріжуча структура доліт сформована поєднанням гарячепресованих вставок з алмазною крихтою (GHI), термостабільних полікристалічних алмазних вставок (TSP), різців PDC класу Premium та матричних матеріалів, імпрегнованих алмазами. Алмазні різці розміщуються в конічній зоні профілю, що підвищує ефективність руйнування породи. Додаткова міцність різців досягається завдяки їх підтримці імпрегнованою матрицею. TSP-вставки встановлюються на калібруючій поверхні для збереження номінального діаметра свердловини. У разі буріння високоабразивних порід ці вставки додатково розміщують на боковій поверхні долота для підвищення зносостійкості



Рисунок 2.8 – Долото серії Kinetic компанії Shlumberger

Збільшена висота лопатей сприяє досягненню більшої проходки порівняно з традиційними імпрегнованими долотами. У долотах серії Kinetic реалізовано комбіновану систему промивання: подача бурового розчину здійснюється як через центральну частину долота, так і через гідромоніторні насадки.

Долото CounterForce компанії Ulterra (рис. 2.9) спроектоване для підвищення ефективності процесу буріння та зменшення негативного впливу вібраційних навантажень. Вібрації, які виникають внаслідок взаємодії долота з гірською породою, є однією з основних причин передчасного виходу з ладу породоруйнівного інструменту. Зокрема, бокові вібрації прискорюють руйнування озброєння незалежно від типу встановлених різців. Технологія CounterForce передбачає перенаправлення частини вібраційної енергії назад у пласт, що фактично трансформує її у збільшення механічної швидкості буріння. У конструкції доліт CounterForce застосовано різні ступені орієнтації різців для зменшення негативного впливу вібраційних процесів. Це одночасно забезпечує підвищений контроль за роботою породоруйнівного інструменту та збільшує тривалість експлуатації полікристалічних алмазних різців.



Рисунок 2.9 – PDC-долото CounterForce компанії Ulterra

Американська корпорація National Oilwell Varco пропонує серію PDC-доліт Tektonic (рис. 2.10). У конструкції доліт Tektonic застосовано різці нового покоління ION, що вирізняються підвищеною термічною та ударною стійкістю. Подовжений ріжучий профіль створює кращі умови для ефективного видалення шламу з вибою та знижує питому енергію, необхідну для руйнування гірської породи. Оптимізована геометрія лопатей сприяє зменшенню локальних контактних тисків під час взаємодії з породою, що позитивно впливає на довговічність озброєння. Кут нахилу лопатей мінімальний в порівнянні з аналогічними конструкціями, що додатково покращує стабільність роботи долота та підвищує механічну швидкість буріння.



Рисунок 2.10 – PDC-долото Tektonic

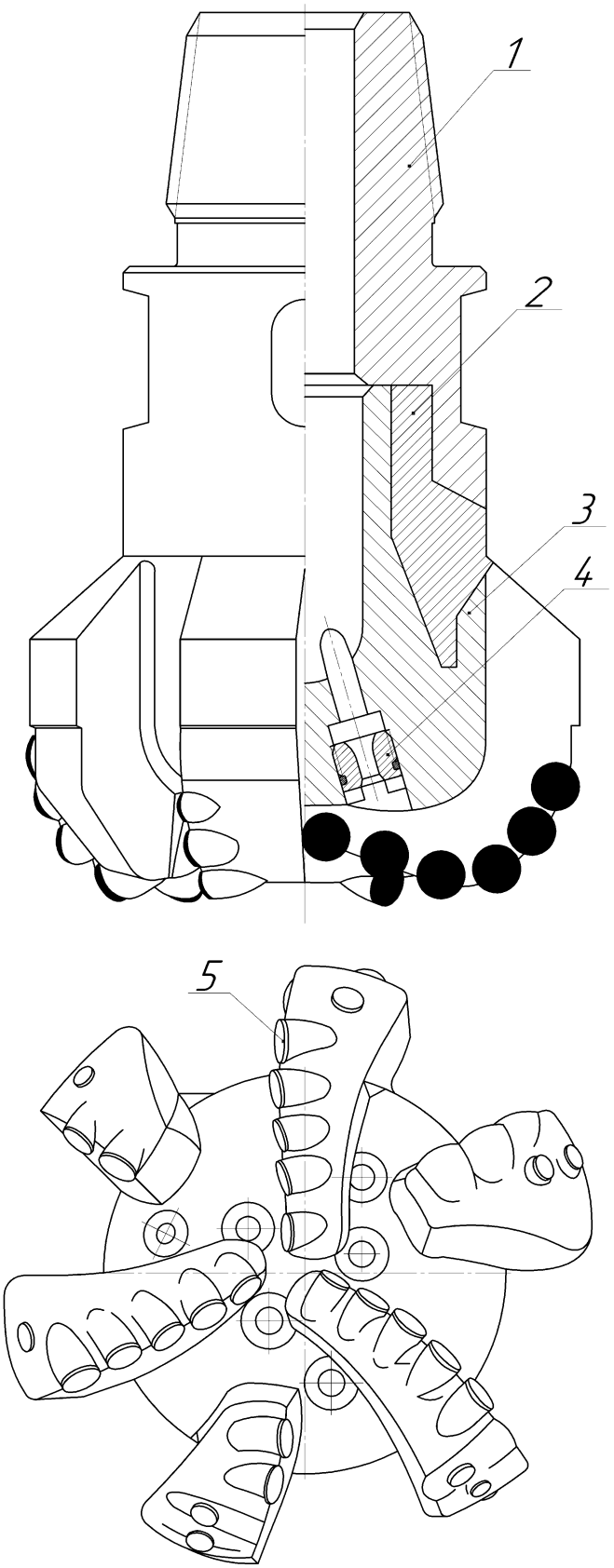
На основі проведеного аналізу конструктивних особливостей PDC полікристалічних алмазних доліт встановлено переваги та недоліки варіантів виконання окремих елементів, таких як різці, очищення від породи, захист від зношування за зовнішнім діаметром, вібраційна стійкість і т.д. Крім того, наведено рекомендації із застосування тієї чи іншої моделі полікристалічних алмазних доліт для конкретних умов експлуатації.

3 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ ДОЛОТА PDC

Полікристалічне алмазне долото (рис. 3.1, МР.НІОм-70.00.00.000 СК) складається з двох основних частин – корпусу із замковою різьбою для приєднання до колони бурильних труб та матриці із спіралеподібними лопатями, на поверхні яких встановлюються ріжучі елементи. Кількість лопатей може змінюватися в межах від трьох до дванадцяти та визначається фізико-механічними властивостями гірських порід. Для твердих та абразивних порід доцільним є застосування доліт із більшою кількістю лопатей, оскільки підвищується міцність конструкції та забезпечується рівномірний розподіл навантаження між різцями. Водночас збільшення числа лопатей призводить до зменшення площі поперечного перерізу промивальних каналів. Промивання вибою здійснюється через твердосплавні насадки, розташовані на мінімальній відстані від зони різання, що сприяє інтенсивному видаленню шламу та ефективному охолодженню ріжучої структури.

Лопаті оснащуються ріжучими елементами, що складаються з тонкого шару синтетичних полікристалічних алмазів та основи з пресованого карбіду вольфраму. Алмазний шар товщиною 0,5-0,7 мм виконується на робочій кромці різця. Зміцнення різців алмазами підвищує їх зносостійкість. Загалом різці можуть мати різне виконання та розміри, проте переважно виготовляються діаметром від 8 мм до 19 мм.

Алмазно-твердосплавні різці можуть розміщуватися на трьох ділянках: у складі основного озброєння, у додатковому (другому) ряді озброєння та в калібрувальній частині долота. Різці основного озброєння безпосередньо взаємодіють із вибійною поверхнею та виконують основну частину процесу різання. Геометрія та орієнтація цих різців визначають профіль вибою. Використання більших за розміром різців забезпечує їхній виступ над поверхнею корпусу долота до 15 мм, що покращує контакт з вибоєм. Крім того, більша висота різців створює сприятливі умови для потоку промивальної рідини та вилучення шламу.



1 – корпус; 2 – кільце; 3 – твердосплавна матриця;

4 – гідромоніторна насадка; 5 – різець

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд PDC долота

Полікристалічні алмазні різці отримують шляхом спікання алмазного порошку з твердосплавною основою за умов високих температур і тиску. Під час цього процесу важливу роль відіграє кобальт, який проникаючи в алмазний шар каталізує реакцію спікання та формує цілісну структуру. Таким чином утворюється монолітний різець із підвищеною міцністю та зносостійкістю. На відміну від природних алмазів, PDC-різці мають однорідні властивості в усіх напрямках, що знижує ризик утворення тріщин і забезпечує високу стійкість до абразивного зносу.

Більшість PDC-різців мають відносно коротку твердосплавну основу, на яку нанесено алмазний шар. Тому, щоб забезпечити надійне кріплення різця до корпусу долота, використовують подовжену опорну частину, що також виготовляється з карбіду вольфраму. Алмазний диск з’єднують з цією опорою шляхом дифузійного зварювання або під тиском. В результаті отримують циліндричні ріжучі елементи, які встановлюють в лопатях долота.

Долота PDC виготовляють у двох конструктивних виконаннях: із суцільним сталевим корпусом та з корпусом із твердосплавної матриці, що приєднується до сталевої основи шляхом напаювання. Долота зі сталевим корпусом характеризуються підвищеною ударною міцністю, тому їх доцільно застосовувати під час буріння м’яких порід, а також у свердловинах великого діаметра, де навантаження на корпус є значними.

Сталевий корпус (рис. 3.2) – це двокомпонентна конструкція (корпус і ніпель), яку виготовляють шляхом механічної обробки прокату на верстатах із ЧПК. Для їх виробництва застосовують цементовані нікельмолібденові або хромонікельмолібденові сталі марок 17Н3МА та 14ХН3МА. Кріплення різців до сталевого корпусу здійснюється наступним чином. Корпус долота нагрівають у печі до температури близько 440 °С. За таких умов попередньо висвердлені посадочні отвори розширюються до діаметра, що забезпечує вільне встановлення ріжучих елементів. Після охолодження корпусу діаметри отворів повертаються до початкових розмірів, внаслідок чого різці надійно затискаються та фіксуються у визначеному положенні.



Рисунок 3.2 – Виготовлення сталевих корпусів PDC доліт

Під час експлуатації доліт зі сталевим корпусом зношуються як різці, так і сам корпус, через це такі долота не підлягають ремонту. Суттєвою проблемою сталевих доліт є абразивне зношення ділянок лопатей, розташованих навколо ріжучих і калібруючих елементів. Також зношується припой, що утримує різці від виривання, відбувається оголення, збільшення виступу та поступове випадання елементів озброєння. Для підвищення абразивної стійкості на поверхню корпусу навколо ріжучих і калібруючих елементів, а також на припой, наносять захисні покриття.

У матричних PDC-долотах корпус із приєднувальною різьбою виготовляють зі сталевих заготовок, тоді як матриця формується за технологією порошкової металургії. Матеріал матриці отримують шляхом пресування та подальшого високотемпературного спікання суміші порошкоподібних твердих сплавів на основі карбіду вольфраму за температури близько 1300 °C.

Матричні долота мають вищу вартість, вирізняються підвищеною довговічністю та стійкістю до абразивного та ерозійного зношування. Завдяки високій міцності матричного матеріалу вони здатні ефективніше працювати в умовах інтенсивного потоку промивальної рідини та при високій концентрації твердої фази в буровому розчині. Тому долота з матричним корпусом доцільно використовувати для буріння інтервалів із високою витратою промивальної рідини, в абразивних породах середньої та високої твердості, а також у свердловинах, що потребують тривалих рейсів без підйому інструменту.

Корпуси матричних бурових доліт традиційно виготовляють із використанням технології спікання в графітових формах. На першому етапі порожнина графітової форми формується на верстатах із ЧПК, що дає змогу відтворити складну геометрію долота (рис. 3.3). Подальша механічна обробка внутрішньої поверхні форми надає їй необхідних конструктивних особливостей, зокрема профілю лопатей та каналів промивання. Отвори для встановлення різців формуються шляхом фрезерування (рис. 3.4). Для відтворення складних порожнин у конструкції можуть застосовуватися допоміжні елементи – керамічні, графітові або піщані вкладиші, які розміщують у формі до засипання порошкової суміші (рис. 3.5-3.6).



Рисунок 3.3 – Створення графітової форми-шаблону



Рисунок 3.4 – Фрезерування отворів під різці

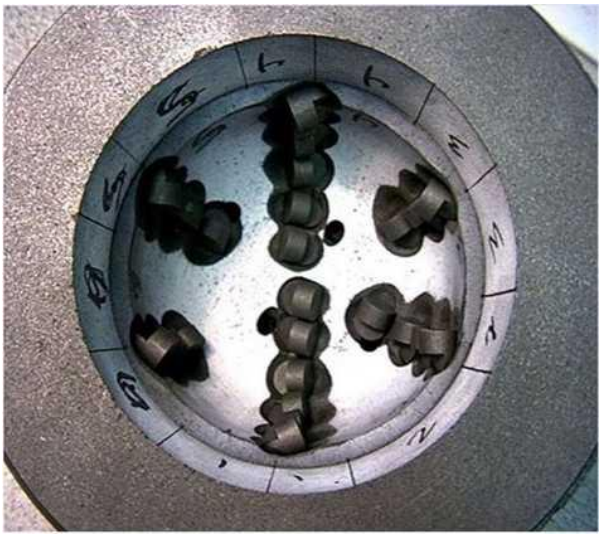


Рисунок 3.5 – Формування шаблону із графітовими вставками під різці

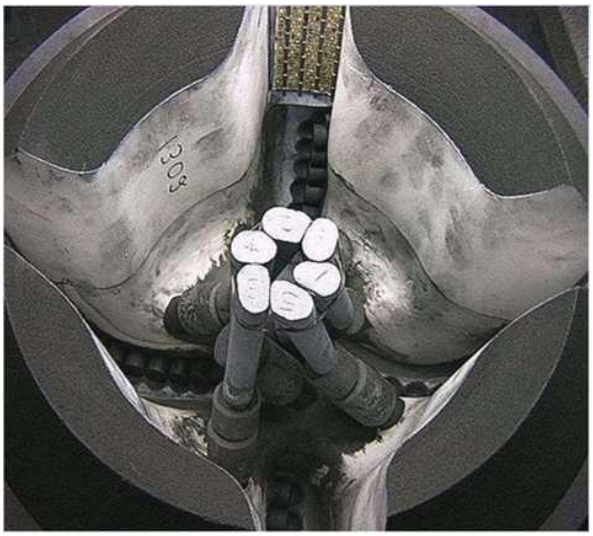


Рисунок 3.6 – Формування шаблону із вставками під отворів

Після завершення підготовчих робіт порожнину форми заповнюють композиційним матеріалом на основі твердосплавних частинок, серед яких найчастіше використовують карбіди вольфраму, титану або танталу. Для формування посадочних місць під різці відповідно до заданої схеми в отвори встановлюють графітові стержні, що зберігають потрібну форму під час подальшого спікання та видаляються після завершення процесу.

По завершенню спікання матриці (рис. 3.7) графітові стержні вилучають. Різці закріплюють у посадочних місцях шляхом паяння спеціальними твердими припоями. Для паяння застосовують срібний твердий припой, що забезпечує високу міцність і корозійну стійкість з’єднання. Різець монтується на опорну поверхню, між ним і стінками отвору формується тонкий шар припою (рис. 3.8). Перед встановленням різців посадочні отвори ретельно очищають для розміщення припою на дно кожного отвору. Різці встановлюються у матрицю та фіксуються пружинним пристроєм. Далі корпус долота поміщають у піч та нагрівають до температури 700 °С. За таких умов утворюється дифузійно-металеве з’єднання між поверхнею опори різця та стінками отвору. Після охолодження припой твердне, забезпечуючи надійне кріплення ріжучих елементів, а пружинний фіксуючий пристрій видаляється.



Рисунок 3.7 – Спечена заготовка долота PDC



Рисунок 3.8 – Припаяні різці до лопатей доліт

Після завершення встановлення ріжучих елементів проводять балансування долота, метою якого є зменшення дисбалансу сил, що виникають під час руйнування гірської породи. Балансування оптимізує розподіл маси та геометрію ріжучої структури, відтак дає змогу зменшити вібраційні навантаження. Зниження рівня вібрацій сприяє підвищенню стабільності роботи долота та збільшенню його ресурсу. Використання матричного корпусу підвищує ерозійну стійкість конструкції завдяки високій твердості та зносостійкості матеріалу матриці.

Конструкція долота PDC реалізує подачу промивальної рідини у периферійну частину вибою свердловини через канали, розташовані між лопатями. У нижній частині канали оснащуються змінними твердосплавними насадками, які формують високошвидкісний струмінь бурового розчину. Переважно застосовуються суцільні твердосплавні насадки, що встановлюються у підготовлені посадочні гнізда корпусу та фіксуються різьбовим з’єднанням.

4 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОЛІТ PDC

4.1 Причини виникнення та вплив вібрацій на роботу PDC доліт

Ефективність роботи бурових доліт визначається не лише оптимальною організацією процесу руйнування гірської породи. Процес буріння є складною багатофакторною системою, у якій кожен параметр (від режимів навантаження до характеристик промивальної рідини) чинить суттєвий вплив на загальну продуктивність та ресурс породоруйнівного інструменту. Зокрема, потенційними чинниками підвищення ресурсу доліт PDC є вибір матеріалу та профілю долота, конфігурація лопатей (їх форма та кількість), раціональне розташування, розмір та орієнтація ріжучих елементів, а також фізико-хімічні властивості бурового розчину. Застосування такого комплексного підходу до оцінювання та оптимізації процесу роботи PDC-доліт забезпечує суттєве збільшення проходки на одне долото, підвищення середньої механічної швидкості та, відповідно, зростання комерційної швидкості буріння. Водночас скорочуються загальні витрати на спорудження свердловини.

Встановлено, що основною причиною передчасного виходу з ладу алмазно-твердосплавних доліт є вібрації. Джерелом виникнення повздовжніх, поперечних і крутильних коливань виступають динамічні навантаження, що створюються під час роботи долота в умовах перешарування гірських порід, тобто чергування інтервалів середніх малоабразивних та твердих середньоабразивних літологій. Такі різкі зміни механічних властивостей вибою призводять до нерівномірного навантаження на ріжучі елементи, що спричиняє дестабілізацію роботи долота та виникнення вібрацій.

Механізм виникнення повздовжніх вібрацій полягає в наступному. Під час переходу буріння з інтервалу середньої твердості до більш твердих порід периферійні різці, розташовані у калібруючій зоні долота, першими вступають у контакт із твердим пропластком і сприймають значно більше осьове навантаження. У той час центральні та проміжні різці все ще взаємодіють із породою середньої твердості, що зумовлює нерівномірний розподіл сил на

лопатях. В момент входу в твердий пропласток периферійні різці зазнають інтенсивного навантаження, що супроводжується їх частковим сколюванням унаслідок контакту з більш міцним матеріалом. В цей момент відбувається переміщення лопаті долота вгору, що призводить до накопичення потенціальної енергії в елементах КНБК. Після проходження твердого пропластка навантаження переноситься на різці, розташовані на калібруючій ділянці долота. Переміщення лопаті вниз супроводжується перетворенням накопиченої потенціальної енергії в кінетичну, що створює серію низькочастотних повздовжніх коливань. Імпульсні перевантаження створюють руйнівний вплив насамперед на периферійні різці, оскільки через більший радіус їх обертання зростає інерційна складова ударних навантажень. У результаті посилюється зношування ріжучих елементів та зростає ймовірність втрати працездатності долота.

Механізм виникнення поперечних коливань долота пов’язаний із асиметрією навантаження на лопаті під час руйнування породи. Під час обертання долота навколо власної осі з певною кутовою швидкістю в окремий момент часу перед однією з лопатей може відбутися локальне сколювання породи. Це призводить до раптової зміни співвідношення сил опору, внаслідок чого виникає невелике зміщення осі обертання інструмента. У результаті геометрична вісь долота починає описувати дугоподібну траєкторію, що проявляється як поперечне зміщення інструмента відносно осі свердловини. Унаслідок цього вибій свердловини, замість круглої форми, набуває форми багатокутника з кількістю вершин, на одну більшою за кількість лопатей долота. Таким чином, зі збільшенням кількості лопатей PDC-долота форма поперечного перерізу свердловини стає ближчою до круглої, оскільки нерівномірність навантаження на окремі лопаті зменшується, що знижує амплітуду поперечних коливань.

Крутильні коливання виникають під час буріння внаслідок різкої зміни фізико-механічних властивостей порід. Ці вібрації є однією з основних причин руйнування периферійних ріжучих елементів. У момент входу різця в більш

твердий пропласток відбувається локальне зростання опору різанню, що може призвести до часткової або повної зупинки обертання долота. Це спричиняє крутильний удар, який супроводжується пружним скручуванням елементів бурильної колони та подальшим раптовим розвантаженням. У таких умовах периферійні різці зазнають найбільших динамічних навантажень, оскільки саме на периферії лопатей спостерігається максимальна питома сила тертя, а також обмежені можливості охолодження і очищення робочої зони. Сукупність цих факторів зумовлює їх прискорене зношення та підвищену ймовірність сколювання.

Робота доліт PDC відбувається в умовах підвищених температур. У процесі руйнування гірської породи температура поверхневих шарів периферійної частини лопатей може досягати 1300 °С. Періодичні термічні навантаження, які спричиняють циклічне розширення та стиск поверхневих шарів, ініціюють розвиток втомних тріщин та прискорюють деградацію ріжучої структури.

Зношення периферійного озброєння є однією з ключових причин обмеження проходки долота та основним критерієм його вибраковування. У практиці буріння стан периферійних різців і ступінь втрати номінального діаметра долота PDC часто недооцінюються. У центральній зоні долота характерним є вдавлювання ріжучих елементів у тіло лопаті, тоді як основний механізм їх зношення зумовлений дією гідроабразивного потоку промивальної рідини.

Окрім прискореного зношення периферійного озброєння, вібраційні навантаження зумовлюють низку інших негативних наслідків, серед яких – інтенсивне руйнування елементів вибійних двигунів, виникнення втомних напружень у колоні бурильних труб (в замкових різьбових з’єднань), а також формування каверн і жолобів. З метою підвищення стійкості ріжучої структури та забезпечення стабільної роботи долота на вибої застосовують різні методи боротьби з вібраціями. Наприклад: посилене антивібраційне озброєння, використання віброзахисних пристроїв в КНБК, застосування антивібраційних промивальних емульсій.

4.2 Конструктивні особливості посиленого антивібраційного озброєння доліт PDC

За конструктивними особливостями озброєння полікристалічних алмазних доліт класифікують на два типи: без посиленого антивібраційного озброєння та з ним. Причому антивібраційне озброєння умовно поділяють на основне та допоміжне. До основного антивібраційного озброєння належить дворядне розташування різців PDC та антивібраційні вставки на лопатях. Тоді як конструктивні особливості допоміжного озброєння містять:

1) імпрегнований захист ріжучих елементів;

2) композитне покриття та регулювання виступу різця над ним;

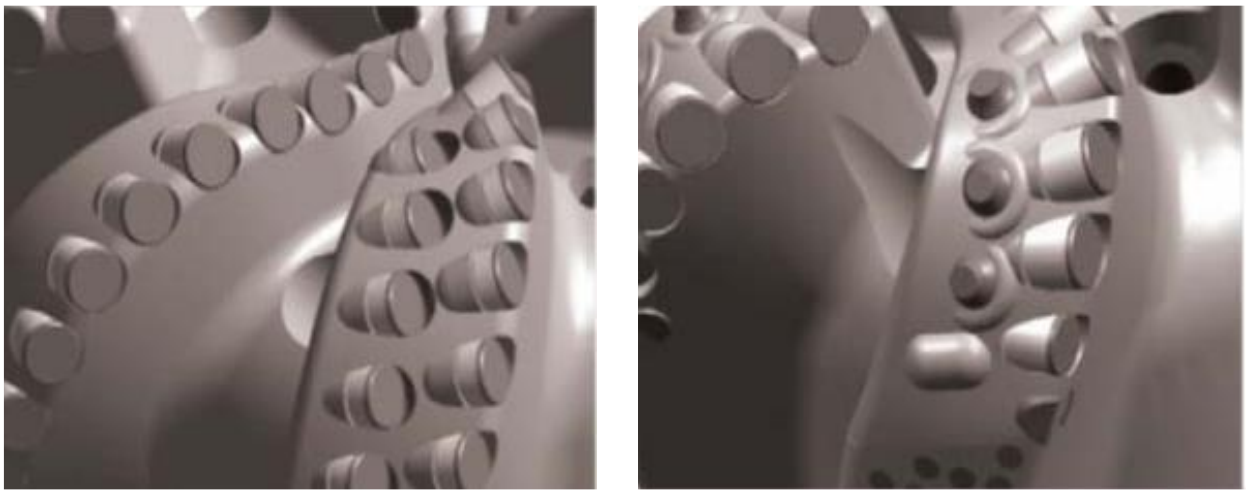
3) різці PDC з підвищеною ударною та абразивною стійкістю;

4) різці конічної форми;

5) різці овальної форми.

Руйнування гірської породи долотом із дворядним розміщенням різців відбувається наступним чином. Перший різець, занурюючись у породу, формує під собою зону стискання, а за собою – ділянку напружень розтягу. Другий різець взаємодіє вже з ослабленим шаром породи, здійснюючи його зрізання. Така конфігурація ріжучої структури забезпечує рівномірний розподіл навантаження між різцями, сприяє більш плавному характеру руйнування породи, підвищує стабільність роботи долота на вибої. Прикладом збільшення механічної швидкості проходки є PDC долота компанії Halliburton [23]. Другий ряд допоміжних різців (рис. 4.1, а) рекомендують використовувати в процесі буріння високоабразивних гірських порід, коли відбувається нерівномірне зношення ріжучих елементів. У разі перешарування порід з різними властивостями застосовують допоміжні різці типу R1 (рис. 4.1, б).

Стабілізаційні антивібраційні вставки встановлюють на ріжучу структуру лопатей долота. Вони можуть мати плоску форму, сферичну або призматичну. Антивібраційні вставки (рис. 4.2) використовуються як алмазний гасник осьових вібрацій, що зменшує зношування посадочного місця під різець.



а б

Рисунок 4.1 – Допоміжні різці PDC

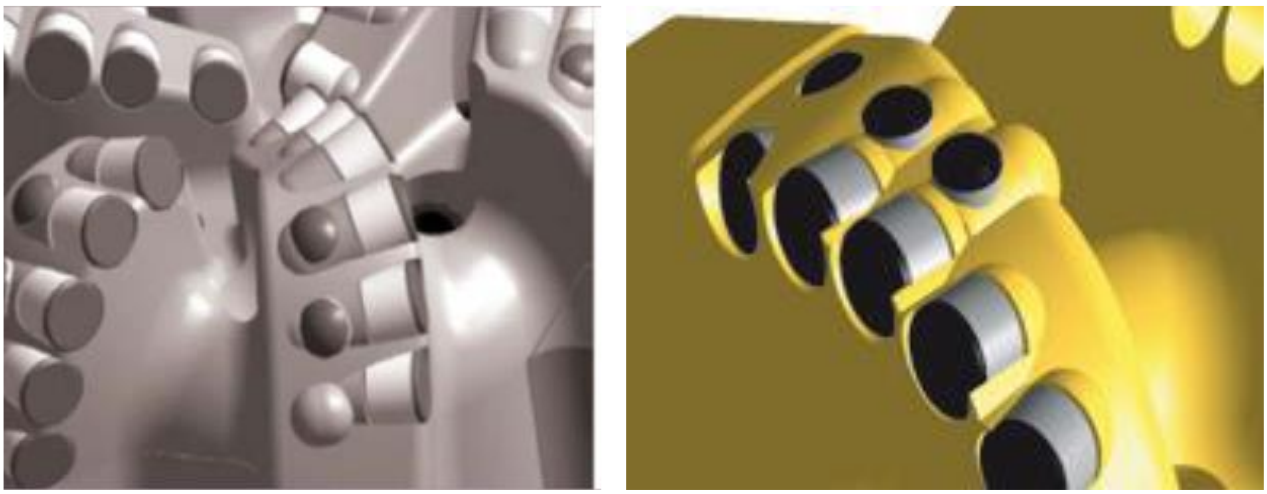
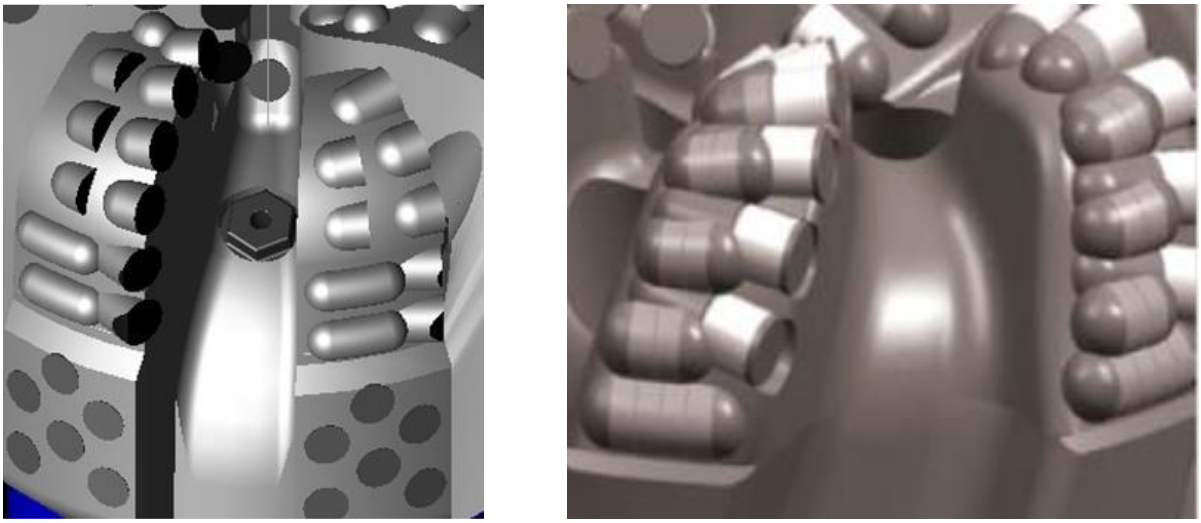


Рисунок 4.2 – Антивібраційні алмазні вставки в озброєнні доліт

У випадку наявності стабілізуючих вставок необхідно враховувати, що кожен різець PDC під час роботи рухається по спіральній траєкторії. Кут підйому цієї спіралі варіюється від декількох градусів для різців, розташованих поблизу осі обертання, до декількох десятих градуса для різців, розміщених на периферійній частині долота. Стабілізуючі вставки повинні контактувати з гірською породою при збільшенні кута підйому спіралі в межах від десятих до сотих долей градуса. Зважаючи на малу відстань від ріжучої кромки різця PDC до вставки, важливо точно витримувати висоту установки вставок для забезпечення ефективності їх роботи та стабілізації долота на вибої.

Імпрегнований захист різців (рис. 4.3) забезпечує демпфуючий ефект та сприяє рівномірному розподілу осьового навантаження між ріжучими елементами PDC. Ці елементи створюють подвійну ріжучу дію разом з

основними різцями, відтак підсилюють основну ріжучу структури. Долота з імпрегнованим захистом зазвичай застосовуються при бурінні середньо-твердих або абразивних порід, а також при високих швидкостях обертання долота або у розвідувальних свердловинах.



а б

Рисунок 4.3 – Імпрегнований захист за різцем

Композиційне покриття карбіду вольфраму обмежує надмірне проникнення різців PDC в гірську породу. Композиційне покриття наноситься товщиною 0,5-7,0 мм з метою забезпечення виступу різця над покриттям в діапазоні 0,1-5,0 мм. На початковому етапі контакту різця PDC з гірською породою занурення ріжучого елемента обмежується композиційним покриттям. У процесі експлуатації верхній шар покриття під дією контакту з породою піддається зносу, що призводить до формування додаткових стабілізаційних канавок глибиною 0-5,0 мм.

Застосування різців PDC з підвищеною ударною, абразивною та термо-механічною стійкістю дозволяє підвищити працездатність озброєння долота в умовах вібрацій. Наприклад, досить поширеними є різці ONYX компанії Smith Bits (рис. 4.4). Використання обертових різців ONYX 360° суттєве підвищує ресурс доліт PDC завдяки можливості повного обертання різця навколо власної осі. Різці встановлюють у зонах максимального зношення ріжучої структури долота, відтак задіюється уся поверхня ріжучої кромки.



Рисунок 4.4 – Різці ONYX

Так як нерухомі різці мають обмежену площу контакту з породою, то в роботі бере участь лише її невелика частина, тоді як понад 60 % поверхні ріжучої кромки залишається незадіяною. Обертовий різець ONYX 360° забезпечує рівномірне використання всієї ріжучої поверхні, що дозволяє довше зберігати гостроту алмазного шару та збільшує строк служби різця порівняно з традиційними нерухомими різцями.

Ще одним способом зменшення вібрацій є застосування конічних різців. Так, компанія Smith Bits застосовує різці конічної форми Stinger (рис. 4.5). Конічна форма та великий шар полікристалічних алмазів підвищують ударну міцність різців. Випробування доліт підтверджують, що різці Stinger стабілізують роботу долота та зменшують вібраційне навантаження.



Рисунок 4.5 – Конічні різці Stinger

Відомо, що лінійна швидкість обертання різців зменшується в міру їхнього наближення до центра озброєння долота. У зв’язку з цим ефективність руйнування породи PDC-різцями, розташованими в центральній зоні долота, істотно знижується, особливо під час буріння твердих порід. Тому, для підвищення ефективності роботи центральної частини ріжучої структури та зменшення пошкоджень доліт PDC у конструкцію додається ріжучий елемент Stinger. Відсутність традиційних PDC-різців у центральній зоні сприяє формуванню мікрокерна, що характеризується меншими напруженнями та нижчим опором руйнуванню.

Результати комп’ютерного моделювання методом скінченних елементів (рис. 4.6) свідчать, що PDC-різці з конічною поверхнею створюють більші навантаження на породу. Завдяки цьому відбувається інтенсивне руйнування та більш глибоке проникнення різця в породу. Унаслідок цього різці з випуклою геометрією демонструють вищу ефективність при руйнуванні твердих і міцних порід, ніж традиційні різці з плоскою робочою поверхнею.

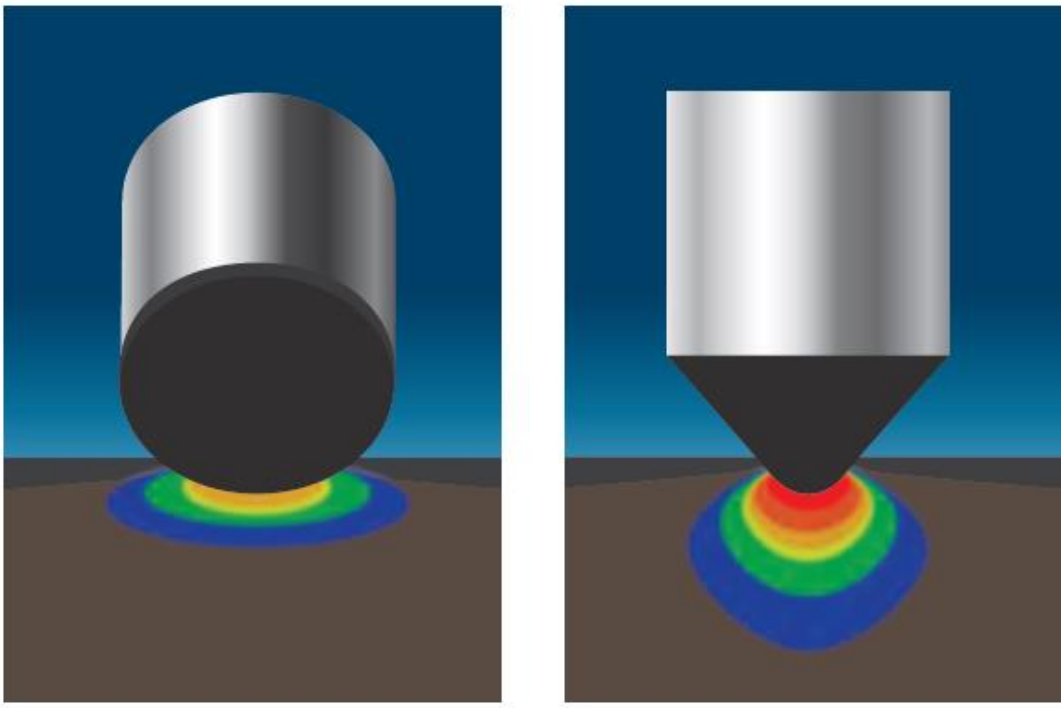


Рисунок 4.6 – Напружено-деформований стан PDC-різців Stinger

Компанія Schlumberger виготовляє різці гребенеподібної форми. Вони поєднують ріжучу дію стандартного PDC-різця та дроблячу дію різців з карбіду вольфраму. Високий ресурс досягається за рахунок використання якісних матеріалів та вибору оптимального способу їх обробки. Інноваційна форма різця AxeBlade (рис. 4.7) оптимізує ріжучу дію та покращує тепловідведення за умов підвищених осьових навантажень. Це досягається за рахунок більшої товщини алмазного шару, комбінації гранул полікристалічних алмазів різного розміру, раціонального вибору матеріалів.



Рисунок 4.7 – Різці AxeBlade

Результати моделювання за допомогою методу скінченних елементів показують, що різець типу AxeBlade забезпечує на 22% більшу глибину проникнення в гірську породу порівняно зі стандартними PDC-різцями за однакових умов і параметрів буріння.

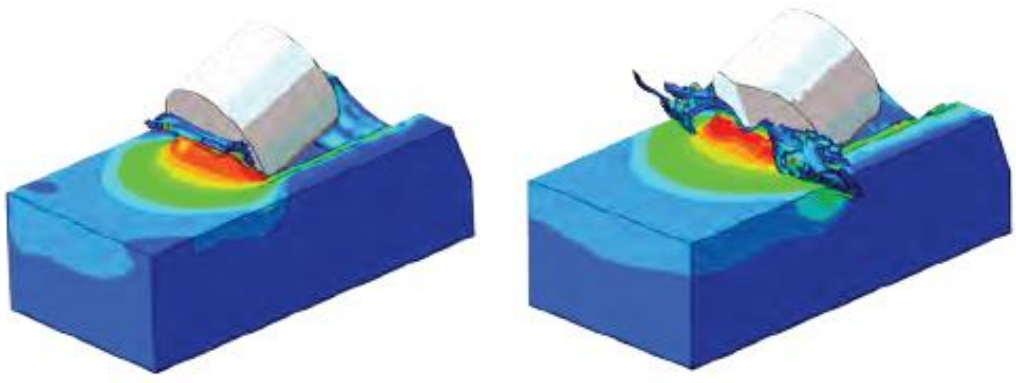


Рисунок 4.8 – Напружено-деформований стан PDC-різців AxeBlade

Корпорація National Oilwell Varco розробила чотири конструктивні варіанти PDC-різців для роботи в різних геологічних умовах (рис. 4.9). Різець із модифікованою геометрією (рис. 4.9, а) характеризується зменшеною площею контакту з гірською породою, що призводить до збільшення точкового навантаження та, як наслідок, до зменшення необхідного обертового моменту порівняно зі стандартними різцями. Конструкція різця з увігнутою центральною частиною (рис. 4.9, б) забезпечує більшу глибину різання, сприяє інтенсивнішому відведенню тепла та охолодження робочої поверхні. Складна геометрична форма різця (рис. 4.9, в) підвищує локальні контактні зусилля в ділянках виступаючих ребер, тоді як плоскі грані взаємодіють із породою аналогічно до традиційних різців. Четвертий тип різця (рис. 4.9, г) характеризується зменшеною площею контакту, відтак потребує меншого обертового моменту у порівнянні зі стандартними конструкціями.



а б в г

Рисунок 4.9 – Різці National Oilwell Varco

4.3 Розроблення різців PDC з увігнутою робочою поверхнею

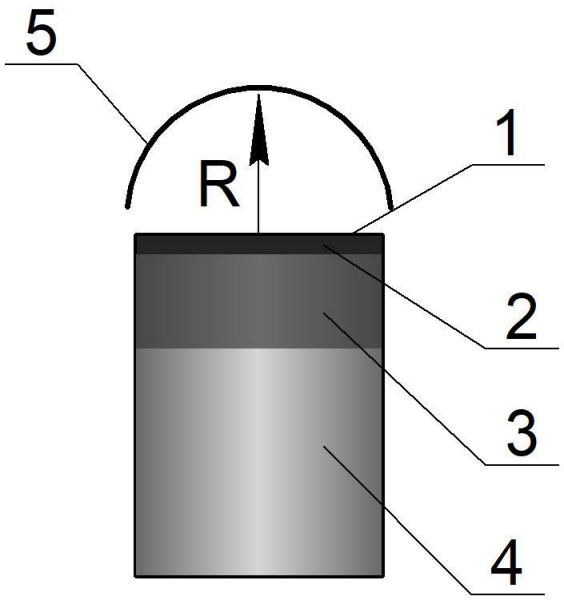
Зменшення рівня вібрацій досягається шляхом регулювання параметрів режиму буріння або додавання до промивальної рідини спеціальних реагентів зі змащувальними властивостями. Проте використання таких підходів призводить до зменшення механічної швидкості буріння, підвищення енергоспоживання або створення додаткових екологічних ризиків. Відтак, ефективним способом уникнення вібраціями є вибір конструктивного виконання озброєння PDC долота.

В процесі проектування полікристалічних алмазних доліт особлива увага приділяється схемі розміщення ріжучих елементів та геометрії їх робочої частини. Експериментальні дослідження свідчать, що різці з фронтальним кутом відмінним від нуля, ефективніше очищують вибій свердловини. Це пояснюється тим, що оптимальний фронтальний кут сприяє видаленню шламу з-під ріжучої кромки. Накопичення твердої фази перед різцем викликає інтенсивне нагрівання робочої поверхні PDC-елементів і погіршує умови руйнування породи. Оптимальні значення фронтального кута перебувають у межах 5–10°, що забезпечує максимальну механічну швидкість буріння та знижує енергетичні витрати.

Одним із підходів до зменшення рівня поперечних вібрацій є використання ріжучих елементів PDC із робочою поверхнею, що містить увігнуті канавки. Наявність таких канавок підвищує коефіцієнт зчеплення та тертя між різцем і вибоєм, а також забезпечує рівномірний розподіл навантаження між ріжучими елементами. Це важливо, оскільки дисбаланс сил різання часто є причиною виникнення поперечних вібрацій при бурінні.

Використання різців з увігнутими канавками в конструкції доліт дає змогу ефективно гасити поперечні коливання незалежно від кількості різців, усуваючи потребу в їх попарному орієнтуванні. Крім того, у випадку армування лопатей цими різцями дотримуються рекомендовані значення фронтальних кутів установлення різців. Разом із тим слід зазначити, що у певних геологічних умовах різці з канавками можуть мати схильність до зашламування. Накопичення вибуреної породи у робочій зоні погіршує умови охолодження та може прискорювати зношування ріжучих елементів.

Стандартний різець PDC містить плоский абразивний шар полікристалічних алмазів 2, твердосплавну основу 3 та корпус різця 4 (рис. 4.10). Полікристалічні алмазні долота оснащують ріжучими елементами таким чином, щоб їх робоча поверхня була орієнтована у напрямку різання гірської породи. За такої схеми сили тертя на робочій грані різців є відносно низькими, що зумовлює виникнення поперечних коливань



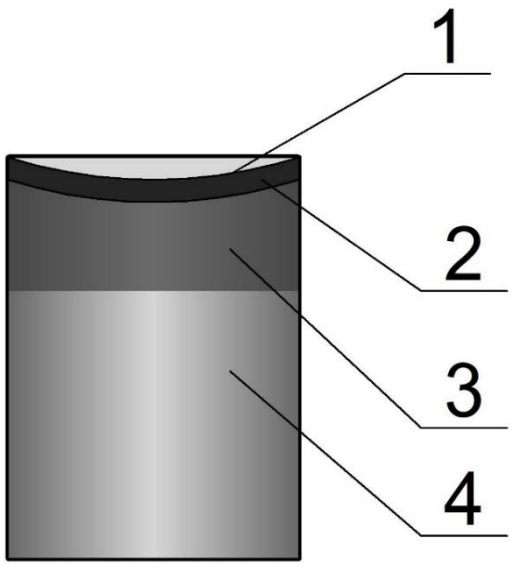
1 – ріжуча поверхня; 2 – шар полікристалічних алмазів; 3 – твердосплавна основа; 4 – корпус різця; 5 – ділянка руйнування породи;

Рисунок 4.10 – Схема роботи різця PDC

Під час руйнування гірських порід на робочому торці різця у напрямку обертання інструмента виникає сила R (рис. 4.10), що створює ріжучо-сколюючу дію на породу. Ця сила є результуючою від дії на різець осьового (P_{oc}) та тангенціального навантаження (F). Можливе відхилення вектора сили різання в межах пласта гірської породи пояснюється насамперед перерозподілом зон опору з боку вибою та може змінюватися залежно від величини P_{oc} і F.

За умови постійного режиму буріння та фіксованої глибини занурення різця у породу результуюча сила різання спрямовується перпендикулярно до центра його ріжучої поверхні (рис. 4.10). Відповідно, для концентрації енергії в центральній частині різця PDC та передачі в масив породи достатньо сформувати на робочій поверхні повздовжнє заглиблення (рис. 4.11).

Під час буріння різцями з увігнутою формою ріжучої поверхні сила різання породи може розкладатися на декілька складових, спрямованих назустріч один одному. Взаємна протидія цих векторів створює стабілізуючий ефект, що перешкоджає виникненню поперечних коливань різця та, відповідно, сприяє ефективному гасінню вібрацій бурового інструмента.



1 – ріжуча поверхня; 2 – шар полікристалічних алмазів; 3 – твердосплавна основа; 4 – корпус різця

Рисунок 4.11– Різець PDC з увігнутою ріжучою поверхнею

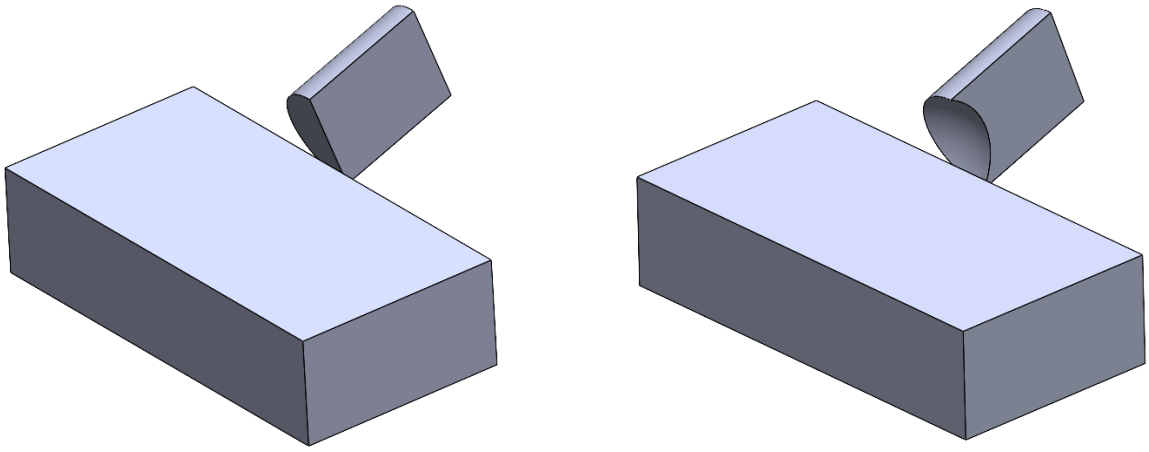
Для підтвердження ефективності роботи різців з увігнутою ріжучою поверхнею проведено моделювання із використанням методу скінченних елементів (МСЕ). МСЕ є ефективним інструментом для дослідження та глибокого аналізу динаміки процесу різання гірської породи. Він дозволяє вивчити напружено-деформований стан ріжучих елементів, проаналізувати динаміку сил та оптимізувати конструкцію інструменту, уникаючи значних витрат, пов'язаних з натурними експериментами.

Метою дослідження є використання МСЕ для моделювання процесів лінійного різання гірських порід різцями PDC різної форми. Основне завдання – дослідити вплив геометрії різця на характер та амплітуду коливань сили різання, щоб визначити оптимальну конструкцію, яка забезпечує мінімальні коливання та, як наслідок, підвищує стабільність процесу буріння.

В процесі задано граничні умови, що відповідають умовам роботи долота на вибої під час взаємодії різця з гірською породою. Пружні деформації, що виникають в інструменті та породі, моделювалися за допомогою узагальненого закону Гука. Для опису пластичних деформацій та визначення моменту руйнування породи була застосована модель Джонсона-Кука, яка є стандартом

для моделювання динамічного руйнування матеріалів при високих швидкостях деформації. Крім того, прийнято декілька припущень та спрощень. Зокрема, не враховувався термічний вплив матеріалу різця в зоні різання, оскільки основна увага приділялася механічним коливанням. Також не моделювався знос ріжучої кромки різця, що дозволило аналізувати вплив виключно початкової геометрії інструменту. Коефіцієнт тертя між різцем та породою прийнято постійним протягом усього процесу моделювання.

Для моделювання обрано дві форми різців – з плоскою та сферичною (увігнутою) робочою поверхнею (рис. 4.12). Розміри різців наступні: висота 18 мм, діаметр 13 мм. Вибір саме цих геометричних розмірів зумовлений характеристиками стандартних PDC-різців, представлених у номенклатурі провідних світових виробників. Режими різання обрані таким чином, щоб відповідати реальним умовам буріння. Швидкість різання вважається постійною із значенням 0,5 м/с. Глибина різання становить 0,5. Кут різання встановлено 20°, час різання – 0,15 с.



а) б)

а) різець з плоским торцем; б) – різець в увігненим всередину торцем

Рисунок 4.12 – Тривимірні моделі для дослідження

Під час імітаційного моделювання додатково побудовано дві системи координат для кожної з деталей (рис. 4.13). Гірську породу закріплено з торця (поз. В) та знизу (на рисунку не показано). До різця прикладено переміщення 10 мм по осі X (поз. А). переміщення по інших осях прийнято рівним 0.

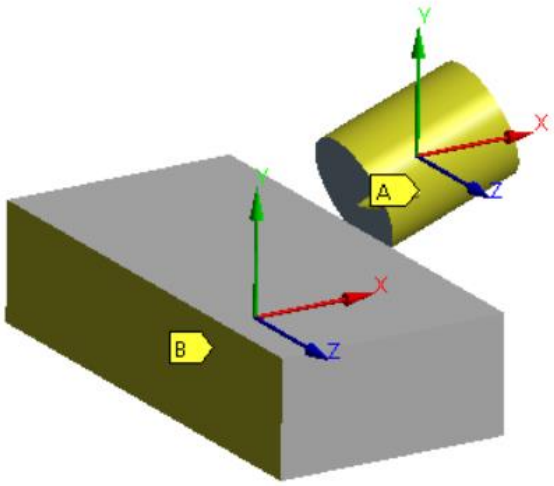


Рисунок 4.13 – Граничні умови

Особливостями сітки скінченних елементів (рис. 4.14), на яку розбито досліджувану модель є те, що застосовано елемент керування її розмірами. З метою отримання точніших результатів на поверхні, яка контактує із різцем, розміри сітки зменшено до 0,8 мм.

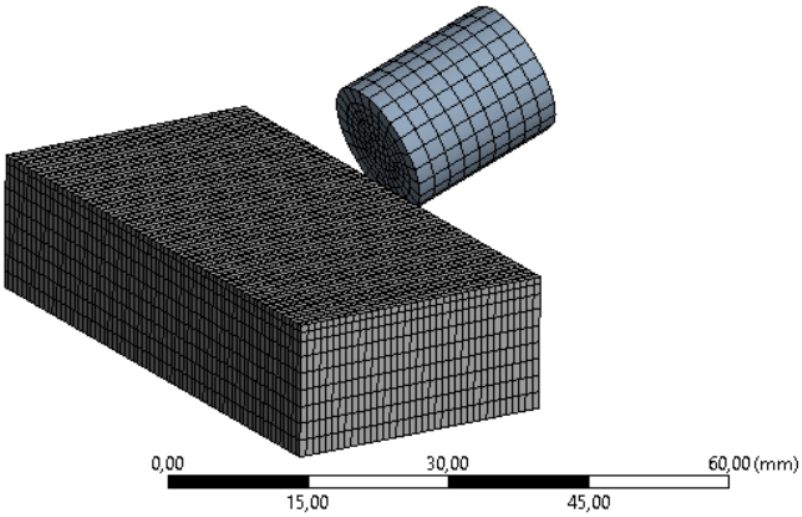


Рисунок 4.14 – Сітка скінченних елементів

Результати моделювання (рис. 4.15) для різних типів різців та режимів різання продемонстрували спільні характеристики процесу руйнування породи. Спостерігаються формування локалізованої зони зсуву безпосередньо біля ріжучої кромки, поширення пластичних деформацій углиб масиву породи та відокремлення скінченних елементів, що імітує утворення стружки. Найбільші

напруження концентруються в зоні контакту різця з породою. Їх розподіл має випадковий характер, що відображає неоднорідність процесу руйнування матеріалу на мікрорівні.

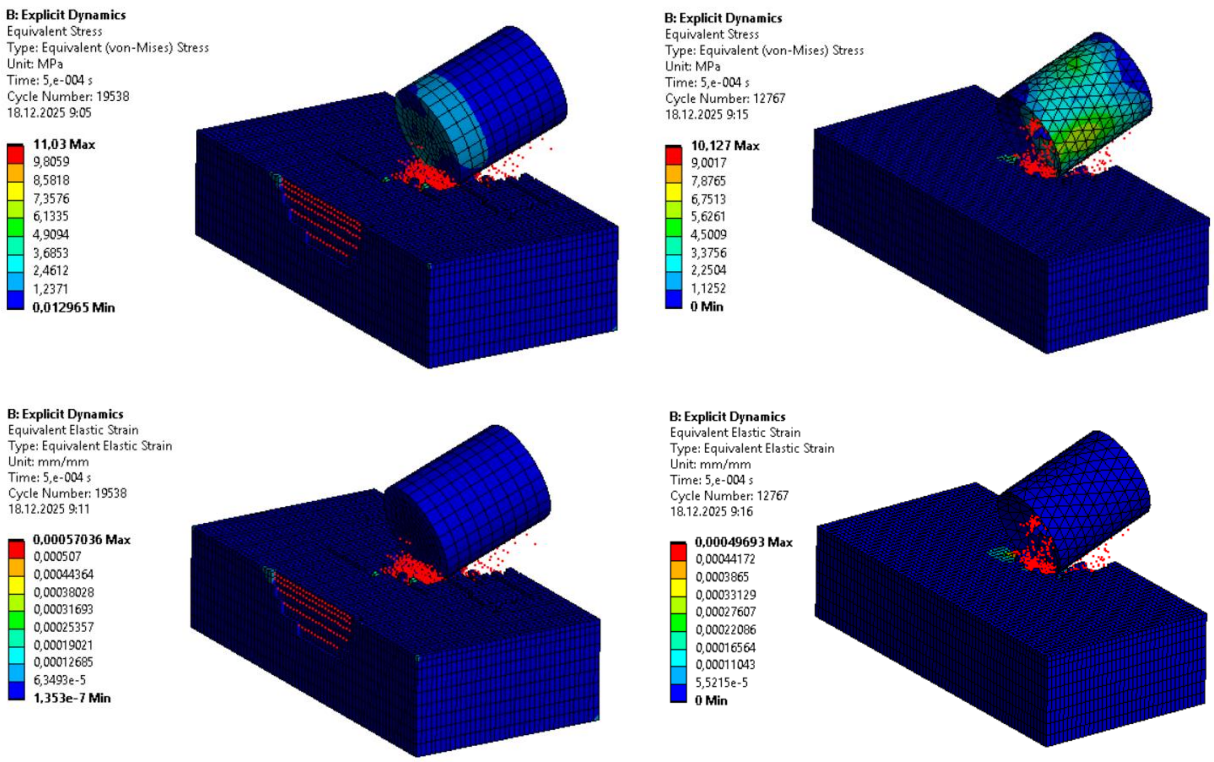
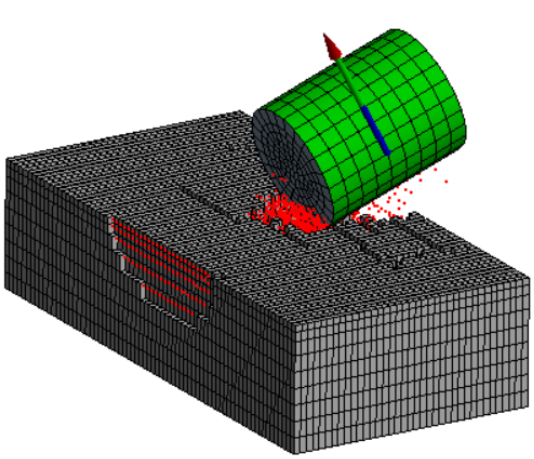
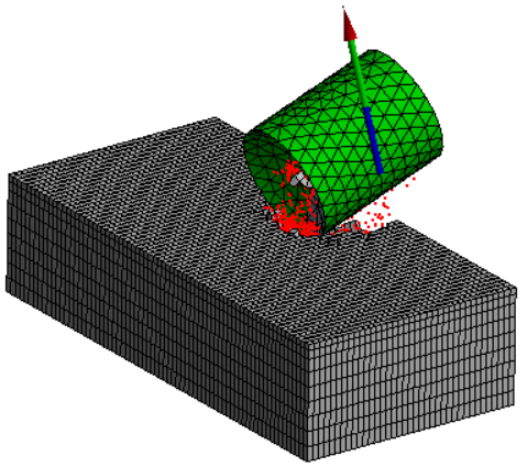


Рисунок 4.15 – Еквівалентні напруження досліджуваних моделей

Середні значення сили різання для різців сферичної форми становлять 112 кН, тоді як для плоских різців – 170 кН (рис. 4.16). Менші сили різання для різців увігнутої форми можна пояснити менш інтенсивним руйнуванням породи. Тобто, сферична форма різця є оптимальною через зменшення сили різання, так і з погляду забезпечення стабільності процесу руйнування гірської породи.

Отже, проведене дослідження з моделювання процесу різання гірських порід методом скінченних елементів дозволило отримати низку важливих результатів. Процес різання для всіх досліджених форм різців PDC характеризується коливальними, нерівномірними та випадковими силами. Геометрія ріжучої кромки є визначальним фактором, що впливає як на величину сили різання, так і на стабільність процесу. Сферичні різці демонструють менші середні значення сили різання.





Results	
Maximum Value Over Time	
X Axis	1,5852e+005 N
Y Axis	40152 N
Z Axis	15188 N
Total	1,7005e+005 N
Minimum Value Over Time	
X Axis	-77561 N
Y Axis	-32464 N
Z Axis	-46650 N
Total	0, N
Information	

Results	
Maximum Value Over Time	
X Axis	23283 N
Y Axis	12795 N
Z Axis	320,27 N
Total	1,1213e+005 N
Minimum Value Over Time	
X Axis	-84272 N
Y Axis	-73967 N
Z Axis	-211,36 N
Total	0, N
Information	

Рисунок 4.16 – Значення сили різання для досліджуваних моделей

Таким чином, використання різців PDC з увігнутою робочою поверхнею забезпечує гасіння поперечних вібрацій породоруйнівного інструмента та усуває вплив ударних навантажень на різець. Також запропонована форма різця PDC з поглибленням на робочій поверхні сприяє направленню струменя промивальної рідини в центральну частину грані, що покращує охолодження та очищення алмазної пластини різця від шламу в найбільш навантаженій ділянці. Загалом запропоноване рішення дозволить підвищити ресурс озброєння полікристалічних алмазних доліт та, як наслідок, техніко-економічні показники буріння.

5 ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ

5.1 Визначення потреби та вибір типорозмірів доліт

Вибір бурового долота для роботи в конкретному інтервалі глибин здійснюється з урахуванням низки факторів: форми вибою, необхідного діаметру стовбура свердловини, фізико-механічних властивостей порід, мінімального діаметра стовбура в розташованих вище інтервалах, поточної глибини свердловини, застосованого способу буріння та типу вибійного двигуна (за наявності), характеристик бурового розчину та схеми його циркуляції [2].

Використовуючи інформацію з ГТН на спорудження свердловини №102 Римарівської площі глибиною 4900 м [3] розбиваємо стовбур свердловини від гирла до проектної глибини буріння $L_{макс}$= 4900 м на окремі інтервали.

Таблиця 5.1 – Відомості про інтервали буріння свердловини

№ інт.	Межі, м		Форма вибою	Діаметр буріння, м	Спосіб буріння	Назва та характеристика (твердість, абразивність) гірських порід
	від	до				
1	0	330	суцільна	0,55	роторний	перешаровування глин, аргілітів і піску, м’які неабразивні породи
2	330	1640	суцільна	0,3937	роторний	пісковики з прошарками глин, м’які та середні неабразивні породи
3	1640	2320	суцільна	0,3937	роторний	перешаровування пісковиків і глин, середні неабразивні породи
4	2320	3800	суцільна	0,2953	роторний	глини з прошарками пісковику і алевролітів, середні абразивні породи
5	3800	4175	суцільна	0,2159	роторний	перешаровування пісковиків, алевролітів і глин, середні неабразивні породи
6	4175	4273	кільцева	0,2127	роторний	пісковики з прошарками глин, середні абразивні породи
7	4273	4580	суцільна	0,2159	роторний	перешаровування пісковиків і глин, середні неабразивні породи
8	4580	4708	кільцева	0,2127	роторний	пісковики з прошарками вапняку, тверді абразивні породи
9	4708	4900	суцільна	0,2159	роторний	пісковики з прошарками вапняку, середні та тверді неабразивні породи

Для кожного інтервалів обираємо типорозмір долота, використовуючи інформацію з табл. 5.1. Для інтервалів, де переважають м'які або середні за твердістю неабразивні породи (№1, 2, 5, 7) обираємо полікристалічні алмазні долота. Для інтервалів, складених з більш твердих порід або порід, що характеризуються високо абразивністю (№3, 4, 6, 8, 9) обираємо тришарошкові бурові долота. Конкретні типорозміри доліт для певного інтервалу наведені в табл. 5.2.

Для всіх інтервалів розраховуємо протяжність ΔL_i та відмітку середньої глибини L_{cpi}:

$$\Delta L_i = L_i - L_{i-1}, \tag{5.1}$$

$$L_{cpi} = \frac{L_i + L_{i-1}}{2}, \tag{5.2}$$

де L_{i-1}, L_i – початок та кінець інтервалу буріння, м.

$\Delta L_1=(L_1 - L_0)=330–0=330$ м; $L_{cp1}=(L_1 + L_0)/2=(330+0)/2=165$ м;

$\Delta L_2=(L_2 - L_1)=1640–330=1310$ м; $L_{cp2}=(L_2 + L_1)/2=(1640+330)/2=985$ м;

$\Delta L_3=(L_3 - L_2)=2320–1640=680$ м; $L_{cp3}=(L_3 + L_2)/2=(2320+1640)/2=1980$м;

$\Delta L_4=(L_4 - L_3)=3800–2320=1480$ м; $L_{cp4}=(L_4 + L_3)/2=(3800+2320)/2=3060$м;

$\Delta L_5=(L_5 - L_4)=4175–3800=375$ м; $L_{cp5}=(L_5+L_4)/2=(4175+3800)/2=3987,5$м;

$\Delta L_6=(L_6 - L_5)=4273–4175=98$ м; $L_{cp6}=(L_6 + L_5)/2=(4273+4175)/2=4224$ м;

$\Delta L_7=(L_7 - L_6)=4580–4273=307$ м; $L_{cp7}=(L_7+L_6)/2=(4580+4273)/2=4426,5$м;

$\Delta L_8=(L_8 - L_7)=4708–4580=128$ м; $L_{cp8}=(L_8 + L_7)/2=(4708+4580)/2=4644$м;

$\Delta L_9=(L_9 - L_8)=4900–4708=192$ м; $L_{cp8}=(L_9 + L_8)/2=(4900+4708)/2=4804$м.

Розраховуємо середньоінтервальні значення проходки на долото за наступною формулою:

$$П_i = 39 \cdot \left(\frac{\frac{25000}{L_{макс}} + 2L_{макс} \cdot 10^{-3}}{\exp(\frac{3L_{cpi}}{L_{макс}} + 1)} \right). \tag{5.3}$$

$$П_1 = 39 \cdot \frac{\frac{25000}{4900} + 2 \cdot 4900 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{3 \cdot 165}{4900} + 1\right)} = 193{,}3 \text{ м};$$

$$П_2 = 39 \cdot \frac{\frac{25000}{4900} + 2 \cdot 4900 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{3 \cdot 985}{4900} + 1\right)} = 116{,}9 \text{ м};$$

$$П_3 = 39 \cdot \frac{\frac{25000}{4900} + 2 \cdot 4900 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{3 \cdot 1980}{4900} + 1\right)} = 63{,}6 \text{ м};$$

$$П_4 = 39 \cdot \frac{\frac{25000}{4900} + 2 \cdot 4900 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{3 \cdot 3060}{4900} + 1\right)} = 32{,}8 \text{ м};$$

$$П_5 = 39 \cdot \frac{\frac{25000}{4900} + 2 \cdot 4900 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{3 \cdot 3987{,}5}{4900} + 1\right)} = 18{,}6 \text{ м};$$

$$П_6 = 39 \cdot \frac{\frac{25000}{4900} + 2 \cdot 4900 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{3 \cdot 4224}{4900} + 1\right)} = 16{,}1 \text{ м};$$

$$П_7 = 39 \cdot \frac{\frac{25000}{4900} + 2 \cdot 4900 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{3 \cdot 4426{,}5}{4900} + 1\right)} = 14{,}2 \text{ м};$$

$$П_8 = 39 \cdot \frac{\frac{25000}{4900} + 2 \cdot 4900 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{3 \cdot 4644}{4900} + 1\right)} = 12{,}5 \text{ м};$$

$$П_9 = 39 \cdot \frac{\frac{25000}{4900} + 2 \cdot 4900 \cdot 10^{-3}}{\exp\left(\frac{3 \cdot 4804}{4900} + 1\right)} = 11{,}3 \text{ м}.$$

Наступним етапом знаходимо витрату доліт для спорудження свердловини за формулою:

$$Z_i = \frac{\Delta L_i}{П_i}. \qquad (5.4)$$

z_1=330/193,3=1,7; приймаємо z_1=2;

z_2=1310/116,9=11,2; приймаємо z_2=12;

z_3=680/63,6=10,7; приймаємо z_3=11;

z_4=1480/32,8=45,1; приймаємо z_4=46;

z_5=375/18,6=20,2; приймаємо z_5=21;

z_6=98/16,1=6,1; приймаємо z_6=7;

z_7=307/14,2=21,6; приймаємо z_7=22;

z_8=128/12,5=10,2; приймаємо z_8=11;

z_9=192/11,3=17,0; приймаємо z_9=17;

Результати проведених обчислень та розрахунків заносимо до таблиці 5.2. Крім того, виписуємо з ГТН на спорудження свердловини інформацію про осьове навантаження на долото та частоту обертання доліт.

Таблиця 5.2 – Типорозміри бурових доліт та показники відпрацювання

№ інт.	ΔL_i м	$L_{сpi}$ м	Типорозмір інструменту	n_i, $хв^{-1}$	$Р_{оді}$, кН	$Р_{доп}$, кН	$\frac{Р_{оді}}{Р_{доп}}$	Z_i, шт.	$П_i$, м
1	140	70	PDC 393,7 MX-1HC	50	30	700	0,04	1	191,9
2	160	220	PDC 393,7 MAX-GT	90	50	700	0,07	1	169,9
3	600	600	III 295,3 МСГВУ	90	120	500	0,24	5	124,9
4	820	1310	III 295,3 СЗГНУ	70	140	500	0,28	12	70,2
5	130	1785	PDC 295,3 VD6-19	50	160	500	0,32	3	47,8
6	650	2175	III 215,9 СЗГАУ	70	120	380	0,32	19	34,8
7	980	2990	PDC 215,9 VD6-19	50	140	380	0,37	55	17,9
8	160	3560	212,7/80 ТКЗ	50	80	380	0,21	15	11,3
9	60	3670	III 215,9 СТГАУ	70	180	380	0,47	6	10,4

Розрахуємо сумарну потребу в породоруйнівному інструменті для свердловини №102 глибиною 4900 м:

$$Z = \sum Z_i . \qquad (5.5)$$

Z=2+12+11+46+21+7+22+11+17=149 шт.

Знайдемо середню проходку на долото з наступного виразу:

$$П_{ср} = \frac{L_{макс}}{Z} . \qquad (5.6)$$

$П_{ср}$=4900/149=32,9 м.

Побудуємо графік середньоінтервального значення проходки на долото від середньої глибини інтервалу $П_i=f(L_{срі})$ (рис. 5.1). Відзначимо на графіку інтервали застосування доліт одного типорозміру.

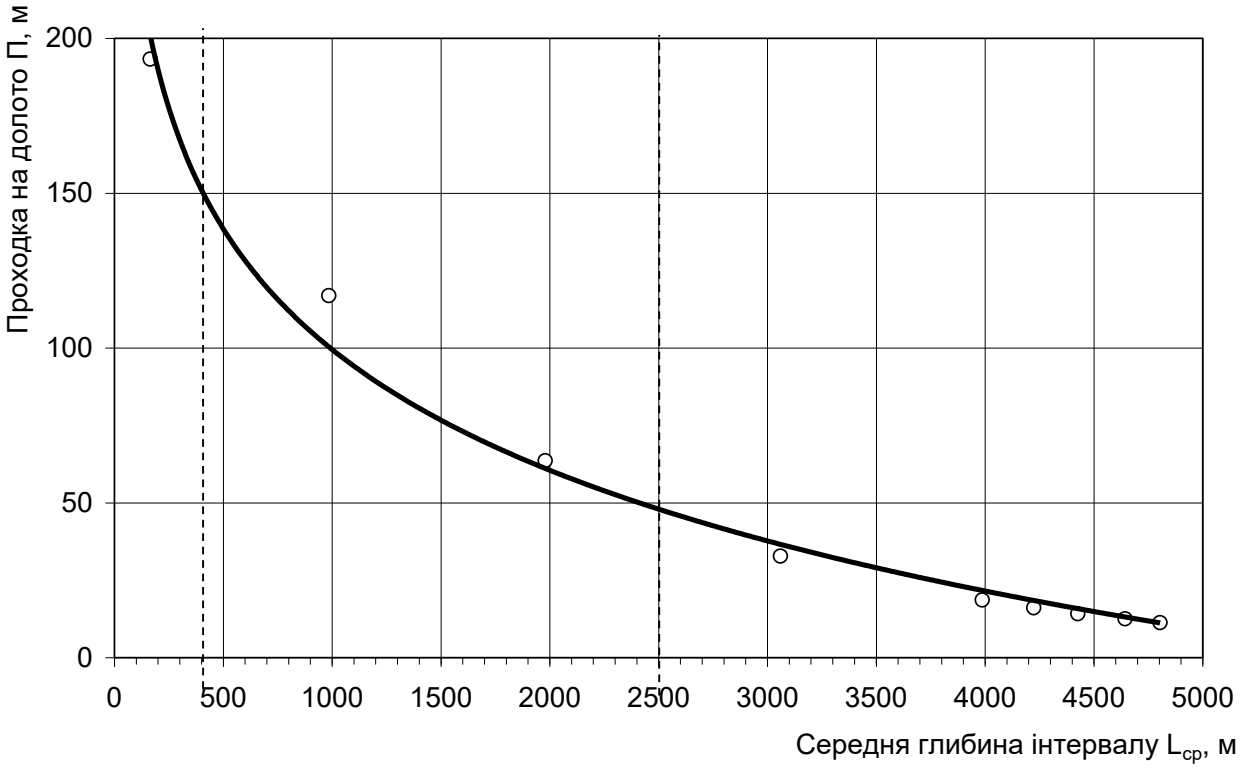


Рисунок 5.1 – Графік середньоінтервальної величини проходки на долото від середньої глибини інтервалу буріння

Використовуючи дані з табл. 5.1 та 5.2, побудуємо криву поглиблення (рис. 5.2) – графік поточної глибини свердловини від числа відпрацьованих з початку буріння доліт $L_i = f(Z)$. Графічна залежність зображена на рис. 5.2.

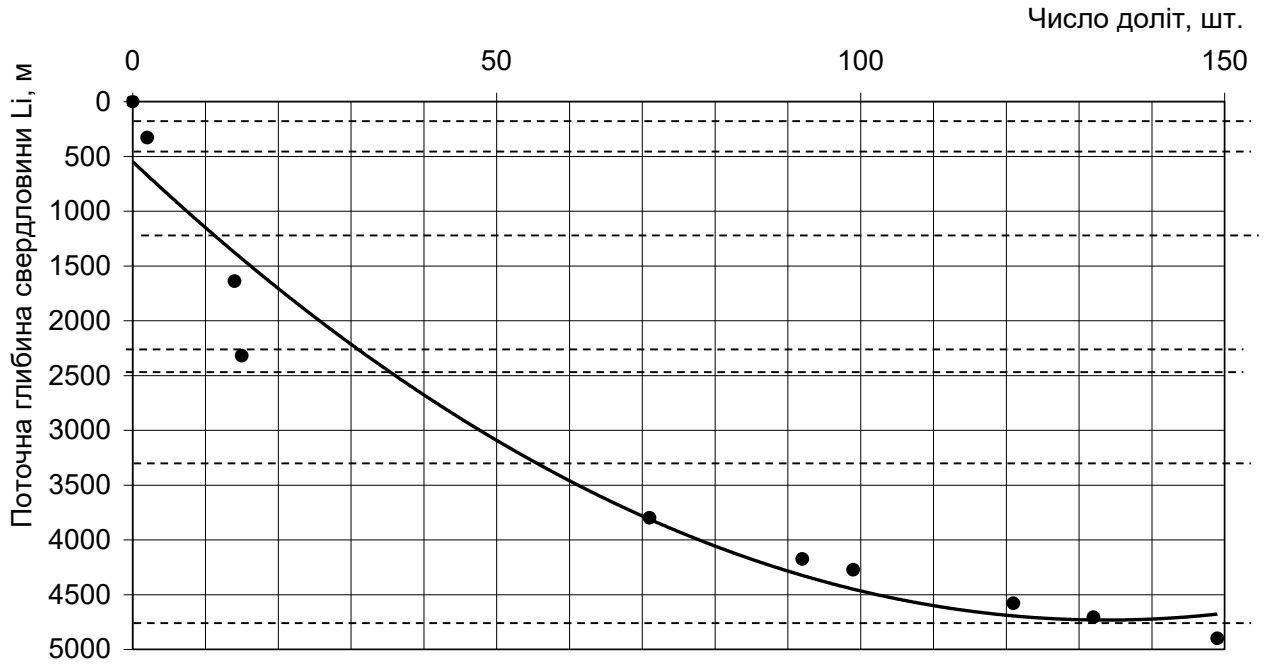


Рисунок 5.2 – Графік поточної глибини від кількості відпрацьованих доліт

Обчислимо середньоінтервальні показники механічної швидкості буріння $V_{мсрі}$ користуючись наступним виразом:

$$V_{мері} = \frac{\Delta L_i}{Z_i \cdot t_{срі}}. \qquad (5.7)$$

де $t_{срі}$ – стійкість долота для певного інтервалу.

Для шарошкових доліт $t_{срі}$ приймають в межах 16-30 год, для алмазних та PDC доліт – в межах від 75 год до 150 год.

$V_{мср1}$ = 330 / (2·16)=10,3 м/год.;

$V_{мср2}$ = 1310 / (12·16)=6,82 м/год.;

$V_{мср3}$ = 680 / (11·25)=2,47 м/год.;

$V_{мср4}$ = 1480 / (46·25)=1,29 м/год.;

$V_{мср5}$ = 375 / (21·25)=0,71 м/год.;

$V_{мср6}$ = 98 / (7·30)=0,47 м/год.;

$V_{мср7}$ = 307 / (22·30)=0,46 м/год.;

$V_{мср8}$ = 128 / (11·30)=0,39 м/год.;

$V_{мср9}$ = 192 / (17·30)=0,38 м/год.

На рис. 5.3 наведено графік залежності механічної швидкості буріння (в м/год) від поточної глибини свердловини $V_{мсрі}=f(L_i)$.

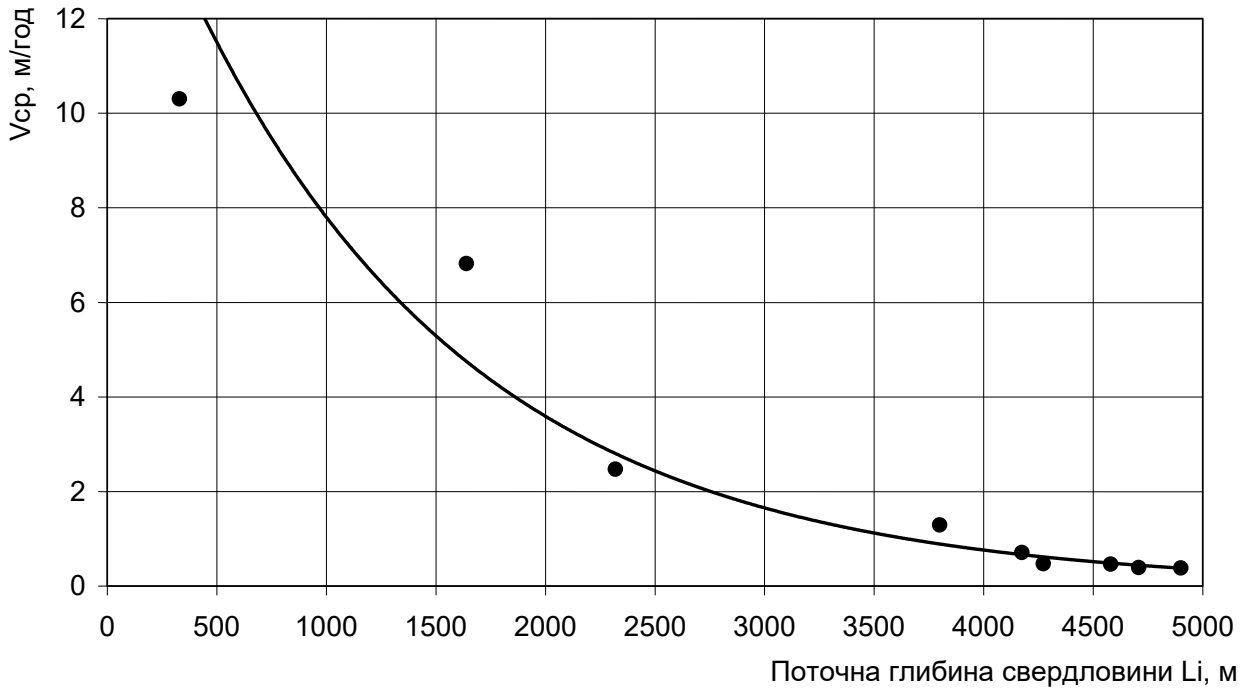


Рисунок 5.3 – Графічна залежність механічної швидкості буріння від глибини свердловини

Аналіз отриманих графічних залежностей дає підстави зробити такі висновки. Із збільшенням глибини свердловини помітно зростає кількість використаних доліт. Це зумовлено підвищенням твердості та абразивності гірських порід, що відповідно ускладнює процес їх руйнування. Внаслідок цього зменшується механічна швидкість буріння та середньоінтервальна проходка на одне долото.

За результатами проведених розрахунків встановлено, що для спорудження свердловини необхідно використати 57 доліт PDC типорозмірів 393,7 MX-1HC, PDC 393,7 MAX-GT та 215,9 VD6-19, що становить приблизно половини всього комплекту інструменту. Іншу частину породоруйнівного інструменту, необхідного для проходки свердловини, формують шарошкові долота.

5.2 Розрахунок корпуса долота

Проведемо розрахунок корпуса PDC долота на статичну міцність. Відомо, що в процесі буріння на корпус діє осьова сила та обертовий момент внаслідок обертання колони бурильних труб. Тому, перевірочний розрахунок на статичну міцність будемо здійснювати на сумісну дію стискаючих та дотичних напружень в середовищі програми SolidWorks Simulation. Розрахункова схема корпусу наведена на рис. 5.4.

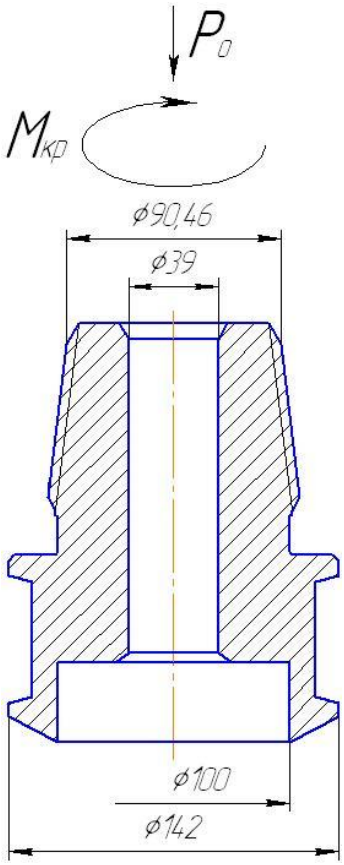


Рисунок 5.4 – Розрахункова схема корпуса

На початковому етапі створюємо тривимірну модель корпусу долота (рис. 5.5) та задаємо властивості матеріалу. Наступним кроком встановлюємо граничні умови та прикладаємо навантаження. Згідно геолого-технічного наряду, максимальне осьове навантаження на долото становить 160 кН. Обертовий момент залежить від сумарної потужності, що витрачається на обертання бурильної колони та на роботу долота під час руйнування породи на вибої свердловини, а також від частоти обертання долота. Приймаємо для розрахунків значення обертового моменту 6 кНм.

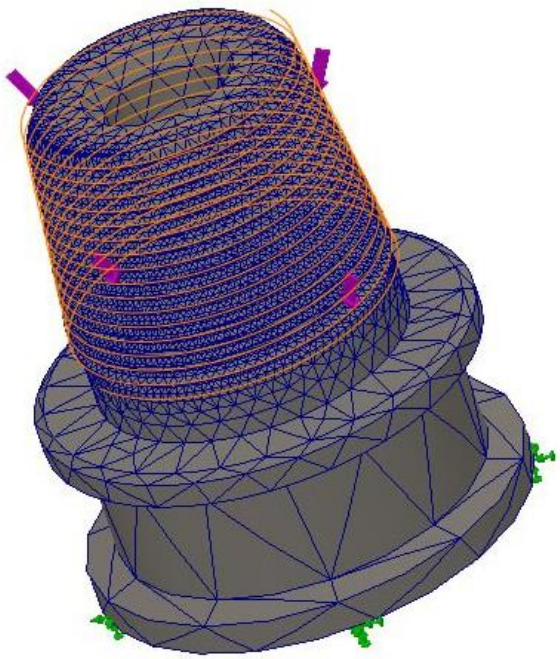


Рисунок 5.5 – Тривимірна модель корпуса PDC долота

В результаті проведеного розрахунку отримано епюру еквівалентних напружень, деформацій та переміщення (рис. 5.6-5.8). Аналіз отриманих епюр показує, що максимальні значення еквівалентних напружень спостерігаються в ділянках зміни діаметра корпусу. Відповідно до результатів розрахунку, саме в цих зонах еквівалентні напруження близькі до максимальних значень, а саме 180 МПа. У центральній та верхній частині корпуса напруження не перевищують 40-60 МПа та мають рівномірний характер, що свідчить про задовільну жорсткість і рівномірність передавання навантажень.

Важливим моментом є встановлення коефіцієнту запасу міцності, для цього потрібно порівняти максимальні еквівалентні напруження із границею текучості матеріалу корпуса, яка становить 241 МПа. Отримані в моделі максимальні напруження (приблизно 75–80 % від границі текучості) дають змогу стверджувати, що корпус долота не досягає межі пластичного деформування. Загалом результати моделювання демонструють, що корпус долота володіє достатнім запасом міцності за основними критеріями при одночасному навантаженні осьовою силою та обертовим моментом.

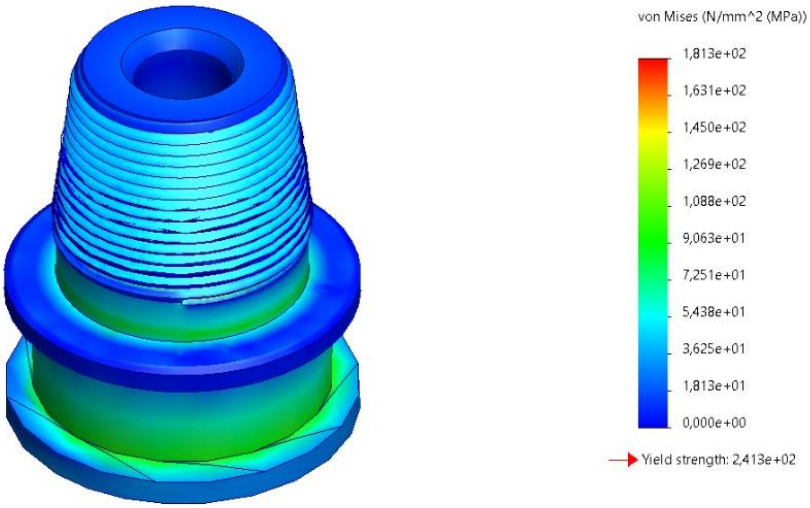


Рисунок 5.6 – Епюра еквівалентних напружень

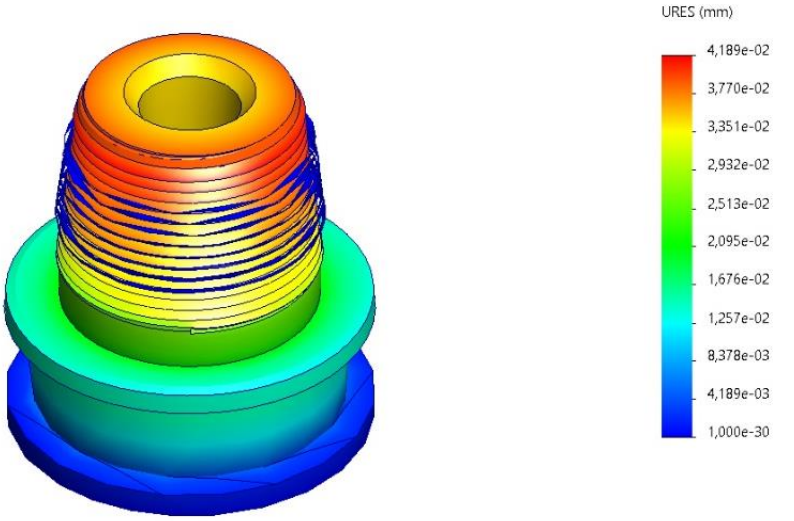


Рисунок 5.7 – Епюра результуючих переміщень

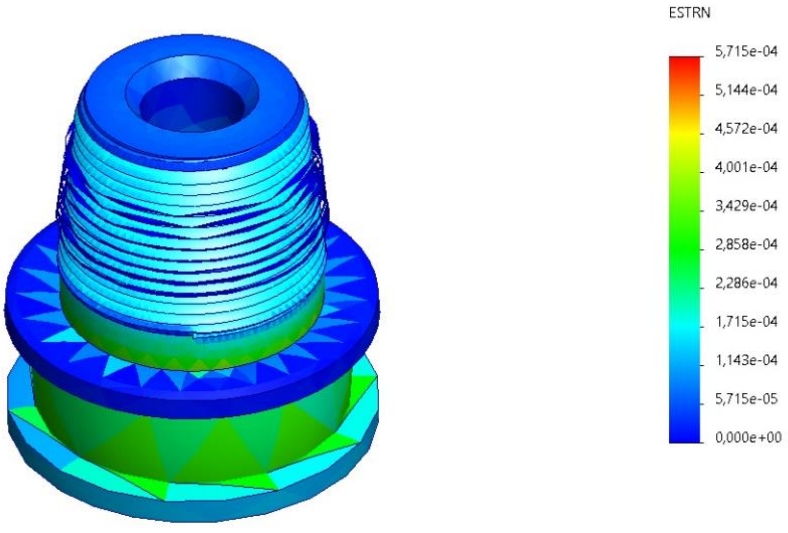


Рисунок 5.8 – Епюра відносних деформацій

5.3 Розрахунок швидкості витікання струменю з насадки

Метою розрахунку є визначення швидкості витікання потоку бурового розчину з насадок PDC-долота.

Для розрахунку ударної сили струменю скористаємося формулою:

$$P_y = 0{,}0173 \cdot \sqrt{\Delta P \cdot \rho}; \quad (5.8)$$

де ΔP – втрати тиску в насадці;

ρ – густина бурового розчину, ρ=1160 кг/м^3.

Втрати тиску в насадці знаходимо за формулою:

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot Q^2}{10{,}858 \cdot F^2}; \quad (5.9)$$

де Q – витрата бурових насосів; Q =0,026 м^3/с;

F – площа перерізу насадки.

Також ударну сила струменя можна визначити за допомогою виразу:

$$P_y = 0{,}000516 \cdot \rho \cdot Q \cdot V; \quad (5.10)$$

де V – швидкість витікання струменю.

Підставляючи (5.9) в (5.8) одержуємо вираз для розрахунку швидкості витікання бурового розчину з насадки долота:

$$V = 0{,}32 \cdot \frac{Q}{F}; \quad (5.11)$$

Площу перерізу насадки знаходимо наступним чином:

$$F = 1{,}33 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}; \quad (5.12)$$

де d – діаметр насадки.

$$F = 1{,}33 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}00953^2}{4} = 7{,}13 \cdot 10^{-5}\ \text{м}^2;$$

$$V = 0{,}32 \cdot \frac{0{,}026}{7{,}13 \cdot 10^{-5}} = 116{,}7\ \text{м/с}.$$

Встановлено, що гідромоніторний ефект досягається за швидкості витікання струменя бурового розчину з насадки не менше 80 м/с. Відтак, отриманий результат перевищує необхідну мінімальну швидкість.

6 Експлуатація полікристалічних алмазних доліт

Ефективність застосування полікристалічних алмазних доліт значною мірою залежить від вибору їхнього типу для проходження певних інтервалів стовбура свердловини, раціонального поєднання параметрів режиму буріння та дотримання встановлених вимог експлуатації інструменту. Процес експлуатації бурових доліт охоплює комплекс технологічних та організаційних заходів, спрямованих на підготовку стовбура свердловини, бурового обладнання й інструменту, а також на виконання операцій зі спуску долота, його відпрацювання та подальшого підйому. Метою таких заходів є забезпечення максимально можливих техніко-економічних показників буріння. Контроль за експлуатацією доліт здійснюється інженерно-технічними фахівцями технологічних служб бурових підприємств.

Експлуатація полікристалічних алмазних доліт за своїми принципами є аналогічною до експлуатації традиційних алмазних доліт. Перед початком буріння вибій свердловини повинен бути очищений від металевих уламків із застосуванням ловильного інструменту. У процесі буріння та виконання допоміжних операцій необхідно суворо дотримуватися заходів безпеки, спрямованих на недопущення потрапляння металевих частинок на вибій.

Під час згвинчування замкового різьбового з’єднання долота з бурильною колоною слід використовувати спеціальний інструмент та забезпечувати дотримання номінального значення обертового моменту. Спуск полікристалічних алмазних доліт у свердловину виконується з підвищеною обережністю, зокрема з недопущенням різких ударів та раптових посадок інструменту. У випадках необхідності пророблення стовбура свердловини бурильну колону попередньо підіймають, після чого здійснюють інтенсивну промивку свердловини з використанням максимальної продуктивності бурових насосів. Операції з розширення стовбура свердловини рекомендується виконувати за кутової швидкості обертання 6,28–7,33 $с^{-1}$ та осьового

навантаження на долото в межах 10–20 кН, що забезпечує стабільну роботу інструменту та мінімізує ризик передчасного зношування.

Під час підходу бурового інструменту до вибою свердловини слід підтримувати мінімально можливе осьове навантаження на долото. Для забезпечення очищення вибою долото попередньо піднімають приблизно на 0,3 м над вибоєм та здійснюють його обертання протягом 5 хвилин за максимальної витрати промивальної рідини, що сприяє видаленню шламу та металевих частинок. Після завершення промивання долото повільно опускають до контакту з вибоєм за умови осьового навантаження 10–25 кН, швидкості обертання 6,38–9,42 $с^{-1}$ та максимальної подачі промивальної рідини, після чого розбурюють орієнтовно 0,5 м породи. На наступному етапі швидкість обертання підвищують до оптимального значення, визначеного для конкретного типу долота та геолого-технічних умов буріння, а осьове навантаження збільшують інтервалами по 10 кН. Якщо підвищення навантаження не супроводжується зростанням механічної швидкості буріння, осьове навантаження необхідно повернути до попереднього значення.

Обертовий момент на долоті є інформативним показником ефективності руйнування гірської породи та може використовуватися як критерій для вибору оптимального осьового навантаження, що забезпечує максимальну механічну швидкість буріння. У випадках, коли результати випробувань демонструють кілька комбінацій осьового навантаження та частоти обертання, які забезпечують однакові значення механічної швидкості та проходки, доцільно обирати режим буріння з меншим осьовим навантаженням. Застосування такого режиму знижує ризик виникнення викривлень стовбура свердловини та загалом сприяє стабільності процесу буріння.

Досвід експлуатації полікристалічних алмазних доліт на родовищах США та Північного моря свідчить, що під час розбурювання м’яких гірських порід оптимальні параметри режиму роботи долота, як правило, характеризуються низькими значеннями осьового навантаження та підвищеними швидкостями обертання. У випадку буріння твердих порід пошук оптимальних режимних

параметрів доцільно здійснювати шляхом попереднього збільшення частоти обертання долота з подальшим поступовим нарощуванням осьового навантаження. При цьому обов'язковим є контроль зміни обертового моменту.

Ефективність роботи полікристалічних алмазних доліт істотно залежить від якості очищення вибою, а також від стану робочої поверхні та інтенсивності охолодження долота. Раціональна питома гідравлічна потужність на одиницю площі вибою визначається фізико-механічними властивостями розбурюваних порід, типом і конструктивними особливостями долота, а також технологічними параметрами промивальної рідини. Під час розбурювання м'яких пластичних порід із механічною швидкістю 12–31 м/год оптимальне значення питомої гідравлічної потужності становить 2,8-5,7 МВт/м².

Вважається недоцільним створювати надмірно високі швидкості витікання промивальної рідини з насадок долота, оскільки останні розташовані на відстані 12,7–19,0 мм від вибою. У таких умовах при підвищених швидкостях струменя може формуватися відбитий від вибою потік, який спричиняє ерозійне руйнування корпусу долота. Це, у свою чергу, підвищує ризик втрати різців і насадок.

Полікристалічні алмазні долота чутливо реагують на зміну твердості та абразивності розбурюваних порід. При переході у твердіші інтервали для зростання механічної швидкості буріння доцільно зменшувати частоту обертання долота та збільшувати осьове навантаження. У випадках, коли підвищення механічної швидкості супроводжується появою ривків, стабілізації механічної швидкості можна досягти шляхом зменшення осьового навантаження та одночасного збільшення частоти обертання.

Під час розбурювання м'яких в'язких порід із застосуванням промивальних рідин на водній основі можливе налипання вибуреної породи на елементи долота. Ознаками цього процесу є зниження механічної швидкості буріння та обертового моменту, а також підвищення тиску в нагнітальній лінії, яке зазвичай зменшується після відриву долота від вибою. Для запобігання налипанню породи рекомендується тимчасово підняти долото над вибоєм,

збільшити подачу бурових насосів і періодично підвищувати частоту обертання. Якщо такі заходи не забезпечують позитивного ефекту, режим буріння слід скоригувати таким чином, щоб зменшити механічну швидкість до рівня, за якого налипання не відбувається. У разі, якщо за цих умов подальше використання полікристалічних алмазних доліт стає економічно необґрунтованим, доцільно замінити долото на інший тип.

В ході відпрацювання доліт PDC відбувається поступове зношування, що призводить до зниження механічної швидкості буріння. Різке зменшення механічної швидкості та обертового моменту, підвищення тиску в нагнітальній лінії або несподіване збільшення обертового моменту при відносно низькому осьовому навантаженні є сигналом для негайного підйому долота зі свердловини.

Отже, ефективність роботи полікристалічних алмазних доліт безпосередньо залежить від правильного вибору типу долота для конкретних гірничо-геологічних умов, дотримання оптимальних параметрів режиму буріння та контролю за експлуатацією. Важливими факторами є підготовка вибою свердловини, очищення від металевих уламків та шламу, підтримка оптимальної частоти обертання, осьового навантаження на долото, а також контроль стану бурового розчину. Таким чином, раціональна експлуатація PDC-доліт включає комплекс технологічних і організаційних заходів, спрямованих на підтримку стабільного контакту ріжучих елементів з породою, забезпечення відведення шламу та охолодження долота, а також зменшення негативного впливу вібрацій, що в цілому підвищує ресурс доліт і ефективність процесу буріння свердловин.

ВИСНОВКИ

На сьогодні полікристалічні алмазні долота широко застосовуються під час буріння нафтових і газових свердловин в Україні та забезпечують щонайменше 50 % загального обсягу проходки породоруйнівного інструменту. Водночас дія повздовжніх і поперечних вібрацій істотно погіршує умови роботи доліт PDC, призводячи до прискореного зношування ріжучого озброєння та, як наслідок, до зниження довговічності інструменту.

В магістерській роботі проведено аналіз умов експлуатації, а також основних переваг і обмежень PDC доліт. Огляд конструкцій полікристалічних алмазних доліт провідних компаній-виробників дав змогу виявити характерні варіанти конструктивного виконання окремих, зокрема озброєння, системи промивання та антивібраційного захисту. На основі проведеного аналізу встановлено раціональні області застосування окремих моделей доліт PDC залежно від конкретних гірничо-геологічних умов буріння.

Враховуючи, що визначальним чинником передчасного виходу з ладу PDC доліт є вібраційні навантаження, у роботі запропоновано комплекс заходів, спрямованих на зменшення їх негативного впливу. Розроблено конструкцію різця з увігнутою робочою поверхнею. Застосування таких різців забезпечує ефективне гасіння поперечних коливань породоруйнівного інструмента та знижує дію ударних навантажень на ріжучі елементи. У цілому запропоноване технічне рішення сприятиме підвищенню ресурсу ріжучого озброєння полікристалічних алмазних доліт і, відповідно, покращенню основних техніко-економічних показників процесу буріння.

На основі виконаних розрахунків обґрунтовано потребу в бурових долотах та визначено їх типорозміри для спорудження свердловини №102 Римарівської площі. Крім того, проведено міцнісний розрахунок корпуса долота, а також визначено швидкість витікання промивальної рідини з гідромоніторних насадок. Наведено рекомендації щодо раціональної експлуатації полікристалічних алмазних доліт з метою підвищення їх ресурсу та ефективності буріння.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1 Романишин Т. Л. Машини та обладнання для буріння нафтових і газових свердловин : конспект лекцій. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022. 274 с.

2 Міронов Ю. В., Романишин Т. Л. Машини та обладнання для буріння нафтових і газових свердловин : практикум. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. 160 с.

3 Геолого-технічний наряд на спорудження свердловини №102 Римарівської площі глибиною 4900 м.

4 Механіка руйнування і міцність матеріалів : довідн. посібник. Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / за ред. В. І. Похмурського, Є. І. Крижанівського. Львів - Івано-Франківськ, 2006. 1193 с.

5 Мислюк М. А., Рибчин І. Й., Яремійчук Р. С. Буріння свердловин : довідн. у 5 т. Т. 1 : Загальні відомості. Бурові установки. Обладнання та інструмент. Київ: Інтерпрес ЛТД, 2002. 367 с.

6 Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Бурове і технологічне обладнання. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП «Бурова техніка», Львів, Видавництво «Новий Світ – 2000», 2021. 358 с.

7 Heriot Watt University, Institute of Petroleum Engineering. Drilling Engineering: Manual. Edinburgh, 2005. 572 pages.

8 Gabolde Gilles, Nguyen J.P. Drilling data handbook. Editions Technip. Paris, 1999. 550 pp.

9 Кочкодан Я.М. Технологія буріння нафтових і газових свердловин. Частина перша Породоруйнівний інструмент: Підручник. Івано-Франківськ: Факел, 2004. 205 с.

10 СОУ 11.2-20077720-029:2009. Буріння свердловин. Основні положення. Київ, НАК «Нафтогаз України». 2009.

11 Енергетична стратегія України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність".

12 Кунцяк Я. В. Удосконалення конструкцій породоруйнівного інструменту, оснащених полікристалічними алмазними різцям. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* 2012. № 1 (42). С. 57–67.

13 Пригоровська Т. О., Чаплінський С. С. Probabilistic estimate of PCD drill bit wear rate. *Науковий вісник НГУ: геотехнічна і гірнича механіка, машинобудування*. Дніпропетровськ : НГУ. 2014. № 5. С. 184–189.

14 PDC bit technology improvements increase efficiency, bit life Menand S., Gerbaud L., Dourfaye A. Drilling contractor. March/April 2005. P. 52-54

15 Пригоровська Т.О. Вивчення форми ріжучої частини долота типу PDC з метою оптимізації конструкції: дослідження кута нахилу лопатей. *Науковий вісник ІФНТУНГ.* 2019. № 2 (47). С. 32-41.

16 Пригоровська, Т. О., Войтенко, П. І., Врюкало, В. В., Пітулей, Л. Д., Роп'як, Л. Я., Присяжнюк, П. М., ... & Луцак, Л. Д. (2018). Конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення PDC-доліт для підвищення їх експлуатаційних показників. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. № 1. С. 176-180.

17 Стасенко В.М., Карпенко В.М., Буняк Б.Т., Тимах В.Г. Методи оцінювання ефективності використання породоруйнівного інструменту для спорудження свердловин на нафту і газ. *Нафтова і газова промисловість*. 2008. № 1. С.27-31.

18 Я.С. Коцкулич, Є. Р. Мрозек, Я. С. Яремійчук. Аналіз відпрацювання породоруйнівного інструменту при бурінні свердловин на нафтогазових родовищах України. *Нафтова і газова промисловість*. 2011. № 3. С. 22-28.

19 Пригоровська Т. О., Драганчук О. Т. Аналіз відпрацювання доліт PDC на родовищах України і світу. *Нафтогазова енергетика*. 2008. № 4 (9). С. 33-39.

20 Бойко П. Я., Бойко С. П., Драганчук О. Т., Панов О. В., Кудрявцева Т. О. Порівняльна оцінка відпрацювання доліт різних типів (за даними БУ "Укрбургаз"). *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2003. № 1 (5). С. 35-38.

21 SPE/IADC 16145 Application of the new IADC dull grading system for fixed cutter bits. 1987.

22 IADC/SPE 23939 First revision to the IADC fixed cutter dull grading system. 1992.

23 Halliburton. Drill bits and Services. Каталог технічних рішень: веб-сайт. URL: https://www.halliburton.com/content/dam/halliburton-ru/public/pubsdata/books-and-catalogs/60-945-DBS-V2.PDF

24 Каталог бурових доліт міжнародної компанії "Baker Hughes Incorporatad". URL: https://www.bakerhughes.com/drilling/drill-bits/pdc-drill-bits

25 Бурові долота Smith Bits. Нові технології та рішення: Інформаційний матеріал. 2015. 215 с.

26 Li, Z., Li, Y., Liu, B., Wang, J., & Zhang, H. Experimental study on rock drilling vibration of PDC bit in interbedded formations. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024. 232, Article 212456. https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212456

27 Liu, W., Wang, X., Li, X., & Zhang. Study on Mechanism of Stick–Slip Vibration Based on Torque Characteristics of PDC Bit. *Applied Sciences*. 2024, 14(15), 6419. https://doi.org/10.3390/app14156419

28 Hongshan, Z., Wenchang, W. & Kaixian, A. The impact of multidirectional excitation on the stick–slip vibration characteristics of a drill string. S*cientific* Reports. 2025, 15, Article number: 28483. https://doi.org/10.1038/s41598-025-13880-w