

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально–науковий інститут
матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона
Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

«На правах рукопису»
УДК 621.762

До захисту допущено
Завідувач кафедри
_____Юрій БОГОМОЛ
«___»_____2025 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо–професійною програмою
«Нанотехнології та комп’ютерний дизайн матеріалів» спеціальності 132
«Матеріалознавство»
на тему: «Вплив кремнію та титану на формування алмазно-
твердосплавних пластин інструментального призначення за умов
високих тисків та температур»

Виконав:

студент II курсу, групи НН–41мп
Лебідь Олексій Ігорович _____

Керівник:

Професор, академік НАН України,
Директор ІНМ ім. В. М. Бакуля
Туркевич Володимир Зіновійович _____

Консультант з організаційно-економічного розділу:

доцент, к.е.н., доцент
Нараєвський Сергій Вікторович _____

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях:

зав.кафедри, д.т.н., професор,
Левченко Олег Григорович _____

Нормоконтроль:

доцент, к. т. н., доцент,
Троснікова Ірина Юріївна _____

Рецензент:

пров.н.с., доктор.техн.наук,
Стратійчук Денис Анатолійович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань
Студент _____ Лебідь О І

Київ – 2025

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут
матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона**

Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

Рівень вищої освіти – другий(магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій БОГОМОЛ

«__» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію магістранту
Лебідю Олексію Ігоровичу**

1. Тема роботи «Вплив кремнію та титану на формування на формування алмазно-твердосплавних пластин інструментального призначення за умов високих тисків та температур» керівник дисертації Туркевич Володимир Зіновійович, професор, д. х. н., директор ІНМ ім. В. М. Бакуля, затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025 р.№ 4748-с.

2. Термін подання студентом роботи: 23.12.2025 р

3. Вихідні дані до роботи: Контактні площадки інструменту будь-якого типу (породоруйнуючий, ріжучий або оброблюючий) в процесі експлуатації зазнають інтенсивного впливу високих силових навантажень і температур, величини яких мають змінний характер, а взаємодія з оброблюваним матеріалом і реагентами з навколишнього середовища призводить до протікання інтенсивних фізико-хімічних процесів: адгезії, дифузії, окислення, корозії та ін. Створення алмазних пластин підвищеної термостійкості які здатні витримувати високі температури під час виготовлення бурового долота, а також не втрачати свої експлуатаційні характеристики під час буріння твердих порід за умов локального розігріву в зоні різання є актуальним завданням сьогодення. Алмазно-твердосплавні пластини (АТП) широко використовують у різних галузях промисловості: нафтовидобувній, гірничовидобувній, металообробній,

деревообробній та інших. Основним методом отримання АТП є спікання алмазних порошків на твёрдосплавній підкладці в умовах високих тисків і температур. Рідка фаза Co-WC евтектичного складу, яка утворюється в твёрдосплавній підкладці інфільтрує в алмазний порошок і сприяє утворенню полікристалічного алмазного шару. Однак, при бурінні по твёрдим породам, температура в зоні різання може досягати 1000°C і наявність значної кількості кобальту сприяє фазовому перетворенню алмазу в графіт, що призводить до зниження зносостійкості і термостійкості АТП. З метою зменшення вмісту кобальту в алмазозносному шарі, деякі дослідники Гаргін В.Г., Бочечка О.О. пропонують вводити в алмазний порошок карбідоутворюючі метали такі як кремній, титан, молібден, хром, цирконій, вольфрам, або їх карбіди чи оксиди. В роботах українських вчених таких як Шульженко О.О. детально описано процеси фазоутворення при просочуванні кремнієм алмазного шару АТП в процесі спікання в умовах високих тисків і температур.

4. Зміст роботи: написання літературного огляду, обґрунтування та вибір активаторів спікання для алмазних мікропорошків із метою отримати двошарові пластини типу АТП для бурового інструменту який здатен працювати в умовах буріння важких порід, зокрема гранітних пластів глибокого занурення; дослідження фазового складу отриманої алмазовмісної кераміки під час НРНТ спікання із добавками титану та кремнію в кількостях до 7 % мас.; проведення обговорень по отриманих результатах, аналіз фізико-технічних та експлуатаційних характеристик надтвёрдої кераміки, що містить алмазні зерна; формулювання та написання загальних висновків.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічний	Доцент, к. е. н., доцент Нараєвський С.В.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Завідувач кафедри ОППЦБ, д.т. н., професор Левченко О. Г		

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Написання літературного огляду, аналіз літератури	11.09.2025	виконано
2	Вибір та обґрунтування типу активуючих добавок для спікання алмазних порошків	15.09.2025	виконано
3	Підготовка вихідних порошків, їх сортування, підбір насипної маси.	18.09.2025	виконано
4	Отримання гомогенних сумішей алмаз/активатор спікання шляхом ситового змішування, або із використанням рідин. Гранулометричний аналіз сумішей.	10.10.2025	виконано
5	Проведення НРНТ експериментів при тисках 7,7 ГПа в апаратах високого тиску типу тороїд-30.	15.10.2025	виконано
6	Дослідження фазового складу отриманих алмазовмісних пластин, вивчення їх фізико-технічних характеристик, зокрема модуля Юнга і термостійкості.	20.10.2025	виконано
7	Комплексний аналіз отриманих даних, аналіз похибок вимірювань, тощо.	25.10.2025	виконано
8	Узагальнення експериментальних даних, підготовка до оформлення основних розділів роботи.	5.11.2025	виконано
9	Розробка розділу охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	11.12.2025	виконано
10	Оформлення енергетичного та організаційно-економічного розділів	12.12.2025	виконано
11	Розробка стартап-проекту.	14.12.2025	виконано
12	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	15.12.2025	виконано

Магістрант

Олексій ЛЕБІДЬ

Науковий керівник дисертації

Володимир ТУРКЕВИЧ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація вміщує: стор. 130; рис. 58; табл. 31; джерел 84
АЛМАЗНО-ТВЕРДОСПЛАВНІ ПЛАСТИНИ, ВИСОКИЙ ТИСК,
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЕ СПІКАННЯ, АЛМАЗНІ КОМПОЗИТИ,
БУРОВИЙ ІНСТРУМЕНТ.

Метою магістерської роботи є розроблення способів отримання спіканням при високих тисках і температурах (НРНТ) нових надтвердих композиційних керамічних матеріалів типу АТП із термостійким алмазоносним шаром, застосовуючи при цьому такі активатори спікання як мікропорошки кремнію та титану.

Протягом виконання магістерської дисертації було вивчено процес приготування гомогенних сумішей алмазних мікропорошків із активуючими добавками, який було здійснено в 2 етапи: на першому, шляхом протирання через мідні (стальні) сита різного розміру (від 60 до 20 мкм) були отримані полідисперсні суміші, які в подальшому гомогенізувалися в тефлоновому барабані за допомогою керамічних шарів (Si_3N_4 , або ВК6) в середовищі ізопропилового спирту на протязі щонайменше 5 год. Отримані суміші було досліджено за допомогою електронного мікроскопу в режимі фазового контрасту та в характеристичному випромінюванні складових елементів і показано високий ступінь їх однорідності.

Методом рентгенофазового аналізу досліджена взаємодія алмазу, кобальту і карбіду вольфраму які є основними компонентами алмазовмісного шару АТП з активуючими добавками: кремнієм, титаном і карбонатом кальцію в процесі отримання АТП в умовах високих тисків і температур до 2000 °С. Встановлено, що по мірі збільшення добавок порошку кремнію в алмазний порошок в кількості від 2 мас. % до 8 мас. %. в процесі просочування евтектичним розчином Co-WC утворюються наступні хімічні сполуки – при додаванні 2 % мас. кремнію в алмазовмісному шарі зафіксовано Co_2Si . При додаванні 4 мас. % кремнію окрім Co_2Si починає утворюватися CoSi . При збільшенні вмісту кремнію до 8 мас. % утворюється також CoSi_2 . При

додаванні кремнію в кількості більше 8 мас. % окрім CoSi_2 починає утворюватись карбід кремнію. Така послідовність утворення сполук кремнію з кобальтом добре корелює з діаграмою Co-Si в умовах атмосферного тиску. З карбідом вольфраму кремній не взаємодіє.

При додаванні порошку титану в алмазний порошок в кількості від 3 до 7 мас. % в процесі спікання АТП утворюється тільки карбід титану. Згідно з діаграмою Co-Ti при атмосферному тиску в цій системі можливе утворення значної кількості інтерметалідів. Однак в наших умовах високих тисків і температур цього не спостерігається, що можна пояснити високою хімічною спорідненістю титану з вуглецем яка приводить до утворення карбїду титану в точках контакту титану з алмазом.

При використанні добавок порошку карбонату кальцію утворення нових сполук з кобальтом не виявлено. Спостерігається тільки розпад карбонату з утворенням CaC_2 при низьких температурах спікання. Взаємодії карбонату кальцію з карбідом вольфраму і алмазом не виявлено. Розроблено схему оснащення робочого торця експериментальної бурової коронки різального типу для буріння з відбором керна.

Розроблена схема відрізняється від відомих тим, що різальні крайки АТП виготовлені з використанням активуючих добавок, причому у свердловино- і керноутворюючих різців поперечна вісь пластини АТП розташована під певним кутом від напрямку вектора обертання, а у різців, розмішених в центральній частині секторів кут $\alpha^0 = 90$ і їх різальні крайки розташовані на одній лінії, що проходить через центр коронки.

ABSTRACT

Master's thesis contains: p. 130; fig. 58; tab. 31; sources 84

DIAMOND-CARBIDE PLATES, HIGH PRESSURE, HIGH TEMPERATURE SINTERING, DIAMOND COMPOSITES, DRILLING TOOLS.

The purpose of the master's thesis is to develop methods for obtaining new superhard composite ceramic materials of the ATP type with a heat-resistant diamond-bearing layer by sintering at high pressures and temperatures (HPHT), using such sintering activators as silicon and titanium micropowders.

During the thesis, the process of preparing homogeneous mixtures of diamond micropowders with activating additives was studied, which was carried out in 2 stages: in the first, by rubbing through copper (steel) sieves of various sizes (from 60 to 20 microns), polydisperse mixtures were obtained, which were subsequently homogenized in a Teflon drum using ceramic layers (Si₃N₄, or VK6) in an isopropyl alcohol environment for at least 5 hours. The resulting mixtures were examined using an electron microscope in phase contrast mode and in the characteristic radiation of the constituent elements and a high degree of their homogeneity was shown.

The interaction of diamond, cobalt and tungsten carbide, which are the main components of the diamond-containing layer of ATP, with activating additives: silicon, titanium and calcium carbonate in the process of obtaining ATP under conditions of high pressures and temperatures up to 2000 °C, was studied by the method of X-ray phase analysis. It was established that as the addition of silicon powder to diamond powder increases in an amount from 2 wt. % to 8 wt. %, the following chemical compounds are formed in the process of impregnation with a Co-WC eutectic solution - when adding 2 wt. % of silicon, Co₂Si was recorded in the diamond-containing layer. When adding 4 wt. % of silicon, in addition to Co₂Si, CoSi begins to form. When the silicon content increases to 8 wt. %, CoSi₂ is also formed. When adding silicon in an amount of more than 8 wt. %, in addition to CoSi₂, silicon carbide begins to form. This sequence of formation of silicon-cobalt compounds correlates well with the Co-Si diagram under atmospheric pressure conditions. Silicon does not interact with tungsten carbide.

When titanium powder is added to diamond powder in an amount of 3 to 7 wt. % during the sintering of ATP, only titanium carbide is formed. According to the Co-Ti diagram, at atmospheric pressure in this system, the formation of a significant amount of intermetallics is possible. However, in our conditions of high pressures and temperatures, this is not observed, which can be explained by the high chemical affinity of titanium with carbon, which leads to the formation of titanium carbide at the points of contact of titanium with diamond.

When using calcium carbonate powder additives, the formation of new compounds with cobalt was not detected. Only the decomposition of carbonate with the formation of CaC₂ at low sintering temperatures is observed. The interaction of calcium carbonate with tungsten carbide and diamond was not detected. A scheme for equipping the working end of an experimental cutting-type drill bit for core drilling has been developed.

The developed scheme differs from the known ones in that the cutting edges of the ATP are made using activating additives, and in well- and core-forming cutters the transverse axis of the ATP plate is located at a certain angle from the direction of the rotation vector, and in cutters located in the central part of the sectors the angle $\alpha^0 = 90$ and their cutting edges are located on the same line passing through the center of the bit.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	15
1.1 Загальна характеристика та розвиток алмазного бурового інструменту.....	15
1.2 Ефективність застосування алмазно-твердосплавних пластин у буровому інструменті.....	16
1.3 Проблеми зносостійкості алмазно-твердосплавних пластин при бурінні твердих порід.....	17
1.4 Промисловий досвід застосування доліт з різцями АТП.....	18
1.5 Особливості роботи бурових коронок, оснащених АТП, та температурні умови на ріжучих крайках.....	23
1.6 Механізми деградації алмазно-твердосплавних пластин при термічних навантаженнях.....	24
1.7 Роль кремнію у підвищенні термостійкості алмазно-твердосплавних систем.....	27
1.8 Роль титану у формуванні термостійких карбідних фаз.....	29
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	31
2.1 Вихідні матеріали та суміші.....	31
2.2 Спінання АТП з активуючими добавками.....	32
2.3 Методика лабораторних досліджень зносостійкості та експлуатаційних властивостей АТП.....	36
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	43
3.1 Аналіз діаграм стану досліджуваної системи.....	43
3.2 Дослідження впливу температури спікання на АТП з активуючими добавками.....	46
3.3 Дослідження взаємодії компонентів алмазовмісного шару АТП.....	48
3.4 Дослідження структури АТП з активуючими добавками.....	53
3.5 Фізико-механічні та експлуатаційні властивості АТП.....	61
3.5.1 Мікротвердість та тріщиностійкість.....	63
3.6 Узагальнення результатів досліджень та вдосконалення методики.....	65
3.7 Практична значущість та порівняльний аналіз отриманих результатів.....	68

3.8	Проведення стендових випробувань експлуатаційних властивостей АТП з активуючими добавками різної фізико-хімічної природи.....	72
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ...	77
4.1	Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів.....	79
4.1.1	Аналіз рівня шуму.....	81
4.2	Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці.....	81
4.2.1	Аналіз параметрів приміщення.....	81
4.2.2	Аналіз параметрів приміщення.....	82
4.3	Розрахунок вентиляції.....	83
4.4	Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях	85
4.4.1	Пожежна безпека.....	85
4.4.2	Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	87
4.4.3	Вимоги безпеки під час повітряної тривоги.....	88
4.5	Висновки за розділом.....	89
5	ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	90
6	ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	92
6.1	Науково-технічна актуальність НДР.....	92
6.2.1	Витрати на оплату праці науково-дослідницького персоналу...93	
6.2.2	Єдиний соціальний внесок.....95	
6.2.3	Матеріали, необхідні для проведення досліджень.....96	
6.2.4	Витрати на енергоносії.....97	
6.2.5	Витрати на спеціальне обладнання.....97	
6.2.6	Витрати на службові відрядження.....97	
6.2.7	Вартість послуг сторонніх організацій.....97	
6.2.8	Інші непрямі невраховані витрати.....98	
6.2.9	Накладні витрати.....98	
6.2.10	Загальний кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи.....99	
6.3	Оцінка доцільності виконання науково-дослідної роботи.....100	
6.4	Висновки до розділу.....103	
7	РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП–ПРОЄКТУ.....	105

7.1 Мета та завдання розробки стартап-проєкту.....	105
7.2 Опис продукту.....	107
7.3 Технологічний аудит ідеї проєкту.....	108
7.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	109
7.5 Розроблення ринкової стратегії проєкту.....	113
7.6 Розробка маркетингової стратегії стартап-проєкту.....	116
7.7 Формування системи збуту.....	118
ВИСНОВКИ.....	120
CONCLUSIONS.....	122
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	124

ВСТУП

Протягом 25 років в ІНМ НАН України ведуться дослідження, спрямовані на розв'язок проблеми консолідації композиційних алмазовмісних матеріалів (КАМ) з певними фізико-механічними властивостями, що поєднує в єдиний ланцюг (генезис) процеси їх спікання, деформування, руйнування й експлуатаційні властивості. Таким чином, поєднуючи воєдино перераховані етапи ми маємо на увазі генезис композиційних алмазовмісних матеріалів (КАМ), починаючи з процесу консолідації й до експлуатаційних властивостей. При цьому ми прагнемо враховувати наявність недосконалостей структури типу: утворення мікротріщин, розшарувань по границях поділу фаз, руйнування самих алмазів у вигляді розтріскування або графітизацію й т.п., тобто ті недосконалості, що приводять до істотних змін фізико-механічних властивостей композита взагалі й в результаті погіршенню його експлуатаційних характеристик.

Алмазно-твердосплавні пластини (АТП) широкого використовують у нафтовидобувній, гірничовидобувній, металообробній, деревообробній та інших галузях. Одним з перших дослідників, які описали процеси, що протікають при виготовленні РСД (закордонний аналог АТП), були науковці з фірми «General Electric Company» R.H. Wentorf, R.C. DeVries, F.P. Bundy. Представниками фірми «De Beers» (на даний час «Element Six»), які займаються розробкою РСД типу «Syndrill» є P.A. Vex, L.R. Shafto. Відомі роботи японських вчених Akaishi M., Kanda H., Uechara K., Yamaya S. які привели до створення РСД «Sumidia» фірми «Sumitomo Електрик». Теоретичні основи створення вітчизняних АТП, описані в роботі А.А. Шульженко, В.Г. Гаргіна та інших, а технічні вимоги до серійних АТП виробництва ІНМ НАНУ, викладені в ТУ88 України 90.1244-91 «Пластини алмазно-твердосплавные для режущего инструмента». Всі дослідники позитивно описують роль кобальта в формуванні спеченого алмазовмісного шару, називаючи його розчинником вуглецю, що сприяє утворенню міжзеренних зв'язків алмаз-алмаз і каталізує утворення суцільного полікристалічного шару

АТП. В багатьох патентах описано спосіб отримання PCD шляхом спікання алмазних кристалів на твердосплавній підкладці в умовах високих тисків і температур. В деяких роботах пропонується додатково вводити кобальт в алмазний порошок перед спіканням.

Основою методу отримання АТП прямим просочуванням з твердосплавної підкладки є те, що згідно з нашими даними в системі Co-WC при температурі плавлення евтектики 1320°C при атмосферному тиску утворюється рідка фаза, яка має склад: 64 мас % Co і 36 мас % WC. При нагріванні спеченого твердого сплаву марки ВК-15 до 1370°C в ньому утворюється 31.1% по об'єму рідкої фази.

Рушійними силами для протікання процесу просочування алмазного порошку евтектичним розплавом являються як капілярні сили, які діють в пористій алмазній пресовці, так і різниця тисків в стисненому спеченому твердому сплаві і атмосферному тиску в порах алмазної засипки. Згідно з рядом авторів] рідкий кобальт, який інфільтрує в алмазний порошок нагрітий до високої температури розчиняє в собі вуглець, який утворюється на поверхнях алмазних зерен в порах пресовки, а також вуглець, що міститься в твердому сплаві. При умовах створення достатнього тиску і пересичення розчину кобальту вуглецем, останній кристалізується в алмазній градці на алмазних зернах пресовки, що сприяє утворенню суцільного алмазного полікристала.

В останній час основною тенденцією в розвитку алмазно-твердосплавних пластин є збільшення висоти алмазовмісного шару, що дає можливість покращити ресурс роботи бурового інструменту. Так, Британська фірма «Element Six» пропонує PCD «Syndrill» з висотою шару від 0,7 до 3мм. Китайська фірма JFZ виготовляє PCD з висотою алмазного шару до 2,5 мм.

В ІНМ НАН України розроблено технологію виготовлення алмазно-твердосплавних пластин з підвищеною висотою алмазного шару 1,7 мм марки АТПБ R1304-17. Спікання проводили в апараті високого тиску «Тороїд-30» під тиском 7,7 ГПа і температурі 1800°C. Для отримання таких АТП

розроблена спеціальна комірка апарату високого тиску, яка дозволяє збільшити висоту алмазного шару при збереженні рівномірного теплового поля.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Загальна характеристика та розвиток алмазного бурового інструменту

З моменту відкриття синтезу штучних алмазів в 1953 р Шведськими дослідниками пройшло вже більше 65 років. Весь цей час постійно удосконалюються та розробляються нові методики спікання алмазних мікропорошків з метою отримання надтвердих композиційних матеріалів. Відомо, що у алмазу завдяки sp^3 гібридизованим зв'язкам формується тетраедричний жорсткий каркас, що в свою чергу призводить до високої міцності, твердості і теплопровідності та робить алмаз рекордсменом за вказаними характеристиками із усіх відомих на землі мінералів або штучно створених речовин. Всі ці фактори роблять його перспективним матеріалом для створення керамічних продуктів інструментального призначення. В першу чергу це стосується каменеобробки та в особливості при бурінні твердих порід оскільки алмазні полікристалічні матеріали поєднують у собі високу твердість, зносостійкість та міцність [1]-[3].

Створення у вісімдесятих роках минулого століття алмазного бурового інструменту, оснащеного ріжучими елементами з полікристалічних алмазів і алмазно-твердосплавними пластинами (АТП), дозволило розширити обсяги використання алмазних коронок при бурінні геологорозвідувальних свердловин. Значно перевищуючи показники твердосплавних коронок з проходки, вони успішно конкурують з ними по механічній швидкості буріння. Це призвело до того, що по всьому світу частка алмазного породоруйнівного інструменту в загальному обсязі буріння досягла 80%, а інструменту, оснащеного АТП в загальному обсязі використання алмазного інструменту - близько 60% [4]. Загальний вигляд алмазного бурового долота, оснащеного алмазно-твердосплавними пластинами, наведено на рисунку 1.1



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд алмазного бурового долота, оснащеного алмазно-твердосплавними пластинами (АТП)

Буріння геологорозвідувальних свердловин при розвідці родовищ корисних копалин як область застосування алмазного породоруйнівного інструмента підвищеної працездатності є однією з найбільш потрібних, але й найбільш складних з погляду на умови його роботи. При цьому частка витрат на інструмент у загальній вартості геологорозвідувальних робіт з буріння свердловин тим вище, чим більше важкоруйнівними та абразивними є гірські породи. Тому у споживачів даного інструменту існує постійний інтерес до підвищення його основної експлуатаційної характеристики – його зносостійкості.

1.2 Ефективність застосування алмазно-твердосплавних пластин у буровому інструменті

Застосування породоруйнівного інструменту, оснащеного пластинами АТП, ефективно при бурінні свердловин в породах з пружно-пластичними властивостями (IV-VII категорій за буримістю). У порівнянні з

твердосплавним інструментом при використанні АТП швидкість буріння підвищується до 1,5 разів, а стійкість - до 15 разів [5].

Створення алмазного бурового інструменту, оснащеного ріжучими елементами з полікристалічних алмазів і алмазно-твердосплавними пластинами (АТП) ознаменувало прорив у використанні алмазних коронок при бурінні нафтових і газових свердловин. Значно перевищуючи показники шарошкових доліт з проходки, вони успішно конкурують з ними по механічній швидкості буріння. Це призвело до того, що по всьому світу частина алмазних доліт в загальному обсязі їх використання досягла 20%, а частка доліт, оснащених АТП в загальному обсязі використання алмазного інструменту досягає 90% [6].

1.3 Проблеми зносостійкості алмазно-твердосплавних пластин при бурінні твердих порід

При бурінні в твердих породах зносостійкість інструменту з АТП знижується та поступається по продуктивності коронкам, що оснащуються алмазами. Тому більшість розробників АТП активно працюють над створенням термостійких елементів, здатних бурити свердловини не тільки в м'яких породах, а й середньої твердості і твердих, де показники буріння алмазними коронками істотно перевищують показники буріння коронками, оснащеними твердосплавними ріжучими елементами [7].

Ріжуча кромка "традиційної" пластини АТП в процесі роботи в твердих породах притупляється, енергоємність руйнування гірської породи поступово підвищується, оскільки збільшується площа контакту з забоем гірської породи. При цьому істотно знижується механічна швидкість буріння. Для підтримки постійної механічної швидкості буріння на практиці зазвичай інтенсивніше підвищують осьову навантаження на породоруйнуючих інструмент, що, призводить до збільшення зносу пластин АТП [8].

Означені технічні рішення в деякій мірі зменшують знос але це не приводить до значного підвищення швидкості буріння.

Цю проблему в деякій мірі намагаються вирішити виконанням на алмазному шарі пластини поглиблень у вигляді квадратів, п'ятикутників тощо. Однак і в цьому випадку суттєвим недоліком АТП є їх недостатня зносостійкість при оснащенні такими пластинами породоруйнівного інструменту, який працює в умовах інтенсивного абразивного зносу. Крім того, при роботі інструменту верхня частина такого зуба зношується швидше ніж впадина і ріжуча (робоча) поверхня пластини стає плоскою. Це приводить до зниження швидкості зйому гірничої породи [9].

1.4 Промисловий досвід застосування доліт з різцями АТП

У нафтовій промисловості долота з різцями АТП найбільш ефективно використовуються в м'яких і середньої твердості породах з межею міцності на стиск не більше 100 120 МПа. Переваги таких доліт особливо чітко виявляються при морському бурінні. На думку фахівців США, при правильному використанні зазначених доліт можна розраховувати на збільшення механічної швидкості буріння в 2 рази і ресурсу в 34 рази в порівнянні з шарошечними долотами [10]. Для наочності на рисунку 1.2 наведено зовнішній вигляд нової алмазно-твердосплавної пластини (АТП) (а) та зношених пластин у складі бурового долота після промислової експлуатації (б).



а



б

а – нова пластина; б – зношені пластини у складі бурового долота після промислового буріння

Рисунок 1.2 – Стан алмазно-твердосплавних пластин (АТП)

На родовищі Статфьорд в Північному морі всі нафтові свердловини буряться долотами з різцями Стратапакс. Представляють інтерес результати випробувань доліт DS-30 (діаметр) фірми "НЛ Хікалог", армованих великими різцями Стратапакс, що характеризуються підвищеною ударною стійкістю. Нові долота забезпечили збільшення механічної швидкості в 2 рази (у середньому 23 м/год) [11].

Фірма "Лінгдріллінг продактс" розробила нові долота серії Андромеда з різцями Стратапакс серії +2543 (пластини закріплені на твердосплавному стовбці). При використанні доліт діаметром була отримана середня швидкість буріння 31 м/год і ресурс долота [12]. Ключовим елементом бурових доліт є

алмазно-твердосплавні пластини (АТП), від якості яких безпосередньо залежить ресурс та ефективність роботи інструмента. На рисунку 1.3 наведено зовнішній вигляд типової АТП, що використовується в конструкціях промислових бурових доліт.

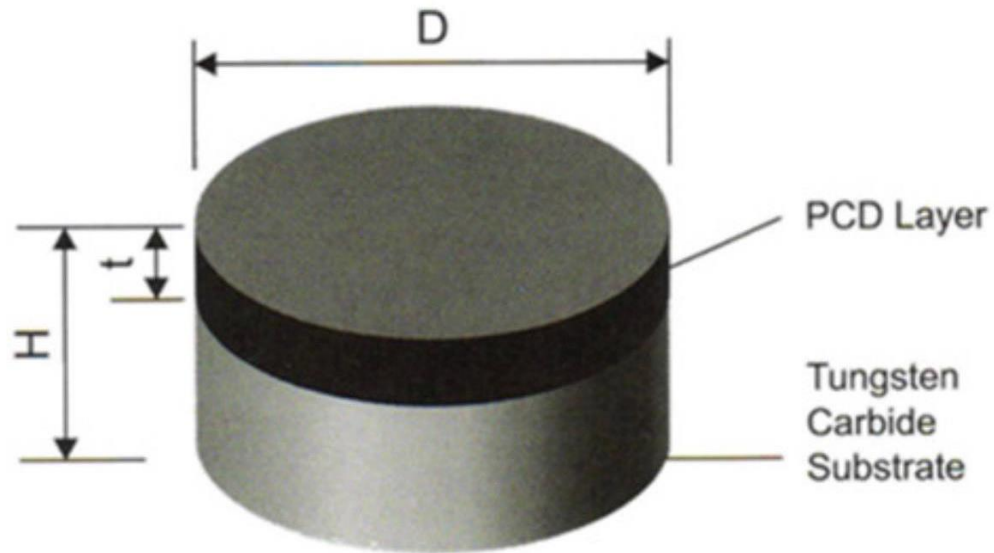


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд алмазно-твердосплавної пластини (АТП), що застосовується у промислових бурових долотах

Роботи зі створення коронок для колонкового буріння, армованих пластинками Стратапакс, проводять фірми "Едеси" (Великобританія), "Лонгір", "АккерДрілл" (США). "ІКС Бойлесен" (Канада), "Креліус" (Швеція), "Адамас" (ПАР). Такі коронки застосовуються в основному на вугільних і уранових родовищах. У західній частині США при бурінні коронками діаметром з різцями Стратапакс по пісковиках і сланцях з прошарками вугілля механічна швидкість збільшилася з 2,8 до 20,4 м/год в порівнянні з алмазними одношаровими коронками при однаковому ресурсі. На сході США при використанні коронки діаметром з різцями Стратапакс в пісковиках, сланцях з прошарками залізної руди і вугілля механічна швидкість підвищилася з 1,44 до 9 м/год, т.б. в 6,25 рази. У середній частині США при бурінні по пісковиках коронка діаметром з різцями Стратапакс в порівнянні з одношаровими

алмазними коронками забезпечила зростання ресурсу з 30 до і механічної швидкості з 3,6 до 16,2 м/год [13], [14].

У результаті лабораторних і виробничих досліджень в ІНМ в 1986 - 1989 років розроблено долото типу ДАТ-76, оснащене пластинами АТП [15]. Долото мало дев'ять різців, розташованих трьома групами, в кожній з яких на однаковій відстані від центру рівномірно по колу знаходилися три різця. Пластини АТП були розташовані в спеціальних гніздах сталевих державок, виступаючих з торця корпусу, в якому державки закріплюються також паянням. На торці корпусу щілинні промивні канали з'єднані з центральним промивним отвором. У корпусі долота виконана внутрішня конічна різьба діаметром , що забезпечувала в порівнянні з циліндричною стрічковою різьбою надійне і міцне з'єднання з буровим снарядом.

Виробничі випробування долота ДАТ-76 проводилися на вугільних родовищах Донбасу. У потужних шарах пісковика (IV-VII категорій за буримістю) механічна швидкість буріння досягала 16 м/год, в піщаних сланцях 3,79,0 м/год, в глинистих сланцях знижувалася до 1,0 1,3 м/год [16]. Таким чином, найбільш ефективною областю застосування доліт були породи типу пісковиків з пружно-крихким характером руйнування. Частилки міцних крихких порід з більшою внутрішньою енергією під дією пружних сил легко витісняються із зони руйнування. Завдяки зменшенню часу контакту і його уривчастості зусилля руйнування може знижуватися до 10 разів.

При бурінні глинистих сланців м'які пластичні частинки ущільнюються, утворюють нарости, розвал борозни руйнування зменшується і зусилля, необхідне для руйнування, може зростати. У середньому ж швидкість при бурінні всього комплексу порід Донбасу складала для ДАТ-76 58 м/год, шарошечних доліт 24 м/год і алмазних коронок 12 м/год. Стійкість доліт ДАТ в 56 разів була вищою, ніж шарошечних, і в 2 рази вищою, ніж у алмазних коронок типу КС [16].

Поряд з поліпшеними показниками роботоздатності долота типу ДАТ не забезпечували достатньої стабільності в роботі через знижену міцність

пластин АТП у яких досить часто при появі в процесі буріння свердловин прошарків більш твердих і абразивних гірських порід (VIII – IX категорій за буримістю) спостерігався катастрофічний знос пластин АТП у вигляді сколів ріжучої крайки АТП та відшарування алмазного шару за рахунок появи високих температур в зоні контакту з вибоєм гірської породи.

У 2002 році, компанія Reed Nycalog впровадила новий різець PDC, названий Трех, у якого на поверхні АТП знаходиться надтвердий алмазовмісний шар. Лабораторні тести, підтверджені польовими випробуваннями породоруйнівного інструменту показали до 40% приросту зносостійкості АТП. Основна маса різців PDC або АТП – круглої форми діаметром від до . Крайка різця може бути скошеною або округленою для зменшення ушкоджень від ударів, особливо це важливо при використанні різців з високим кутом атаки. У деяких дизайнерських рішеннях використовуються гравійовані різці, де частина різця, що знаходиться в контакті з породою, загострена, що дає зосереджене навантаження. Це дуже важливо при бурінні порід з високим ступенем стиснення, особливо в кристалічних вапняках [17].

Удосконалення алмазно-твердосплавних пластин відбувається також в напрямку підвищення їх ударної міцності, абразивної та термічної стійкості.

Велика увага приділяється вибору раціональної форми профілю породоруйнівного інструменту і схемі розміщення різців АТП по його робочому торцю, кутам нахилу і розвороту різців. Розрахунки оптимального розміщення різців АТП виконуються з використанням ЕОМ.

Ведуться роботи, спрямовані на підвищення термічної стійкості композитних алмазно-твердосплавних матеріалів і розробку технології кріплення великих полікристалічних пластин підвищеної стійкості до корпусу доліт і коронок без застосування пайки.

Сьогодні геологорозвідувальні підприємства України та країн СНД купують дорогі і невисокої якості бурові коронки за кордоном, а коронки, що армовані АТП, взагалі ніхто в СНД серійно не випускає. Тому актуальною є

проблема розробки сучасних конструкцій коронок діаметром від до , армованих високоякісними, зносостійкими і термостійкими пластинами АТП, впровадження у виробництво технологій буріння свердловин коронами такого типу, особливо гірських порід VII- IX категорії по буримості, що перемежуються по твердості .Коронки армовані АТП, ефективно бурять гірські породи від VI до VIII категорії по буримості. Цей нюанс має принципово важливе значення, особливо для умов, де пропластки гірських порід IX категорій зустрічаються в розрізі досить часто. Випуск цих коронок - це спроба знайти відповідь на питання: як однією короною пробурити гірські породи з VII до IX категорій по буримости за один рейс. Але до останнього часу однозначної відповіді на це питання немає [18].

1.5 Особливості роботи бурових коронок, оснащених АТП, та температурні умови на ріжучих крайках

Бурові коронки, оснащені АТП, в середніх породах працюють як ріжучий інструмент. При зустрічі твердих порід VIII-IX категорії по буримості, ці коронки починають працювати в режимі мікрорізання [19]. Коронки призначені, в першу чергу, для підвищення механічної швидкості буріння, збільшення проходки на коронку, поліпшення якості очищення вибою від шламу, зниження моменту опору і зусилля подачі. Але широке впровадження коронок, оснащених АТП, в практику буріння геологорозвідувальних свердловин в гірських породах твердих порід VII-IX категорії по буримості стримується за рахунок низької термостійкості пластин АТП, що, як відомо, призводить до значного зниження зносостійкості їх при високих значеннях контактної температури на вибої. Домогтися значного збільшення техніко-економічних показників роботи даних коронок стало можливим за рахунок орієнтованого розташування пластин АТП і послідовної їх установки, в результаті чого на вибої гірської породи утворюються канавки гребінчастої форми [20].

По результатам металографічного аналізу відпрацьованих коронок с АТП встановлено, що на периферійних ріжучих елементах при швидкостях різання, що перевищують 3 м/с, в породах малої та середньої абразивності температура в мікроб'ємах поверхневих шарів може досягати 1300 °С и більше [21]. При таких температурах, що мають назву критичних, відбувається катастрофічне зношування усіх відомих армуючих матеріалів, в т.ч. і алмазно-твердосплавних пластин.

Дослідження бурових коронок, оснащених АТП, що були виконані в Південно-російському політехнічному університеті (НПІ) (м. Новочеркаськ) [21], показали, що критична температура є фактором, що визначає граничну або критичну швидкість різання: швидкість різання повинна підтримуватися такою, щоб контактна температура не перевищувала критичного значення. Критичні температури залежать тільки від властивостей матеріалу різця, а контактні температури - від конструкції коронки, режиму її відпрацювання та фізико-механічних характеристик гірських порід, що буряться. Критична швидкість різання з підвищенням контактної міцності породи знижується. Ці дослідження дозволили також виявити вплив швидкості різання на механізм зносу коронок, армованих АТП. На докритичних швидкостях агрегатна твердість АТП значно вище твердості зерен породи. З підвищенням швидкості відповідно підвищуються контактні температури пари "різець АТП – гірська порода". Тобто фактором, що визначає критичну швидкість різання гірської породи, є критична температура. Швидкість різання повинна бути такою, щоб контактна температура не перевищувала критичного значення. Дослідженнями Літкевича Ю.Ф. в 1999 році встановлено, що для всіх твердих сплавів групи ВК з вмістом кобальту від 1 до 8%, критичні температури розташовуються в межах 500 - 700 °С. Критичне значення контактної температури на ріжучих краях АТП становить $T_{кр} = 1690$ °С [22].

Головною причиною неефективного буріння з відбором керна в породах VII-IX категорій по буримості, що перемежуються по твердості є відсутність на ринку СНД бурових коронок для снаряду зі з'ємним кернаприймачем

(технологія Wire Line), здатних ефективно руйнувати такі гірські породи. Для отримання досить високої продуктивності при застосуванні технології Wire Line типу HQ, яка використовується на бурових станках шведської фірми "Atlas Copco", необхідна розробка породоруйнівного інструменту, який дозволить при обмеженій швидкості обертання до 340 об/хв досягти високої механічної швидкості і ресурсу інструменту. В даний час технологія буріння свердловин такими коронками з АТП практично не розроблена, особливо по вказаним вище гірських породах, а коронки типу HQ діаметром , оснащених АТП, в заводських умовах не випускаються [23].

1.6 Механізми деградації алмазно-твердосплавних пластин при термічних навантаженнях

Алмазно-твердосплавні пластини під час експлуатації працюють в умовах надзвичайно інтенсивних термомеханічних навантажень. У зоні різання одночасно діють високі контактні тиски, значні швидкості ковзання та локальні піки температури, що створює передумови для розвитку складних деградаційних процесів у структурі матеріалу [28]. Ці процеси з часом призводять до втрати різальної здатності, відшарування алмазного шару та руйнування інструменту.

Одним з основних механізмів деградації є термічне розтріскування, яке зумовлене циклічними нагріваними та охолодженнями різальних елементів. Значна різниця коефіцієнтів термічного розширення між алмазом і твердосплавною підкладкою призводить до виникнення високих внутрішніх напружень, що ініціюють утворення мікротріщин у приповерхневих шарах [29]. За багатоциклового навантаження ці мікротріщини можуть коалесціювати, утворюючи макротріщини та локальні зони відшарування.

Суттєву роль відіграє також термомеханічне руйнування, що поєднує механічні удари навантаження з тепловим впливом. У процесі різання порід алмазні зерна піддаються багаторазовим ударам та абразивному контакту з

твердими включеннями породи. За підвищених температур це призводить до інтенсифікації мікросколів, пластичної деформації зв'язки та локальної втрати опори для алмазних зерен, що в решті-решт прискорює їх випадання з матриці [28].

Графітизація алмазного шару є ще одним ключовим механізмом деградації. Навіть частковий перехід алмазу в графітовий стан різко знижує твердість і зносостійкість різального елемента, оскільки графіт значно м'якший і хімічно активніший у високотемпературних умовах. Утворення графітових прошарків на межі «алмаз–зв'язка» послаблює адгезійне зчеплення та сприяє розвитку міжфазних тріщин [28].

Хіміко-дифузійні взаємодії між алмазом і металевою зв'язкою, зокрема з кобальтом, також істотно впливають на деградацію. Розчинення вуглецю в металевій фазі та повторне його виділення у вигляді графіту або карбідних фаз призводять до ослаблення міжфазного з'єднання і формування зон збагачення вуглецем у зв'язці [30]. Такі зони можуть слугувати концентраторами напружень і зародковими областями для розвитку тріщин.

Умови навколишнього середовища також відіграють важливу роль у деградації АТП. В окиснювальних середовищах можливе окиснювальне руйнування як металевої зв'язки, так і поверхневих шарів алмазу. Утворення оксидних плівок на поверхні зменшує теплопровідність і погіршує тепловідведення, що сприяє локальному перегріву та подальшому прискоренню деградаційних процесів [28]. У присутності водяної пари та агресивних газових компонентів ці ефекти можуть посилюватися.

Усі перелічені механізми деградації діють не ізольовано, а в комплексі, що значно ускладнює розроблення ефективних шляхів підвищення довговічності алмазно-твердосплавних пластин. Для їх нейтралізації необхідно оптимізувати як склад і структуру матеріалу, так і режими його експлуатації.

1.7 Роль кремнію у підвищенні термостійкості алмазно-твердосплавних систем

Кремній є одним з найбільш перспективних елементів для легування та модифікування алмазно-твердосплавних систем, що працюють в умовах високих температур. Його введення до складу зв'язки або приповерхневих шарів композиту дозволяє суттєво змінювати фазовий склад, мікроструктуру та термохімічну поведінку матеріалу [33].

Однією з основних причин застосування кремнію є здатність утворювати термостійкі карбідні фази типу SiC. Карбід кремнію характеризується високою твердістю, тугоплавкістю, стійкістю до окиснення та хімічною інертністю щодо алмазу в широкому діапазоні температур [34]. Формування тонких прошарків SiC на межі «алмаз–зв'язка» розглядається як ефективний спосіб створення дифузійного бар'єра, який перешкоджає прямому контакту алмазу з кобальтом і іншими металами-каталізаторами графітизації. Схематичне зображення інтерфейсу між алмазним шаром і твердосплавною підкладкою зображено на рисунку 1.5.

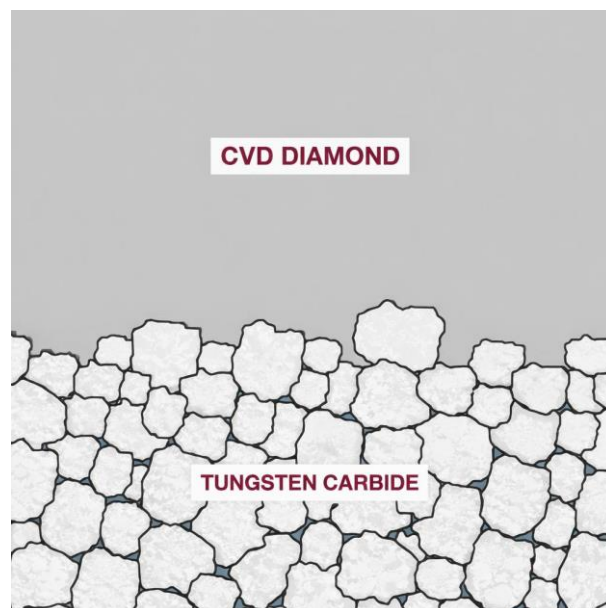


Рисунок 1.5 – Схема контакту алмазного шару з твердосплавною підкладкою, яка ілюструє роль інтерфейсу у формуванні термостійких алмазно-твердосплавних систем.

Кремній може вводитися в систему різними способами: у вигляді чистого елемента, як компонент силіцидних або силікатних фаз, а також у складі складніших легувальних добавок. Під час спікання при підвищених температурах він реагує з вуглецем і компонентами зв'язки з утворенням SiC та супутніх фаз. При цьому на поверхні алмазних зерен можуть формуватися реакційні оболонки, які змінюють енергію міжфазної межі, покращують змочуваність алмазу і одночасно виконують бар'єрну функцію [33].

Важливою перевагою SiC є його висока стійкість до окиснення за температур, що перевищують робочі температури більшості бурових та різальних інструментів. На поверхні SiC може утворюватися тонка захисна оксидна плівка на основі SiO₂, яка додатково зменшує швидкість окиснювальних процесів і покращує термостійкість композиту [34]. Таким чином, кремній, через формування SiC та оксидних шарів, забезпечує багаторівневий захист алмазного шару.

Крім бар'єрної дії, кремній може впливати на теплопровідність та розподіл температурних полів у композиті. Наявність SiC-фаз із високою теплопровідністю сприяє більш рівномірному розподілу тепла в зоні різання, зменшуючи локальні перегріву та термічні градієнти. Це, у свою чергу, знижує рівень термічних напружень на межі «алмаз–зв'язка» та зменшує ймовірність термотріщиноутворення [33].

Ще одним аспектом впливу кремнію є можливість часткового витіснення кобальту або інших металів-каталізаторів із приповерхневих зон. Унаслідок формування силіцидних і карбідних фаз змінюється локальний склад зв'язки, зменшується вміст Co в безпосередньому контакті з алмазом, що знижує інтенсивність небажаних хіміко-дифузійних процесів [32, 34].

Таким чином, роль кремнію у алмазно-твердосплавних системах полягає у комплексному впливі на фазовий склад, мікроструктуру та термохімічні властивості композиту. Завдяки формуванню SiC-бар'єрів, підвищенню окиснювальної стійкості та оптимізації теплопровідності кремній забезпечує

значне підвищення термостійкості та довговічності алмазно-твердосплавних пластин.

1.8 Роль титану у формуванні термостійких карбідних фаз

Титан є одним із найбільш ефективних легувальних елементів для створення термостійких карбідних фаз у композиційних матеріалах, що працюють за високих температур. У системах на основі алмазу та твердих сплавів Ti широко застосовується для модифікування зв'язки та приповерхневих шарів з метою підвищення адгезії, термостійкості та опору хіміко-дифузійним процесам [35].

За взаємодії з вуглецем титан утворює карбід титану TiC, який характеризується високою твердістю, тугоплавкістю, стійкістю до окиснення та хімічною інертністю щодо алмазу. TiC має добру змочуваність алмазних зерен і може формувати міцні міжфазні зв'язки, що сприяє підвищенню адгезії між алмазом і твердосплавною підкладкою [35].

Однією з ключових функцій TiC у алмазно-твердосплавних композитах є виконання ролі дифузійного бар'єра між алмазом і металевою зв'язкою. Тонкі прошарки TiC на межі «алмаз–зв'язка» перешкоджають прямому контакту алмазу з кобальтом, нікелем або залізом і значно зменшують швидкість розчинення вуглецю в цих металах. Як наслідок, знижується інтенсивність графітизації алмазу та ослаблюється каталітичний вплив металів підгрупи заліза [36].

Крім карбиду титану, у системах, що містять Ti, можуть формуватися також нітриди (TiN), карбонітриди (TiCN) та інші складні фази, які додатково підвищують зносостійкість і термостійкість композиту. Плівки TiN і TiCN широко використовуються як захисні та зміцнювальні покриття для різального інструменту, оскільки вони поєднують високу твердість, стійкість до окиснення та добру адгезію до твердих сплавів [35]. У алмазно-твердосплавних пластинах такі фази можуть утворюватися як у процесі

спікання, так і шляхом нанесення тонких покриттів на поверхню різальних елементів.

Важливим є також вплив титану на мікроструктуру та механічні властивості зв'язки. Титан може взаємодіяти з кобальтом та іншими компонентами матриці, утворюючи інтерметалідні та карбідні фази, що змінюють співвідношення між пластичністю і крихкістю зв'язки. Правильно підібраний вміст Ti дозволяє підвищити тріщиностійкість композиту, зменшити схильність до крихкого руйнування та оптимізувати розподіл напружень у приповерхневих шарах [36].

Окремої уваги заслуговує здатність титану активно взаємодіяти з киснем з утворенням оксидних плівок, які можуть виконувати захисну функцію в окиснювальних середовищах. Хоча надмірне окиснення Ti може бути небажаним, контрольоване утворення тонких оксидних прошарків на поверхні TiC або TiN може додатково зменшувати швидкість окиснення та корозії інструментального матеріалу [35].

Таким чином, титан у алмазно-твердосплавних системах виконує багатофункціональну роль: забезпечує формування термостійких карбідних та нітридних фаз, підвищує адгезію між алмазом і зв'язкою, створює ефективні дифузійні бар'єри та сприяє оптимізації мікроструктури композиту. Комплекс цих ефектів приводить до істотного підвищення термостійкості, зносостійкості та довговічності алмазно-твердосплавних пластин, що є критично важливим для їх застосування у важких умовах буріння та різання.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вихідні матеріали та суміші

В роботі були виготовлені наступні гомогенні суміші: $C_{\text{АЛМ.}} - \text{Si}$, $C_{\text{АЛМ.}} - \text{Ti}$. Вищезазначені суміші були виготовлені за допомогою планетарного млина марки Fritsch (Pulverisette 6 classic line) оснащеного барабаном із зносостійкої кераміки на базі Si_3N_4 номінального об'єму 250 мл та керамічними (Si_3N_4) кулями (\varnothing 5 - 6 мм) (рис. 2.1). Для уникнення активного намолу, змішування проводили при незначних швидкостях 70-150 об/хв в середовищі ізопропилового спирту. Суміш із крупними алмазними зернами АСМ 60/40 виготовляли шляхом протирання через сталеві сита з подальшим змішуванням в вільному стані (без керамічних куль).



а



б

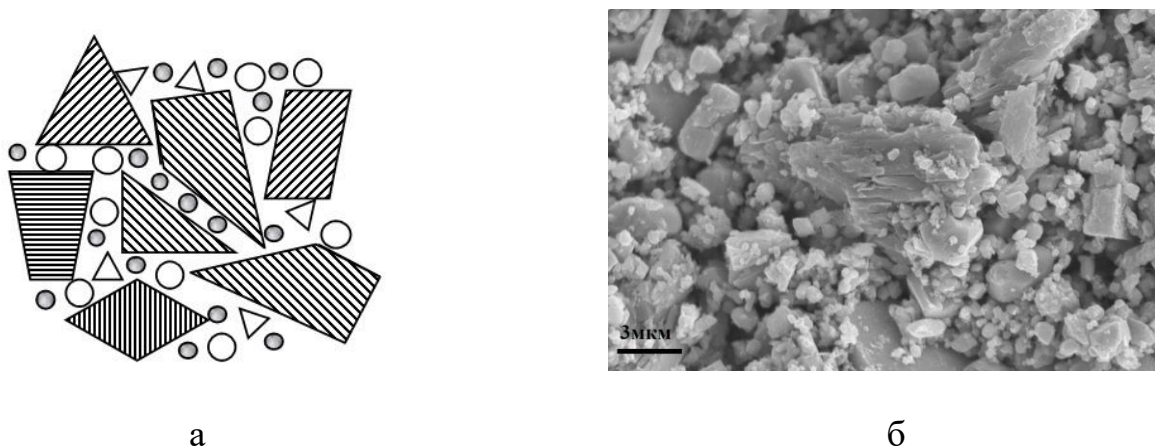
а – планетарний млин; б – керамічний барабан.

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд планетарного млина Fritsch (Pulverisette 6 classic line) та керамічного барабана

Аналіз розміру часток готових сумішей, контролювали методом гранулометричного аналізу з використанням гранулометра Malvern Mastersizer 2000 [37]. З метою уникнення агломерації часток в процесі сушіння та коректного гранулометричного аналізу здійснювали забір суспензії спирт-порошок [38].

Отримані гомогенні суміші звільняли від ізопропилового спирту шляхом нагрівання в сушильній шафі (180 °С), брикетували при необхідності в сталевих пресс-формах та зберігали при температурі 110 °С, що дозволяло уникнути небажаної гідратації.

Таким чином були отримані гомогенні суміші в досліджуваних системах де кожне алмазне зерно (рис. 2.2). оточено мікронними зернами активуючої добавки.



а – схематична модель вихідної суміші Салм–Ті; б – SEM-зображення порошку титана

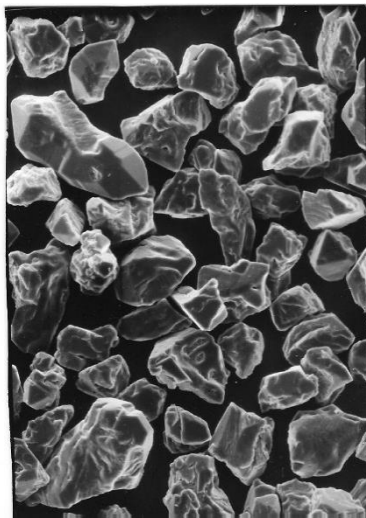
Рисунок 2.2 – Схематична модель та морфологія вихідної суміші Салм–Ті

2.2 Спінання АТП з активуючими добавками

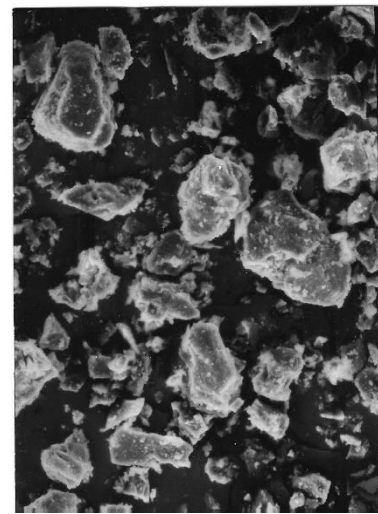
Спінання алмазовмісних твёрдосплавних пластин з активуючими добавками здійснювали на пресовій установці високого тиску ДО-044, призначеній для створення надвисоких квазігідростатичних тисків і температур. Установа працює з використанням апарата високого тиску з

ковадлом-заглибленням типу Тороїд-30, який забезпечує формування необхідних термодинамічних умов для консолідації порошкових сумішей [39]. Нагрів зразків здійснювався шляхом пропускання електричного струму через провідний нагрівальний елемент, що дозволяє реалізувати задані температурні режими без застосування індукційного або електронно-променевого нагріву та забезпечує відтворюваність процесу спікання.

В нашому дослідженні мікропорошок алмазу марки АСМ 60/40 поміщали в комірку АВТ на попередньо спечену підкладку з твердого сплаву марки ВК20, яка має вигляд диску $\varnothing 15$ мм та $h = 3$ мм. В стані вільної засипки пористість алмазного порошку складає приблизно 50 %. Зерна початкового порошку мають подовжену форму з вираженими кристалічними гранями і гострими кутами (рис. 2.3 а).



а



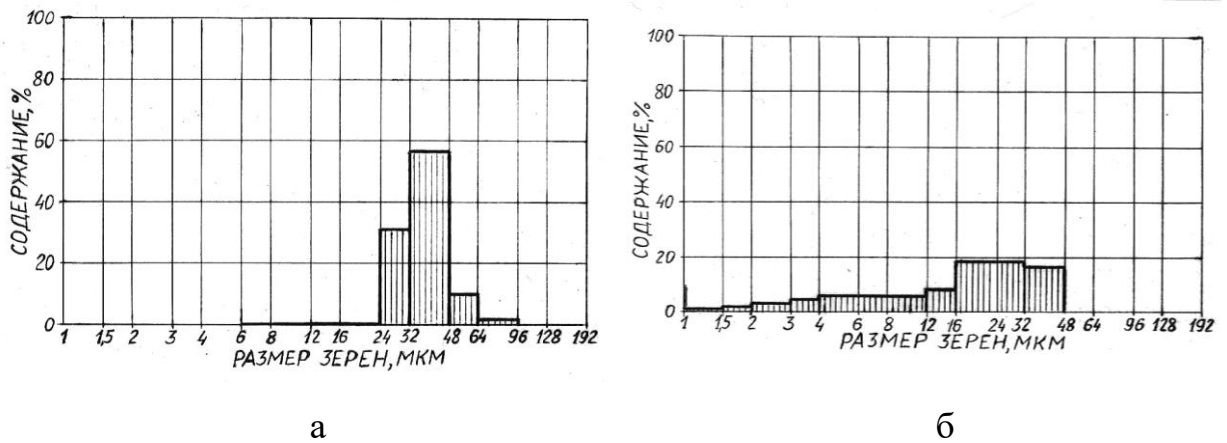
б

а – мікропорошок алмазу у вихідному стані; б – після дії тиску 7,7 ГПа

Рисунок 2.3 – SEM-зображення морфології частинок мікропорошку алмазу марки АСМ 60/40

Гранулометричний склад мікропорошку АСМ60/40 згідно ГОСТ 9206-80 представлений на рисунку 9.6 а, та оказує що основна фракція має розміри зерен 60-30 мкм. Зверху на алмазний порошок поміщали суміш алмазного порошку з активуючими добавками в необхідній пропорції і розрахованій

кількості. Зібрану таким чином комірку поміщають в камеру високого тиску і піддають тиску 7,7 ГПа без нагріву реакційного об'єму. В результаті такої дії пористість алмазної пресовки зменшується до 20 %. Аналіз зернового складу порошку після дії тиску 7,7 ГПа показує зменшення середнього розміру зерен майже в двічі з максимальним розміром 48 мкм і значною кількістю дрібних зерен розміром до 1 мкм (рис. 2.4 б).



а – у вихідному стані; б – після дії тиску 7,7 ГПа

Рисунок 2.4 – Гранулометричний склад мікропорошку алмазу марки АСМ 60/40

Кристали алмазу набувають вигляд овалізованих з відсутністю гострих кутів і кристалічних граней, з'являється велика кількість дрібних кристалітів осколкової форми (рис. 2.3 б). Таким чином усадка алмазного порошку під час прикладання тиску без нагріву реакційного об'єму проходить за рахунок крихкого подрібнення алмазних зерен і їх укладки в більш щільну упаковку [40]. Треба мати на увазі, що при зовнішньому тиску 7,7 ГПа зусилля в точках контакту зерен можуть бути набагато більшими і може перевищити міцність алмазних зерен.

Після досягнення необхідного тиску реакційний об'єм комірки АВТ нагрівають до заданої температури шляхом пропускання електричного струму через коло нагріву преса ДО 044. Час для досягнення потрібної температури складає 20-30 сек. Цей етап можна вважати періодом неізотермічного

спікання. В цей час можуть проходити термічно активні процеси укладки зерен за рахунок їх проковзування і пластичного течіння, що призводить до усадки алмазного порошку. Так згідно [41] пластичне течіння алмазу можливе при тисках вище 4,0 ГПа та температурі 1000 °С. При досягненні температури плавлення евтектики Co-WC в твердосплавній підкладці починається процес рідко фазного спікання шляхом інфільтрації евтектичного розплаву в алмазний порошок. По даним роботи [42] просочування алмазного порошку Co при тиску 8,0 ГПа починається при 1440 °С, а розплавом із твердого сплаву при 1700 °С, тобто для досягнення рівних констант швидкості просочування твердий сплав необхідно нагріти на 150-200 градусів вище ніж чистий Co. Ці данні добре співпадають з нашими, так при температурах спікання 1500-1600 °С алмазовмісний шар диспергується і відшаровується від підкладки, а цілі пластини можна отримати в діапазоні температур 1700-1800 °С. Час ізотермічної витримки достатній для формування кінцевої структури алмазовмісного шару АТП складає 30-40 сек. Збільшення часу спікання більше вказаного не призводить до суттєвого підвищення рівня властивостей пластини, але значно зменшує кількість циклів роботи апарату високого тиску.

Для виготовлення РСД різні іноземні фірми використовують твердий сплав з вмістом кобальту 6-15 мас. %. При спіканні вітчизняних серійних АТП використовують попередньо спечені твердосплавні підкладки марок ВК 15, ВК 20 з вмістом кобальту відповідно 15 і 20 мас. %. Зі збільшенням вмісту кобальту при температурі утворення евтектики 1370 °С при атмосферному тиску кількість рідкої фази збільшується, так ВК6 авона складає 13,8 % об., для ВК 10 – 21,8, для ВК15 31,1 %, для ВК 20 – 41,9 % [43].

Нами виконані дослідження процесу спікання АТП з активуючими добавками з використанням попередньо спечених підкладок зі сплавів марок ВК6, ВК10, ВК15, ВК20. Спікання проводили в спеціально розроблених комірках високого тиску при параметрах 7,7 ГПа і 1700-1800 °С. В якості активуючої добавки в алмазний порошок попередньо перед спіканням додавали порошок кремнію в кількості 2 мас. % і 4 мас. %.

По результатам експериментів можна констатувати що при використанні підкладки з низьким вмістом кобальту (ВК6) для отримання якісних АТП необхідно підвищувати температуру спікання для збільшення швидкості процесу просочування алмазного мікропорошку рідкою фазою. При використанні підкладок з високим вмістом кобальту (ВК20) спікання проходить з високою швидкістю, однак при високих температурах можливе утворення дефектів у підкладці. При спіканні на підкладках з середнім вмістом кобальту (ВК10, ВК15) процес формування структури алмазного шару АТП проходить в оптимальному режимі. Таким чином найбільш оптимальними для використання при спіканні АТП з активуючими добавками визнані підкладки з середнім вмістом кобальту, а саме ВК10 та ВК15.

2.3 Методика лабораторних досліджень зносостійкості та експлуатаційних властивостей АТП

Для ефективного застосування в буровому інструменті породоруйнівних елементів з нових надтвердих матеріалів необхідно проводити більш якісні і менш затратні дослідження з оцінювання працездатності їх у процесі руйнування твердої гірської породи.

Відомі на цей час методи оцінювання працездатності породоруйнівних елементів для бурового інструменту мають складність в обробці інформації на застарілому обладнанні або малу інформативність процесу і громіздкість програмного забезпечення, яке призводило до великих витрат робочого часу на розрахунки

Раніше експериментальні дослідження зносостійкості алмазно-твердосплавних пластин АТП в ІНМ проводилися відповідно до стандарту підприємства [44]. Цей стандарт встановлює метод оцінки зносостійкості алмазно-твердосплавних пластин (АТП), що виготовляються за ТУ 88 України 90.1244-91 і вживаних в буровому інструменті.

Суть цього методу полягає у визначенні середньої висоти площини зносу алмазно-твердосплавних пластин при різанні гірських порід на поперечно-стругальному верстаті моделі 7В36. Цей метод добре зарекомендував себе для відбору АТП, які використовуються в породоруйнівному інструменті, що працює без охолодження. Але для бурового інструменту, що працює з використанням охолодження (промивна рідина чи стиснене повітря), він є не зовсім коректним.

В ІНМ також раніше була розроблена методика досліджень алмазовмісних породоруйнівних елементів при точінні керну гірської породи на токарно-гвинторізному верстаті, яка стала основою нової вдосконалої методики лабораторних досліджень експлуатаційних властивостей АТП з активуючими добавками [45].

Суть цієї методики полягає в наступному. На першому етапі проводяться експериментальні дослідження зносостійкості породоруйнівних елементів при точінні заздалегідь вибурених кернів гірської породи різцем, оснащеним дослідною пластиною АТП, на спеціальному стенді, створеному на базі токарно-гвинторізного верстата моделі ДП-200 (рис. 2.5)

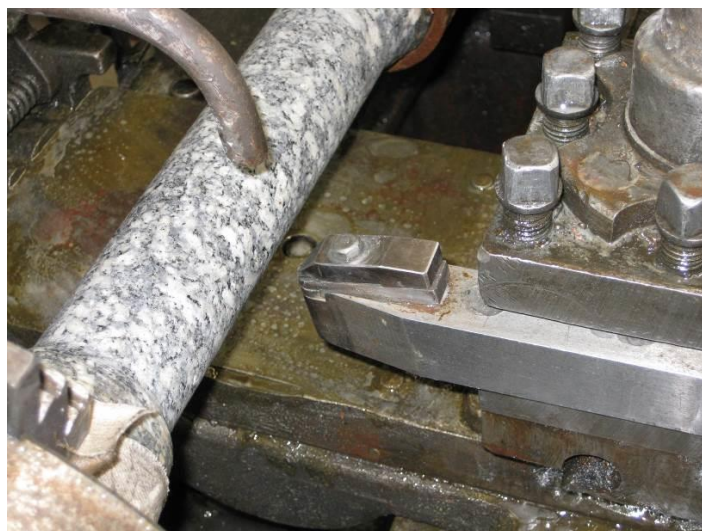


Рисунок 2.5 – Дослідження зносостійкості АТП на спеціальному стенді

При випробуваннях використовувалося спеціальне пристосування для закріплення керн гірської породи у вигляді розрізного циліндра і склянки (рис. 2.6), а також спеціальний різець для закріплення зразка ріжучого АТП, що досліджується (рис. 2.7). Геометричні параметри різальної частини спеціального різця: передній кут $\gamma = -10^\circ$, задній кут $\alpha = 10^\circ$.



Рисунок 2.6 – Спеціальне пристосування для закріплення керну



Рисунок 2.7 – Спеціальний різець для закріплення зразка ріжучого АТП, що досліджується

Дослідний зразок АТП закріплюється в спеціальному різці і підводиться до поверхні керну гірської породи, де і здійснюється його поздовжнє різання з заданою глибиною впровадження. Зносостійкість досліджуваних зразків АТП оцінювали за інтенсивністю зношування за масою.

Інтенсивність зношування за масою I (мг/км) визначалась як співвідношення втрати маси породоруйнівної вставки $\Delta m = m_{\text{п}} - m_{\text{к}}$ до величини проходки на елемент L , де $m_{\text{п}}$ та $m_{\text{к}}$ (мг) – маса зразка, відповідно до і після тестування

$$I = \frac{\Delta m}{L}, \quad (2.1)$$

де $L = \frac{\pi D n}{60} t$; (D – діаметр керну, м; n – частота обертання шпинделя станка, об/хв; t – тривалість різання, хв) [46].

При цьому втрати маси дослідних зразків АТП з активуючими добавками вимірювали на електронних аналітичних вагах типу KERN ABS/ABJ.

На другому етапі вдосконаленої методики проводились порівняльні експериментальні дослідження експлуатаційних властивостей породоруйнівних елементів з АТП під час поздовжнього різання керну гірської породи на спеціальному стенді, створеному на базі токарно-гвинторізного верстата типу ФТ-11 (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Випробування на інтенсивність зношування на токарно-гвинторізному верстаті ФТ - 11

Складові сили різання P_x , P_y та P_z вимірювалися встановленим на спеціальному стенді універсальним динамометром УДМ-1200 конструкції

ВНІнструмента. Тарування динамометру проводили у спеціальному пристрої зразковим динамометром ДОСМ-200 (рис. 2.9).

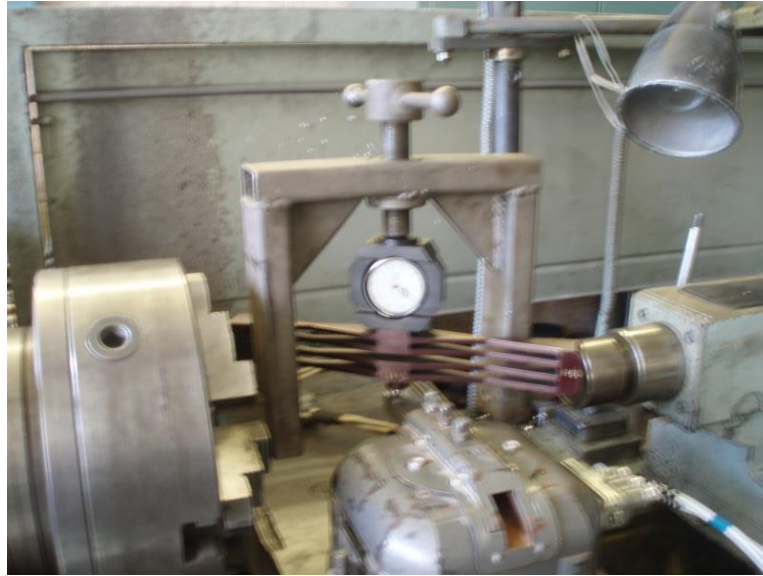


Рисунок 2.9 – Тарування динамометру ДОСМ-200

Дані вимірювань складових сили різання фіксувалися з використанням спеціально розробленого і виготовленого апаратно-програмного комплексу, що має модуль вимірювання, оснащений аналого-цифровим перетворювачем (АЦП), і оброблювалися на персональному комп'ютері (ПК) за допомогою спеціальної програми "Tenzosation-2". Інтерфейс програмного забезпечення, що використовувався при виконанні вимірювань, показано на рисунку 2.10. Все це дало змогу оперативно проводити запис і обробку інформації за допомогою ПК в режимі реального часу [47].

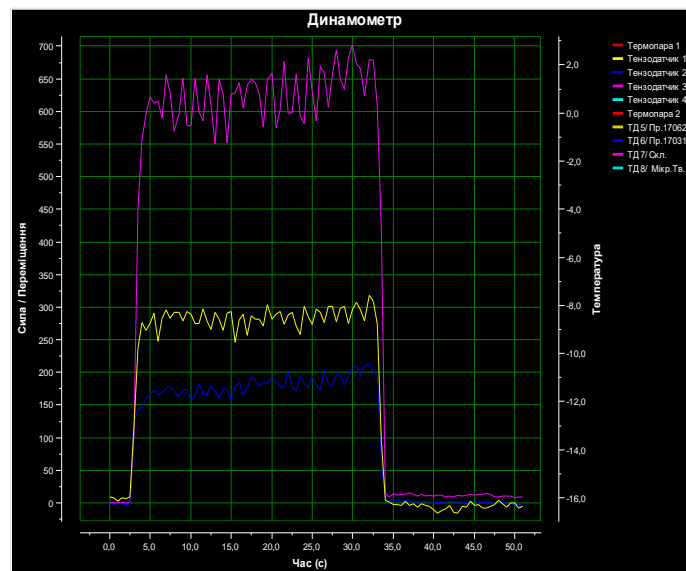


Рисунок 2.10 – Інтерфейс програми "Tenzosation-2"

Кінетику зношування досліджуваних пластин АТП під час різання в режимі реального часу також вивчали з урахуванням зміни складових сили різання, які вимірювали універсальним динамометром УДМ-1200. Отримані дані фіксували в апаратно-програмному комплексі з модулем вимірювання з АЦП та опрацьовували на ПК. На випробуваннях, як і при виконанні досліджень на попередньому етапі, теж використовувалося спеціальне пристосування для закріплення керна гірської породи у вигляді розрізного циліндра і склянки, а також спеціальний різець для закріплення зразка досліджуваного АТП.

Працездатність досліджуваних пластин АТП оцінювали за інтенсивністю зношування за масою і контрольним виміром висоти площадки зносу мікроскопом МБС-9 з похибкою вимірювань $\pm 0,03$ мм, а також за розрахованими показниками питомої енергоємності руйнування γ для кожного із зразків [48].

В якості гірської породи для випробувань зносостійкості та експлуатаційних властивостей досліджуваних зразків АТП було вибрано коростишевський граніт X категорії буримості, що характеризується стабільними властивостями, високою твердістю та малою абразивністю. Його

загальні характеристики: граніт біотитовий порфіровидний, вкраплення польового шпату мають ізометричну або подовжену призматичну форму, при цьому основна маса породи середньозерниста, мікроструктура її гіпідіоморфіозерниста. Мінералогічний склад: кварц – до 25%, польовий шпат – до 55%, біотит – 20%. Кварц представлений у вигляді зерен із ксеноморфними обрисами й становить 20-25% площі петрографічного шліфа. Вкраплення польового шпату представлені у вигляді майже ізометричних або витягнутих зерен розміром від 0,5 до 2-3 мм по довгій осі або в поперечнику. Основна маса зерен польового шпату від 1,5 до 3 мм. Зерна з гіпідіоморфними обрисами. Польовий шпат становить 60-65% площі шліфа. Біотит представлено у вигляді гіпідіоморфних пластинчастих зерен розміром від 0,5 до 2-3 мм по довгій осі [49].

Основні фізико-механічні властивості коростишевського граніту: твердість по штампі $P_{ш} = 237$ даН/мм²; абразивність – 43; об'єднаний показник буримості $\rho_m = 34,2 \div 51,2$.

Слід зазначити, що дослідження зносостійкості та експлуатаційних властивостей досліджуваних зразків АТП в представленій методиці проводилися при різанні керну граніту при примусовому охолодженні зони різання проточною водою, що імітує процес промивки і охолодження озброєння робочого торцю бурового інструменту на вибої свердловини [50].

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

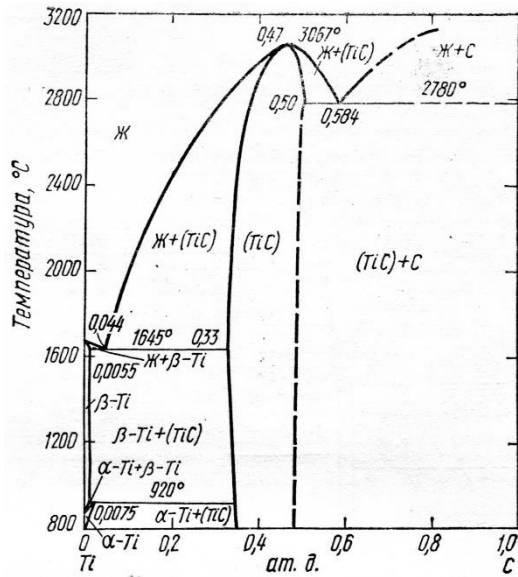
3.1 Аналіз діаграм стану досліджуваної системи

Оскільки метою цієї роботи є створення в поверхневому шарі АТП на противагу Со який інфільтрує з твердосплавної підкладки тугоплавких карбідів або інтерметалідів на основі кобальту з ціллю підвищення термостійкості нами розглянуті фазові діаграми стану систем: Ti-C, Si-C [51], [52], Co-Ti [53], Co-Si [54]; в умовах НТНР [55], [56] (рис. 3.1).

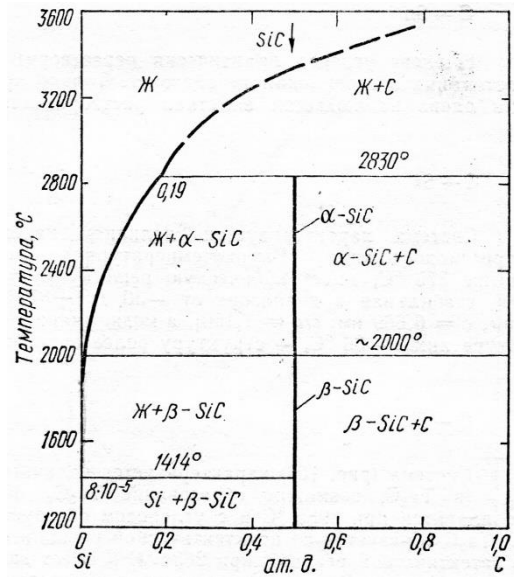
Розгляд діаграми TiC (рис. 3.1а) показує, що в процесі реакційного спікання на контактах алмазних зерен з титаном можливе утворення TiC, що і було встановлено при спіканні в умовах високих тисків та температур [56]. Аналогічна можливість утворення SiC (рис. 3.1б) на контактах кремнію з алмазом за умов високих НРНТ [57].

Згідно з діаграмою стану системи Co-Ti (рис. 3.1в) при співвідношенні 71 мас. % Со, 29 мас. Ti утворюється інтерметаліди Co_2Ti , при 55 мас. % Со – 45 % мас. Ti утв. $CoTi$, при 38 мас. % Со – 62 % мас. Ti утв. $CoTi_2$. Так в попередніх дослідженнях [58] встановлено, що в спеченому алмазному шарі АТП знаходиться в середньому 9 мас. % Со, то для дослідження процесів утворення цих інтерметалідів з метою зв'язування кобальту вміст титану при додаванні в алмазний порошок складає 3, 5, 7 мас. % Ti.

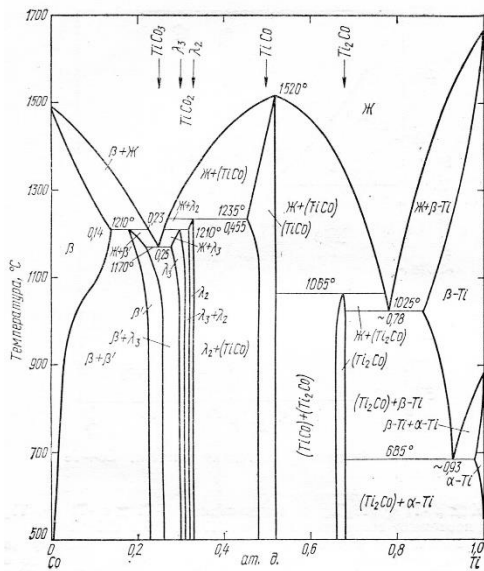
В системі Co-Si (рис. 3.1г) при співвідношенні 82 мас. % Со – 18 мас. % Si утворюється інтерметалід Co_2Si , 68 мас. % Со – 32 мас. % Si утворюється інтерметалід $CoSi_2$. На основі попередніх досліджень [58] при вмісті Со в алмазному шарі в середньому 9 мас. % кількість добавок кремнію в алмазний порошок повинна складати 2 мас. %, 4 мас. %, 8 мас. %, що забезпечить утворення цих інтерметалідів і зв'яже кобальт алмазного шару.



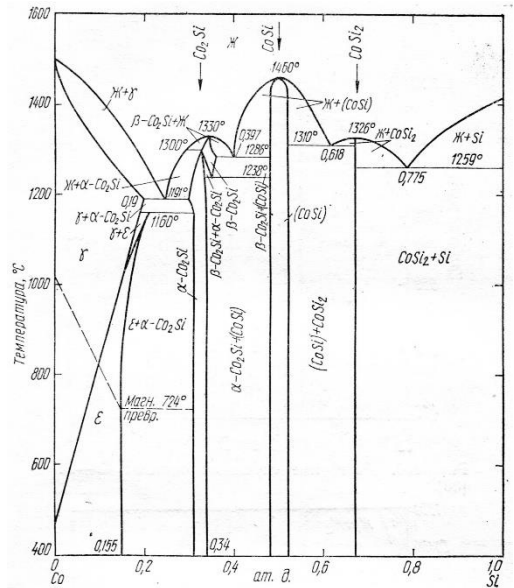
а



б



в



г

а – діаграма стану системи Ti–C;

б – діаграма стану системи Si–C;

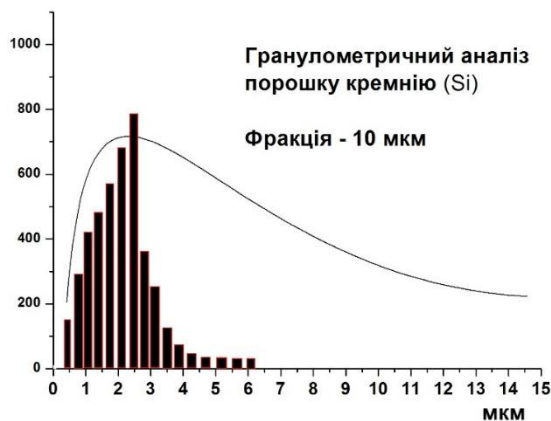
в – діаграма стану системи Co–Ti;

г – діаграма стану системи Co–Si

Рисунок 3.1 – Діаграми стану систем [68]

В роботі були використані наступні вихідні матеріали: алмазні синтетичні мікропорошки марки АСМ 60/40 світло-жовтого кольору які були проаналізовані на наявність домішок та сторонніх фаз методами порошкової дифракції та за допомогою електронно-мікроскопічним аналізом.

В якості активуючих процес спікання добавок використано мікропорошки: титану, кремнію та карбонату кальцію. Всі вони мали середній розмір частинок 1-3 мкм та були проаналізовані методом РФА. На рисунку 3.2 показано (на прикладі кремнію) гранулометричний склад вибраних активуючих добавок та їх загальний вигляд. Порошок титану та кремнію зберігався в атмосфері аргону для запобігання його окиснення киснем повітря, а вихідні суміші готувалися безпосередньо перед проведенням експериментів.



а

б

а – гранулометричний склад порошку кремнію;

б – загальний вигляд вихідних порошків активуючих добавок

Рисунок 3.2 – Гранулометричний склад кремнію та загальний вигляд вихідних порошків

3.2 Дослідження впливу температури спікання на АТП з активуючими добавками

Після завершення процесу спікання АТП і видалення її з комірки високого тиску пластина являє собою циліндр неправильної форми з висотою ~ 5 мм та \varnothing близько 15 мм (рис. 3.3). Зовні вона покрита матеріалом захисного екрану і в такому вигляді не придатна для використання. Для надання пластині робочого стану необхідна обробка по боковій циліндричній поверхні і по площині з боку підкладки та алмазозносного шару. Така робота досить складна та трудомістка так як йдеться про механічну обробку полікристалічного алмазу, яку можна виконати тільки алмазним інструментом [59]. Обробку по боковій поверхні виконували на без_центровому кругло-шліфувальному верстаті моделі ЗГ182 алмазним кругом з використанням алмазів АС6 125/100 на металевій зв'язці. Для обробки розроблені спеціальні касети, які дають можливість провести поетапне округлення з діаметра 15 мм до $\varnothing 13,5$ мм. Також були розроблені технологічні режими роботи без центрового кругло-шліфувального верстата ЗГ182 для механічної обробки АТП.

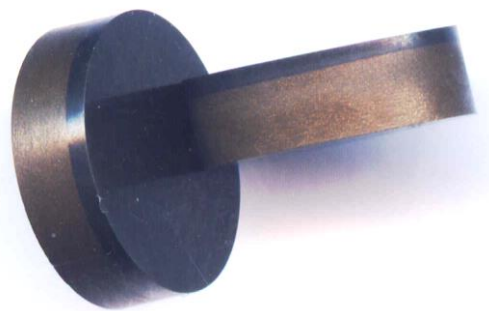


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд АТП з активуючими добавками

Обробку площинами виконували на плоско-шліфувальному доводочному верстаті моделі ЗШП-320 з використанням спеціально

розроблених для них касет. Обробку проводили з використанням алмазно-абразивної суспензії на базі алмазів АС6 80/63 на чавунних планшайбах.

Виготовлені експериментальні зразки АТП з використанням активуючих добавок в кількості 2, 4, 8 мас. % кремнію; 3, 5, 7 мас. % Ті. Отримані якісні пластини представляють собою циліндри висотою $4,0 \pm 0,1$ мм, $\varnothing 13,5^{+0,1}$ мм з висотою алмазного шару 1,5-1,8 мм (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Оброблена та готові до випробувань пластини АТП з активуючими добавками

Такі АТП можна отримати при додаванні 2 та 4 мас. % Si та 3 мас. % Ti, при збільшенні вмісту кремнію до 8 мас. % і Ti до 5-7 мас. % в алмазному шарі з'являються дефекти (не_пропечені ділянки) і тріщини (рис. 3.5).

Таким чином отримати якісні АТП при параметрах спікання $p - 7,7$ ГПа, $T - 1800$ °С, $\tau - 60$ сек можна при додаванні невеликих по кількості активуючих добавок активуючих добавок: 2-4 мас. % Si, 3 мас. % Ti. Збільшення вмісту кремнію чи Ti в алмазному шарі при спіканні АТП як приклад пропонується в [63], [62], [61] шляхом просочування алмазного шару і призводить до утворення дефектів в ньому.

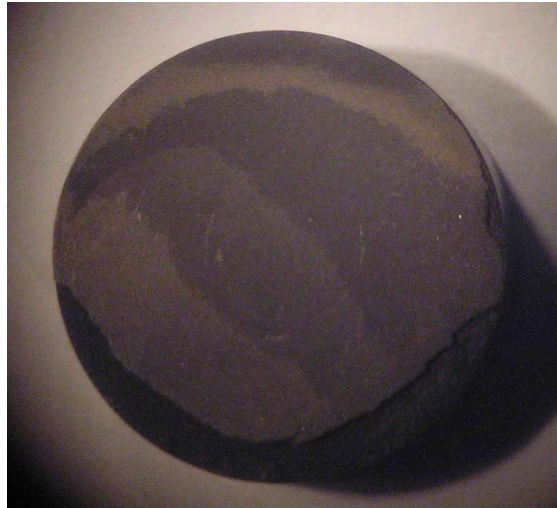


Рисунок 3.5 – Не_пропечені ділянки і тріщини в алмазному шарі АТП з активуючими добавками.

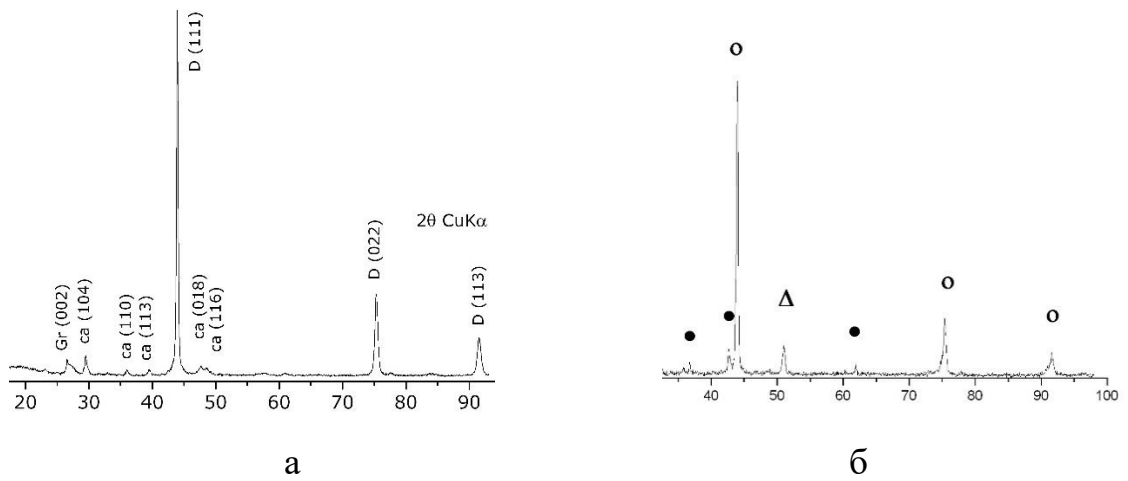
3.3 Дослідження взаємодії компонентів алмазовмісного шару АТП

Дослідження проводили методом рентгенофазового аналізу на установці STOE STADI MP, що оснащено монохроматором з використанням сцинтиляційного лічильника у випромінюванні CuK_α ($\lambda_{\text{Cu}} = 1,54060 \text{ \AA}$). Зйомку проведено в інтервалі кутів $2\theta = 20 - 100$ град. при кімнатній температурі з використанням сцинтиляційних лічильників у фокусуєчій геометрії за Брегом-Брентано. Особливістю фокусування за Брегом-Брентано [64] є розміщення зерен полікристалічного зразка у відбиваючому положенні (кут θ). При зміні положення детектора на певний кут зразок обертається на кут вдвічі менший. Умовою дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці є відоме рівняння Вульфа-Брегга [65]. Рентгенівський фазовий аналіз зразків проведено з використанням комплексу програм з базою даних еталонних дифрактограм, що розраховані за літературними даними про кристалічну структуру сполук. Програмне забезпечення дає можливість графічного співставлення спектра дослідженого зразка з еталонним дифракційним спектром, аналітичного порівняння міжплощинних відстаней зразка і еталона та уточнення періодів кристалічної ґратки фаз за методом найменших квадратів [66].

Дослідження взаємодії з додаванням Ti проводили на АТП отриманих спіканням методом прямого просочування з твердосплавної підкладки з додаванням в алмазний порошок 3, 5, 7 мас. % Ti з метою утворення при взаємодії з Co відповідно до діаграми стану Co-Ti інтерметалідів: Co_2Ti , $CoTi$, $CoTi_2$. Згідно з діаграмою Ti-C можливе також утворення TiC.

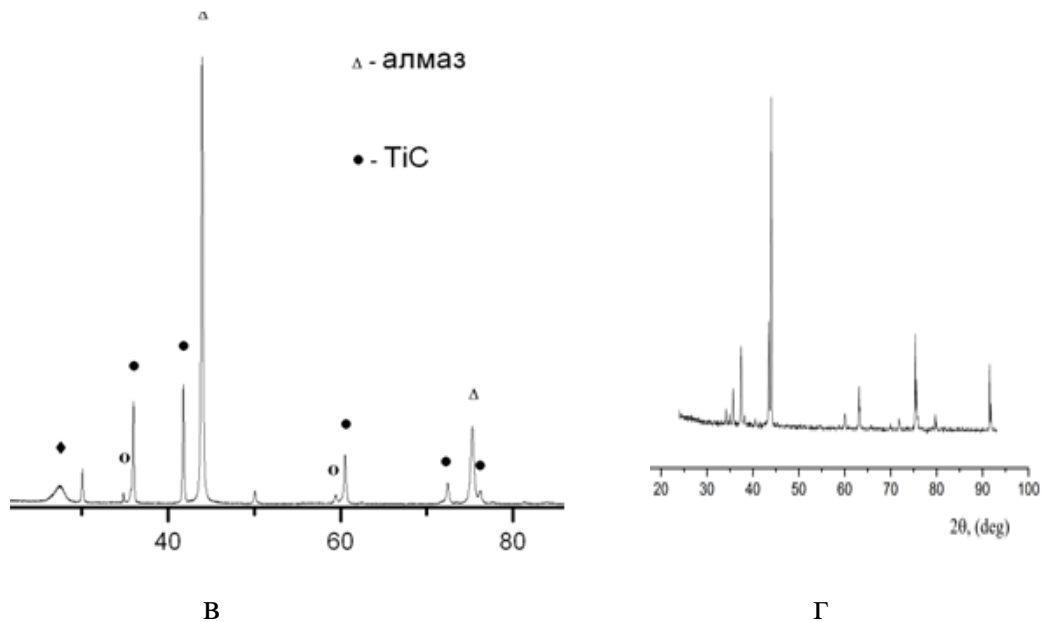
На рисунку 3.6 наведено фрагменти дифрактограм АТП, зняті з поверхні алмазного шару, що дозволяє наочно простежити перебіг процесів взаємодії в досліджуваній системі. У зразках без додавання Ti в алмазний порошок після спікання в алмазовмісному шарі виявляються фази Co та WC (рис. 3.6, а). При введенні 3 мас. % Ti формується подвійний карбід Ti_4WC_5 , при цьому взаємодії між Ti та Co з утворенням інтерметалідів не спостерігається (рис. 3.6, б). За вмісту 5 мас. % Ti основною новоутвореною фазою є монокарбід титану TiC за наявності значної кількості Co (рис. 3.6, в). Подальше збільшення концентрації Ti до 7 мас. % не змінює загальний вигляд дифрактограм, відмічається лише зростання кількості утвореного карбиду титану (рис. 3.6, г). Отже, у процесі реакційного спікання АТП з титановою активуючою добавкою взаємодія Ti з Co з утворенням інтерметалідів не реалізується, а переважає формування TiC, що пояснюється вищою хімічною спорідненістю Ti до вуглецю порівняно з Co.

Дослідження взаємодії з додаванням Si проводили на АТП отриманих спіканням методом прямого просочування з твердосплавної підкладки з додаванням в алмазний порошок: 2, 4, 8 мас. % Si з метою утворення при взаємодії з Co відповідно до діаграми Co-Si (рис. 3.1 г) інтерметалідів: Co_2Si , $CoSi$, $CoSi_2$. Згідно з діаграмою Si-C (рис. 3.1 б) можливе також утворення SiC.



а – фрагмент рентгенограми спечених пластин без додавання титану;
 б – фрагмент рентгенограми спечених пластин з додаванням 3 мас. %
 титану

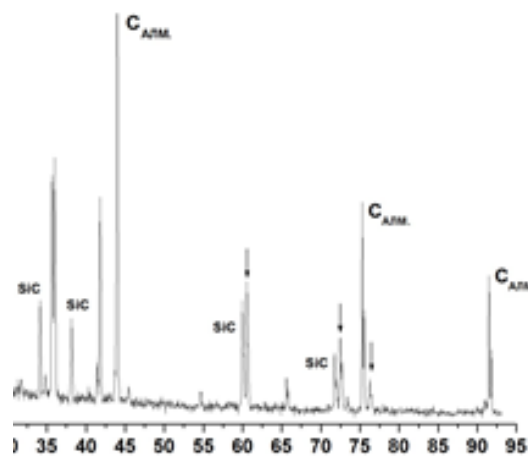
Рисунок 3.6 – Фрагменти рентгенофазових спектрів алмазно
 тврдосплавних пластин після реакційного спікання



в – фрагмент рентгенограми спечених пластин з додаванням 5 мас. %
 титану;
 г – фрагмент рентгенограми спечених пластин з додаванням 7 мас. %
 титану

Рисунок 3.6 – Фрагменти рентгенофазових спектрів алмазно
твердосплавних пластин після реакційного спікання

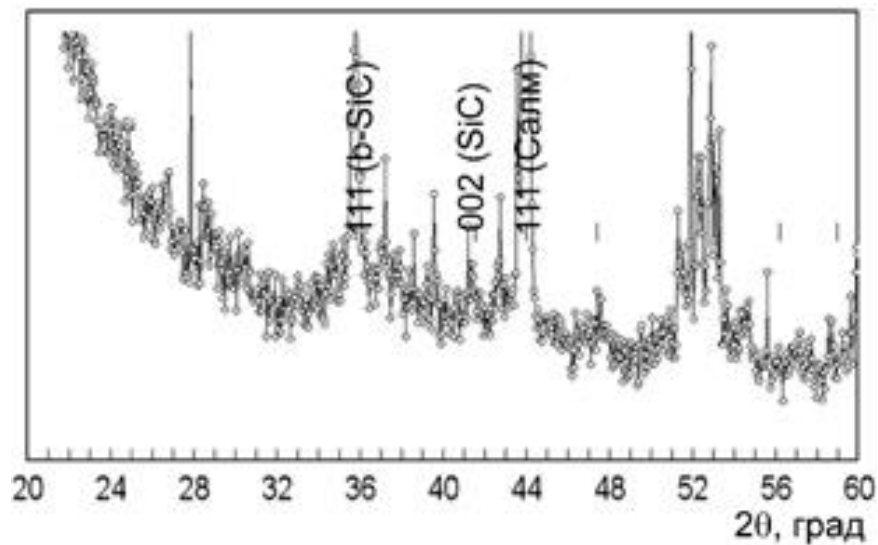
На рисунку 3.7 наведено фрагменти дифрактограм АТП, знятих з поверхні алмазного шару. У зразках без додавання Si до алмазного порошку в алмазовмісному шарі спечених АТП присутні компоненти евтектики Co та WC (рис. 3.7а). При введенні 2 мас. % Si відбувається взаємодія між Co та Si з утворенням інтерметаліду Co_2Si , при цьому реакція протікає повністю без залишків вихідних компонентів (рис. 3.7а), тобто спостерігається повне зв'язування Co в інтерметалід. За вмісту 4 мас. % Si взаємодія Co з Si приводить до формування моносиліциду $CoSi$ (рис. 3.7а), що відповідає співвідношенню компонентів згідно з діаграмою стану системи Co–Si (рис. 3.1г). При додаванні підвищеної кількості Si — 8 мас. %, коли його вміст за об'ємом перевищує кількість Co в алмазному шарі, утворюються інтерметаліди Co та $CoSi_2$, а також карбід кремнію SiC (рис. 3.7в). Взаємодії між Si та TiC, аналогічно до випадку з титановими добавками, не виявлено. Переважне утворення інтерметалідів у системі алмаз–Si–Co зумовлене більш високою хімічною спорідненістю кремнію до кобальту порівняно з вуглецем.



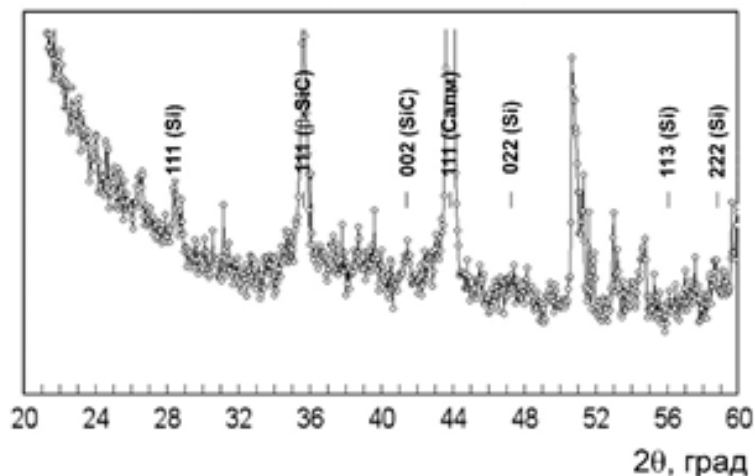
а

а – фрагмент рентгенограми спечених АТП з добавкою 3 мас. % Si.

Рисунок 3.7 – Фрагменти рентгенофазових спектрів алмазно
твердосплавних пластин після реакційного спікання



б



в

б) Фрагмент рентгенограми спечених АТП з добавкою 5 мас. % Si.

в) Фрагмент рентгенограми спечених АТП з добавкою 7 мас. % Si.

Рисунок 3.7 – Фрагменти рентгенофазових спектрів алмазно тврдосплавних пластин після реакційного спікання

Слід відмітити, що при утворенні SiC в процесі реакційного спікання в алмазному шарі АТП спостерігається формування тріщин і розшарувань. Такий процес утворення тріщин і відокремлення алмазного шару від підкладки при утворенні значної кількості SiC і силіциду кобальту під час просочування кремнієм алмазного шару АТП спостерігається авторами патенту [27].

Аналогічний процес формування тріщин в алмазному шарі АТП при утворенні TiC під час реакційного спікання спостерігався при додаванні в алмазний порошок значної кількості Ti. Подібне явище формування тріщин в алмазному шарі при утворенні карбідів відзначене авторами [67].

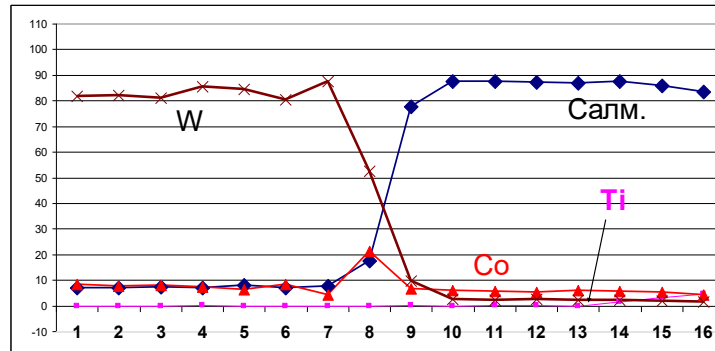
Таким чином найбільш перспективним для використання в якості активуючої добавки можна вважати Si. Додавання його в алмазний порошок в невеликій кількості сприяє зв'язуванню Co в інтерметаліди, що повинно підвищити зносостійкість і термостійкість алмазозносного шару АТП.

3.4 Дослідження структури АТП з активуючими добавками

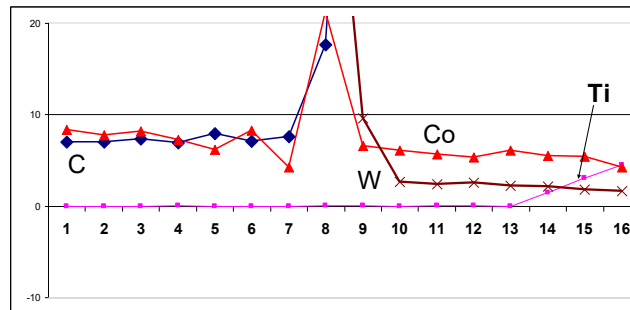
Дослідження структури алмазно-твердосплавних пластин з активуючими добавками виконували із застосуванням методів рентгеноспектрального аналізу та скануючої електронної мікроскопії. Елементний аналіз у режимі характеристичного випромінювання проводили методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії на скануючому електронному мікроскопі Tescan Mira 3, оснащеному детектором вторинних електронів Еверхарта–Торнлі (SE2), детектором обернено розсіяних електронів (BS) та енергодисперсійним аналізатором рентгенівських спектрів X-MaxN 80 (Oxford Instruments). Обробку та аналіз отриманих зображень здійснювали з використанням програмного забезпечення Automated AZtecEnergy. Дослідження мікроструктурних особливостей алмазного шару АТП також проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопу Zeiss LEO 1560 (NanoLund, Швеція), оснащеного детектором In-Lens та детектором вторинних електронів Еверхарта–Торнлі (SE2), з максимальною роздільною здатністю 5 нм при напрузі 20 кВ і робочій відстані $WD = 2$ мм та збільшенні до $900000\times$.

Для виконання досліджень на бічній поверхні пластин готували полірований металографічний шліф шириною 3 мм. Розподіл хімічних елементів в АТП, спечених з додаванням 3 мас. % Ti, наведено на рисунку 3.8,

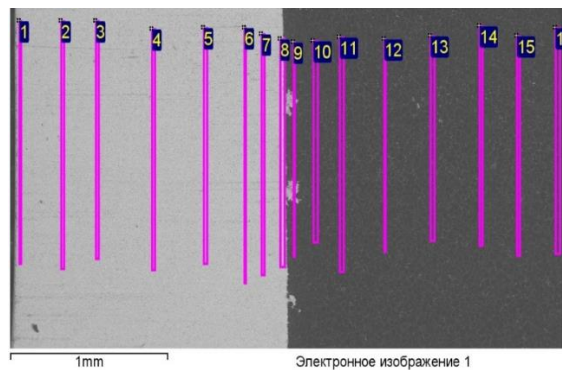
а мікроструктура алмазного шару та підкладки в області перехідної зони показана на рисунку 3.9.



а



б



в

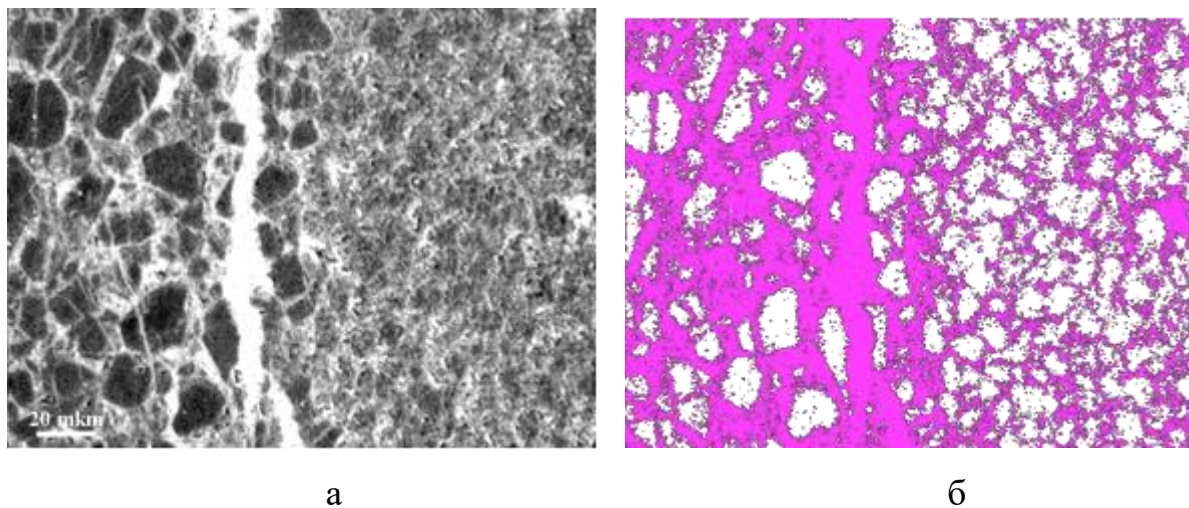
а – лінійний EDS-розподіл елементів (C, W, Co, Ti) по товщині алмазного шару АПІ;

б – профілі концентрацій елементів у перехідній зоні «алмазний шар – підкладка»;

в – електронне зображення ділянки лінійного аналізу

Рисунок 3.8 – Розподілення хімічних елементів в пластинах з додаванням 3 мас. % Ti

У поверхневому алмазному шарі АТП на глибині до 0,5 мм фіксується наявність титану, який характеризується достатньо нерівномірним розподілом, при цьому вміст кобальту в даній області дещо зменшується. Такий характер просторового розподілу Ті можна пояснити тим, що утворення евтектики в системі Ті–С відповідно до діаграми стану відбувається при температурі 1645 °С, що перевищує температуру формування евтектики Со–WC (1320 °С), унаслідок чого в процесі спікання спостерігається витіснення титану до поверхні. Аналогічний характер витіснення нікелю раніше відзначався іншими авторами [68].



- а – мікроструктура алмазного шару поблизу межі з підкладкою;
 б – мікроструктура зони «алмазний шар – підкладка»

Рисунок 3.9 – Мікроструктурна будова перехідної зони між твердосплавною підкладкою та алмазним шаром

Згідно з результатами раніше виконаних рентгенофазових досліджень встановлено, що титан перебуває у стані сформованого карбиду ТіС. У структурі твердосплавної підкладки в зоні, безпосередньо прилеглий до алмазного шару, можна виокремити три характерні області. Перша область відповідає структурі твердого сплаву з підвищеним вмістом кобальту, друга — структурі сплаву ВК зі зниженим вмістом Со, а третя представлена темними ділянками, локалізованими на поверхні кристалів алмазу.

Мікрорентгеноспектральний аналіз перехідної зони (рис. 3.9) підтвердив наявність зазначених структурних ділянок у підкладці. На відстані понад 700 мкм від лінії перетину пластини склад твердого сплаву відповідає марці ВК20, тоді як у зоні 70–10 мкм спостерігається збіднення сплаву кобальтом. У безпосередній приповерхневій області товщиною близько 10 мкм зафіксовано істотне зростання концентрації Со при одночасному зменшенні вмісту вольфраму. Більш детальний аналіз темних ділянок (рис. 3.10) показує, що їх середній елементний склад становить близько 83 мас. % Со, 7 мас. % W та 9 мас. % С.

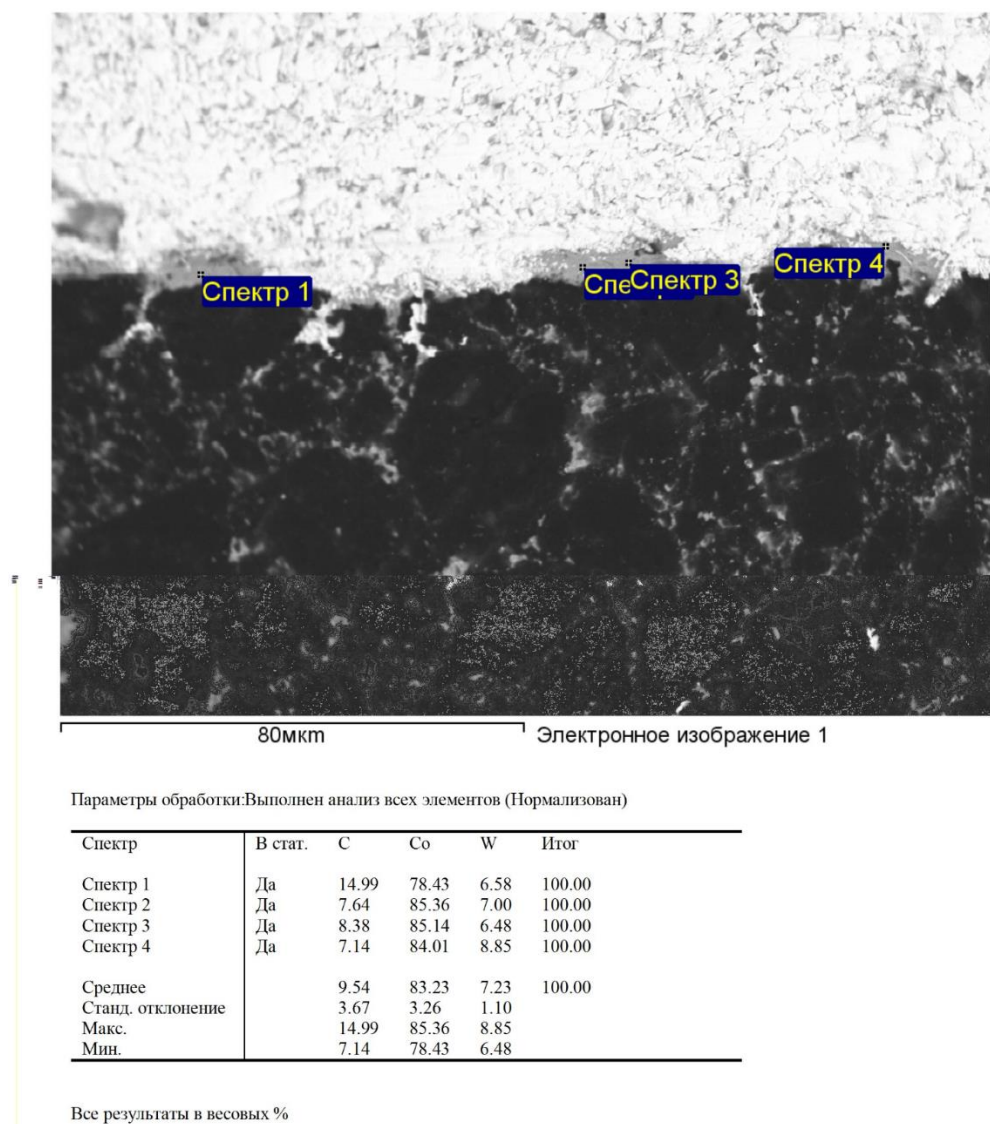


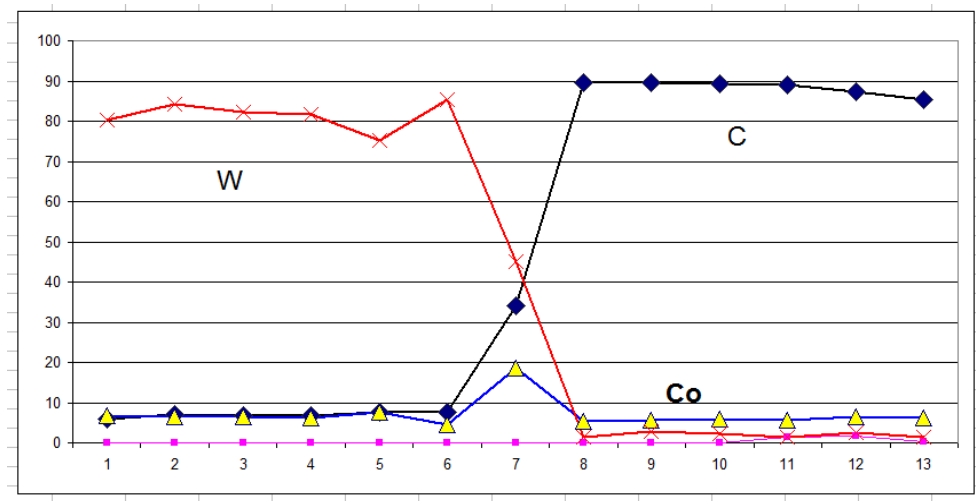
Рисунок 3.10 – Спектральний аналіз перехідної зони пластини

Отримане співвідношення елементів може бути інтерпретоване як твердий розчин WC у кобальті [69, 70]. Характерною особливістю є те, що темна кобальтова фаза спостерігається виключно на поверхні алмазних кристалів, які контактують із твердосплавною підкладкою, тоді як у міжзерновому просторі вона відсутня. Це дає підстави стверджувати, що збагачена кобальтом рідка фаза, яка формується в твердосплавній підкладці, швидше за все евтектика Co–WC, мігрує з підкладки та проникає в пори алмазної пресовки під час процесу спікання АТП.

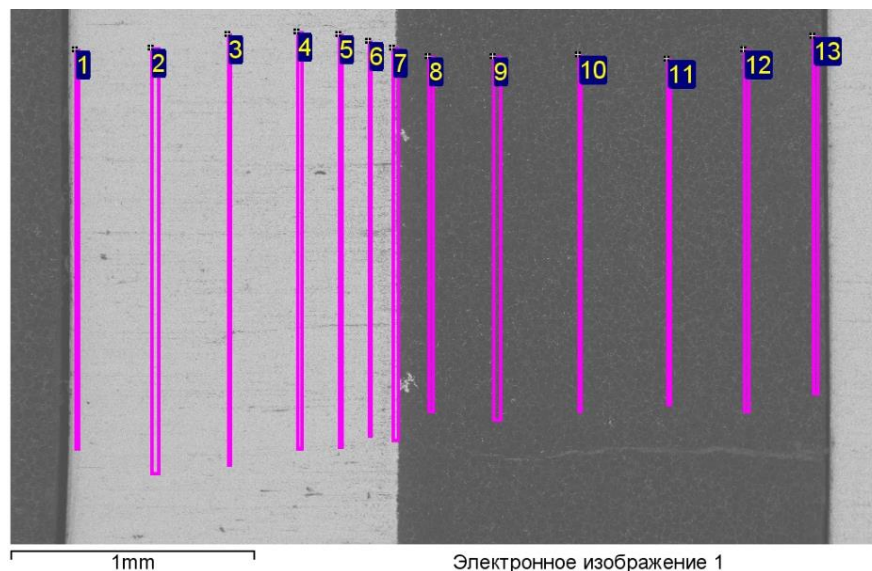
Можна бачити, що основу алмазного шару формують кристали розміром близько 20–40 мкм, тоді як дрібніші зерна локалізуються в проміжках між ними. Для такої мікроструктури характерна наявність значної кількості прямих міжзернових контактів.

Отже, алмазовмісний шар пластини являє собою суцільний полікристалічний каркас з тонкими прошарками металевої фази. Результати аналізу елементного складу алмазовмісного шару АТП свідчать, що середній вміст вуглецю становить близько 88 мас. %, кобальту — 6 мас. %, вольфраму — 2 мас. %. Рентгенофазовий аналіз підтверджує, що вуглець перебуває у формі алмазу, вольфрам входить до складу кристалів WC, тоді як графітоподібний вуглець не виявляється. Співвідношення Co та W у металевій зв'язці наближене до складу евтектики Co–WC (64/36 мас. %), яка формується при температурі 1320 °C у твердому сплаві. Розподіл металевої зв'язки по товщині алмазного шару є достатньо рівномірним, що вказує на ефективне протікання процесу просочування алмазного порошку.

Розподілення елементів в АТП спечених з додаванням 2 мас. % Si представлено на рисунку 3.11.



а



б

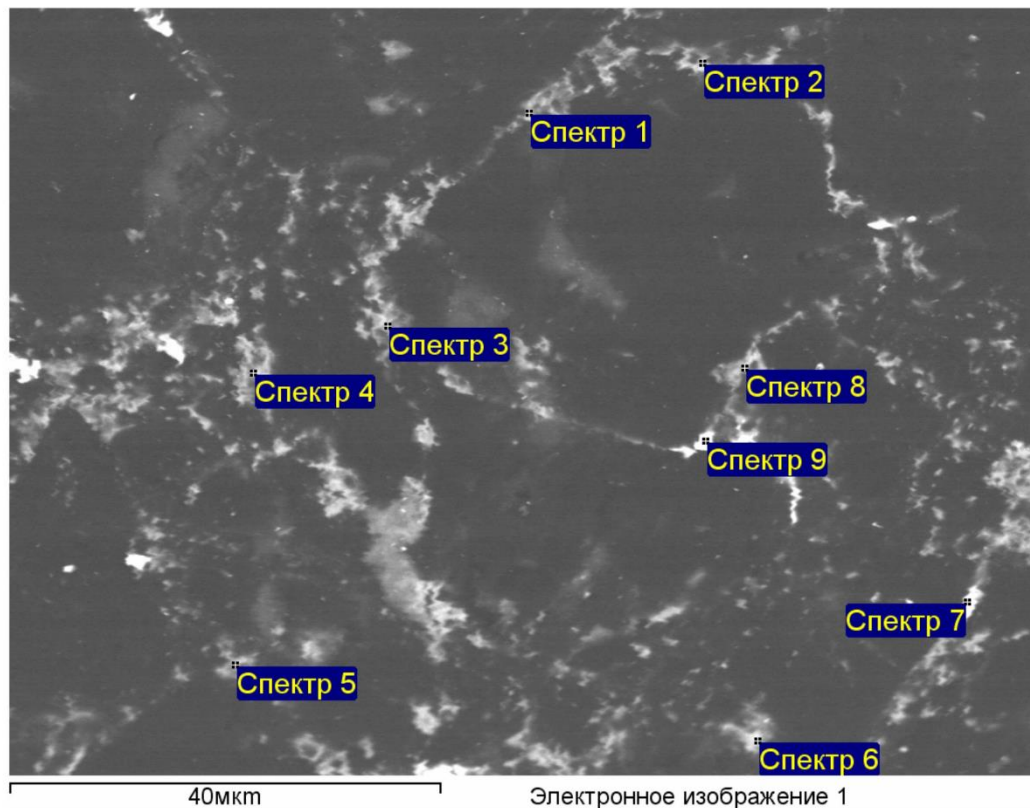
а – профілі розподілу елементів (W, C, Co) в пластині, спеченій з додаванням 2 мас. % Si;

б – електронне зображення ділянки вимірювання з лініями аналізу

Рисунок 3.11 – Розподіл хімічних елементів в алмазно-твердосплавних пластинах, спечених із введенням 2 мас. % Si

Загальний характер процесів, що відбуваються під час спікання з додаванням кремнію, в цілому є подібним до випадку використання титану. Встановлено формування евтектики Co–WC зі співвідношенням компонентів 64/36 мас. % у твердосплавній підкладці та її подальшу міграцію в алмазовмісний шар. Детальніший аналіз зв'язуючої фази, яка в основному

алмазному шарі представлена у вигляді тонких прошарків світлого та сірого кольору, наведено на рисунку 3.12



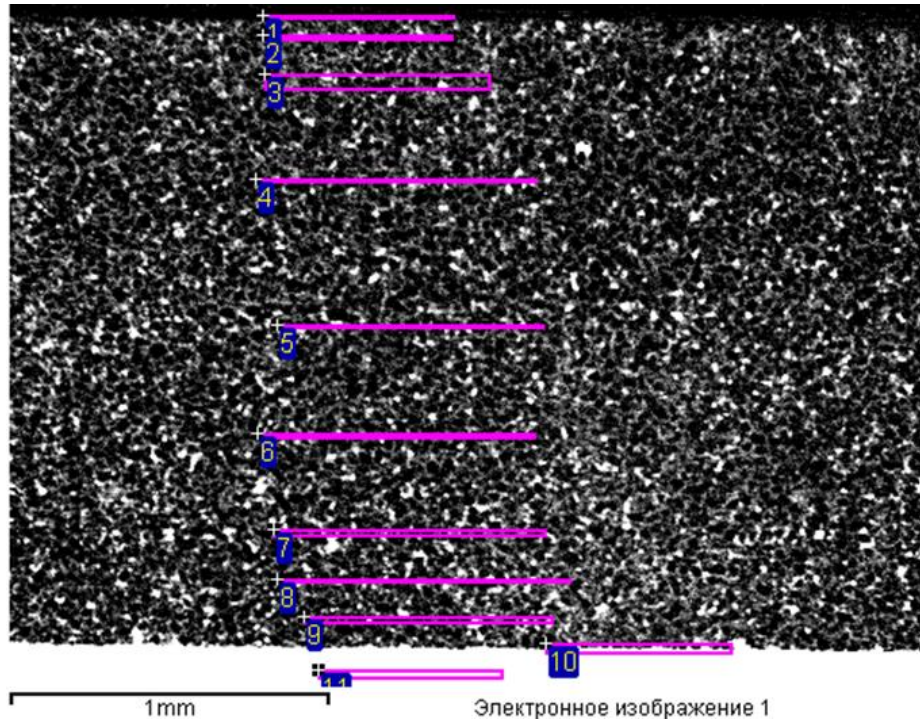
Параметры обработки: Выполнен анализ всех элементов (Нормализован)

Спектр	В стат.	C	Co	W	Итого
Спектр 1	Да	52.11	41.52	6.37	100.00
Спектр 2	Да	39.58	53.76	6.66	100.00
Спектр 3	Да	40.90	51.39	7.71	100.00
Спектр 4	Да	39.51	55.61	4.89	100.00
Спектр 5	Да	54.07	40.45	5.49	100.00
Спектр 6	Да	26.87	65.11	8.01	100.00
Спектр 7	Да	20.94	4.82	74.24	100.00
Спектр 8	Да	35.13	57.51	7.36	100.00
Спектр 9	Да	16.37	5.66	77.97	100.00
Среднее		36.16	41.76	22.08	100.00
Станд. отклонение		12.90	22.05	30.66	
Макс.		54.07	65.11	77.97	
Мин.		16.37	4.82	4.89	

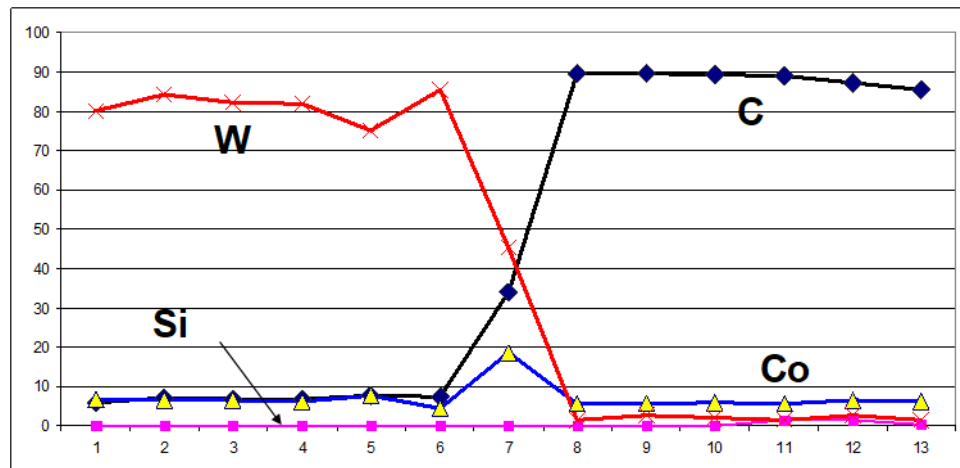
Все результаты в весовых %

Рисунок 3.12 – Мікроструктура основного алмазного шару АТП

У поверхневому шарі алмазного шару на глибині близько 0,6 мм фіксується наявність кремнію, середній вміст якого становить приблизно 2 мас. % (рис. 3.13).



а

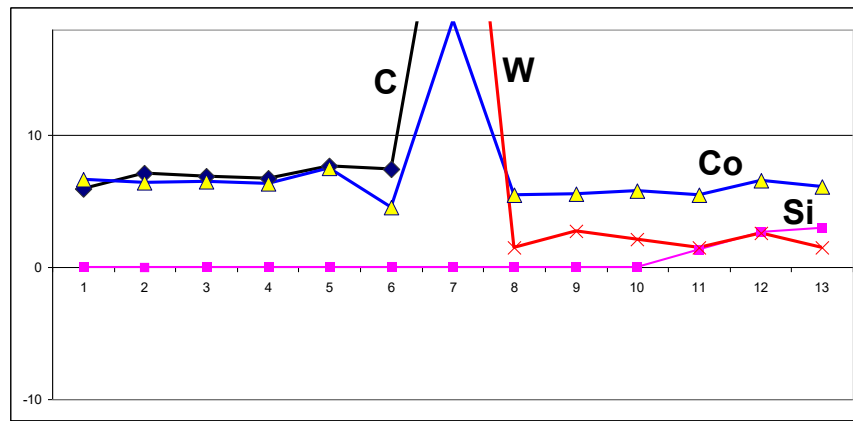


б

а – електронне зображення мікроструктури алмазного шару з лініями локального аналізу;

б – розподіл елементів W, C, Co та Si за глибиною алмазного шару

Рисунок 3.13 – Мікроструктура та розподілення елементів алмазного шару АТП з добавкою 2 мас. % Si.



в

в – профіль розподілу елементів у поверхневій зоні алмазного шару.

Рисунок 3.13 – Мікроструктура та розподілення елементів алмазного шару пластини з добавкою 2 мас. % Si.

Як і в попередньому випадку, фіксується витіснення до поверхні алмазного шару евтектики Co–Si, яка характеризується більшою в'язкістю порівняно з евтектикою Co–WC, що інфільтрує з твердосплавної підкладки. Згідно з результатами раніше проведеного рентгенофазового аналізу, кремній у даному випадку перебуває у складі інтерметаліду Co_2Si .

Таким чином, застосування способу спікання АТП з додаванням титану або кремнію дозволяє сформувати в поверхневому алмазному шарі структуру з включеннями TiC або забезпечити зв'язування кобальту в більш інертні інтерметалічні сполуки.

3.5 Фізико-механічні та експлуатаційні властивості АТП

Роботи по визначенню пружних модулів отриманих АТП проводилися в Інституті металофізики НАН України (м. Київ) методами ультразвукової діагностики. Для цього використана унікальна імпульсна УЗ установка яка розроблена к.ф.-м.н. О.І. Запорожцем. Оскільки пластини АТП є двошаровими, а в нашому випадку пружні характеристики необхідно визначити лише робочого в буровому інструменті алмазовмісного шару тому

їх попередньо готували, а саме шляхом механічної обробки знімали 2-3 мм з обох боків роблячи невеликі лиски на боковій поверхні. В подальшому ультразвукові хвилі пропускали, як показано стрілками на (рис. 3.14), лише через алмазний шар. При дослідженнях проводили вимірювання поздовжньої (v_l) та поперечної (v_t) швидкостей ультразвуку в частотному діапазоні 10–30 МГц з інструментальною похибкою 0,01 % на временній базі 10 мкс. При зменшенні останньої похибка пропорційно зростала. Щільність (d) вимірювалась диференціальним методом гідростатичного зважування з використанням кварцового еталону з похибкою 0,01 % при масі зразка 10 г. Також густину визначали шляхом прямих геометричних вимірювань, оскільки наші пластини АТП пройшли високоточну механічну обробку. При розрахунках пружних параметрів – модуль Юнга (E), зсуву (G), всебічного стискання (B) і коефіцієнту Пуассона (η) керамік при $T = 20 \pm 2$ °С, використовували відомі формули:

$$G = dv_t^2; \quad E = GA; \quad B = GA/3(3 - A); \quad (3.1)$$

$$\eta = E/2G - 1 = (a^2 - 2)/2(a^2 - 1), \quad (3.2)$$

де $A = (3a^2 - 4)/(a^2 - 1)$; $a = v_l/v_t$.

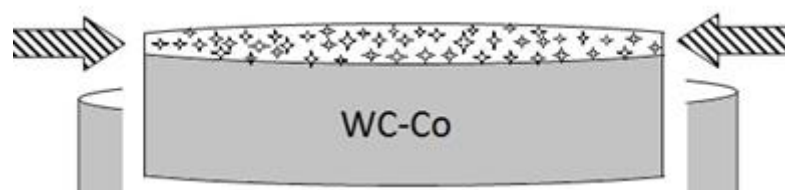


Рисунок 3.14 – Схема ультразвукових вимірювань пружних характеристик алмазовмісного шару АТП

Результати ультразвукових досліджень наведені в таблиці 3.1. Як видно з даних найбільші значення модуля Юнга характерні для керамік отриманих в системі $C_{\text{АЛМ.}}-4\% \text{ Si}$ в той час коли добавки карбонату кальцію дещо знижують пружні характеристики алмазного шару в АТП. Що в свою чергу є наслідком вимушеної низької температури отримання АТП для карбонатних систем.

Таблиця 3.1 – Пружні модулі для пластин АТП отриманих в різних системах

Система	ρ , г/см ³	ν_l , м/с	ν_t , м/с	E , ГПа	G , ГПа	B , ГПа	η	B/G
$C_{\text{АЛМ.}}-4\% \text{ Si}$	3.685	16789. 9	10529. 9	949.71	409.14	469.23	0.159	1.1
$C_{\text{АЛМ.}}-2\% \text{ Si}$	3.589	16322. 7	10617. 6	959.88	401.7	477.35	0.160	1.1 4
$C_{\text{АЛМ.}}-3\% \text{ Ti}$	3.698	16379. 4	10299. 8	949.38	402.31	458.61	0.156	1.1 1
ВК20	13.26 5	6479.3	3795.4	474.1	187.68	301.37	0.257	1.5 4

3.5.1 Мікротвердість та тріщиностійкість

Вимірювання мікротвердості за Вікерсом проведено на мікротвердомірі THV-30MDX – навантаження на індентор (алмазна піраміда з кутом при вершинах 136°) не перевищувало 9,8 Н, витримка при заданому навантаженні – 15 секунд. Вимірювання діагоналей відбитку індентора після зняття навантаження проводили з використанням оптичного мікроскопу Alicona InfiniteFocus. На кожному зразку здійснено десять індентувань при заданому навантаженні. Для визначення мікротвердості матеріалу в розрахунках

використано середнє значення довжини діагоналі відбитку індентору. Твердість матеріалу за Вікерсом (HV) розрахована за формулою:

$$H\mu = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2} \quad (3.3)$$

де P – навантаження на індентор, d – довжина діагоналі відбитку індентора.

Вимірювання тріщиностійкості АТП за Вікерсом проведено на мікротвердомірі THV-30MDX – навантаження на індентор (алмазна піраміда з кутом при вершинах 136°) не перевищувало 48 Н, витримка при заданому навантаженні – 15 секунд. За допомогою оптичного мікроскопу Alicona InfiniteFocus вимірювали довжину тріщин сформованих індентором. Як і при визначенні мікротвердості, було проведено по десять індентувань на зразок при заданому навантаженні. Після кожного індентування за допомогою оптичного мікроскопу було перевірено алмазна піраміда на предмет мікроскопів та руйнувань вершини, в разі необхідності вона пере_заточувалась. Для визначення тріщиностійкості матеріалу використано середнє значення половини довжини тріщини, сформованої індентором згідно формулою Антіса:

$$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{HV} \right)^{0.5} \cdot \frac{P}{c^{1.5}} \quad (3.4),$$

де E – модуль Юнга, HV – твердість, P – навантаження на індентор, c – половина довжини тріщини, сформованої індентором. В таблиці 3.2 наведені значення твердості та тріщиностійкості отриманих нами АТП з чого можна зробити наступні висновки.

Таблиця 3.2 – Показники твердості та тріщиностійкості алмазно-твердосплавних пластин, синтезованих у різних системах

Система	ρ , г/см ³	Твердість по Вікерсу	Тріщиностійкість
С _{АЛМ.} - 3%Ті	3.779	57,1 ±0,2	8,9 ±0,4
С _{АЛМ.} - 2%Si	3.797	55,4 ±0,2	7,1 ±0,4
С _{АЛМ.} - 4%Si	3.774	53,9 ±0,2	7,9 ±0,4
ВК20	13.154	10,1 ±0,2	16,1 ±0,4

Таким чином проаналізувавши данні вимірювань фізико-механічних властивостей показано, що якісні пластини можна отримати при додаванні в алмазний порошок 2-4 мас. % Si, або 3 мас. % Ti.

3.6 Узагальнення результатів досліджень та вдосконалення методики

Експериментальні дослідження зносостійкості породоруйнівних елементів з АТП, модифікованих різними активуючими добавками, виконувалися на початковому етапі зношування алмазно-твердосплавних пластин. Режим різання дослідних зразків АТП характеризувався частотою обертання 355 об/хв та глибиною впровадження 0,5 мм. Швидкість різання (м/хв) і шлях різання (м) визначали залежно від довжини керна гірської породи та тривалості процесу різання.

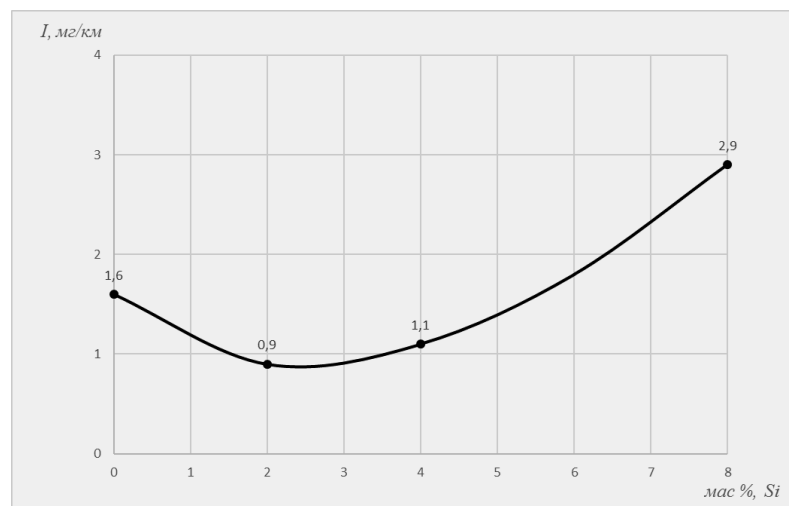
Контрольованими параметрами під час випробувань були глибина впровадження (з точністю до 0,05 мм) та тривалість точіння (з точністю до 1 с). Порівняльні дослідження зразків АТП з різними активуючими добавками проводили за таких умов: середня швидкість різання — 105 м/хв, шлях різання — 1100 м, середня тривалість точіння — 10,5 хв.

Для виконання порівняльних досліджень зносостійкості АТП з активуючими добавками різної фізико-хімічної природи використовували

попередньо виготовлені експериментальні зразки породоруйнівних елементів з АТП із вмістом кремнію 2, 4 та 8 мас. %, а також титану 3, 5 та 7 мас. %. Результати випробувань зносостійкості АТП залежно від концентрації активуючих добавок наведено на рисунку 3.15.

Зокрема, при введенні 2 мас. % Si та повному зв'язуванні кобальту в інтерметалід Co_2Si інтенсивність зношування породоруйнівного елемента з АТП зменшується майже на 50 % (рис. 3.15, а) [72]. За вмісту 4 мас. % Si та формуванні моносиліциду CoSi зносостійкість породоруйнівного елемента з АТП зростає приблизно на 30 % відносно початкового рівня. При додаванні 8 мас. % Si утворюються дисиліцид CoSi_2 та карбід кремнію, що зумовлює різке зростання інтенсивності зношування і деструкцію алмазного шару АТП.

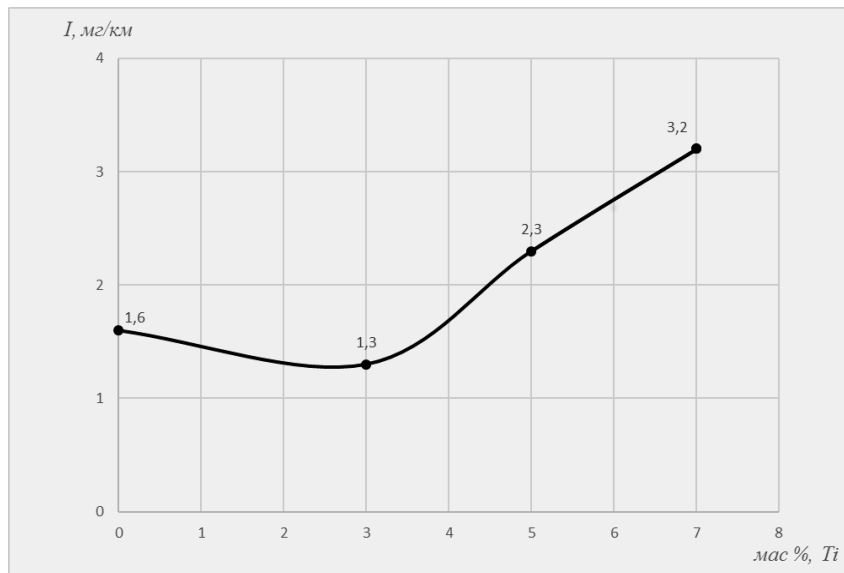
При введенні 3 мас. % Ti та утворенні подвійного карбиду титану і вольфраму зносостійкість АТП підвищується приблизно на 20 %. Водночас збільшення вмісту титану до 5 та 7 мас. % з формуванням карбиду титану призводить до різкого зниження зносостійкості АТП майже на 100 % (рис. 3.15, б).



а

а — залежність інтенсивності зношування зразка АТП від вмісту кремнію (мас. %)

Рисунок 3.15 — Залежність інтенсивності зношування зразка АТП (1,0 мг/км) від концентрації активуючої добавки (мас. %).



б)

б — залежність інтенсивності зношування зразка АТП від вмісту титану (мас. %)

Рисунок 3.15 — Залежність інтенсивності зношування зразка АТП (1,0 мг/см) від концентрації активуючої добавки (мас. %).

Отже, загальна тенденція полягає в тому, що в результаті утворення карбідів у процесі реакційного спікання АТП з додаванням карбідоутворюючих металів відбувається деструкція алмазного шару і знижується його зносостійкість.

Отже, встановлена загальна закономірність свідчить, що внаслідок утворення карбідів під час реакційного спікання АТП з карбідоутворюючими металами відбувається руйнування алмазного шару, що супроводжується зменшенням його зносостійкості. За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що активація спікання АТП шляхом введення до алмазного порошку кремнію або титану сприяє підвищенню зносостійкості породоруйнівного елемента з АТП за рахунок формування інтерметалідних фаз на основі кобальту, які характеризуються підвищеною стійкістю до окиснення. Водночас утворення значної кількості карбідів у процесі реакційного спікання призводить до погіршення якості алмазного шару та зниження його зносостійкості. У зв'язку з цим доцільно надавати перевагу

активації спікання шляхом додавання до алмазного порошку перед спіканням 2 мас. % та 4 мас. % Si.

3.7 Практична значущість та порівняльний аналіз отриманих результатів

Як відомо температура негативно впливає на експлуатаційні властивості АТП, такі як зносостійкість, а саме термостійкість та термічна стабільність є вагомими факторами які визначають межу експлуатаційних характеристик. Отримані алмазовмісні керамічні матеріали із високою твердістю та зносостійкістю можуть бути запропоновані в якості правлячого та бурового інструменту, де як відома при високих швидкостях обробки розвиваються високі температури в зоні різання. Так висока температура призводить до графітизації алмазу і руйнуванню АТП [73]. Першим високотемпературним випробуванням для АТП є процес їх пайки в корпус бурових доліт. Пайка АТП при виготовленні бурового інструменту проводиться в основному припоями на основі срібла марки ПСР-40 з температурою плавлення 650 °С [74]. Пайку також можна проводити припоями на основі латуні з $T_{пл}$ до 850 °С.

Другим високотемпературним нагрівом АТП є процес самого буріння, особливо по твердим породам. Так по деяким даним температура в зоні різання за рахунок тертя з породою може сягати 1000 °С. В більшості випадків при бурінні інструментом з використанням АТП використовують охолодження, в основному буровими розчинами на основі води.

Однак при бурінні в екстремальних умовах, або в аварійних ситуаціях без достатнього охолодження загальна температура інструмента в забої може досягати 1000 °С [75]. Тому в нашій роботі для визначення термічних характеристик було долучено метод ізотермічної витримки на протязі 3 хв., на повітрі.

Загалом метод полягає у внесенні керамічної пластини в попередньо розігріту піч марки СНОЛ-1300, витримки матеріалу на протязі короткого

інтервалу часу (3 хв.) та вилучення із подальшим дослідженням фізико-механічних та експлуатаційних властивостей (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Загальний вигляд муфельної печі СНОЛ-1300 для проведення експериментів із визначення термостійкості отриманих КОМПОЗИТІВ.

Залежність зносостійкості цих АТП від температури нагріву представлена на рисунку 3.17.

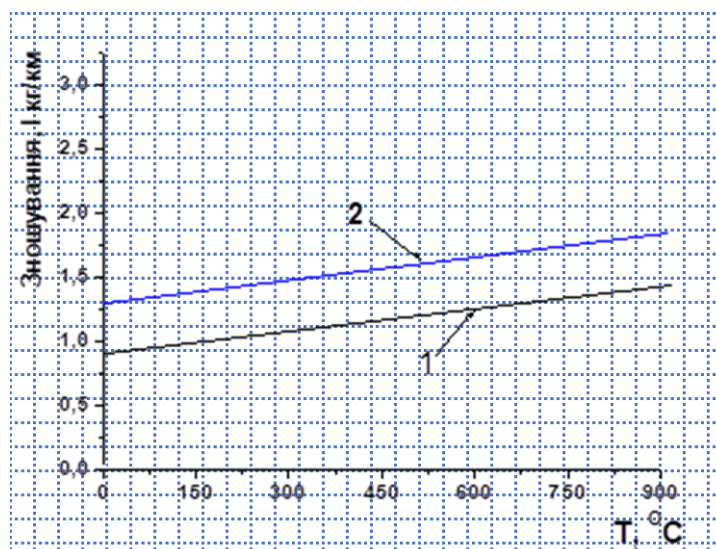


Рисунок 3.17 – Залежність інтенсивності зношування зразка АТП від температури нагріву; 1- з додаванням 2 мас. % Si; 2- з додаванням 3 мас. % Ti.

Як видно зносостійкість представлених АТП зменшується зі збільшенням температури нагріву плавно в межах 30 %. Фазовий склад поверхневого алмазного шару АТП з додаванням 2 мас. % Si після нагріву до 850 °С представлений на рисунку 3.18 і залишається незмінним в порівнянні з початковим (рис. 3.7).

Термостійкість АТП визначали розробленим методом точіння граніту шляхом визначення їх зносостійкості після нагріву до заданої температури. Фазовий склад алмазного шару визначали способом рентгенофазового аналізу. Випробуванням піддавали АТП які показали в попередніх дослідженнях найкращу зносостійкість: а саме АТП з додаванням в алмазний шар 3 мас. % Ti, та 2 мас. % кремнію.

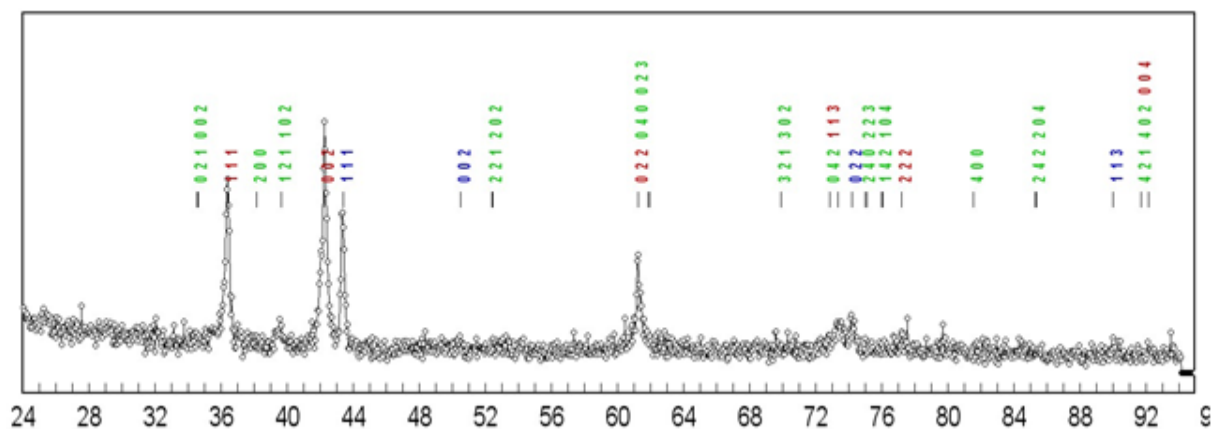


Рисунок 3.18— Фрагмент рентгенофазового аналізу алмазно-твердосплавної пластини з добавкою 2 мас. % Si після нагріву до 850 °С

Однак ситуація суттєво змінюється при нагріві АТП до 1000 °С на протязі 3 хв. в звичайній атмосфері. В АТП з добавкою 2 мас. % Si (рис 3.19), алмазний шар відслоївся від підкладки, що можна зв'язати з графітизацією алмазу яка підтверджується РФА аналізом, з'являється також вільний Со. При нагріві АТП з додаванням 3 мас. % Ti в алмазному шарі утворюються тріщини.

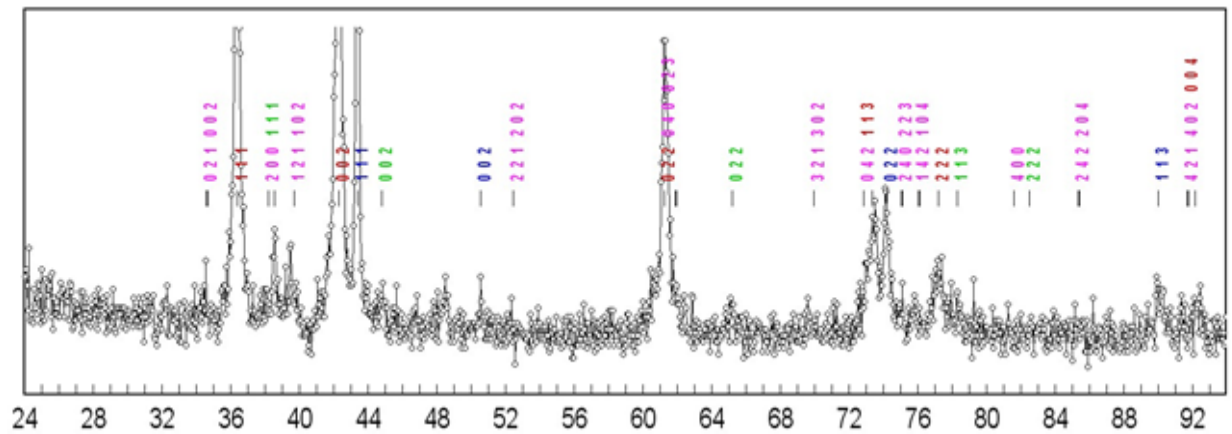


Рисунок 3.19– Фрагмент рентгенофазового аналізу алмазно-твердосплавної пластини з добавкою 2 мас. % Si після нагріву до 1000 °C

Рентгенофазовий аналіз цих АТП показує перехід Ti_4WC_5 в TiC і утворення окислів Co (рис. 3.20).

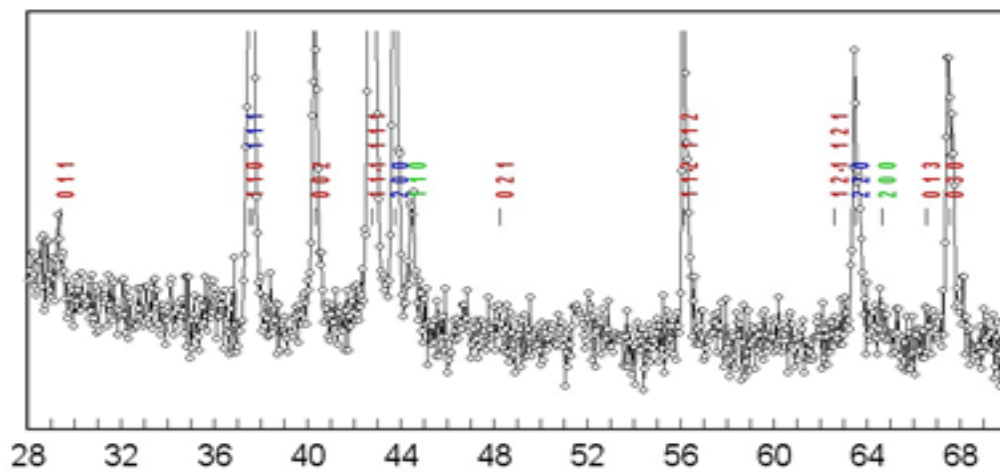


Рисунок 3.20– Фрагмент рентгенофазового аналізу алмазно-твердосплавної пластини з добавкою 3 мас.% Ti після витримки при температурі 1000 °C

На поверхні алмазного шару утворюється графітоподібний шар який злущується при терті об тверду поверхню. На поверхні твердосплавної підкладки спостерігається білий наліт який по даним РФА є окислами Co та

використано алмазно-твердосплавні пластини АТП серійного виробництва ІНМ, а також дослідні пластини з активуючою добавкою 2 мас. % Si, які на попередньому етапі вдосконаленої методики продемонстрували підвищену зносостійкість.

Експериментальні випробування здійснювали під час поздовжнього різання з фіксованою глибиною впровадження по поверхні керну коростишівського граніту Х категорії за буримістю, що відзначається стабільними фізико-механічними властивостями, високою твердістю та підвищеною абразивністю. Дослідження проводилися на спеціалізованому стенді, створеному на базі токарно-гвинторізного верстата типу ФТ-11 відповідно до другого етапу вдосконаленої методики випробувань.

Порівняльні випробування пластин АТП серійного виробництва та пластин з активуючою добавкою 2 мас. % Si виконували за таких параметрів режиму різання: частота обертання 500 об/хв, глибина впровадження 0,5 мм. При цьому розрахункові показники становили: швидкість різання 1,82 м/с, шлях точіння 1120 м, тривалість точіння 1000 с.

Слід зазначити, що дослідження експлуатаційних властивостей породоруйнівних елементів з АТП під час обробки керну граніту проводили за умов примусового охолодження зони різання проточною водою, що імітує процес промивання та охолодження бурового інструменту безпосередньо на вибої свердловини.

Аналіз результатів порівняльних випробувань алмазно-твердосплавних пластин показав, що отримані значення інтенсивності зношування для пластин АТП серійного виробництва та пластин з активуючою добавкою 2 мас. % Si є співставними з попередніми результатами і становлять відповідно 1,82 мг/км та 1,06 мг/км (табл. 3.3). Таким чином, встановлено зниження інтенсивності зношування на 42 % у пластин з активуючою добавкою 2 мас. % Si порівняно з пластинами АТП серійного виробництва ІНМ.

Таблиця 3.3 – Порівняння показників зношування серійних АТП і АТП з добавкою 2 мас.% Si при обробці граніту X категорії за буримістю

Характеристика пластини АТП	Маса пластини, мг		Знос по масі, мг	Інтенсивність зношування по масі, I , мг/км	Висота площадки зносу, h , мм
	Начальна	Кінцева			
серійна	3798,0	3796,0	2,0	1,79	1,1
з активуючою добавкою	4399,2	4398,0	1,20	1,04	0,35

Крім того, результати вимірювань висоти площадки зносу h для обох зразків пластин АТП, а також аналіз характеру зношування ріжучої кромки підтвердили перевагу пластин АТП з активуючою добавкою 2 мас. % Si за показниками працездатності порівняно з пластинами серійного виробництва.

У ході виконання досліджень також було отримано експериментальні дані щодо вимірювання основних складових сили різання (P_Z та P_Y), що дало змогу більш детально оцінити працездатність досліджуваних пластин АТП (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Порівняльні значення складових сили різання і питомої енергоємності процесу руйнування граніту X категорії пластинами АТП

Характеристика АТП	Швидкість різання, м/с	Глибина впровадження, мм	Складові сили різання		Об'єм зруйнованої породи, V , мм ³	Питома енергоємність руйнування, γ , Нм/мм ³
			P_Z , Н	P_Y , Н		
серійна	1,79	0,49	55,0	185,0	11,1	16,9
з активуюч. добавкою	1,79	0,49	60,0	210,0	17,4	11,7

Аналіз результатів вимірювань основних складових сил різання пластин АТП та питомої енергоємності процесу руйнування, наведених у таблиці 3.4,

показав, що під час руйнування граніту для обох досліджуваних зразків горизонтальна складова сили різання PZ практично не відрізнялася. Водночас зафіксовано суттєву різницю у значеннях вертикальної складової сили різання P_Y, середній рівень якої для пластини з активуючою добавкою був у 1,14 раза вищим порівняно з серійною пластиною.

При цьому питома енергоємність процесу руйнування породи під час роботи пластини з активуючою добавкою виявилася у 1,45 раза меншою, ніж при використанні серійної пластини, що зумовлено більшим (у 1,64 раза) об'ємом зруйнованої породи. Отримані результати свідчать про вищу працездатність пластини з активуючою добавкою, яка забезпечується підвищеною зносостійкістю її ріжучої кромки порівняно з роботою пластини АТП серійного виробництва ІНМ під час руйнування монолітної твердої гірської породи.

Висновки

За результатами виконаних досліджень встановлено, що пластини АТП з активуючою добавкою 2 мас. % кремнію продемонстрували підвищення зносостійкості ріжучої кромки на 42 % під час руйнування монолітної твердої гірської породи — коростишівського граніту X категорії за буримістю — порівняно з пластинами АТП серійного виробництва ІНМ. Крім того, для таких пластин зафіксовано зростання середніх значень вертикальної складової сили різання P_Y у 1,14 раза.

Питома енергоємність руйнування породи при використанні пластин з активуючою добавкою була у 1,45 раза нижчою, ніж при роботі серійних пластин, що пояснюється більшим (у 1,64 раза) об'ємом зруйнованої гірської породи. Це підтверджує підвищену працездатність пластин з активуючою добавкою, зумовлену більшою зносостійкістю їх ріжучої кромки порівняно з серійними пластинами АТП ІНМ.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що застосування пластин АТП з активуючою добавкою кремнію у геологорозвідувальних бурових коронках є доцільним та ефективним,

оскільки забезпечує розширення діапазону буріння твердих гірських порід завдяки підвищеній зносостійкості ріжучої кромки

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У даному розділі розглядаються питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час виконання науково-дослідних робіт, пов'язаних з вивченням впливу кремнію та титану на формування алмазно-твердосплавних пластин за умов високих тисків і температур.

Проведення експериментальних досліджень передбачає використання спеціалізованого лабораторного обладнання, роботу з порошковими матеріалами, дію підвищених температур і тисків, а також застосування електричної енергії, що зумовлює необхідність суворого дотримання вимог нормативних документів з охорони праці та правил безпечної експлуатації обладнання.

Метою даного розділу є аналіз потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть виникати під час виконання науково-дослідних робіт, а також розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці та мінімізації ризиків у разі виникнення надзвичайних ситуацій [76], [77].

4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів.

Під час виконання даної науково-дослідної роботи, спрямованої на вивчення впливу кремнію та титану на формування алмазно-твердосплавних пластин за умов високих тисків і температур, використовуються технологічні процеси та обладнання, які можуть створювати потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Аналіз зазначених факторів є необхідним для забезпечення безпечних умов праці та запобігання травматизму під час проведення досліджень [76].

Основними процесами, що несуть у собі потенційну небезпеку, є:

робота з пресовим обладнанням, у якому реалізуються високі тиски під час процесів спікання;

використання нагрівальних елементів та печей, що працюють за підвищених температур;

застосування порошкових матеріалів, зокрема алмазних мікропорошків і компонентів металевої зв'язки;

експлуатація електрообладнання та нагрівальних установок, що живляться від електричної мережі;

виконання допоміжних операцій, пов'язаних з переміщенням заготовок і роботою з рухомими частинами обладнання.

До фізичних небезпечних факторів у даних умовах належать підвищені температури нагрівальних елементів і робочих поверхонь обладнання, а також високі тиски, що створюються в зоні пресування. Дія цих факторів може призводити до термічних опіків і механічних травм у разі порушення технологічних режимів [78].

Хімічні шкідливі фактори пов'язані з використанням порошкових матеріалів, пил яких може потрапляти до органів дихання. Для зменшення шкідливого впливу пилу передбачено застосування місцевої вентиляції та індивідуальних засобів захисту органів дихання, зокрема фільтрувальних респіраторів відповідно до вимог чинних нормативних документів [79].

Електричні небезпечні фактори виникають під час експлуатації електрообладнання та нагрівальних установок. Захист від ураження електричним струмом забезпечується заземленням обладнання, справним станом електричних мереж і дотриманням вимог електробезпеки [80].

Таким чином, виконання аналізу шкідливих і небезпечних виробничих факторів дозволяє систематизувати основні ризики, пов'язані з проведенням досліджень, та є підґрунтям для розробки відповідних заходів з охорони праці.

4.1.1 Аналіз рівня шуму

Під час виконання даної науково-дослідної роботи можливим шкідливим виробничим фактором є шум, що виникає внаслідок роботи пресового обладнання, вакуумних насосів та допоміжних електромеханічних установок. В умовах лабораторії рівень шуму на робочому місці становить близько 75 дБ, що не перевищує гранично допустимих значень для виробничих приміщень відповідно до чинних санітарних норм [81].

Для запобігання шкідливому впливу шуму під час виконання досліджень застосовуються звукоізоляційні заходи, зокрема розміщення обладнання у захисних кожухах, використання вібро- та звукопоглинальних матеріалів, а також дотримання регламентованих режимів роботи обладнання.

Контроль рівня шуму в лабораторному приміщенні здійснюється шляхом періодичних вимірювань за допомогою шумоміра. З урахуванням виконання зазначених заходів рівень шуму не перевищує допустимих норм, а умови праці відповідають вимогам охорони праці [76], [80].

4.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

4.2.1 Аналіз параметрів приміщення

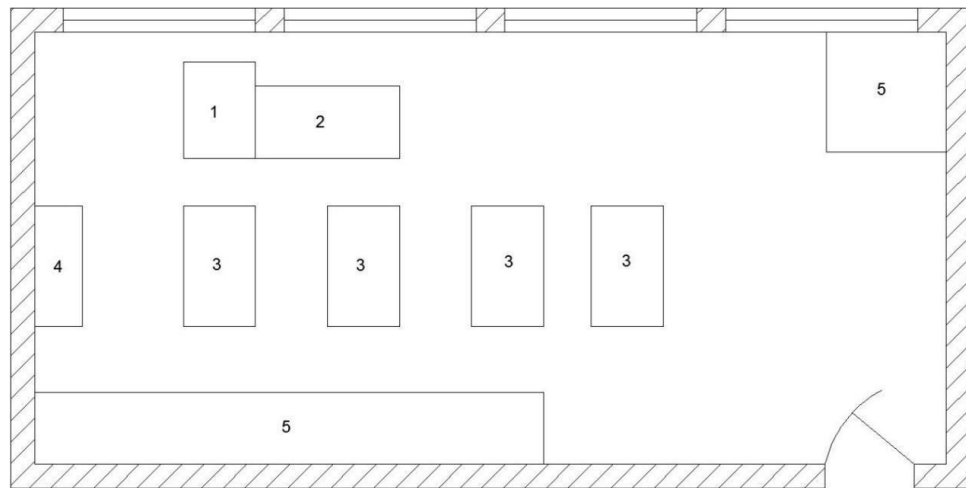
Дослідження виконуються у науково-дослідній лабораторії Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України у першому корпусі. Лабораторія призначена для проведення експериментальних робіт зі спікання алмазно-твердосплавних пластин за умов високих тисків і температур із використанням спеціалізованого обладнання. Основне технологічне обладнання розміщене з урахуванням вимог охорони праці, ергономіки та безпечної експлуатації.

Детальну специфікацію технологічного обладнання та характеристики приміщення, можна знайти в таблицях 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Специфікація технологічного обладнання

№	Найменування обладнання	Габаритні розміри, м Д/Ш/В	Основні характеристики	Кількість, шт	Позиція на рисунку
1	Установка високого тиску АВТ-Тороїд (Тороїд-30)	1,2/1,0/2,0	Тиск до 8 ГПа, температура до 2000 °С, імпульсний електричний нагрів	1	3
2	Пристрій для змішування порошків	0,6/0,5/0,8	Механічне змішування порошкових матеріалів	1	3
3	Робоча станція з ПК	1,4/0,7/1,2	Обробка та аналіз експериментальних даних	2	1,5
4	Сканувальний електронний мікроскоп	2,0/1,5/2,2	Дослідження мікроструктури матеріалів	1	2

Схема розміщення робочих місць та обладнання у лабораторії наведена на рисунку 4.1.



1 – робоче місце з ПК; 2 – робоче місце зі сканувальним електронним мікроскопом; 3 – робочий стіл; 4 – сушильна шафа; 5 – робоче місце з ПК

Рисунок 4.1 – Схема розміщення робочих місць та обладнання дослідницької лабораторії Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України

Основні геометричні характеристики науково-дослідної лабораторії наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні геометричні характеристики науково-дослідної лабораторії

Довжина приміщення, м	12
Ширина приміщення, м	6
Висота приміщення, м	4,5
Площа приміщення, м ²	72
Об'єм приміщення, м ³	324

У лабораторії одночасно працюють три особи. Площа та об'єм приміщення на одного працюючого визначаються відповідно до чинних нормативних вимог.

Результати порівняння реальних та нормативних параметрів приміщення наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Реальні та нормативні характеристики приміщення

№	Параметр	Фактичне значення	Нормативне значення
1	Площа на одного працюючого	24 м ²	4.5 м ²
2	Об'єм на одного працюючого	108 м ³	15 м ³

Результати розрахунків показують, що приміщення лабораторії задовольняє стандарти будівель виробничого призначення ДБН В.2.2 28:2010 [81].

Таким чином, приміщення лабораторії, в якій проводилась дана робота, відповідає вимогам санітарних норм і правил

4.2.2 Аналіз параметрів приміщення

У дослідницькій лабораторії Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України під час виконання науково-дослідних робіт використовується електротехнічне обладнання, робота якого пов'язана з дією електричного струму. До такого обладнання належать установка високого тиску типу АВТ Тороїд, допоміжні електричні пристрої, вимірювальна апаратура, а також персональні комп'ютери та освітлювальні установки.

Наявність електрообладнання створює потенційну небезпеку ураження електричним струмом, що потребує впровадження відповідних інженерних та організаційних заходів безпеки. Електрообладнання лабораторії експлуатується відповідно до вимог (ПУЕ), а також чинних нормативних документів [82].

Для зниження ризику ураження електричним струмом у лабораторії передбачені такі заходи:

- використання електрообладнання із справною ізоляцією струмопровідних частин;
- заземлення металевих корпусів електроустановок та стаціонарного обладнання;
- застосування автоматичних вимикачів та запобіжників для захисту електричних мереж від перевантажень і коротких замикань;
- періодичний контроль технічного стану електрообладнання та електропроводки;
- допуск до роботи з електрообладнанням лише осіб, які пройшли відповідний інструктаж з охорони праці та електробезпеки;
- дотримання встановлених режимів експлуатації електроустановок згідно з технічною документацією виробника.

Реалізація зазначених заходів відповідає вимогам ПУЕ, ДСТУ та нормативних документів і забезпечує надійність та безпечність роботи персоналу під час експлуатації електрообладнання в умовах науково-дослідної лабораторії.

4.3 Розрахунок вентиляції

Конструкція місцевих відсмоктувачів обирається залежно від характеру технологічного процесу, типу застосованого обладнання та специфіки виконуваних операцій. Місцева вентиляція повинна забезпечувати необхідну чистоту повітря в зоні робочих місць, запобігати поширенню пилу та інших

шкідливих домішок у приміщенні, а також не перешкоджати виконанню технологічних операцій. Розташування відсмоктувача приймають з урахуванням максимально можливого наближення до джерела виділень під час операцій змішування порошків, підготовки шихти та механічної обробки заготовок. Схема розміщення місцевого відсмоктувача в лабораторному приміщенні наведена на рисунку 4.2

Обсяг повітря, який необхідно видалити через систему місцевої вентиляції L_m , визначають за формулою:

$$L_m = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0 \quad (4.1)$$

де F_0 — площа відкритого перерізу витяжного отвору, m^2 ;

V_0 — швидкість повітря у цьому перерізі, m/c .

Швидкість повітря у перерізі отвору V_0 розраховують за формулою:

$$V_0 = 16 \cdot V_x \cdot (x / d)^2 \quad (4.2)$$

де d — діаметр вентиляційного отвору, m ;

V_x — задана швидкість повітря (приймається не менше $0,5 m/c$);

x — відстань від джерела виділень до площини отвору відсмоктувача, m .



Рисунок 4.2 – Схема місцевої вентиляції

Таким чином, швидкість всмоктування повітря у цьому перерізі становить $V_0 = 15$ м/с, а об'єм повітря, який необхідно видалити для забезпечення належних умов $L_m = 8100$ м³ /год.

4.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

4.4.1 Пожежна безпека

Відповідно до класифікації приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою згідно з ДБН В.1.1-7:2016, дослідна лабораторія Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України відноситься до категорії Д. До цієї категорії належать приміщення, у яких знаходяться негорючі речовини та матеріали у холодному стані, а пожежна небезпека обумовлена переважно наявністю електрообладнання.

У лабораторії виготовлення заготовок здійснюється у замкненій установці високого тиску типу АВТ-Тороїд. Технологічний процес не передбачає використання відкритого полум'я, розжарених матеріалів або горючих речовин у робочій зоні. Після завершення циклу спікання

отримується охолоджена заготовка, що виключає контакт персоналу з джерелами високої температури.

Основними потенційними причинами виникнення пожежі в лабораторії можуть бути:

- несправність або перевантаження електрообладнання;
- коротке замикання в електричних мережах внаслідок пошкодження ізоляції;
- порушення правил експлуатації електротехнічних установок;
- відсутність або несправність первинних засобів пожежогасіння.

Для запобігання виникненню пожежі в лабораторії передбачено дотримання вимог пожежної безпеки, регулярний контроль технічного стану електрообладнання та наявність первинних засобів пожежогасіння. План евакуації персоналу наведений на рисунку 4.3.

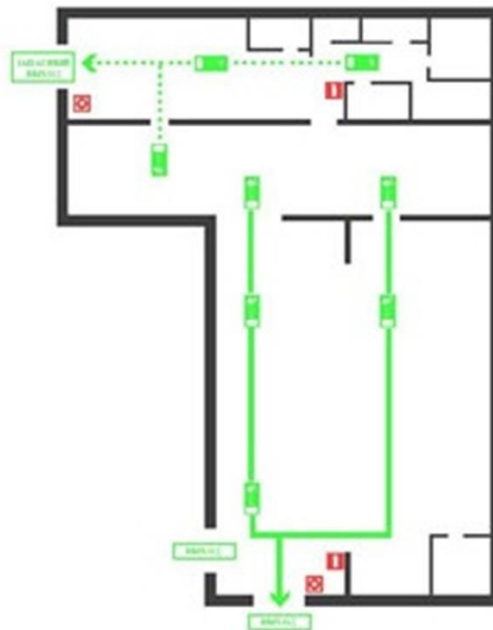


Рисунок 4.3 – План евакуації

4.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У процесі виконання науково-дослідних робіт у лабораторії можливе виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із порушенням нормальної роботи електрообладнання, короткими замиканнями, задимленням або виникненням пожежі. З метою мінімізації негативних наслідків та забезпечення безпеки персоналу розроблено вимоги щодо дій працівників у разі виникнення аварійних ситуацій.

У разі ураження працівника електричним струмом необхідно:

- негайно вимкнути електроживлення аварійної ділянки або від'єднати потерпілого від струмопровідних частин, дотримуючись власної безпеки;
- викликати швидку медичну допомогу та повідомити відповідальну особу;
- за відсутності свідомості перевірити наявність дихання та пульсу;
- у разі необхідності надати першу домедичну допомогу (штучне дихання, непрямий масаж серця);
- забороняється залишати потерпілого без нагляду до прибуття медичних працівників.

У разі виникнення пожежі або займання в лабораторії необхідно:

- негайно повідомити про пожежу відповідальну особу та викликати пожежно-рятувальну службу за телефоном 101;
- відключити електроживлення лабораторії, якщо це можливо без загрози життю;
- вжити заходів щодо гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння (вогнегасники) за умови відсутності небезпеки для життя;
- організувати евакуацію персоналу згідно з планом евакуації;
- забороняється використовувати воду для гасіння електрообладнання, що перебуває під напругою.

У разі травмування працівника необхідно:

- проінформувати керівника або відповідальну за охорону праці особу;

- надати постраждалому першу домедичну допомогу до прибуття медичних працівників;
- у разі потреби забезпечити транспортування потерпілого до медичного пункту підприємства або найближчого лікувального закладу.

Кожен працівник лабораторії зобов'язаний знати порядок дій у разі виникнення аварійних ситуацій, місця розташування первинних засобів пожежогасіння, шляхів евакуації та неухильно дотримуватися вимог та інструкцій.

4.4.3 Вимоги безпеки під час повітряної тривоги

Під час виконання науково-дослідних робіт у лабораторії Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України в умовах воєнного стану можливе виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з оголошенням сигналу повітряної тривоги. У такому випадку персонал лабораторії повинен діяти відповідно до вимог цивільного захисту населення та чинних нормативно-правових актів України [84].

Почувши сигнал повітряної тривоги, працівники лабораторії зобов'язані негайно припинити виконання науково-дослідних робіт та виконувати вказівки керівника робіт або відповідальної особи. Подальші дії персоналу мають бути спрямовані на швидке та організоване залишення приміщення лабораторії.

Евакуація персоналу здійснюється відповідно до затвердженого плану цивільного захисту та маршрутів евакуації. Працівники повинні без зволікань прямувати до найближчого захисного укриття, дотримуючись встановленого порядку та не створюючи паніки.

Перебування в захисному укритті триває до моменту отримання офіційного сигналу відбою повітряної тривоги. Повернення до лабораторного

приміщення та відновлення виконання робіт дозволяється лише після відбою тривоги та з дозволу відповідальної особи.

4.5 Висновки за розділом

Рівні шкідливих виробничих факторів, що виникають у процесі роботи, не перевищують встановлених нормативними документами допустимих значень, що свідчить про відповідність умов праці вимогам безпеки. Для зниження ризику виникнення пожеж у приміщенні передбачено та застосовується необхідний комплекс організаційних і технічних заходів, а також сучасні засоби пожежогасіння. Лабораторне обладнання та пристрої проходять регулярне технічне обслуговування і перевірку, що забезпечує їх надійну та безпечну експлуатацію. Персонал лабораторії систематично проходить інструктажі з охорони праці та дій у надзвичайних ситуаціях, що сприяє запобіганню аварійних ситуацій і створенню безпечних умов праці.

5 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Метою розділу є визначення обсягу витрат електроенергії на підставі вибору і розрахунку кількості технологічного обладнання, використання його встановленої потужності при запланованому режимі роботи:

$$\mathcal{E} = M\Phi_0\eta_{зв}K_1K_2, \quad (5.1)$$

де M – встановлена потужність обладнання, кВт; Φ_0 – річний фонд часу роботи обладнання, год;

$\eta_{зв}$ – коефіцієнт завантаження обладнання;

K_1 – коефіцієнт одночасності роботи (приймається рівним для електричних печей – 0,6; для електродвигунів – 0,3; для генераторів високочастотного нагріву – 0,8);

K_2 – коефіцієнт використання потужності (приймається рівним 0,7).

Витрати електроенергії на роботу підйомно-транспортного обладнання визначаються виходячи з його встановленої потужності. В умовах виконання даної науково-дослідної роботи спеціалізоване підйомно-транспортне обладнання не використовується, у зв'язку з чим витрати електроенергії на його роботу відсутні.

Витрати електроенергії для санітарно-технічних пристроїв (вентиляції та опалення) визначаються відповідно до вимог охорони праці та техніки безпеки і в даному розділі окремо не розраховуються.

Основним споживачем електричної енергії при проведенні експериментальних досліджень є установка високого тиску АВТ-Тороїд (прес УДО-044), яка використовується для спікання алмазно-твердосплавних зразків за умов високих тисків і температур. Допоміжне обладнання (планетарний млин, мікроскоп тощо) має епізодичний характер використання

та не є основним технологічним обладнанням, тому у розрахунок енергоспоживання не включається.

Річні витрати електроенергії на роботу технологічного обладнання визначаються на основі встановленої потужності, фонду робочого часу та відповідних коефіцієнтів завантаження, одночасності та використання потужності. Результати розрахунку наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Витрати електроенергії на роботу технологічного обладнання

Найменування споживача струму	Кількість споживачів	Потужність, кВт	Фонд часу, год/рік	Коеф. завантаження	Коеф. одночасності	Коеф. Використання потужності	Річні витрати, кВт·год
Установка високого тиску АВТ-Тороїд (УДО-044)	1	30	300	0,8	0,8	0,7	4032

Витрати електроенергії на освітлення визначаються на основі площі приміщення, поверхневої щільності теплового потоку, кількості годин горіння освітлювальних приладів та коефіцієнта одночасності горіння. Результати розрахунку наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Витрати електроенергії на освітлення

Найменування приміщення	Площа, м ²	Питома потужність, Вт/м ²	Години горіння, год/рік	Коеф. одночасності	Річні витрати, кВт·год
Виробнича лабораторія	72	12	2500	0,8	1728

6 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

6.1 Науково-технічна актуальність НДР

Розвиток сучасного інструментального виробництва потребує створення матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками, здатних працювати в умовах значних механічних навантажень, високих температур і інтенсивного зношування. Одним із перспективних напрямів у цій галузі є застосування алмазно-твердосплавних пластин інструментального призначення, які поєднують високу твердість, зносостійкість і термостійкість, що забезпечує підвищення ресурсу інструменту та ефективності обробки матеріалів.

Особливу роль у формуванні експлуатаційних властивостей алмазно-твердосплавних пластин відіграє їх хімічний склад та особливості структуроутворення за умов високих тисків і температур. Введення легувальних компонентів, зокрема кремнію та титану, дозволяє впливати на процеси спікання, фазоутворення та характер міжфазної взаємодії в композиційному матеріалі. Це, у свою чергу, створює передумови для покращення механічних властивостей, стабільності структури та підвищення довговічності інструментальних виробів.

Актуальність даного дослідження зумовлена тим, що технологія виготовлення алмазно-твердосплавних пластин із застосуванням високих тисків і температур уже використовується в науково-дослідній та виробничій практиці, проте потребує подальшого вдосконалення з точки зору оптимізації складу та режимів обробки. Зміна вмісту кремнію та титану, а також аналіз їх впливу на формування структури матеріалу дозволяє отримати нові експериментальні дані, що можуть бути використані для підвищення ефективності існуючих технологічних процесів.

З економічної точки зору проведення таких досліджень є доцільним, оскільки покращення властивостей алмазно-твердосплавних пластин сприяє зменшенню витрат на виготовлення та експлуатацію інструменту, скороченню

простоїв обладнання та зниженню собівартості обробки деталей. Крім того, використання наявної матеріально-технічної бази та відпрацьованої методики виготовлення дозволяє виконувати науково-дослідні роботи без суттєвого збільшення виробничих витрат.

Таким чином, дослідження впливу кремнію та титану на формування алмазно-твердосплавних пластин інструментального призначення за умов високих тисків і температур є науково та економічно обґрунтованим. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення технології виготовлення інструментальних матеріалів та мають перспективу практичного впровадження у виробництво.

6.2.1 Витрати на оплату праці науково-дослідницького персоналу

У цій статті розраховується заробітна плата персоналу який залучений до виконання даної дослідницької роботи, яка включається у кошторисну вартість . Для тем, які мають фінансування з держ-бюджету, прибуток не передбачений тому врахована лише основна заробітна плата (без премій та інших виплат, які здійснюються з прибутку).

Витрати на оплату праці науково-дослідницького персоналу визначаються на підставі планової трудомісткості виконання етапів НДР (табл. 6.1) та посадових окладів виконавців..

Таблиця 6.1 – Трудомісткість етапів

Найменування робіт по темі дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людиноднів		
	Провідний науковий співробітник	Інженер-дослідник	Аспірант
Підготовчий етап	1	3	–
Аналіз науково технічних публікацій з теми	–	15	–
Виконання дослідницької роботи	7	52	70
Разом за виконавцями теми	8	70	70

Розрахунок заробітної плати здійснюється за середньоденною оплатою праці з урахуванням усередненого числа робочих днів у місяць, а саме на 21,2.

В таблиці 6.2 розміщена інформація про витрати на посадові оклади виконавців.

Таблиця 6.2 – Витрати на посадові оклади виконавців

Посада	Планова трудомісткість, люд.-днів	Заробітна плата, грн		
		Місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
1	2	3	4	5
1.Провідний науковий співробітник	8	23850,19	1125	8999
2. Інженер-дослідник	70	11316	533,77	37364,07
3. Аспірант	70	9226,45	435,21	30464,42
Разом оплата праці з теми				76828,48

6.2.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) є обов'язковим платежем, який сплачується роботодавцем до фондів загальнообов'язкового державного соціального страхування відповідно до чинного законодавства України. ЄСВ нараховується на фонд оплати праці працівників, залучених до виконання науково-дослідних робіт.

Розрахунок єдиного соціального внеску здійснюється як відсоток від загальної суми витрат на оплату праці науково-дослідницького персоналу, визначеної у підпункті 6.2.1. Ставка єдиного соціального внеску приймається на рівні 22 % відповідно до вимог законодавства.

Сума єдиного соціального внеску визначається за формулою (6.1):

$$\text{ЄСВ} = \text{ФОП} \cdot k \quad (6.1),$$

де ФОП — фонд оплати праці науково-дослідницького персоналу, грн;
k — ставка єдиного соціального внеску ($k = 0,22$).

Підставивши значення фонду оплати праці, що становить 76828.49 грн, отримаємо суму єдиного соціального внеску:

$$\text{ЄСВ} = 76828.49 \cdot 0,22 = 16902.27 \text{ грн.}$$

Отримане значення єдиного соціального внеску враховується у складі загальних витрат на проведення науково-дослідних робіт за темою.

6.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Для виконання запланованих експериментів з формування алмазно-твердосплавних пластин та оцінювання впливу добавок кремнію й титану потрібні вихідні порошкові матеріали та допоміжні реагенти. Перелік і вартість матеріалів наведено в таблиці 6.3. Вартість прийнято за даними відкритих комерційних пропозицій постачальників (ціни наведені станом на поточний період) і може уточнюватися за рахунками-фактурами.

Таблиця 6.3 – Витрати на матеріали, необхідні для проведення досліджень

№	Найменування матеріалу	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
1	Порошок титану (≤ 45 мкм)	кг	0,1	3480	348
2	Кремній металевий (як добавка Si)	кг	0,1	198	19,8
3	Карбонат кальцію (CaCO_3)	кг	0,1	349	34,9
4	Алмазний мікропорошок АСМ 60/40	кг	0,1	10000	1000
	Разом				1402,7

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо на рівні 10 % від планової вартості загальних витрат на матеріали:

$$T_v = 1402.7 \cdot 0.1 = 140.27 \text{ грн.}$$

У такому разі загальна сума витрат на закупівлю матеріалів та їх транспортування буде становити:

$$V_m = 1402.7 + 140.27 = 1542.97 \text{ грн.}$$

6.2.4 Витрати на енергоносії

Витрати на енергоносії у межах виконання науково-дослідної роботи окремо не враховуються. Це пов'язано з тим, що всі експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах Інституту надтвердих матеріалів з використанням наявного обладнання. Споживання електричної енергії входить до загальних експлуатаційних витрат установи та не потребує додаткового обліку.

6.2.5 Витрати на спеціальне обладнання

Витрати на спеціальне обладнання при виконанні науково-дослідної роботи не передбачалися. Дослідження виконувалися з використанням наявної матеріально-технічної бази Інституту надтвердих матеріалів без придбання, оренди або модернізації додаткового обладнання. У зв'язку з цим відповідні витрати до кошторису не включалися.

6.2.6 Витрати на службові відрядження

Витрати на службові відрядження у процесі виконання науково-дослідної роботи не здійснювалися. Усі експериментальні та дослідні роботи проводилися безпосередньо на базі Інституту надтвердих матеріалів без необхідності виїздів за межі установи.

6.2.7 Вартість послуг сторонніх організацій

Послуги сторонніх організацій під час виконання науково-дослідної роботи не залучалися. Усі необхідні експериментальні дослідження, аналізи та випробування виконувалися в межах

можливостей Інституту надтвердих матеріалів, у зв'язку з чим відповідні витрати у кошторисі відсутні.

6.2.8 Інші непрямі невраховані витрати

До інших непрямих неврахованих витрат відносяться витрати, які можуть виникати під час виконання науково-дослідної роботи та не були включені до основних статей кошторису. Такі витрати мають допоміжний характер і пов'язані з організаційним забезпеченням досліджень, використанням загальноінститутських ресурсів, а також виконанням супровідних робіт.

Розмір інших непрямих неврахованих витрат визначається розрахунковим шляхом відповідно до встановленої методики та розраховується за формулою (6.2):

$$I_b = (ЗП + ЄСВ + B_m) \cdot 0.1 \quad (6.2),$$

Наразі I_b буде становити:

$$I_b = (76828.48 + 16902.27 + 1542.97) \cdot 0.1 = 9527.37 \text{ грн.}$$

6.2.9 Накладні витрати

Накладні витрати пов'язані із забезпеченням умов виконання науково-дослідної роботи та включають витрати загальновиробничого і адміністративного характеру, які не можуть бути безпосередньо віднесені до окремих етапів досліджень. До складу накладних витрат належать витрати на утримання приміщень, експлуатацію обладнання, організаційне та адміністративне забезпечення виконання науково-дослідних робіт.

Для розрахунку накладних витрат візьмемо 20 % від прямих витрат, розрахуємо за формулою (6.3) :

$$H_B = (ЗП + ЄСВ + V_M + I_B) \cdot 0.2 \quad (6.3),$$

Наразі H_B буде становити:

$$H_B = (76828.48 + 16902.27 + 1542.97 + 9527.37) \cdot 0.2 = 20960.21 \text{ грн.}$$

6.2.10 Загальний кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи

На основі виконаних розрахунків складено загальний кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи, який наведено у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Загальний кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи

Найменування статті витрат	Склад витрат	Сума, грн	Обґрунтування
Витрати на оплату праці	Заробітна плата науково-дослідницького персоналу	76828.48	Відповідно до трудомісткості виконання НДР
Єдиний соціальний внесок	Відрахування на соціальні заходи	16902.27	22 % від фонду оплати праці
Витрати на матеріали	Матеріали для проведення експериментальних досліджень	1542.97	Відповідно до розрахунків підрозділу 6.2.3
Інші непрямі витрати	Допоміжні та організаційні витрати	9527.37	Визначено відповідно до методики
Накладні витрати	Загальновиробничі та адміністративні витрати	20960.21	Розраховано за формулою (6.3)
Разом		125761.3	

6.3 Оцінка доцільності виконання науково-дослідної роботи

Доцільність виконання науково-дослідної роботи визначається сукупністю наукових, технічних та економічних факторів, що характеризують ефективність отриманих результатів. У межах даного дослідження оцінка доцільності проведення НДР спрямована на аналіз впливу легувальних добавок титану та кремнію на процес формування двошарових алмазовмісних композитів, а також на визначення перспектив практичного використання отриманих матеріалів у буровому інструменті.

Для визначення економічного ефекту використовується бальна система оцінювання, а саме це важливість розробки, можливість використання результатів, теоретичне значення та рівень новизни, складність дослідження К1; К2; К3; К4 відповідно .

Коефіцієнт К1 може приймати наступні значення :

- 1) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- 2) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- 3) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- 4) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- 5) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт К2 може приймати такі значення:

- 1) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- 2) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- 3) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.

4) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;

5) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт К3 може приймати такі значення:

1) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

2) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

3) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

4) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

5) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт К4 може приймати такі значення:

1) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;

2) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;

3) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

4) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;

5) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів, формула 6.4.

Таблиця 6.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	К1	Робота ініціативна, не є завданням будь яких директивних органів	1
2. Можливість використання Результатів розробки	К2	Результатами розробки можуть користуватися у різних галузях	10
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	К3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	5
4. Складність дослідження	К4	робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень	7

$$B = K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4 \quad (6.4)$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 6.5 становить:

$$B = 1 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 7 = 350$$

Умовний ефект НДР розраховується за формулою 6.5 :

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot B - E_n \cdot V_{\text{НДР}}, \quad (6.5)$$

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1-0,3 для розрахунку обираємо $E_n = 0,2$);

$V_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок таблиця 6.4);

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{ндр}} = 500 * 350 - 0.2 * 125761.30 = 149847,74 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність науково-дослідної роботи є важливим показником, що визначає фінансову доцільність наукового дослідження. Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою 6.6 :

$$E_e = \frac{E_{\text{ндр}}}{V_{\text{ндр}}}. \quad (6.6),$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = 1.196$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 1,2 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

6.4 Висновки до розділу

У розділі виконано економічне обґрунтування науково-дослідної роботи, пов'язаної з дослідженням впливу легувальних добавок титану та кремнію на формування двошарових алмазовмісних композитів. Визначено основні статті витрат, необхідні для проведення досліджень, з урахуванням особливостей лабораторного виконання робіт.

Проведено розрахунок витрат на оплату праці науково-дослідницького персоналу, відрахувань на соціальні заходи, витрат на матеріали, а також накладних та інших непрямих витрат. На основі отриманих даних сформовано загальний кошторис витрат на виконання науково-дослідної роботи, який склав 125761.3 грн.

Оцінка доцільності виконання науково-дослідної роботи показала, що отримані результати мають наукову та практичну цінність і можуть бути використані для подальших досліджень та впровадження у сфері створення бурового інструменту на основі алмазовмісних композитів.

7 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

7.1 Мета та завдання розробки стартап-проєкту

Метою розробки стартап-проєкту є обґрунтування доцільності створення та впровадження інноваційного продукту на основі результатів науково-дослідної роботи, присвяченої вивченню впливу легувальних добавок титану та кремнію на формування двошарових алмазовмісних композитів для бурового інструменту. Стартап-проєкт спрямований на перетворення отриманих наукових результатів у конкурентоспроможний продукт, який має практичну цінність та потенціал комерціалізації.

Основними завданнями розробки стартап-проєкту є:

- аналіз науково-технічних передумов створення інноваційного продукту на основі алмазовмісних композитів;
- визначення потенційних сфер застосування та цільових споживачів розроблюваного продукту;
- формування концепції стартап-проєкту з урахуванням результатів проведених досліджень;
- оцінка ринкових можливостей та конкурентних переваг запропонованого рішення;
- попереднє обґрунтування економічної доцільності реалізації стартап-проєкту;
- визначення перспектив подальшого розвитку та впровадження стартап-проєкту у виробничу практику.

7.2 Опис продукту

Продукт стартап-проєкту являє собою двошаровий алмазовмісний композит, призначений для використання у складі бурового інструменту. Матеріал формується на основі алмазного шару та підкладки зі спеціально підібраною металевою зв'язкою, модифікованою легувальними добавками

титану та кремнію. Такий підхід забезпечує стабільність структури композиту та надійне зчеплення між шарами.

Функціональне призначення розроблюваного продукту полягає у підвищенні експлуатаційних характеристик бурового інструменту, зокрема його зносостійкості та ресурсу роботи. Використання титану та кремнію у складі зв'язки сприяє покращенню фізико-механічних властивостей матеріалу, що дозволяє зменшити інтенсивність зношування робочої поверхні під час буріння твердих порід.

Запропонований продукт орієнтований на застосування у гірничодобувній, нафтогазовій та геологорозвідувальній галузях. У порівнянні з існуючими алмазовмісними матеріалами він має потенціал забезпечити підвищення ефективності роботи бурового інструменту та зниження експлуатаційних витрат.

Таблиця 7.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Покращення експлуатаційних властивостей двошарових алмазовмісних композитів для бурового інструменту шляхом легування зв'язки титаном та кремнієм.	Гірничодобувна промисловість, нафтогазова галузь, геологорозвідувальні роботи.	а) підвищення міцності та зносостійкості бурового інструменту; б) збільшення ресурсу роботи інструменту в умовах високих навантажень; в) зниження витрат на обслуговування та заміну інструменту.

Таблиця 7.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проєкт	Аналогічні рішення конкурентів	W	N	S
1	Міцність	Висока	Середня			+
2	Технологічність виготовлення	Середня	Середня		+	
3	Зносостійкість	Висока	Середня			+
4	Вартість	Середня	Середня		+	

W – слабка сторона

N – нейтральна сторона

S – сильна сторона

Проведений аналіз свідчить, що ідея стартап-проєкту має переважно сильні та нейтральні характеристики, що підтверджує доцільність її подальшого розвитку та впровадження.

7.3 Технологічний аудит ідеї проєкту

У даному підрозділі здійснюється технологічний аудит ідеї стартап-проєкту, який передбачає аналіз технологій, за допомогою яких може бути реалізований розроблюваний продукт. Аудит включає оцінку наявності необхідних технологічних рішень, рівня їх зрілості, а також можливості практичного впровадження з метою досягнення поставлених цілей проєкту. Результати технологічного аудиту наведено в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Отримання двошарового алмазовмісного композиту для бурового інструменту з модифікованою зв'язкою на основі титану та кремнію	Високотемпературне та високотискове спікання, порошкова металургія, технології формування алмазовмісних композитів	Технології є наявними та використовуються у науково-дослідній практиці	Технології доступні для реалізації в умовах науково-дослідних установ

7.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для оцінювання ринкових можливостей запуску стартап-проекту здійснено попередню характеристику потенційного ринку та визначено типові вимоги й поведінкові особливості потенційних клієнтів. Результати узагальнено в таблицях 7.4 та 7.5.

Таблиця 7.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап- проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн.	40 млн.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Спеціальне обладнання, вузька направленість
5	Специфічні вимоги для стандартизації та сертифікації	Присутні
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	18%

Таблиця 7.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Матеріали з підвищеною міцністю та зносостійкістю	Гірничодобувна промисловість	Орієнтація на надійність та стабільність властивостей; високі вимоги до механічної та термічної стійкості матеріалів	Висока довговічність; стійкість до навантажень; відповідність технічним стандартам

Список ринкових загроз і можливостей формується на основі аналізу чинників, що впливають на маркетингове середовище. Ринкові загрози й можливості є передбачуваними наслідками дії цих чинників і мають ймовірний характер, оскільки ще не реалізувалися на ринку.

Таблиця 7.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактори	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Зростання кількості конкурентів у сфері виробництва інструментальних матеріалів зі схожими властивостями.	Патентування розробок; підвищення якості продукції; укладання довгострокових контрактів.
2	Наявність сировини	Можливі перебої з постачанням якісної сировини для виготовлення твердосплавних пластин.	Диверсифікація постачальників; формування запасів сировини.
3	Технологічні ризики	Ускладнення процесу високотискового спікання через високі вимоги до стабільності параметрів.	Модернізація обладнання; залучення кваліфікованого персоналу; контроль параметрів процесу.

Фактори можливостей вказані в таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактори	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Розширення сфер застосування	Існує ризик втрати конкурентних позицій у разі несвоєчасного виходу на нові галузі застосування матеріалу.	Моніторинг нових ринків; адаптація продукції під вимоги нових галузей; активна комунікація з потенційними споживачами.
2	Підвищення попиту на легкі матеріали	Нездатність швидко масштабувати виробництво може призвести до втрати частки ринку при зростанні попиту.	Планування розширення виробничих потужностей; оптимізація технологічних процесів; формування запасів.
3	Розвиток технологій виробництва	Відставання у впровадженні сучасних технологій може знизити конкурентоспроможність продукції.	Інвестування в модернізацію обладнання; співпраця з науковими установами; впровадження інноваційних рішень.

SWOT-аналіз є інструментом стратегічного планування, що дозволяє оцінити внутрішні сильні та слабкі сторони стартап-проєкту. Аналіз внутрішнього середовища дає змогу визначити конкурентні переваги розробки, а також обмеження, які можуть впливати на подальший розвиток і комерціалізацію продукту. Перелік ключових сильних і слабких сторін проєкту наведено в таблицях 7.8 та 7.9.

Таблиця 7.8 – SWOT-аналіз стартап-проєкту (Сильні та слабкі сторони)

Сильні сторони (S):	Слабкі сторони (W):
Унікальний алмазно-твердосплавний матеріал, отриманий за умов високих тисків і температур, що забезпечує підвищену зносостійкість і міцність	Висока складність технологічного процесу виготовлення, що ускладнює масштабування виробництва
Застосування сучасної технології високотискового спікання типу Тороїд, яка забезпечує стабільні властивості матеріалу	Значні початкові витрати на спеціалізоване обладнання та енергоресурси
Орієнтація на гірничодобувну галузь зі сталим попитом на зносостійкі ріжучі елементи	Обмежена впізнаваність продукту на ринку та необхідність формування довіри з боку замовників

Таблиця 7.9 – SWOT-аналіз стартап-проєкту (Можливості та загрози)

Можливості (O):	Загрози (T):
<ul style="list-style-type: none"> – Застосування вискоєфективних алмазно-твердосплавних пластин у гірничодобувній галузі; – Розширення використання інструментів для обробки твердих і абразивних порід; – Зростання попиту на зносостійкі ріжучі елементи для бурового обладнання; – Можливість заміщення імпортних матеріалів вітчизняними розробками; – Співпраця з підприємствами гірничо-металургійного комплексу. 	<ul style="list-style-type: none"> – Посилення конкуренції з боку міжнародних виробників ріжучого інструменту; – Зростання собівартості через складність технології виготовлення; – Ризик появи альтернативних матеріалів із нижчою ціною; – Залежність від стабільності постачання сировинних компонентів; – Можливі труднощі з масштабуванням виробництва.

Також, порівняння товарів конкурентів з товарами, які вироблятимуться в рамках роботи зазначено в таблиці 7.10.

Таблиця 7.10 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Висока зносостійкість та твердість ріжучих пластин	15			+				
2	Стійкість матеріалу до високих механічних навантажень і ударів	16			+				
3	Працездатність в умовах високих тисків і температур	17			+				
4	Технологічна ефективність виготовлення методом високотискового спікання	15					+		
5	Підвищений ресурс роботи інструменту при руйнуванні гірських порід	16					+		

На основі результатів SWOT-аналізу визначено можливі альтернативи ринкової поведінки, спрямовані на ефективне впровадження стартап-проекту на ринок. Для кожної альтернативи оцінено ймовірність отримання необхідних ресурсів та орієнтовний період її реалізації з урахуванням ринкових умов і потенційних дій конкурентів. Подальший аналіз альтернатив дозволяє обрати найбільш доцільний варіант ринкового впровадження стартап-проекту (табл. 7.11).

Таблиця 7.11 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтований комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Період реалізації
1	Укладання стратегічних партнерств з підприємствами гірничодобувної галузі для впровадження інноваційних ріжучих пластин	70%	5-7 міс.
2	Вихід на ринок спеціалізованого інструменту для бурових, прохідницьких та кар'єрних робіт у складних геологічних умовах	80%	4-6 міс.
3	Співпраця з науково-дослідними установами та виробничими підприємствами для доведення технології до серійного виробництва	60%	6-8 міс.

7.5 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Ринкова стратегія проєкту охоплює сукупність ключових управлінських рішень, що визначають характер взаємодії підприємства з ринком ресурсів, і за своєю структурою тісно пов'язана з товарно-ринковою стратегією. Основна увага при її формуванні зосереджується на двох взаємопов'язаних аспектах.

По-перше, ринкова стратегія визначає поведінку підприємства на ринках матеріальних факторів виробництва, зокрема засобів та предметів праці, необхідних для реалізації проєкту. По-друге, вона передбачає формування номенклатури, обсягів і якісних характеристик ресурсів, що закуповуються та використовуються у межах виробничого процесу.

Розроблення ринкової стратегії ґрунтується на комплексному аналізі та прогнозуванні ринкової кон'юнктури, дослідженні споживачів, товарів, конкурентного середовища та інших складових ринкової системи. Результати такого аналізу дозволяють обґрунтувати напрями розвитку проєкту та вибрати найбільш доцільні інструменти його ринкової реалізації.

У практиці стратегічного планування найчастіше застосовуються такі маркетингові стратегії:

- вихід на нові ринки;
- розширення наявних ринків збуту;
- удосконалення товару та його споживчих характеристик;
- диверсифікація напрямів діяльності.

Вибір цільових сегментів потенційних споживачів представлено в таблиці 7.12.

Таблиця 7.12 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1	Гірничодобувна промисловість	Висока – підвищена зносостійкість і твердість є критичними для ріжучого інструменту	70% – високий	Середня – наявні конкуренти, але попит стабільно зростає	Середня – необхідні галузеві стандарти та випробування
2	Нафтогазовидобувна промисловість	Середня – орієнтація на довговічність і роботу в складних умовах	60% – середній	Середня – використовується імпортований інструмент	Складна – високі вимоги до сертифікації та надійності

Враховуючи обрані цільові групи споживачів, а саме підприємства гірничодобувної та суміжних галузей, можна зробити висновок, що розвиток стартап-проєкту доцільно здійснювати із застосуванням стратегії концентрованого маркетингу. Такий підхід дозволяє зосередити ресурси на вузькому, але технічно вимогливому сегменті ринку, де ключове значення мають зносостійкість, міцність та стабільність характеристик алмазно-твердосплавних пластин. Базові напрями подальшого розвитку проєкту наведені в таблиці 7.13.

Таблиця 7.13 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Постачання алмазно-твердосплавних пластин для гірничодобувної промисловості та виробників бурового і ріжучого інструменту	Концентрований маркетинг	Висока зносостійкість; стабільність властивостей; працездатність у важких умовах різання та буріння	Стратегія лідерства за технічними характеристиками
2	Співпраця з промисловими підприємствами для виготовлення спеціалізованих інструментальних пластин під індивідуальні умови експлуатації	Диференційований маркетинг	Адаптація під вимоги замовника; висока міцність матеріалу; можливість модифікації складу та геометрії	Стратегія інноваційного партнерства

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 7.14).

Таблиця 7.14 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурентів, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Представлений проєкт не є «першопрохідцем» на ринку	Компанія поєднуватиме залучення нових клієнтів із поступовим переходом споживачів від існуючих конкурентів	Компанія не копіює існуючі продукти, а фокусується на вдосконаленні характеристик: підвищена зносостійкість, твердість та стабільність ріжучих властивостей	Стратегія диференціації за рахунок інноваційних властивостей матеріалу

У процесі розроблення ринкової стратегії стартап-проєкту було визначено ключові вимоги до її реалізації, а також сформульовано основні позиції проєкту й базові передумови забезпечення його конкурентоспроможності на обраному ринку.

З урахуванням специфіки цільового сегмента та характеристик продукції особливе значення набуває формування ефективної стратегії позиціонування. Вона визначає підхід компанії до зайняття стійкого та унікального місця в обраному ринковому сегменті, забезпечуючи чітке відокремлення від конкурентів і підвищення впізнаваності серед потенційних споживачів.

Основні елементи стратегії позиціонування стартап-проєкту наведено в таблиці 7.15.

Таблиця 7.15 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію проєкту
1	Висока міцність і зносостійкість; стабільна робота при високих контактних навантаженнях; придатність для обробки гірських порід.	Стратегія інноваційного лідерства	Підвищена міцність і твердість алмазно-твердосплавних пластин; стійкість до ударних і абразивних навантажень; ресурсозберезувальна технологія виготовлення.	Надійний інструмент для важких умов експлуатації; довговічність і стабільна якість; використання науково обґрунтованих технологій виробництва.

7.6 Розробка маркетингової стратегії стартап-проєкту

Першим етапом розробки маркетингової стратегії стартап-проєкту є формування маркетингової концепції продукту, який пропонується потенційним споживачам. Для цього доцільно узагальнити результати

попереднього аналізу конкурентоспроможності та визначити ключові потреби цільових сегментів ринку. Оскільки запропонована технологія та матеріал мають інноваційний характер, важливим є акцент на унікальних перевагах продукту порівняно з існуючими аналогами, а також на можливостях їх практичного застосування. Узагальнення ключових переваг концепції потенційного товару наведено в таблиці 7.16.

Таблиця 7.16 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Необхідність використання зносостійких і надміцних матеріалів для обробки складних та твердих матеріалів у гірничодобувній галузі.	Підвищення ресурсу ріжучого інструменту, зменшення частоти заміни інструментальних пластин, забезпечення стабільності процесу обробки.	Висока твердість і міцність, підвищена зносостійкість алмазно-твердосплавних пластин, отриманих за рахунок оптимізованого складу.
2	Необхідність зниження витрат на виготовлення та експлуатацію інструментальних матеріалів при збереженні високих експлуатаційних характеристик.	Скорочення матеріальних витрат та підвищення економічної ефективності виробництва за рахунок тривалого строку служби інструменту.	НРНТ спікання забезпечує однорідну структуру матеріалу, меншу кількість дефектів і стабільні властивості, що знижує загальну собівартість використання.

Наступним етапом розробки маркетингової стратегії є визначення цінових меж, яких доцільно дотримуватися під час формування ціни на майбутній продукт. Остаточне встановлення ціни буде здійснено в межах фінансово-економічного аналізу проєкту.

Для визначення орієнтовного цінового діапазону проведено аналіз рівня цін на товари-аналоги та товари-субститути, а також оцінено платоспроможність цільових груп споживачів (табл.7.17).

Таблиця 7.17 – Визначення встановлення меж ціни (за 1 кг)

№ п/п	Рівень ціни на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межа встановлення ціни на товар
1	4–8 тис. грн/кг.	12–25 тис. грн/кг.	150–300 млн грн на рік	15–30 тис. грн/кг.

7.7 Формування системи збуту

Формування системи збуту стартап-проєкту передбачає вибір та обґрунтування ефективних каналів реалізації продукції, а також організацію взаємодії між виробником і кінцевими споживачами. Система збуту має забезпечувати своєчасне постачання продукції, мінімізацію витрат обігу та досягнення запланованого рівня рентабельності.

У межах даного стартап-проєкту основними споживачами є підприємства гірничодобувної та суміжних галузей, які використовують надтверді матеріали та інструментальні заготовки для роботи в умовах підвищених механічних і термічних навантажень. З огляду на це, доцільним є використання прямої системи збуту без посередників, що дозволяє встановлювати довгострокові партнерські відносини з ключовими замовниками та оперативно реагувати на їхні технічні вимоги.

Основними каналами збуту продукції є прямі контракти з промисловими підприємствами, участь у галузевих виставках і технічних форумах, а також співпраця з інжиніринговими компаніями, що здійснюють підбір матеріалів для складних виробничих процесів. Такий підхід дозволяє підвищити рівень довіри до продукції та сприяє її впровадженню у виробничі цикли споживачів.

Оцінка ефективності системи збуту здійснюється на основі аналізу обсягів реалізації продукції, витрат на збут, рівня задоволеності споживачів та швидкості укладання контрактів. У результаті впровадження обраної системи збуту очікується зниження витрат обігу, підвищення конкурентоспроможності стартап-проєкту та стабільне зростання продажів.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено процес спікання АТП з активуючими добавками. Встановлено, що якісні пластини без тріщин і сколів можна отримати при додаванні в алмазний порошок 2-4 мас. % Si, або 3 мас. % Ti.

2. Вивчено взаємодію компонентів алмазного шару АТП і частинок алмазних порошоків, Co, карбиду вольфраму з активуючими добавками. Встановлено, що в системі $C_{\text{АЛМ.}}-Co-Ti$ утворюється тільки TiC. В системі $C_{\text{АЛМ.}}-Co-Si$ спочатку утворюється інтерметаліди на основі Co і кремнію, а із збільшенням кількості кремнію утворюється $\beta-SiC$. В поверхневому шарі алмазу сформований термостійкий шар до 0,5 мм за рахунок зв'язування Co в інтерметаліди кремнію.

3. Розроблена методика лабораторних досліджень зносостійкості розроблених АТП методом точіння граніту із охолодженням, що імітує буріння гозавих свердловин. За результатами виконаних досліджень доходимо висновку, що при активації спіканні АТП шляхом додавання до алмазного порошку кремнію або титану підвищується зносостійкість за рахунок утворення інтерметалідів на основі кобальту, які мають вищу стійкість до окислення. У разі утворення значної кількості карбідів у процесі реакційного спікання якість алмазного шару АТП погіршується і його зносостійкість знижується. Отже, перевагу доцільно надавати активації спікання шляхом додавання до алмазного порошку перед спіканням 2 мас.% Si та 4 мас.% Si.

4. Згідно результатів випробувань було показано, що найкращі АТП є пластини сформовані на твердосплавній підкладці BK15 із товщиною алмазного шару 1,6-1,7 мм які отримані в результаті додавання до вихідного алмазного порошку АСМ 60/40 від 2 до 4 мас. % Si та спечені при тиску 7,7 ГПа і $T = 1800$ °C. Саме в таких умовах вдалося сформувати термостійкий шар SiC який підвищує як міцність так і загальну термостійкість матеріалу.

5. З використанням методики дослідження зносостійкості АТП встановлено, що термостійкість на повітрі розроблених АТП складає 850 °C, що є високим показником для алмазовмісної кераміки і доводить її високу

ефективність під час точіння важких порід, зокрема граніту, що може бути використано у нафтобазо-видобувній галузі.

CONCLUSIONS

1. The process of sintering ATP with activating additives was studied. It was established that high-quality plates without cracks and chips can be obtained by adding 2-4 wt. % Si or 3 wt. % Ti to the diamond powder.

2. The interaction of the components of the ATP diamond layer and particles of diamond powders, Co, tungsten carbide with activating additives was studied. It was established that in the SALM.-Co-Ti system only TiS is formed. In the SALM.-Co-Si system, intermetallics based on Co and silicon are initially formed, and with an increase in the amount of silicon, β -SiC is formed. A heat-resistant layer up to 0.5 mm thick is formed in the surface layer of diamond due to the binding of Co to silicon intermetallics.

3. A method for laboratory studies of the wear resistance of ATPs developed by the method of granite turning with cooling, which simulates the drilling of deep wells, has been developed. According to the results of the studies, we conclude that when activating the sintering of ATPs by adding silicon or titanium to diamond powder, the wear resistance increases due to the formation of cobalt-based intermetallics, which have higher resistance to oxidation. In the case of the formation of a significant amount of carbides in the process of reaction sintering, the quality of the diamond layer of ATP deteriorates and its wear resistance decreases. Therefore, it is advisable to give preference to sintering activation by adding 2 wt.% Si and 4 wt.% Si to the diamond powder before sintering.

4. According to the test results, it was shown that the best ATPs are plates formed on a VK15 hard alloy substrate with a diamond layer thickness of 1.6-1.7 mm, which are obtained as a result of adding 2 to 4 wt.% Si to the original AFM 60/40 diamond powder and sintered at a pressure of 7.7 GPa and $T = 1800$ °C. It was under such conditions that it was possible to form a heat-resistant SiC layer that increases both the strength and the overall heat resistance of the material.

5. Using the method of studying the wear resistance of ATP, it was established that the thermal resistance in air of the developed ATP is 850 OS, which is a high

indicator for diamond-containing ceramics and proves its high efficiency during turning of heavy rocks, in particular granite, which can be used in the oil and gas industry.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kharlamov, A. I., Nizhenko, V.I., Kirillova, N.V. Wettability of Hot-Pressed Samples of Boron-Containing Aluminium Compounds by Liquid Metals and Alloys (in Russian) // Zh. Prikl. Khim. – 2000. – V.73(6). – P. 884-888.
2. Liu, C.H. Structure and Properties of Boron Carbide with Aluminum Incorporation // Mater. Sci. Eng. – 2000. – V.B72. – P. 23-26.
3. Pat. 6042627 USA, B 24 D 17/00; C 22 C 29/02. Aluminum-Boron-Carbon Abrasive Article and Method to Form Said Article / A. J. Pyzik, U.V. Deshmukh, R. D. Krystosek. – Publ. 03.28.00.
4. Solozhenko, V.L., Meyer, F.D., Hillebrecht, H. 300-K Equation of State and High-Pressure Phase Stability of Al_3BC_3 // Solid State Chem. – 2000. – V.154. – P. 254-256.
5. Werheit, H., Schmechel, R., Meyer, F.D., Hillebrecht, H. Interband Transitions and Optical Phonons of B_4C-Al // Solid State Chem. – 2000. – V.154. – P. 75-78.
6. Lee, K.B., Sim, H.S., Cho, S.Y., Kwon, H. Reaction Products of Al-Mg/ B_4C Composite Fabricated by Pressureless Infiltration Technique // Mater. Sci. Eng. – 2001.
7. Ersoy A., Waller M. D. Wear characteristics of polycrystalline diamond compact (PDC) cutters // Wear. – 1995. – Vol. 188. – P. 150–165.
8. Glowka D. A. Fundamentals of drilling mechanics // Journal of Petroleum Technology. – 1989. – Vol. 41, No. 9. – P. 1023–1032.
9. Detournay E., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1992. – Vol. 29, No. 1. – P. 13–23.
10. Glowka D. A. Use of single-cutter data in the analysis of PDC bit designs // Society of Petroleum Engineers Journal. – 1989. – Vol. 29, No. 1. – P. 25–35.
11. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E., Young F. S. Applied Drilling Engineering. – SPE Textbook Series, Vol. 2. – Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1986. – 592 p.

12. Oganov A.R., Solozhenko V.L. Boron: a Hunt for Superhard Polymorphs // *Journal of Superhard Materials*. – 2009. – V. 31. N. 5 – P. 285–291.
13. Field M. G. Polycrystalline diamond compact cutters for oil and gas drilling // *Industrial Diamond Review*. – 1988. – Vol. 48, No. 3. – P. 101–109.
14. Hoover E. R., Decker R. L. Performance of Stratapax cutters in sedimentary rocks // *SPE Drilling Engineering*. – 1987. – Vol. 2, No. 4. – P. 315–322.
15. Белов В. М., Кравченко В. П., Сидоренко А. Ф. Алмазно-твердосплавные пластины и буровой инструмент на их основе // *Сверхтвердые материалы*. – 1990. – № 2. – С. 45–52.
16. Кузнецов В. А., Михайлов Ю. Н. Опыт применения долот с алмазно-твердосплавными пластинами при бурении угольных месторождений Донбасса // *Горный журнал*. – 1991. – № 6. – С. 38–42.
17. 29. Ерсой А., Уоллер М. Д. Wear characteristics of polycrystalline diamond compact (PDC) cutters // *Wear*. – 1995. – Vol. 188. – P. 150–165.
18. Glowka D. A. Development of a method for predicting the performance and wear of PDC drill bits // *SPE Drilling Engineering*. – 1987. – Vol. 2, No. 4. – P. 393–401.
19. Glowka D. A., Stone C. M. Thermal aspects of PDC bit design // *SPE Drilling Engineering*. – 1985. – Vol. 1, No. 2. – P. 137–144.
20. Detournay E., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1992. – Vol. 29, No. 1. – P. 13–23.
21. Richard T. F., Robert R.A., Pyzik A.J. and Han Ch. Al₂O₃-B₄C-Al composite Material System via Pressureless Infiltration Methods// *Int. J. Appl. Ceram Technol*. – 2010. – 7[6]. – P. 837-845.
22. Litkevich Yu. F. Cutting temperature and wear of polycrystalline diamond compact cutters // *Journal of Superhard Materials*. – 1999. – Vol. 21, No. 3. – P. 45–52.
23. Atlas Copco Secoroc. Wireline core drilling – principles, equipment and application limits. – Atlas Copco Rock Drills AB, Sweden, 2008. – 56 p.
24. Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films. – Boca Raton: CRC

Press, 1995.

25. Bundy F.P. The pressure–temperature phase and transformation diagram for carbon // *Carbon*. – 1996.
26. Davies G. Graphitization of diamond at zero pressure // *Proceedings of the Royal Society A*. – 1972.
27. Prelas M., et al. *Diamond Based Composites*. – Berlin: Springer, 1997.
28. Field J.E. *The Properties of Natural and Synthetic Diamond*. – London: Academic Press, 1992.
29. Twardowski A. Thermal stresses in diamond composites // *Materials Science*. – 2008.
30. Fedoseev D.V. Interaction of diamond with transition metals // *Powder Metallurgy*. – 2003.
31. Kanda H. Solubility of carbon in transition metals at high temperature // *Carbon*. – 2001.
32. Yao Z. Cobalt diffusion in PCD materials // *Diamond & Related Materials*. – 2012.
33. Lee K. Silicon carbide formation in diamond composites // *Ceramics International*. – 2010.
34. Moriguchi H. Oxidation resistance of SiC-based ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2008.
35. Pierson H.O. *Handbook of Refractory Carbides and Nitrides*. – New Jersey: Noyes Publications, 1996.
36. Zhang Y. Titanium carbide as diffusion barrier in diamond tools // *Surface & Coatings Technology*. – 2015.
37. ISO 13320:2009 Particle size analysis — Laser diffraction methods. – International Organization for Standardization, 2009.
38. Allen T. *Particle Size Measurement*. – 4th ed. – Springer, 1997.
39. Вінницький В.Л., Верещагін Л.Ф. Надвисокі тиски в фізиці твердого тіла. – М.: Наука, 1981.
40. Bundy F. P. Pressure–temperature phase diagram of carbon // *Carbon*. – 1980. –

Vol. 18, No. 2. – P. 129–138.

41. Field J. E. The properties of natural and synthetic diamond. – London: Academic Press, 1992.
42. Prelas M. A., Popovici G., Bigelow L. K. Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films. – CRC Press, 1997.
43. Prelas M. A., Popovici G., Bigelow L. K. Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films. – CRC Press, 1997.
44. Стандарт підприємства СТП 28.5-05417377-100–2003.Пластини алмазно-твердосплавні. Метод визначення зносостійкості при різанні гірських порід. – Донецьк: ІНМ НАН України, 2003.
45. Кузнєцов В. Г., Федосєєв Д. В. Знос і зносостійкість інструментальних матеріалів при різанні гірських порід. – Москва: Недра, 1990. – 256 с.
46. Основы теории резания материалов : учеб. пособие /В. А. Кривоухов, А. М. Бочаров, В. А. Юдин. – Москва : Машиностроение, 1984. – 232 с.
47. ГОСТ 20911–89. Станки металлорежущие. Методы измерения сил резания. – Москва: Издательство стандартов, 1989.
48. Износ и стойкость режущего инструмента /В. Ф. Бобров, И. А. Боровский. – Москва : Машиностроение, 1979. – 288 с.
49. Streckeisen A. L. Classification and nomenclature of igneous rocks. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen, 1976. – Vol. 107. – P. 144–240.
50. Bourgoyne A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E., Young F. S. Applied Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers (SPE), Richardson, TX, 1991. – 502 p.
51. Rudy E. Ternary Phase Equilibria in Transition Metal–Carbon Systems. AFML-TR-65-2, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1965.
52. Olesinski R. W., Abbaschian G. J. The Si–C (Silicon–Carbon) system. Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 1984, Vol. 5, No. 3, pp. 273–276.
53. Okamoto H. Co–Ti (Cobalt–Titanium). Journal of Phase Equilibria, 1992, Vol. 13, No. 3, pp. 305–306.
54. Massalski T. B. (Ed.) Binary Alloy Phase Diagrams. ASM International,

Materials Park, Ohio, 1990.

55. Bundy F. P., Hall H. T., Strong H. M., Wentorf R. H. Man-made diamonds. *Nature*, 1955, Vol. 176, pp. 51–55.

56. Rudy E. Ternary Phase Equilibria in Transition Metal–Carbon Systems. AFML-TR-65-2, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1965.

57. Olesinski R. W., Abbaschian G. J. The Si–C (Silicon–Carbon) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1984, Vol. 5, No. 3, pp. 273–276.

58. Okamoto H. Co–Ti (Cobalt–Titanium). *Journal of Phase Equilibria*, 1992, Vol. 13, No. 3, pp. 305–306.

59. Field J. E. The properties of natural and synthetic diamond. Academic Press, London, 1992.

60. Sokol A. G., Palyanov Y. N. Diamond formation from carbonate melts under high-pressure high-temperature conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, Vol. 271, Issues 1–4, pp. 1–10.

61. Palyanov Y. N., Khokhryakov A. F. Growth conditions and morphology of diamond crystals at high temperatures and pressures. *Crystal Growth & Design*, 2010, Vol. 10, No. 11, pp. 4701–4709.

62. Konov V. I., Kononenko T. V. Diamond-based composite materials: synthesis, structure and properties. *Physics-Uspekhi*, 2012, Vol. 55, No. 6, pp. 593–615.

63. Gracio J. J., Fan Q. H., Madaleno J. C. Diamond growth by chemical vapor deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, Vol. 43, 374017.

64. Cullity B. D., Stock S. R. *Elements of X-Ray Diffraction*. 3rd ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. — 664 p.

65. Warren B. E. *X-Ray Diffraction*. — New York: Dover Publications, 1990. — 381 p.

66. Gates-Rector S., Blanton T. The Powder Diffraction File: a quality materials characterization database. *Powder Diffraction*, 2019, Vol. 34(4), pp. 352–360.

67. Konoplyuk S., Abe T., Uchida Y. Interfacial reactions and cracking behavior in diamond–metal composites. *Diamond and Related Materials*, 2009, Vol. 18, Issues 5–8, pp. 929–933.

68. Silicate Crystal Chemistry. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, Vol. 5, 1994.
69. Exner H.E. Physical and chemical nature of cemented carbides. International Metals Reviews, 1979, Vol. 24, No. 4, p. 149–173.
70. Upadhyaya G.S. Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties, and Testing. Noyes Publications, New Jersey, 1998.
71. Bundy F.P., Hall H.T., Strong H.M. Man-made diamonds. Nature, 1955.
72. Upadhyaya G.S. Materials Science of Cemented Carbides – An Overview. Materials & Design, 2001.
73. Bundy, F. P., Strong, H. M., Hall, H. T. Diamond–graphite equilibrium line from high-pressure, high-temperature data. Journal of Chemical Physics, 1958, 29(3), pp. 773–778.
74. Herzfeld, C. L., & Stampfl, C. Handbook of Hard Materials – Properties, Characteristics, Processing and Applications. McGraw-Hill, 2016.
75. Huang, H., Xu, C., Zhang, F. Thermal behaviour of diamond drilling tools under high-speed drilling conditions. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014.
76. Закон України "Про охорону праці", [Електронний ресурс] : від 21.11.2002, № 229-IV / Верховна Рада України. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>.
77. Наказ "Про затвердження Вимог безпеки та захисту здоров'я під час використання виробничого обладнання працівниками", [Електронний ресурс] : від 28.12.2017, № 2072 / Міністерство юстиції України . – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0097-18#Text>.
78. ДСТУ EN 149:2017. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Напівмаски фільтрувальні для захисту від аерозолів. Вимоги, випробування, маркування. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.
79. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС). НПАОП 40.1-1.21-98. – Офіційне видання. – Київ : Держпраці України.

80. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014.
81. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвучу та інфразвучу.
82. Державні будівельні норми природного та штучного освітлення : ДБН В 2.5-28-2006. – [Чинний від 2006- 10-01]. – К. : Держстандарт України, 2008. – 79 с.
83. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ-2017. – Київ : Держстандарт України, 2017. – 617 с.
84. Закон України «Про цивільний захист населення» від 24.06.2004 № 1859-IV // Відомості Верховної Ради України. – 2004. – № 39. – Ст. 488. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1859-15>.