

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

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____Юрій БОГОМОЛ
«___»_____2026 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»
на тему: «Дільниця з виробництва надтвердого інструменту на
основі нітриду бору для чистової обробки різальних пластин»

Виконав:
студент IV курсу, групи ФН-21
Зайцев Всеволод Павлович

Керівник:
асистент, PhD,
Наконечний Сергій Олегович

Консультант з економічно-організаційного розділу:
доцент, к.е.н., доцент
Нараєвський Сергій Вікторович

Консультант з охорони праці:
зав. кафедри, д. т. н., професор
Левченко Олег Григорович

нормоконтроль:
доцент, к. т. н., доцент
Бірюкович Ліна Олегівна

рецензент:
доцент, к.т.н., доцент кафедри ФМТО
Іващенко Євген Вадимович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без відпо-
відних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Пояснювальна записка	112	
3	A4	ФН21.2106.4203.003.02АС	Апаратурно-технологічна схема	1	
4	A4	ФН21.2106.4203.003.03ПД	План ділянки	1	
5	A4	ФН21.2106.4203.003.04СА	Спецагрегат	1	
6	A4	ФН21.2106.4203.003.05СА	Техніко-економічні показники	1	
			ФН21.2106.4203.003.01ПЗ		
		ПІБ	Підп.	Дата	
Розробн.	Зайцев В.П.			ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ	Аркуш
Керівн.	Наконечний С.О.				1
Консульт.	Іващенко Є.В.				Аркуші
Н/контр.	Бірюкович Л.О.				1
Зав.каф.	Богомол Ю. І.				КПІ ім. Ігоря Сікорського

**Пояснювальна
записка до
дипломного
проєкту
на тему: «Дільниця з виробництва надтвердого інструменту
на основі нітриду бору для чистової обробки різальних
пластин»**

Київ – 2026 року

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 – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій БОГОМОЛ

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Зайцеву Всеволоду Павловичу

1. Тема проєкту «Дільниця з виробництва надтвердого інструменту на основі нітриду бору для чистової обробки різальних пластин», керівник проєкту Наконечний Сергій Олегович, старший викладач, затверджені наказом по університету від «28» травня 2026 р. №1986-с
2. Термін подання студентом проєкту 12 черня 2026 р.
3. Вихідні дані до проєкту: плановий обсяг виготовленої продукції – 150000 вир./рік; аналіз стану інструментального виробництва та сучасних методів одержання надтвердих матеріалів; технологічний процес повинен забезпечувати максимальну щільність, високу твердість, зносостійкість, термостабільність та нормативну точність геометричних параметрів різальних пластин.
4. Зміст пояснювальної записки: технологічний та будівельний розділи, спеціальний розділ, розділ охорона праці, енергетичний, організаційно-

економічний розділ.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): апаратурно-технологічна схема і план цеху; таблиця еко-номічних показників.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічний	Нараєвський С. В., доцент		
Охорона праці	Левченко О. Г., зав. каф. ОП-ПЦБ		

7. Дата видачі завдання 20.04.26

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Літературний пошук. Вибір матеріалу для виготовлення ріжучого інструменту.	15.04.2026 – 17.04.2026	Виконано
2	Вибір технологічного процесу та його опис.	18.04.2026 – 02.05.2026	Виконано
3	Матеріальні розрахунки. Розрахунок необхідної кількості технологічного обладнання.	03.05.2026 – 06.05.2026.	Виконано
4	Розробка розділу з охорони праці	07.05.2026 – 15.05.2026	Виконано
5	Розробка будівельного розділу	16.05.2026 – 22.05.2026	Виконано
6	Розробка спеціального розділу	23.05.2026 – 31.05.2026	Виконано
7	Розробка організаційно-економічного розділу	01.06.2026 – 03.06.2026	Виконано
8	Виконання графічної частини проєкту	04.06.2026 – 05.06.2026	Виконано
9	Оформлення дипломної записки	06.06.2026 – 08.06.2026	Виконано

Студент
Керівник

Всеволод ЗАЙЦЕВ
Сергій НАКОНЕЧНИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт за освітньо-професійною програмою складається із пояснювальної записки, що містить: стор. – 115, рис. – 35, табл. – 19, літ. – 33 і графічної частини із 3 креслень.

КЕРАМІЧНА ЗВ'ЯЗКА, КУБІЧНИЙ НІТРИД БОРУ, НАНОАРМУВАННЯ, ТЕРМОБАРИЧНЕ СПІКАННЯ, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, PcBN , VMAM .

У дипломному проєкті викладено літературний огляд сучасних методів виробництва та фінішної обробки інструментальних надтвердих матеріалів на основі PcBN групи VL . Метою проєкту є розроблення конструкторської документації дільниці та інтелектуальної технологічної лінії з виробництва різальних пластин марки BN100 із впровадженням систем цифрових двійників для мінімізації виробничого браку.

У роботі обґрунтовано склад наноармованого композиту BN100 та параметри зміцнюючих нановолокон. Розроблено схему технологічного процесу, що включає власний карботермічний синтез карбіду титану та термобаричне спікання за параметрів надвисокого тиску. Запропоновано архітектуру подвійного цифрового двійника для моделювання термобаричних полів спікання та прогнозування зносу різальної кромки. Розраховано основні техніко-економічні показники виробництва: річний прибуток підприємства оцінюється у 4,91 млн грн, а термін окупності проєкту складає – 3,7 років. Розроблено будівельний, спеціальний розділи та розділ охорона праці.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив	Зайцев В.П.				РЕФЕРАТ			Літ.	Арк.	Акрушіє	
Перевірів	Наконечний С.О.									2	115
Рецензент	Іващенко Є.В.							НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21			
Н. Контр	Бірюкович Л.О.										
Затвердив	Богомол Ю. І.										

ABSTRACT

The diploma project under the educational and professional program consists of an explanatory note containing: pages – 115, figures – 35, tables – 19, references – 33 and a graphic part consisting of 4 drawings and a digital system architecture.

CERAMIC BINDER, CUBIC BORON NITRIDE, DIGITAL TWIN, NANO-REINFORCEMENT, PcBN, THERMOBARIC SINTERING, VMAM.

The diploma project presents a literature review of modern production methods and finishing of superhard tool materials based on BL-grade PcBN. The goal of the project is to develop design documentation for a production area and an intelligent technological line for manufacturing BN100 cutting inserts with the implementation of digital twin systems to minimize production scrap.

The study justifies the composition of the nano-reinforced composite BN100 and the parameters of reinforcing nanofibers. A technological process scheme has been developed, including in-house carbothermic synthesis of titanium carbide and thermobaric sintering under ultra-high pressure parameters. A dual digital twin architecture is proposed for modeling thermobaric sintering fields and predicting cutting edge wear. The main technical and economic indicators of production have been calculated: the annual profit of the enterprise is estimated at 4,91 million hrn, and the project payback period is – 3,7 years. The construction, special, and occupational safety chapters have been developed

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ABSTRACT				
Розробив	Зайцев В.П.								
Перевірів	Наконечний С.О								
Рецензент	Іващенко Є.В.								
Н. Контр	Бірюкович Л.О								
Затвердив	Богомол Ю. І.								
					Літ.	Арк.	Акрушів		
						3	115		
					НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21				

Зміст

РЕФЕРАТ	2
ABSTRACT	3
ВСТУП.....	7
1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Вибір матеріалу	8
1. 2 Аналіз матриць зв'язки	12
1.3 Вибір і обґрунтування технологічного процесу	16
1.3.1 Метод прямого фазового перетворення.....	16
1.3.2 Метод реакційного спікання	17
1.3.3 Метод спікання з попередньо синтезованою матрицею	19
1.4 Впровадження цифрових двійників	24
1.5 Обґрунтування асортименту продукції	26
1.6 Характеристика сировини	28
1.6.1 Закуповувані компоненти	28
1.6.2 Власне виробництво	29
1.7 Вибір схем технологічного процесу.....	30
1.8 Опис технологічних операцій.....	34
1.9 Розрахунок матеріального балансу	37
1.10 Вибір та розрахунок кількості обладнання	46
1.10.1 Обладнання для тонкого подрібнення	46
1.10.2 Обладнання для змішування та гомогенізації.....	47

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Зайцев В.П.				ЗМІСТ		Літ.	Арк.
Перевірів	Наконечний С.О							4
Рецензент	Іващенко Є.В.							115
Н. Контр	Бірюкович Л.О						НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21	
Затвердив	Богомол Ю. І.							

1.10.3 Гранулятор YK-160 Granulator	49
1.10.4 Електроерозійний верстат Sodick AQ325L.....	50
1.10.5 Установка фінішної обробки OTEC CF Series	48
1.10.6 НРНТ-прес Hyumen Advanced Materials Cubic Press.....	49
1.10.7 Програмований логічний контролер Siemens	55
1.10.8 Система збору даних NI CompactDAQ	56
1.10.9 Датчики тиску Omega PX409.....	57
1.10.10 Датчики вібрації Brüel & Kjær 4524.....	58
1.10.11 Робоча станція Dell Precision 5860	59
1.10.12 Цифровий мікроскоп Keyence VHX-7000	57
1.10.13 Сушильна шафа Binder FDL 115	59
1.10.14 Вакуумна піч Centorr Vacuum Industries Series 3000.....	61
1.10.15 Гідравлічний лабораторний прес Fontijne LabTop 300	62
1.10.16 Спеціалізована гідравлічна станція ZZSM.....	64
2 БУДІВЕЛЬНИЙ РОЗДІЛ	68
2.1 Компонування виробничої дільниці	68
2.2 Розрахунок виробничих площ	69
2.3 Розрахунок складських приміщень.....	67
3 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ	72
3.1 Конструювання реакційної комірки.....	69
3.2 Проектування прес-форми для холодного пресування заготовок	69
4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ	73
4.1 Загальна характеристика виробничої дільниці	73
4.2 Аналіз параметрів мікроклімату.....	77
4.3 Аналіз виробничого освітлення.....	79

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

4.4 Шум та вібрація.....	80
4.5 Аналіз загазованості та запиленості.....	81
4.6 Електробезпека.....	83
4.7 Засоби індивідуального захисту працівників.....	84
4.8 Пожежна безпека.....	86
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	89
5.1 Розрахунок чисельності виробничих робітників.....	89
5.2 Визначення фондів заробітної плати.....	92
5.3 Розрахунок продуктивності праці.....	97
5.4. Розрахунок капітальний вкладень	98
5.5 Визначення планової собівартості одиниці продукції	104
5.6. Розрахунок показників економічної ефективності.....	106
ВИСНОВКИ.....	110
CONCLUSIONS	111
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	112

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Сучасне машинобудування потребує ефективного оброблення надміцних конструкційних матеріалів, що зумовлює широке використання надтвердих матеріалів (НТМ). Ці наукомісткі продукти є важливою складовою сучасного інструментального виробництва завдяки високій твердості, хімічній інертності та теплопровідності. Одним із найбільш ефективних інструментальних матеріалів для чистової обробки загартованих сталей і чавунів є полікристалічний кубічний нітрид бору (РсВN) групи ВL із керамічною зв'язкою, який зберігає різальні властивості при температурах до від 1200 °С до 1300 °С [1], [2].

Подальший розвиток галузі пов'язаний зі створенням наноармованих композитів із підвищеними експлуатаційними характеристиками. Використання наноструктурних компонентів під час термобаричного спікання дозволяє формувати бар'єри для поширення мікротріщин, що підвищує надійність інструменту групи ВL. Водночас ефективність таких матеріалів залежить від точності керування технологічним процесом, що потребує впровадження інтелектуальних систем контролю [3], [4].

Метою дипломного проекту є розроблення інтелектуальної технологічної лінії з виробництва надтвердих різальних пластин марки ВN100 із використанням систем прогнозування сил різання та технології цифрових двійників для стабілізації якості продукції й зниження виробничого браку. Результати проекту можуть бути використані в авіаційній та оборонній промисловості для заміни шліфування високопродуктивним чистовим точінням загартованих деталей [5].

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Зайцев В.П.				ВСТУП	Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевірів	Наконечний С.О.						7	115	
Рецензент	Іващенко Є.В.					НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21			
Н. Контр	Бірюкович Л.О.								
Затвердив	Богомол Ю. І.								

1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Вибір матеріалу

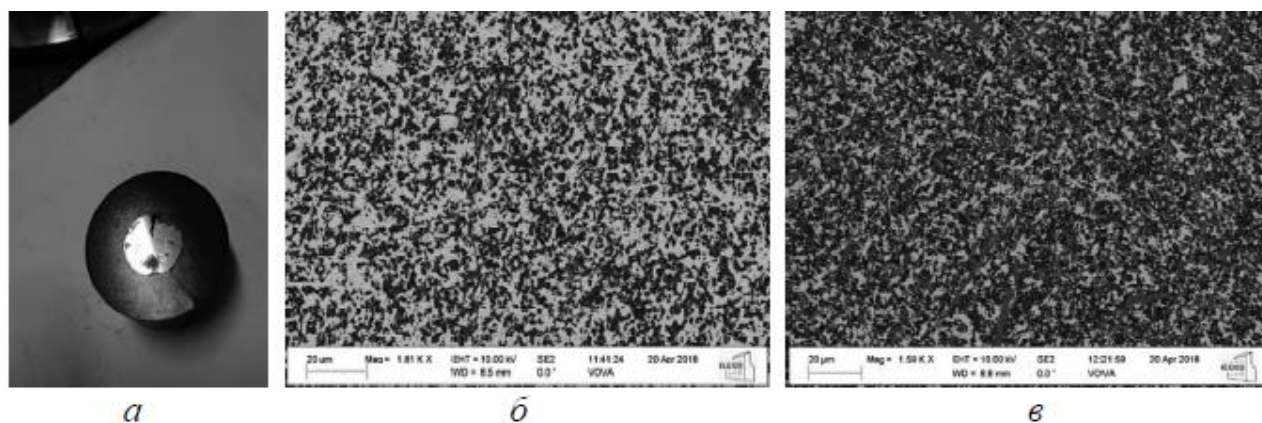
У сучасному машинобудуванні при фінішній обробці загартованих сталей та жароміцних сплавів найвищу ефективність демонструють інструменти з полікристалічного кубічного нітриду бору (PcBN). Як зазначає В. І. Лавріненко [1], цей матеріал поступається алмазу за твердістю, проте володіє значно вищою термічною стабільністю та винятковою хімічною інертністю до сплавів на основі заліза. Застосування PcBN забезпечує високу точність та якість обробленої поверхні, що дозволяє розглядати його як основну високопродуктивну альтернативу операціям шліфування [6].

Відповідно до міжнародного стандарту ISO 513:2012 [7], композити на основі cBN за вмістом нітриду бору та типом зв'язки поділяються на дві основні групи: BH (high-cBN) та BL (low-cBN). Для розроблюваних різальних пластин марки BN100 обрано композит групи BL, який містить від 45 об. % до 65 об. % cBN у керамічній матриці. Згідно з дослідженнями А. О. Чумака [8], саме інструменти групи BL із керамічною зв'язкою характеризуються мінімальною інтенсивністю зношування при чистовому безперервному точінні загартованих сталей.

Головною проблемою матеріалів групи BL є їхня відносно низька тріщиностійкість (від $2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ до $5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), що може призводити до передчасного руйнування різальної кромки. Для усунення цього недоліку в матеріалі BN100 застосовано технологію армування керамічної матриці мікрОВОлокнами Al_2O_3 . Використання цього методу зміцнення забезпечує формування бар'єрів для поширення мікротріщин, що сприяє значному підвищенню в'язкості руйнування та загальної експлуатаційної надійності інструменту [4].

					ФН21.2106.4203.003.01П		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Зайцев В.П.				ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	Літ.	Арк.
Перевірів	Наконечний С.О.						Акрушів
Рецензент	Іващенко Є.В.					8	115
Н. Контр	Бірюкович Л.О.					НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21	
Затвердив	Богомол Ю. І.						

Ефективність такого підходу підтверджується експериментальними даними, які демонструють, що неармовані зразки часто руйнуються від термічних напружень уже на етапі виготовлення, тоді як армовані волокнами структури зберігають цілісність (рис. 1.1).



а – зовнішній вигляд неармованого зразка, що руйнується при 2150 °С;

б – СЕМ-зображення мікроструктури неармованого зразка (1600 °С);

в – СЕМ-зображення мікроструктури армованого зразка (2150 °С)

Рисунок 1.1 – Вплив армування мікрОВОлокнами на цілісність та структуру
РсBN групи BL після НРНТ-спікання [4]

Вибір оксидних волокон для марки BN100 зумовлений їхньою високою хімічною стабільністю, що дозволяє не лише зміцнити композит, а й стабілізувати процес різання при високих температурах. Зазначений склад забезпечує необхідний комплекс експлуатаційних властивостей для прецизійної обробки деталей із твердістю від 45 HRC до 70 HRC [1].

Вибір кубічного нітриду бору як основної фази для інструментального матеріалу BN100 (60 % cBN, 25 % TiC, 15 % Al₂O₃) зумовлений його унікальними термодинамічними та фізико-механічними характеристиками порівняно з іншими НТМ. Згідно з науковим посібником В. І. Лавріненка [1], попри те, що алмаз залишається найтвердішим матеріалом, його застосування для обробки сталей обмежене через інтенсивну дифузію вуглецю в залізо при температурах понад 700 °С. Кубічний нітрид бору (КНБ), будучи штучним

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

аналогом алмазу, володіє значно вищою хімічною інертністю до сплавів на основі заліза та зберігає різальні властивості до від 1200 °С до 1300 °С. Для порівняльного аналізу доцільно розглянути основні характеристики інструментальних матеріалів, що наведені в таблиці 1.1 [9], [10].

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні властивості надтвердих матеріалів та кераміки

Характеристика	Алмаз (АС)	cBN (КНБ)	Кераміка (TiC)
Твердість, HV, ГПа	80–100	73–90	25–35
Термостійкість на повітрі, °С	700–800	1200–1300	1100–1200
Модуль пружності, ГПа	900–1000	710–750	450–550
Тріщиностійкість K_{Ic} , МПа· м ^{1/2}	3,4–5,0	4,5–5,0	3,0–5,0
Густина, г/см ³	3,52	3,45–3,49	4,92
Теплопровідність, Вт/(м · К)	500–2000	42–100	20–40
Хімічна інертність до сталей	Низька	Висока	Висока

Відповідно до класифікації ISO 513:2012 [7], для чистової обробки загартованих сталей обрано матеріали групи BL із вмістом фази cBN від 45 об. % до 65 об. %. Зниження концентрації кубічного нітриду бору на користь керамічної зв'язки (зокрема TiC) підвищує опір інструменту дифузійному зносу. Як зазначають В. І. Лавріненко [1] та А. О. Чумак [8], низька теплопровідність матриці TiC забезпечує локалізацію тепла в зоні стружкоутворення. Це зумовлює термічне розм'якшення загартованого шару металу, що полегшує лезове різання й захищає корпус пластини від перегріву [2], [5].

Особливе місце в структурі матеріалу марки BN100 посідає армувальна фаза у вигляді мікрОВОЛОКОН. Наноармування дозволяє вирішити ключову проблему композитів групи BL – їхню схильність до крихкого руйнування. Дослідження Ю. Ю. Румянцевої [4] доводять, що за умов НРНТ-спікання (тиск

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

7,7 ГПа, температура до 2150 °С) мікрОВОлокна виконують функцію механічних бар'єрів для поширення мікротріщин. Це забезпечує підвищення в'язкості руйнування композита та збереження цілісності його структури під навантаженням [3].

Для візуалізації ієрархії обраного матеріалу та визначення його місця серед інших надтвердих матеріалів доцільно розглянути схему, що базується на розробках ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України (рис. 1.2).

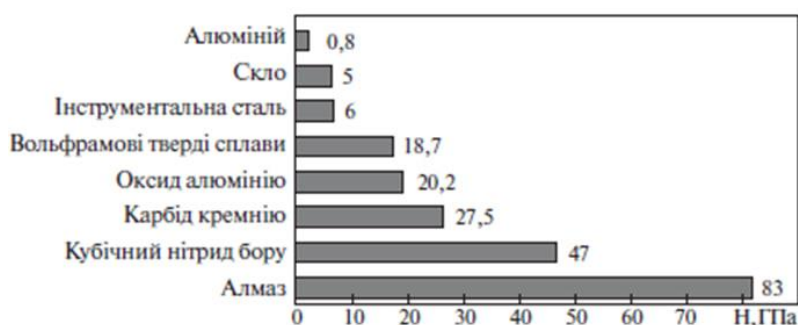


Рисунок 1.2 – Класифікація сучасних надтвердих інструментальних матеріалів за походженням та структурою [1]

Особливе місце в структуризації матеріалу марки BN100 посідає армувальна фаза у вигляді мікрОВОлокон Al_2O_3 . Наноармування дозволяє вирішити ключову проблему композитів групи BL – їхню схильність до крихкого руйнування [4]. Дослідження О. С. Осіпова та І. А. Петруші [3] доводять, що за умов НРНТ-спікання (тиск 7,7 ГПа, температура до 2150 °С) мікрОВОлокна виконують функцію механічних бар'єрів для поширення мікротріщин. Застосування цієї технології підвищує в'язкість руйнування та експлуатаційну надійність матеріалу [4].

Важливим аспектом стабільності композита є контроль фазових перетворень. Як зазначає В. І. Лавріненко [1], ключовим завданням є недопущення зворотного переходу кубічної модифікації (BN_{cf}) у графітоподібну (BN_G), що за нормального тиску починається при температурах понад 600 °С. Термодинамічне моделювання за допомогою програмного

комплексу ThermoCalc підтверджує, що при обраних параметрах термобаричного синтезу (7,7 ГПа) фаза cBN залишається стабільною, а в структурі додатково утворюються зміцнювальні фази боридів танталу, що підвищує зносостійкість інструменту [4].

Це обґрунтовує вибір розробленого складу, який характеризується оптимальним балансом між твердістю cBN, хімічною стійкістю TiC та тріщиностійкістю, яку надають оксидні волокна. Згідно з дослідженнями Дж. П. Давіма [5] та С. Кумара [8], такий комплекс властивостей забезпечує одержання прецизійної якості поверхні (R_a = від 0,04 мкм до 0,08 мкм.) при чистовому точінні сталей типів AISI D2 (ХВГ) та ШХ15.

1. 2 Аналіз матриць зв'язки

Зв'язувальна фаза в композитах на основі RcBN виконує функцію жорсткого міжзернового каркаса, який цементує кристали cBN та визначає фізико-механічні характеристики інструменту. Відповідно до ISO 513:2012 [7], RcBN-матеріали групи BL із керамічною матрицею є найефективнішими для прецизійної фінішної обробки загартованих сталей та жароміцних сплавів завдяки високій хімічній інертності зв'язки до залізовуглецевих систем [7], [8].

Керамічні матриці на основі TiC, TiN або TiCN виконують функцію теплового та хімічного бар'єра, що дозволяє інструменту зберігати різальні властивості при температурах у зоні контакту від 1200 °C до 1300 °C [1], [5]. Порівняльний аналіз свідчить, що матриці на основі TaN відзначаються структурною неоднорідністю, а композити з TiN схильні до мікросколювання кромки. Найменшу інтенсивність зношування та стабільну нанорозмірну шорсткість поверхні забезпечує матриця на основі TiC [8]. Для цього проєкту обрано композит марки BN100, де введення Al_2O_3 додатково підвищує термостабільність та опір окисненню [4].

Критичним недоліком керамоматричних систем групи BL залишається їхня висока крихкість: показник тріщиностійкості (K_{Ic}) становить лише

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

від $2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ до $5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ [4]. Для нейтралізації цієї проблеми в роботі застосовано технологію армування керамічної матриці тугоплавкими мікрОВОлокнами. Ступінь зміцнення композиту безпосередньо залежить від морфології введених волокон, зокрема відношення їхньої довжини до діаметра (L/d). На рисунку 1.3 наведено зовнішній вигляд вихідних мікрОВОлокон SiC та Al_2O_3 перед їх введенням до порошкової шихти [4].

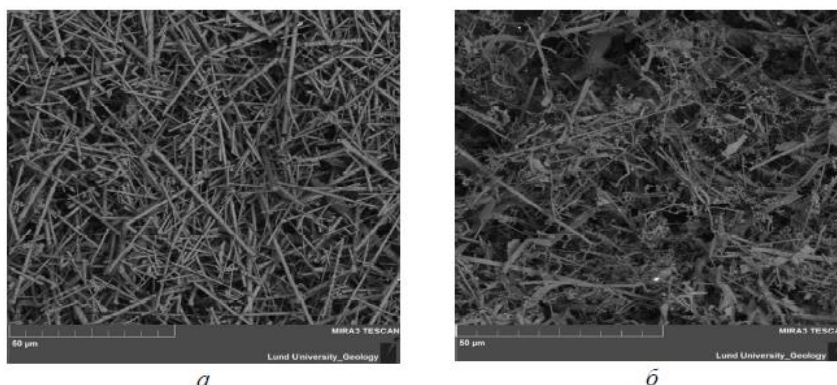
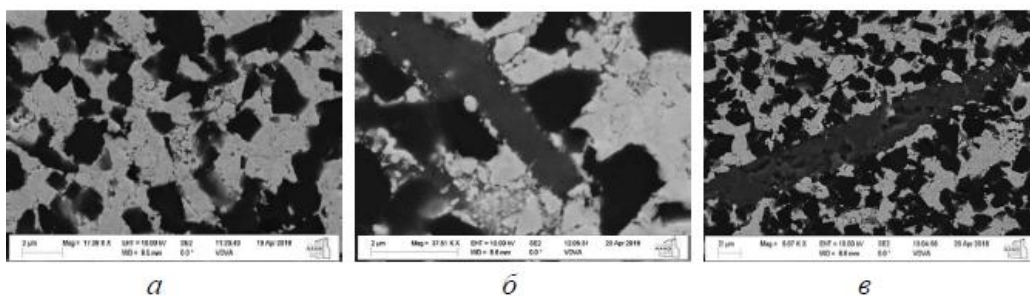


Рисунок 1.3 – Морфологія мікрОВОлокон SiC (а) та Al_2O_3 (б) до проведення змішування [4]

Експериментальні дані підтверджують, що введення армувальних волокон у кількості до 10 % об. запобігає інтенсивній рекристалізації матриці за екстремальних температур НРНТ-спікання (понад 2000°C), яка в неармованих структурах призводить до руйнування матеріалу. Аналіз мікроструктур (рис. 1.4) свідчить, що волокна виконують функцію механічних бар'єрів для поширення мікротріщин на інтерфейсах фаз. Це забезпечує збереження цілісності композиту та підвищення межі міцності на згин до рівня від 850 МПа до 900 МПа, що гарантує високу надійність різальної кромки при високопродуктивному точінні [4], [8].

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13



а – неармований зразок; *б* – зразок, армований мікрОВОлокнами SiC;

в – зразок, армований мікрОВОлокнами Al₂O₃ [4]

Рисунок 1.4 – Мікроструктура зразків, неармованого (а) та армованих мікрОВОлокнами SiC (б) і Al₂O₃ (в) (5 % за об'ємом), спечених при 2150 °С

Для обґрунтування обраного технологічного рішення проведено порівняльний аналіз фізико-механічних та експлуатаційних характеристик розробленого наноармованого складу марки BN100+ із традиційними композитами груп ВН та ВЛ за класифікацією ISO 513:2012 [2].

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика властивостей PсBN-композитів з різними типами матриць

Характеристика	Група ВН (Металева матриця: Co, Ni, Al)	Група ВЛ (Керамічна матриця: TiC, TiN, TaN)	Проект BN100+ (Армована матриця: TiC–Al ₂ O ₃ + нанОВОлокна)
1	2	3	4
Вміст сBN, об. %	70–95	40–65	60
Твердість (HV), ГПа	34–36	31–40	40,5
Межа міцності на згин (σ _{зг}), МПа	750–1200	600–650	850–900
Тріщиностійкість K _{IC} , МПа· м ^{1/2}	9,0–10,0	2,5–5,0	6,5–7,5 (прогноз)

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
Термостабільність, °С	до 800	1200–1300	1200–1300
Хімічна інертність до сталей	Низька (дифузійний знос)	Висока	Висока
Основна сфера застосування	Переривчасте різання, обробка чавунів	Фінішне точіння загартованих сталей	Високошвидкісна прецизійна обробка

Аналіз наведених даних свідчить, що металоматричні композити групи ВН мають обмежений ресурс при швидкостях різання понад 180 м/хв через термічне розм'якшення зв'язки та інтенсивну дифузію вуглецю в залізо заготовки [8]. Керамічні матриці групи ВЛ забезпечують необхідну хімічну стійкість, проте їхня висока крихкість призводить до викришування різальної кромки. Зокрема, застосування TaN-зв'язки відзначається структурною неоднорідністю, що вдвічі підвищує інтенсивність зношування інструменту порівняно з іншими марками цієї групи [8].

Запропонований у проєкту склад BN100+ поєднує переваги обох технологічних груп. Матриця на основі TiC мінімізує адгезійну взаємодію та забезпечує формування стабільної нанорозмірної шорсткості. Одночасно з цим наноармування підвищує межу міцності на згин до від 850 МПа до 900 МПа [4], [5], зумовлюючи трикратне зниження інтенсивності дифузійного зношування порівняно з композитами групи ВН [8].

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.3 Вибір і обґрунтування технологічного процесу

1.3.1 Метод прямого фазового перетворення

Метод безпосередньої консолідації гексагонального нітриду бору (hBN) у кубічну модифікацію (cBN) реалізується без використання зв'язувальних фаз чи каталізаторів [1], [3]. Отриманий беззв'язковий PcBN характеризується однорідною структурою з надміцними міжзерновими ковалентними зв'язками, що забезпечує стабільність різальної кромки при екстремальних теплових навантаженнях.

Головним чинником впливу на повноту перетворення та щільність спеченого тіла є рівень тиску. Для синтезу необхідне стабільне підтримання тиску в діапазоні від 10 ГПа до 12 ГПа [3], [10]. Підвищення параметрів понад 12 ГПа є технічно недоцільним через критичне зниження ресурсу апаратів надвисокого тиску. При цьому підвищення чистоти вихідної сировини (hBN) зумовлює потребу в зростанні температури для ініціації фазового переходу. Процес здійснюється як у закритих реакційних контейнерах із порошку, так і шляхом консолідації попередньо сформованих заготовок [1], [4].

Дисперсність вихідного порошку hBN безпосередньо впливає на в'язкості руйнування: використання дрібнозернистих фракцій забезпечує формування структури з вищим опором розвитку тріщин [1], [4]. Проте через відсутність пластичних фаз, що демпфують внутрішні напруження, сумарна крихкість таких виробів залишається найвищою серед усіх груп PcBN.

Найбільш відповідальною операцією технології є витримка при максимальних р–Т параметрах (де р – тиск, Т – температура) для забезпечення повного фазового переходу без залишків графітоподібної фази. Оскільки у беззв'язкових матеріалах відсутня електропровідна фаза (наприклад, TiC), подальша обробка спечених заготовок не може здійснюватися методом електроерозійної обробки (EDM). Це зумовлює потребу в застосуванні дороговартісного алмазного шліфування або лазерного різання [10], [19].

Вироби, отримані цим методом, відзначаються екстремальною твердістю

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

(від 55 ГПа до 60 ГПа) та найвищою термічною стійкістю, але мають низьку міцність на згин. Їх доцільно використовувати як інструмент для надточного чистового точіння загартованих деталей у стабільних режимах різання без ударних навантажень [8].



Рисунок 1.5 – Технологічна схема отримання надтвердих матеріалів методом прямого фазового перетворення hBN → cBN

1.3.2 Метод реакційного спікання

Метод реакційного спікання базується на формуванні зміцнювальної керамічної матриці безпосередньо під час термобаричного оброблення [3], [10]. Процес реалізується шляхом введення до вихідної шихти активних металевих компонентів (Ti, Al), які вступають у хімічну взаємодію з азотом та бором кристалічної ґратки cBN. У результаті забезпечується утворення нових реакційних сполук – нітриду титану (TiN), дибориду титану (TiB₂) та нітриду алюмінію (AlN), які виконують функцію зв'язувальної фази в місцях контакту зерен.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Головною перевагою цього методу є висока адгезійна міцність між кристалами надтвердої фази та новоутвореною зв'язкою завдяки ідеальному змочуванню поверхні cBN під час реакції. Одержані матеріали відзначаються підвищеною теплопровідністю та стійкістю до циклічних теплових навантажень. Технологічні параметри процесу становлять: тиск від 5,5 ГПа до 7,7 ГПа, температура від 1400 °C до 1650 °C [4].

Проте метод реакційного спікання має обмеження через нерівномірність прогріву реакційної комірки великого об'єму, що зумовлює структурну неоднорідність композиту. Неконтрольований розподіл реакційних фаз та ризик збереження залишкових металевих компонентів знижують твердість різальної кромки. Крім того, наявність температурних градієнтів у зонах інтенсивного тепловиділення при екзотермічних реакціях може спровокувати термічну деградацію армувальних нановолокон [4], [8].

Основним завданням процесу є прецизійне дозування металевих добавок, оскільки їхній надлишок формує «м'які» прошарки, а нестача – збільшує пористість. Вироби володіють хорошою в'язкістю руйнування, але мають нестабільні властивості від партії до партії. Вони доцільні для чорнової та напівчистої обробки чавунів в умовах термічних ударів, проте поступаються матеріалам із попередньо синтезованою матрицею при фінішних операціях [8].



Рисунок 1.6 – Технологічна схема виготовлення PcBN методом реакційного спікання

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

1.3.3 Метод спікання з попередньо синтезованою матрицею

Метод високотемпературного високого тиску (НРНТ) консолідації шихти із попередньо підготовленими компонентами матриці забезпечує найвищу технологічну керованість у серійному виробництві композитів марки BN100+. На відміну від реакційного спікання, ця технологія передбачає використання фазово чистих тугоплавких сполук, що дозволяє прецизійно контролювати стехіометричний склад зв'язки до початку термічної обробки [2]. Вибір керамічної системи на основі TiC зумовлений її високою твердістю та здатністю забезпечувати необхідну електропровідність композиту для подальшого контурного вирізання пластин геометричної форми SNGN 120408 методом EDM-різання [1].

Для подолання підвищеної крихкості композитів групи BL у структуру впроваджено наноармування волокнами Si_3N_4 . Спектроскопічні дослідження підтвердили, що ці наноструктури виконують функцію механічних бар'єрів, які блокують поширення мікротріщин на інтерфейсах фаз [3], [4]. Це підвищує межу міцності на згин до від 850 МПа до 900 МПа при збереженні твердості на рівні 40 ГПа. Процес реалізується в апаратах високого тиску під дією термобаричних параметрів: тиск від 5 ГПа до 8 ГПа, температура від 1400 °C до 1650 °C [3], [4].

Основним завданням операції є контроль термобаричних полів у реакційній комірці. Для мінімізації виробничого браку та запобігання деградації нановолокон процес спікання контролюється цифровим двійником (DT1) на базі програмного забезпечення AdvantEdge, яке в реальному часі моделює теплові градієнти. Це забезпечує формування гомогенної структури PсBN на твердосплавній підкладці WC-Co.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19



Рисунок 1.7 – Технологічна схема виготовлення інтелектуального інструменту марки BN100+ методом спікання з попередньо синтезованою матрицею

Фінальна підготовка різальної кромки методом VMAM-обробки у поєднанні з прогностичним моніторингом зносу через другий цифровий двійник (DT2) підвищує експлуатаційну надійність інструменту у від 2 до 8 разів, порівняно з традиційними аналогами [19]. Виготовлені за цією технологією пластини поєднують високу твердість, в'язкість руйнування та хімічну інертність, що дозволяє ефективно використовувати їх як стабільну заміну шліфуванню при чистовому точінні загартованих деталей [8].

1.4 Впровадження цифрових двійників

Сучасний комплекс виробництва армованих PcBN-пластин базується на використанні динамічних віртуальних моделей для стабілізації якісних показників продукції та мінімізації браку. Цифровий двійник у цьому проєкті поєднує дані фізичного рівня з результатами імітаційного моделювання для

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимізації життєвого циклу інструменту марки BN100+. Дворівнева архітектура розроблюваної системи охоплює етап НРНТ-синтезу композиту й стадію його подальшої експлуатації (рис. 1.8).

Перший рівень цифрового супроводу (DT1) призначений для прецизійного моніторингу процесів у реакційній комірці апарата високого тиску типу «Belt». Застосування спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє проводити термомеханічний аналізу розподілу температурних полів та градієнтів тиску.

Це забезпечує запобігання термічній деградації армувальних нановолокон нітриду кремнію при екстремальних параметрах спікання. Система керування реалізована на базі програмованих логічних контролерів (PLC) та модулів збору даних (DAQ), що синхронізують сигнали лазерних пірометрів та датчиків тиску для формування цифрової моделі процесу в реальному часі [3].

Другий рівень системи (DT2) виконує функцію прогностичного моніторингу зношування інструменту під час його експлуатації. В основі алгоритмічного забезпечення лежить розширений фільтр Калмана, який інтегрує сигнали від трикомпонентних динамометрів та акселерометрів. Система здійснює зіставлення діючих сил різання з віртуальною моделлю деградації PcBN-шару, що дозволяє прогнозувати лінійне зношування задньої поверхні інструменту з максимальною похибкою до 0,038 мм. Обробка масивів даних здійснюється на базі периферійних модулів штучного інтелекту та інженерних станцій, що гарантує стабільну роботу інструменту в умовах інтенсивних термобаричних навантажень.

Застосування запропонованого цифрового супроводу забезпечує зниження рівня виробничого браку з 10 % до 3 % та гарантує стабільний ресурс експлуатації пластин при прецизійній обробки загартованих сталей [8].

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

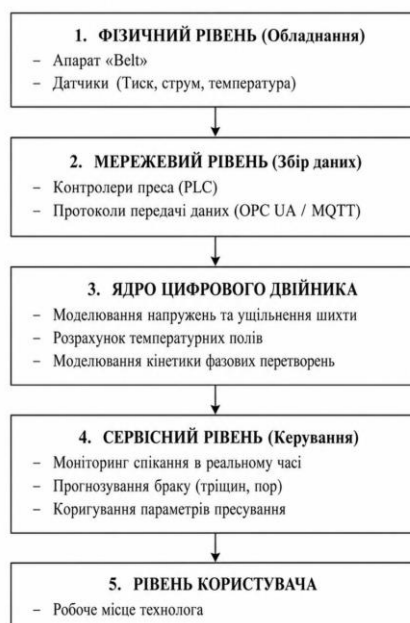


Рисунок 1.8 – Блок-схема архітектури системи цифрових двійників виробництва PcBN-інструменту

1.5 Обґрунтування асортименту продукції

Асортимент продукції, що розробляється в цьому проєкті, базується на аналізі потреб машинобудування у високоефективному інструменті для фінішної лезової обробки загартованих сталей (Hard Turning). Перехід від традиційного шліфування деталей до чистового точіння інструментами з PcBN зумовлений прагненням підвищити продуктивність процесу та вилучити витрати на утилізацію мастильно-охолоджувальних рідин.

Основним виробом обрано непереточувані змінні різальні пластини, які забезпечують прецизійну точність та якість поверхні деталей підшипникової та автомобільної промисловості. Вибір геометрії та типорозміру інструменту здійснено відповідно до міжнародного стандарту ISO 1832:2017 [9]. Основним типом продукції є квадратна пластина марки BN100+ форми SNGN 120408, призначена для чистової обробки сталей твердістю від 55 HRC до 65 HRC. Використання цієї форми забезпечує наявність восьми робочих вершин, що підвищує економічну ефективність інструменту.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Позначення пластини за стандартом ISO визначає такі характеристики:

- форма пластини – квадратна (S);
- задній кут – 0° (N);
- клас точності – прецизійний (G);
- тип кріплення – без отвору та стружколомів (N), що є оптимальним для крихких надтвердих матеріалів.

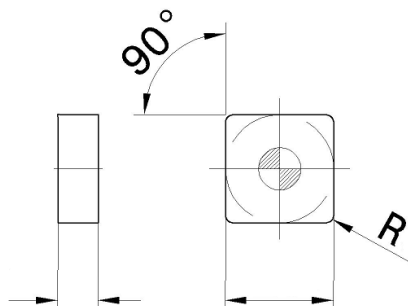


Рисунок 1.9 – Схема геометричних параметрів непереточуваної різальної пластини SNGN 120408 [9]

Типорозмір 120408 визначає довжину різальної кромки 12,7 мм, товщину 4,76 мм та радіус при вершині 0,8 мм. Таке поєднання геометричних параметрів дозволяє одержувати стабільну шорсткість поверхні (R_a = від 0,23 мкм до 0,32 мкм) при чистових режимах різання. Основними технічними вимогами до пластин є забезпечення твердості PсBN-шару не менше 40 ГПа та стабільної мікрогеометрії кромки. Завдяки використанню VMAM-обробки радіус заокруглення кромки (ρ) становить від 30 мкм до 50 мкм, що мінімізує концентрацію напружень та у від 2 до 8 разів. підвищує експлуатаційну надійність інструменту порівняно зі стандартними аналогами [19].

Пластини цього асортименту оптимізовані для «сухого» точіння при швидкостях різання від 180 м/хв до 250 м/хв. Завдяки наноармуванню керамічної матриці вони демонструють у 3 рази нижчу інтенсивність дифузійного та адгезійного зношування порівняно з композитами групи ВН при обробці сталей типу ШХ15 та ХВГ [20].

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

1.6 Характеристика сировини

Якість вихідної сировини є визначальним фактором для формування бездефектної структури PсBN-композиту та забезпечення стабільного ресурсу роботи різальної кромки в умовах екстремальних термомеханічних навантажень. Для виробництва армованих пластин марки BN100 застосовується комбінована модель постачання, що поєднує закупівлю високотехнологічних компонентів із власним синтезом керамічної зв'язки.

Таблиця 1.3 – Технічні умови на сировину та готову продукцію

Сировина	Технічна характеристика та показники	Стандарт або ТУ
Порошок cBN	Зернистість 1–2 мкм, вміст основної фази > 98%	ДСТУ 3292-95 [11]
Порошок Al ₂ O ₃	Чистота > 99,5%, питома густина 3,8 г/см ³	ДСТУ 4389:2005 [12]
Сировина	Технічна характеристика та показники	Стандарт або ТУ
Нановолокна S ₃ N ₄	Діаметр 0,5–2 мкм, армуюча здатність (L/d > 20)	ТУ постачальника
TiC	Фазово чистий, електропровідний, субмікронний	ТУ 6-09-492-75[13]

1.6.1 Закуповувані компоненти

Основним компонентом шихти є порошок cBN субмікронної фракції з розміром зерен від 1 мкм до 2 мкм. З огляду на високу складність НРНТ-синтезу, потребу в спеціалізованих пресах із тиском від 5 ГПа до 8 ГПа та багатостадійність процесів хімічного очищення, організація власного виробництва cBN у межах підприємства є економічно недоцільною. При річній потребі близько 593 кг порошок cBN доцільно закуповувати у спеціалізованих виробників надтвердих матеріалів.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Порошок Al_2O_3 , що вводиться до складу керамічної матриці як термічний бар'єр, також доцільно закуповувати в готовому вигляді. Річна потреба в цьому компоненті становить приблизно 148 кг, а його низька ринкова вартість за умов масового промислового виробництва робить власний синтез недоцільним.

Надійним постачальником такої сировини є Запорізький абразивний комбінат, продукція якого відповідає вимогам щодо чистоти та дисперсності порошків для технічної кераміки.

Для наноармування застосовуються нановолокна, які забезпечують зниження інтенсивності зносу задньої поверхні інструменту та блокують поширення мікротріщин. Враховуючи складність їхнього термохімічного синтезу при температурах від $1530\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносно малу річну потребу, їх закупівля в готовому стані є виправданою. Крім того, закупівлі підлягають хімічні прекурсори для синтезу матриці (діоксид титану рутильної форми та вуглець), а також допоміжні технологічні матеріали. До них належать бензин, який використовується як розчинник для формування зв'язки із синтетичного каучуку, та ізопропіловий спирт, застосування якого обмежене виключно стадією змочування та ультразвукової дегломерації нановолокон.

1.6.2 Власне виробництво

На відміну від надтвердої фази, виробництво TiC , який є основним матричним матеріалом композитів групи VL, передбачено безпосередньо на проєктованій ділянці. Отримання TiC здійснюється методом карботермічного синтезу суміші TiO_2 та вуглецю у вакуумній печі при температурі $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Власне виробництво цього компонента при річній потребі близько 247 кг є стратегічно та фінансово обґрунтованим рішенням.

Економічна та технологічна вигода власного виробництва карбіду титану зумовлена такими чинниками:

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

– зниження собівартості: витрати на власний синтез TiC є суттєво нижчими за ринкову ціну прецизійних керамічних порошків, що зменшує загальний бюджет на сировину;

– контроль фазової чистоти: процес дозволяє отримувати стехіометрично чистий продукт без надлишку вільного вуглецю, що є критичним для запобігання утворенню макротріщин та неоднорідностей у структурі PcBN-шару;

– регулювання дисперсності: технологічний ланцюг передбачає подрібнення синтезованого продукту в планетарному кульовому млині Retsch PM300, що гарантує отримання дрібнодисперсної фракції, необхідної для формування щільного міжзернового каркаса.

Обрана модель забезпечення сировиною дозволяє оптимізувати річні витрати на матеріали при одночасному забезпеченні прецизійної якості та стабільності характеристик інструменту марки BN100.

1.7 Вибір схем технологічного процесу

Узагальнена послідовність операцій виготовлення інструменту марки BN100+ наведена на рисунку 1.10, де відображено інтеграцію закупленої сировини та власного синтезу карбіду титану в єдиний виробничий ланцюг. Основним виробом проєкту є непереточувані квадратні пластини типу SNGN 120408, призначені для прецизійної обробки загартованих сталей твердістю від 55 HRC до 65 HRC. Вибір складу композиту та його армування нановолокнами Si_3N_4 дозволяє досягти твердості 40 ГПа та підвищити межу міцності на згин до від 850 МПа до 900 МПа, що забезпечує стабільність кромки при екстремальних температурах у зоні різання.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

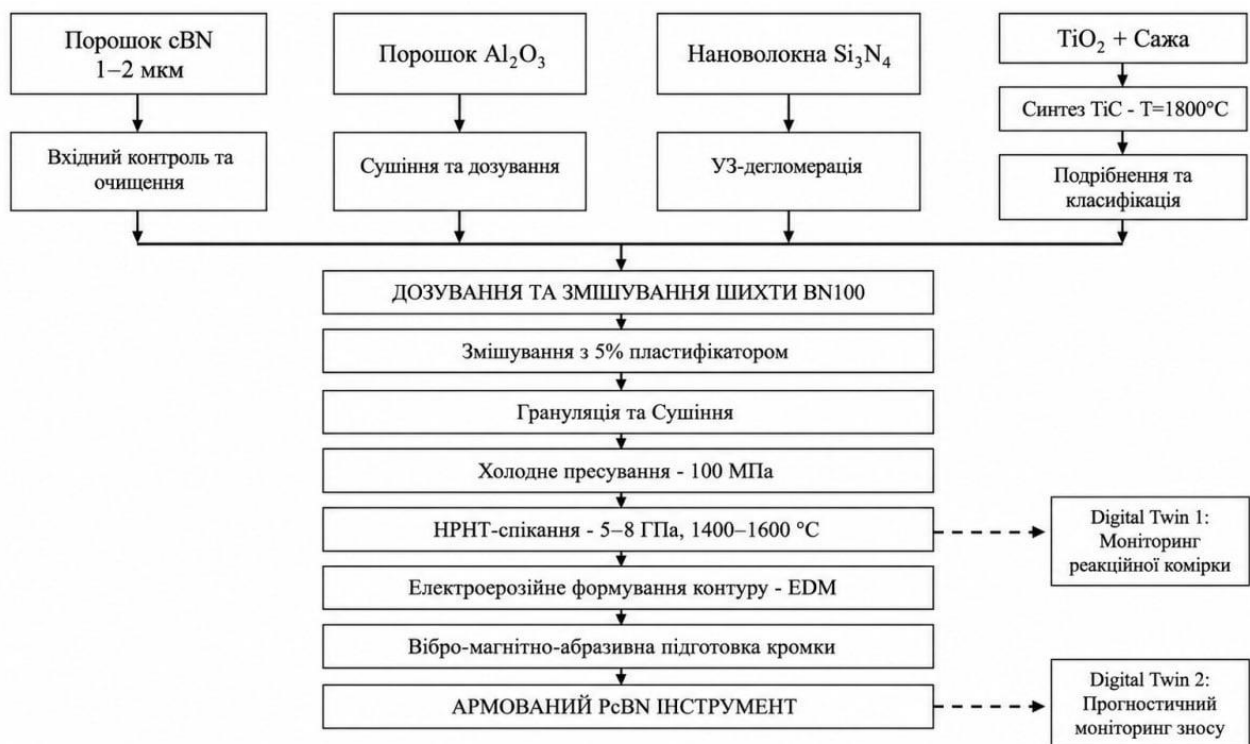


Рисунок 1.10 – Узагальнена технологічна схема виробництва інструменту на основі нітриду бору

Економічна модель передбачає закупівлю порошку cBN зернистістю від 1 мкм до 2 мкм, оксиду алюмінію та готових нановолокон Si_3N_4 , тоді як єдиний компонент керамічної зв'язки – карбід титану, виготовляється безпосередньо на підприємстві. Технологія отримання TiC, наведена на рисунку 1.11, базується на карботермічному синтезі суміші TiO_2 та сажі у вакуумній печі при температурі 1800 °C. Власне виробництво цього компонента дозволяє знизити собівартість інструменту та гарантувати високу фазову чистоту матриці, що критично для формування міцних адгезійних зв'язків під час подальшого спікання.

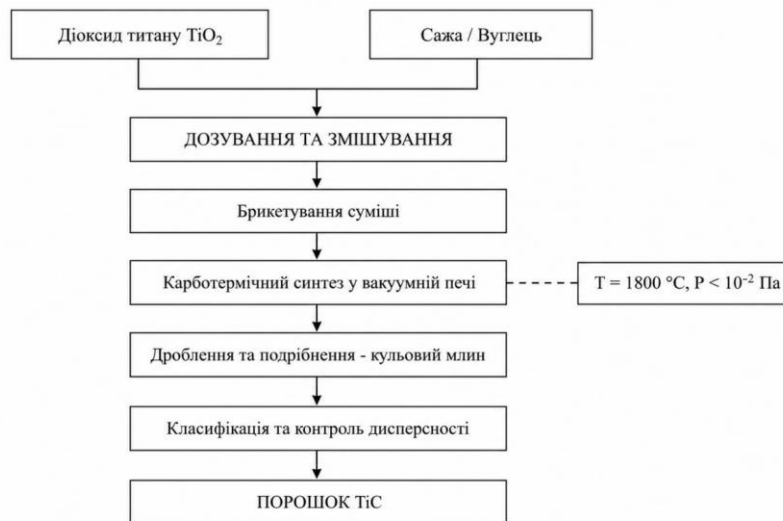


Рисунок 1.11 – Схема карботермічного синтезу карбиду титану

Процес підготовки армованої шихти, деталізований на рисунку 1.12, починається з прецизійного дозування та ультразвукової дегломерації нановолокон для їх рівномірного розподілу в об'ємі суміші. Для надання порошкам пресувальних властивостей, відповідно до теоретичних основ А. М. Степанчука [10], використовується розчин синтетичного каучуку в бензині (співвідношення розчинника до речовини 10 : 1), після чого суміш піддається грануляції в апаратах УК-160 для отримання гранул розміром від 0,5 мм до 3 мм. Така підготовка дозволяє досягти високої текучості шихти, стабілізувати щільність заготовок припресуванні та мінімізувати втрати дороговартісного матеріалу до 0,5 % [10].



Рисунок 1.12 – Схема підготовки армованої шихти

Фінальна консолідація композиту здійснюється в апаратах типу «Belt» за параметрів надвисокого тиску від 5 Гпа до 8 Гпа та температур від 1400 °С до 1600 °С (рис. 1.13). Особливістю цього етапу є використання першого цифрового двійника (DT1), який за допомогою ПЗ AdvantEdge моделює теплові поля всередині реакційної комірки, захищаючи наноструктури від термічної деградації. Спінання РсВN-шару безпосередньо на твердосплавній підкладці WC–Co формує бездефектну структуру, здатну витримувати робочі навантаження без сколювання різальної кромки.



Рисунок 1.13 – Технологічна схема термобаричного спікання

Механічна обробка спечених заготовок, наведена на рисунку 1.14, включає електроерозійне формування контуру на верстатах Sodick AQ325L (EDM-різання) та фінішну підготовку різальної кромки методом VMAM. Заміна традиційного шліфування на вібро-магнітно-абразивну обробку дозволяє усунути мікротріщини, сформувати прецизійний радіус округлення (від 30 мкм до 50 мкм) та досягти шорсткості $R_a = 0,04$ мкм. Такий підхід у поєднанні з прогностичним моніторингом зносу через другий цифровий двійник (DT2) дозволяє підвищити надійність інструменту у від 2 до 8 разів та знизити рівень виробничого браку з 10 % до 3 %.

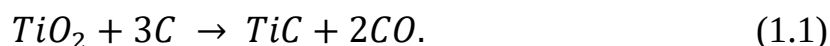


Рисунок 1.14 – Схема фінішної обробки різальних пластин

1.8 Опис технологічних операцій

Комплексний процес виготовлення інструменту марки BN100+ базується на поєднанні методів порошкової металургії, карботермічного синтезу та високотемпературної консолідації під інтегрованим цифровим супроводом.

Карботермічний синтез карбіду титану. Метою операції є отримання фазово чистої керамічної зв'язки, що забезпечує стабільні фізико-механічні властивості матриці композиту. Процес базується на ендотермічній реакції відновлення діоксиду титану вуглецем:



Синтез здійснюють у вакуумній печі при температурі 1800 °C та розрідженні нижче 1 Па. Власне виробництво цього компонента дозволяє гарантувати відсутність домішок кисню, що є критичним для формування міцних адгезійних зв'язків під час подальшого спікання. Отриманий продукт піддають тонкому подрібненню в планетарному млині Retsch PM300 до субмікронного стану для забезпечення високої однорідності РсВN-композиту.

Дозування компонентів. Метою операції є одержання прецизійної кількості порошків сBN, TiC, Al₂O₃ та нановолокон Si₃N₄ для точного

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

шихтування.

У промислових умовах використовують автоматичне вагове дозування на електронних вагах високого класу точності, оскільки цей метод не залежить від насипної щільності та текучості порошків. Розрахунок наважки сухої шихти виконують за формулою:

$$G = V \cdot \gamma_m \cdot (1 - \Pi) \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (1.2)$$

де V – об’єм готового виробу (см^3);

γ_m – розрахункова густина шихти в компактному стані, г/см^3 ;

Π – задана залишкова пористість (мінімальна для PcBN), %;

$K_1 K_2$ – коефіцієнти, що враховують незворотні втрати матеріалу на стадіях пресування та спікання.

Ультразвукова дегломерація та змішування. Операція забезпечує руйнування агрегатів армувальних наноструктур та формування гомогенної суміші компонентів. Нановолокна S_3N_4 піддають дегломерації в ультразвуковій ванні в середовищі ізопропілового спирту, оскільки він є необхідним для ефективного змочування наноструктур та їх стабільного розподілу в об’ємі суміші. Основне змішування виконують у барабанному змішувачі PerMix PDR, який працює в «м’якому» режимі для збереження структурної цілісності волокон. Для надання шихті пресувальних властивостей вводять розчин синтетичного каучуку в бензині, який виконує функцію тимчасової зв’язки; вибір бензину як розчинника зумовлений технологічною необхідністю формування якісного адсорбційного прошарку навколо частинок cBN та TiC без ризику окиснення активних поверхонь.

Сушіння шихти. Операція призначена для видалення надлишкового розчинника перед грануляцією до досягнення технологічної вологості в межах від 10 % до 16 %. Процес проводять у сушильних шафах при температурі від 80 °C до 90 °C. Зниження температури суттєво уповільнює процес, тоді як її

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

перевищення понад 100 °C призводить до термічного розкладу пластифікатора та окиснення активних поверхонь порошків, що викликає виробничий брак.

Грануляція. Операція забезпечує підвищення текучості порошкової суміші та стабілізацію її насипної щільності. Шихту калібрують в апаратах УК-160 для отримання гранул розміром від 0,5 мм до 3 мм. Така підготовка забезпечує рівномірне заповнення матриці пресформи, стабілізує щільність заготовок при пресуванні та мінімізує втрати дороговартісного PсBN-матеріалу до 0,5 %.

Холодне пресування. Операція забезпечує отримання заготовок заданої форми з рівномірною щільністю по всьому об'ємі. Застосовують двостороннє холодне пресування в закритих сталевих пресформах при питомому тиску 100 МПа. Гідравлічний спосіб навантаження гарантує плавність ущільнення, що є критичним для крихких керамічних систем, та запобігає утворенню внутрішніх дефектів у таблетках PсBN.

НРНТ-спікання. Операція призначена для фінального формування мікроструктури та фазового складу композиту BN100+. Процес реалізують в апаратах високого тиску типу «Belt» за екстремальних термобаричних параметрів: тиск від 5 ГПа до 8 ГПа, температура від 1400 °C до 1600 °C. Спікання PсBN-шару проводять безпосередньо на твердосплавній підкладці WC–Co, що забезпечує високу адгезійну міцність міжфазних меж. Процес контролюється першим цифровим двійником (DT1), який моделює розподіл теплових полів у реакційній комірці, запобігаючи деградації армувальних нановолокон.

Електроерозійне формування контуру (EDM). Операція забезпечує формування прецизійної геометрії непереточуваних пластин SNGN 120408 із точністю до 0,01 мм. Через високу твердість спеченого матеріалу (40 ГПа) традиційна абразивна обробка є неефективною, тому застосовують дротове електроерозійне різання на верстатах Sodick AQ325L. Наявність у складі матриці електропровідного карбиду титану забезпечує стабільність електричних розрядів та високу якість поверхні зрізу.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Вібро-магнітно-абразивна обробка (VMAM). Операція призначена для фінішної підготовки різальної кромки та видалення дефектного шару після EDM-різання. Замість традиційного шліфування використовують енергію магнітного поля та алмазний абразив ASM 28/20, що дозволяє сформувати прецизійний радіус заокруглення кромки (від 30 мкм до 50 мкм) та досягти шорсткості $Ra = 0,04$ мкм. Це усуває концентратори напружень і підвищує експлуатаційну надійність інструменту у від 2 до 8 разів.

Контроль якості та інтелектуальний моніторинг. Операція передбачає атестацію готової продукції на відповідність вимогам стандартів ISO 1832:2017 та ISO 513:2012. Проводять 100 % контроль геометрії та вибірковий контроль твердості й мікроструктури. Всі виміряні параметри виробу вносять у цифровий паспорт, який використовується другим цифровим двійником (DT2) для прогностичного моніторингу зносу та оцінки залишкового ресурсу пластини в реальних умовах різання.

1.9 Розрахунок матеріального балансу

Матеріальний баланс є основним вихідним параметром для розрахунку необхідної кількості вихідних матеріалів, визначення потреби в технологічному обладнанні та розрахунку техніко-економічних показників проектного виробництва.

Матеріальний баланс являє собою систему показників і розрахунків, які характеризують джерела формування матеріальних ресурсів і напрями їх використання. Він є важливим інструментом забезпечення збалансованості натурально-речових пропорцій у виробництві. Разом з фінансовими балансами і балансами праці матеріальні баланси є основою системи економічних балансів та дають змогу найбільш точно визначити потребу в кожному виді матеріальних ресурсів і узгодити її з можливостями покриття.

Добова продукція цеху за сировиною визначається за формулою:

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$A = \frac{G}{n}, \quad (1.3)$$

де G – річний випуск продукції, який для даного проекту прийнято рівним 150000 шт./рік;

n – кількість робочих днів на рік.

Підсумувавши зворотні (а) і незворотні (б) втрати на окремих технологічних операціях, визначають загальні втрати $\Sigma(a + б)$ і загальні витяги η для кожної операції у відсотках за формулою:

$$\eta = 100 - (a + b). \quad (1.4)$$

Загальний витяг відносно вихідної сировини для n -ї операції (φ_n) визначають за формулою:

$$\varphi_n = \left(\frac{\eta_1}{100} \cdot \frac{\eta_2}{100} \dots \frac{\eta_n}{100} \right) \cdot 100, \quad (1.5)$$

де $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ – витяги відповідно на окремих технологічних операціях.

Втрати відносно вихідної сировини для кожної операції визначають за післяопераційними втратами та повним витягом відносно вихідної сировини за формулою:

$$\alpha_n (\beta_n) = \alpha_n (\beta_n) \cdot \frac{\varphi_{n-1}}{100}, \quad (1.6)$$

де $\alpha_n (\beta_n)$ – зворотні (незворотні) втрати відносно вихідної сировини на n -й операції.

Кількість днів, необхідних для ремонту обладнання неавтоматизованого виробництва, визначають на підставі графіка планово-попереджувального

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ремонту (таблиця 1.4), який складають за нормативними заводськими даними та з урахуванням досвіду роботи. На основі цих даних визначають баланс часу роботи обладнання, який наведений у таблиці 1.5.

Таблиця 1.4 – Графік планово-попереджувального ремонту обладнання.

Обладнання	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Усього
	Місяці				
	1–3	4–6	7–9	10–12	
1	2	3	4	5	6
Кульовий млин		$\frac{18}{6} \cdot \text{С}$		$\frac{18}{6} \cdot \text{С}$	12
Барабанний змішувач			$\frac{21}{4} \cdot \text{С}$		4
Гранулятор		$\frac{15}{2} \cdot \text{О}$			2
Сушильна шафа				$\frac{21}{4} \cdot \text{С}$	4
Вакуумна піч	$\frac{29}{4} \cdot \text{О}$			$\frac{1 - 3}{20} \cdot \text{К}$	24
Прес			$\frac{20}{8} \cdot \text{С}$	$\frac{1 - 5}{40} \cdot \text{К}$	48
Верстат (EDM)		$\frac{25}{8} \cdot \text{С}$		$\frac{5 - 8}{30} \cdot \text{К}$	38
Установка			$\frac{21}{6} \cdot \text{С}$		6
Контролер		$\frac{15}{2} \cdot \text{О}$			2
Система збору даних			$\frac{12}{4} \cdot \text{С}$		4
Датчики	$\frac{20}{1} \cdot \text{О}$		$\frac{15}{1} \cdot \text{О}$		4
Сенсори	$\frac{10}{1} \cdot \text{О}$		$\frac{05}{1} \cdot \text{О}$		4

Продовження таблиці 1.4

1	2	3	4	5	6
Робоча станція				$\frac{21}{6} \cdot C$	6
Мікроскоп	$\frac{12}{4} \cdot C$				4
Прес		$\frac{12}{4} \cdot C$		$\frac{12}{4} \cdot C$	8
Усього					170

Таблиця 1.5 – Баланс часу роботи дільниці на рік

Елементи балансу	Кількість днів
Календарна кількість днів	365
Час на планово-попередній ремонт	8
Загальнонаціональні свята	9
Вихідні дні	98
Неробочі дні	115
Робочі дні цеху	250

Для визначення витрат матеріалів знадобляться такі дані:

1. Річний випуск продукції цеху k – 150000 шт/рік (або 468,75 кг/рік при масі деталі 3,125 г).
2. Питома густина ρ – 4,07 г/см³. (розрахована адитивно для складу марки BN100 з урахуванням керамічної зв'язки TiC).
3. Площа пресування S – 1,61 см². Розрахована для квадратної пластини типорозміру 1204 (сторона 12,7 мм).
4. Об'єм деталі V – 0,768 см³. Визначений при товщині пластин 4,76 мм.
5. Маса 1 готової деталі m – 3,1245 г.
6. Визначимо масу матеріалу для однієї деталі G :

Для матеріалів групи BL (марка BN100) характерні високі незворотні

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

втрати при шліфуванні – до 3,5%. Враховуючи коефіцієнт втрат $K = 1,093$ та нульову пористість після НРНТ-спікання, розрахунок проводимо за формулою:

Визначимо кількість робочих днів цеху на рік, виходячи з його добової продуктивності за готовою продукцією:

Приймаємо кількість робочих днів $n = 250$ (згідно з графіком ППР та балансом часу роботи цеху).

$$G = \rho V(1 - P) \cdot K = 4,07 \cdot 0,768 \cdot 1 \cdot 1,093 = 3,417 \text{ г} = 0,003417 \text{ кг},$$

$$A = \frac{k_{\text{мас}}}{n} = \frac{468,75 \text{ кг}}{250} = 2,34 \text{ кг/добу},$$

$$N_{\text{гот}} = \frac{150000}{250} \approx 600 \text{ шт/добу}.$$

Втрати на операціях виготовлення надтвердого різального інструменту на основі кубічного нітриду бору (PcBN), які передбачені у даному проекті, наведені на рисунку 1.15



Рисунок 1.15 – Витрати на операціях з виготовлення деталей

Врахуємо втрати шляхом виходу придатного ф для цього:

1. Визначемо прямий поопераційний витяг на кожній операції.

$$\eta_1 = 100 - (0,2 + 0) = 99,8;$$

$$\eta_2 = 100 - (0,2 + 0) = 99,8;$$

$$\eta_3 = 100 - (0,1 + 0,3) = 99,6;$$

$$\eta_4 = 100 - (0,5 + 0) = 99,5;$$

$$\eta_5 = 100 - (0,5 + 0,2) = 99,3;$$

$$\eta_6 = 100 - (0,3 + 0) = 99,7;$$

$$\eta_7 = 100 - (1,0 + 0) = 99,0;$$

$$\eta_8 = 100 - (3,5 + 0) = 96,5;$$

$$\eta_9 = 100 - (0 + 0) = 100.$$

2. Визначаємо загальний витяг на кожній операції ф відносно вихідного матеріалу:

$$\varphi_1 = \eta_1 = 99,98\%;$$

$$\varphi_2 = 99,98 \cdot 99,8/100 = 99,6\%;$$

$$\varphi_3 = 99,6 \cdot 99,6/100 = 99,2\%;$$

$$\varphi_4 = 99,2 \cdot 99,5/100 = 98,7\%;$$

$$\varphi_5 = 98,7 \cdot 99,3/100 = 98,0\%;$$

$$\varphi_6 = 98,0 \cdot 99,7/100 = 97,7\%;$$

$$\varphi_7 = 97,7 \cdot 99,0/100 = 96,7\%;$$

$$\varphi_8 = 96,7 \cdot 96,5/100 = 93,3\%;$$

$$\varphi_9 = 93,3 \cdot 100/100 = 93,3\%.$$

3. Визначаємо кількість сировини, яка має надійти на початок процесу в перший день. Для цього використовуємо формулу 2.6:

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$A_0 = \frac{A}{\varphi} \cdot 100, \quad (1.7)$$

$$A_0 = 3,75 \cdot 100/93,3 = 2,51 \text{ кг.}$$

4. Обчислюємо суму зворотних втрат і масу матеріалу, що надходить щоденно

Сума зворотних втрат становить:

- після сушки шихти – 0,3%;
- після формування – 0,2%;
- після грануляції – 0,5%;

Загальні зворотні втрати:

$$\sum q^a = 1\%,$$

При $A_0 = 1,59 \text{ кг/добу}$ отримаємо:

$$\sum q^a = 4,02 \cdot 0,01 = 0,0251 \text{ кг,}$$

$$B = A_0 - \sum q^a = 4,21 - 0,160 = 2,48 \text{ кг.}$$

Рух матеріалу по операціях:

На першу операцію:

надходить: 2,5121 кг;

виходить: $2,5121 - 0,0050 = 2,5071 \text{ кг}$

На другу операцію:

надходить: $2,5071 + 0,0075 \text{ (з оп. 3)} + 0,0126 \text{ (з оп. 4)} + 0,0050 \text{ (з оп. 5)}$
 $= 2,5322 \text{ кг;}$

виходить: $2,5322 - 0,0051 = 2,5271 \text{ кг}$

На третю операцію:

надходить: 2,5271 кг;

виходить: $2,5271 - 0,0025 - 0,0075 = 2,5171 \text{ кг}$ (зворотні втрати після сушки

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повертаються на стадію замішування)

На четверту операцію:

надходить: 2,5171 кг;

виходить: $2,5171 - 0 - 0,0126 = 2,5045$ кг (зворотні втрати після грануляції

повертаються на стадію замішування)

На п'яту операцію:

надходить: 2,5045 кг;

виходить: $2,5045 - 0,0125 - 0,0050 = 2,4870$ кг (зворотні втрати після

формування повертаються на стадію замішування)

На шосту операцію:

надходить: 2,4870 кг;

виходить: $2,4870 - 0,0075 = 2,4795$ кг

На сьому операцію:

надходить: 2,4795 кг;

виходить: $2,4795 - 0,0248 - 0 = 2,4547$ кг

На восьму операцію:

надходить: 2,4547 кг;

виходить: $2,4547 - 0,0859 = 2,3688$ кг

На дев'яту операцію:

надходить: 2,3688 кг;

виходить: $2,3688 - 0 - 0 = 2,3688$ кг

Одержані результати зведені до таблиці 1.6

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.10 Вибір та розрахунок кількості обладнання

1.10.1 Обладнання для тонкого подрібнення

На початковій стадії для отримання субмікронних порошків керамічної матриці і їх гомогенізації у рідкому органічному середовищі обрано планетарний млин Retsch PM 300 (рис. 1.16). Вибір зумовлений можливістю створення екстремально високих відцентрових сил, що забезпечує стабільну дисперсність шихти, необхідну для серійного випуску надтвердого інструменту.

Технічні характеристики Retsch PM 300:

- максимальна швидкість обертання: 800 об/хв;
- об'єм стаканів: від 12 до 500 мл;
- максимальний розмір завантаження: 2 x 220 мл;
- потужність двигуна: 1,1 кВт;
- габарити (Д/Ш/В), мм: 900 / 800 / 1200.



Рисунок 1.16 – кульовий млин Retsch PM300

Згідно з матеріальним балансом (табл. 1.6), добова потреба в подрібнених компонентах матриці становить $G_{\text{доб}} = 2,5121$ кг. При завантаженні 0,44 кг суміші (2 стакани по 220 мл) та тривалості циклу помелу год, годинна продуктивність млина складає:

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

$$P_m = \frac{V_{\text{зав}} \cdot \rho_{\text{нас}}}{t} = \frac{0,44 \cdot 1,0}{4} = 0,11 \text{ кг/год.}$$

Розрахункова кількість одиниць обладнання при добовому фонді часу год (2 зміни):

$$N_{\text{розр}} = \frac{G_{\text{доб}}}{P_m \cdot T_{\text{ф}}} = \frac{2,5121}{0,11 \cdot 16} = 1,4273.$$

Приймаємо 2 одиниці млинів Retsch PM 300 з коефіцієнтом завантаження $K_3 = 0,71$.

1.10.2 Обладнання для змішування та гомогенізації

Для сухого змішування компонентів армованої шихти марки BN100+ обрано барабанный змішувач PerMix PDR Drum Mixer (рис. 1.17). Це обладнання забезпечує «м'який» режим перемішування, що є критично важливим для збереження структурної цілісності армуючих нановолокон та запобігання їх механічному руйнуванню.

Принцип дії базується на обертанні змішувального барабана на чотирьох роликах під кутом, що змушує матеріал переміщуватися не лише вгору-вниз, а й ліворуч-праворуч. Це створює тривимірний потік, який забезпечує високу гомогенність суміші за декілька хвилин без утворення застійних зон.

Технічні характеристики PerMix PDR-50:

- робочий об'єм: 35 л;
- максимальне навантаження: 30 кг;
- частота обертів барабана: 30 об/хв;
- потужність двигуна: 0,55 кВт;
- габарити (Д/Ш/В), мм: 1800 / 1200 / 2200.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43



Рисунок 1.17 – барабанний змішувач PerMix PDR Drum Mixer

Згідно з матеріальним балансом, добова потреба в армованій шихті становить $G_{\text{доб}} = 2,5121$ кг. Для забезпечення високої однорідності розподілу нановолокон тривалість одного циклу змішування (включаючи завантаження та вивантаження) прийнята $t = 3$ год. Годинна продуктивність змішувача при роботі з добовою порцією шихти складає:

$$P_m = \frac{G_{\text{доб}}}{t} = \frac{2,5196}{3} = 0.8399 \text{ кг/год.}$$

Розрахункова кількість одиниць обладнання при добовому фонді часу год (2 зміни):

$$N_{\text{розр}} = \frac{G_{\text{доб}}}{P_m \cdot T_{\text{ф}}} = \frac{2,5196}{0.8399 \cdot 16} = 0,1875.$$

Оскільки об'єм завантаження однієї партії шихти (2,5121 кг) значно менший за максимальну вантажопідйомність апарата (30 кг), а «м'який» режим гомогенізації дозволяє проводити процес рідше:

Приймаємо 1 одиницю змішувача PerMix PDR-50 з коефіцієнтом завантаження $K_z = 0,188$.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

1.10.3 Гранулятор YK-160 Granulator

Для надання вологому прес-порошку необхідної текучості та стабільної насипної щільності шляхом отримання гранул фракції від 0,5 мм до 3 мм обрано осцилюючий гранулятор YK-160 (рис. 1.18). Процес грануляції здійснюється шляхом протирки шихти через сітку за допомогою хитного ротора, що мінімізує пилоутворення та забезпечує високий вихід придатної фракції.

Технічні характеристики YK-160:

- діаметр ротора: 160 мм;
- кут коливання ротора: 360°;
- швидкість ротора: 46 об/хв;
- місткість завантажувальної камери: 4,5 л;
- потужність: 2,2 кВт;
- габарити (Д/Ш/В), мм: 1260 / 850 / 1250.



Рисунок 1.18 – гранулятор YK-160 Granulator

Для гранулятора періодичної дії розрахунок ведеться через об'ємний облік завантаження добової партії шихти. Добова маса шихти становить кг. При середній насипній щільності зволоженої шихти $\rho_{\text{нас}} = 1,028$ кг/л, об'єм матеріалу, що надходить на операцію:

					ФН21.2106. 4203.003.01ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_{\text{доб}} = \frac{G_{\text{доб}}}{\rho_{\text{нас}}} = \frac{2,5045}{1,028} = 2,4363 \text{ л.}$$

Розрахункова кількість одиниць обладнання визначається відношенням об'єму шихти до робочої місткості камери гранулятора ($V_{\text{кам}} = 4,5 \text{ л}$) з урахуванням одного повного циклу завантаження на добу:

$$N_{\text{розр}} = \frac{V_{\text{доб}}}{V_{\text{кам}} \cdot K_z \cdot n_{\text{цикл}}} = \frac{2,4363}{4,5 \cdot 0,8 \cdot 1} = 0,6768,$$

де $K_z = 0,8$ – коефіцієнт заповнення камери;

$n_{\text{цикл}}$ – кількість завантажень (прийнято 1 цикл для всієї добової партії).

Приймаємо 1 гранулятори УК-160 з коефіцієнтом завантаження $K_z = 0,68$.

1.10.4 Електроерозійний верстат Sodick AQ325L

Через надвисоку твердість РсВN-шару (40 ГПа) формування прецизійного контуру квадратних пластин SNGN 120408 здійснюється методом дротового електроерозійного різання на верстатах Sodick AQ325L (рис. 1.19). Обладнання оснащене лінійними двигунами та системою керування LN2W, що дозволяє досягти шорсткості поверхні зрізу без дефектів, характерних для механічного шліфування.

Технічні характеристики Sodick AQ325L:

- максимальна швидкість різання: 250 мм²/хв;
- діаметр дроту (електрода): від 0,1мм до 0,3 мм;
- точність позиціонування: $\pm 0,002$ мм;
- максимальні розміри заготовки: 350 х 250 х 220 мм;
- споживана потужність: 12 кВА;
- габарити (Д/Ш/В), мм: 2300 / 2550 / 2150.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



Рисунок 1.19 – верстат Sodick AQ325L

Для EDM розрахунок ведеться через сумарну площу поверхні різання за добу. Периметр однієї пластини SNGN 120408 зі стороною 12,7 мм становить: $L = 12,7 \cdot 4 = 50,8$ мм. При товщині пластини $h = 4,76$ мм площа різання однієї одиниці:

$$S_{\text{вир}} = L \cdot h = 50,8 \cdot 4,76 = 241,8 \text{ мм}^2.$$

Загальна добова площа різання для 1200 пластин:

$$S_{\text{доб}} = S_{\text{вир}} \cdot Q_{\text{доб}} = 241,8 \cdot 600 = 290160 \text{ мм}^2.$$

Хоча максимальна швидкість верстата становить $250 \text{ мм}^2/\text{хв}$, при прецизійній обробці PсBN-композитів для забезпечення точності та якості поверхні ефективна швидкість різання приймається рівною $40 \text{ мм}^2/\text{хв}$ (з урахуванням пакетної обробки по від10 шт. до 15 шт). Годинна продуктивність одного верстата:

$$P_h = v_{\text{еф}} \cdot 60(\text{хв}) \cdot K_{\text{п}} = 40 \cdot 60 \cdot 1,2 = 2880 \text{ мм}^2/\text{год},$$

де $v_{\text{еф}}$ – коефіцієнт інтенсифікації за рахунок пакетного різання.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Розрахункова кількість верстатів при добовому фонді год (2 зміни):

$$N_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{доб}}}{P_h \cdot T_{\text{ф}}} = \frac{145080}{2880 \cdot 16} = 3,1484.$$

Приймаємо 4 верстатів Sodick AQ325L з коефіцієнтом завантаження $K_3 = 0,79$.

1.10.5 Установка фінішної обробки OTEC CF Series

Для реалізації методу вібро-магнітно-абразивної обробки (VMAM) та формування прецизійного радіуса заокруглення кромки (30–50 мкм) обрано установку серії OTEC CF (рис. 1.20). Обладнання використовує технологію дискового шліфування, де обробка відбувається у потоці абразивного середовища, що дозволяє досягти дзеркальної шорсткості $R_a 0,04$ мкм та усунути дефекти після EDM-різання.

Технічні характеристики OTEC CF 18:

- робочий об'єм контейнера: 18 л;
- швидкість обертання диска: до 500 об/хв;
- тип обробки: мокра/суха з магнітною сепарацією;
- споживана потужність: 4,5 кВт;
- габарити (Д/Ш/В), мм: 1500 / 1500 / 1800.



Рисунок 1.20 – OTEC CF установка фінішної обробки

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Добова продуктивність однієї установки розраховується на основі місткості завантаження та тривалості циклу обробки партії:

$$P_{\text{доб}} = \frac{T_{\text{ф}}}{t_{\text{цикл}}} \cdot n_{\text{парт}} = \frac{16}{0,75} \cdot 400 = 8533 \text{ шт/добу},$$

де $T_{\text{ф}}$ – добовий фонд робочого часу (16 год);

$t_{\text{цикл}}$ – тривалість повного технологічного циклу, що включає завантаження, обробку та промивку (0,75 год);

$n_{\text{парт}}$ – кількість виробів у разовій партії завантаження (прийнято 400 шт. для контейнера об'ємом 18 л).

Розрахункова кількість одиниць обладнання визначається за формулою:

$$N_{\text{розр}} = \frac{Q_{\text{доб}}}{P_{\text{доб}}} = \frac{600}{8533} = 0,0703,$$

де $Q_{\text{доб}}$ – задана добова програма випуску пластин (600 шт/добу).

Приймаємо 1 установку OTEC CF 18 з коефіцієнтом завантаження $K_z = 0,07$.

1.10.6 НРНТ-прес Hymen Advanced Materials Cubic Press

Для термобаричного спікання PсBN-шару на підкладці WC–Co обрано шестипуансонний гідравлічний прес Hymen Advanced Materials Cubic Press (рис. 1.21). Обладнання забезпечує створення та тривале підтримання екстремальних умов (тиск до 8 ГПа, температура до 2300 °С), що необхідно для формування бездефектної структури композиту марки BN100+.

Технічні характеристики Hymen Cubic Press:

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- максимальне зусилля: 60 000 кН;
- робочий тиск у камері: від 5 ГПа до 8 ГПа;
- точність підтримки тиску: $\pm 0,1$ МПа;
- споживана потужність: 45 кВт;
- габарити (Д/Ш/В), мм: 4000 / 3500 / 4500.



Рисунок 1.21 – НРНТ-прес Hymen Advanced Materials Cubic Press

Годинна продуктивність одного преса визначається кількістю виробів у реакційній комірці та тривалістю циклу:

$$P_{\text{год}} = \frac{n_{\text{зав}}}{t_{\text{цикл}}} = \frac{20}{1,5} = 13,33 \text{ шт/год},$$

де $n_{\text{зав}}$ – кількість пластин SNGN 120408 у багатомісній реакційній касеті (20 шт.);

$t_{\text{цикл}}$ – тривалість повного технологічного циклу, що включає завантаження, вихід на режим, витримку та охолодження (1,5 год).

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункова кількість одиниць обладнання для забезпечення темпу лінії:

$$N_{\text{розр}} = \frac{Q_{\text{доб}}}{P_{\text{доб}} \cdot T_{\text{ф}}} = \frac{600}{13,33 \cdot 16} = 2,8132,$$

де $Q_{\text{доб}}$ – задана добова програма випуску (600 шт/добу);

$T_{\text{ф}}$ – добовий фонд робочого часу при двозмінній роботі (16 год).

Приймаємо 3 одиниць пресів Numen Cubic Press з коефіцієнтом завантаження $K_z = 0,94$.

1.10.7 Програмований логічний контролер Siemens

Для інтелектуального керування циклами термобаричного спікання та синхронізації роботи периферійних систем обрано високопродуктивний ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500. Він забезпечує мінімальний час відгуку (60 нс) та підтримує протокол PROFINET для інтеграції в архітектуру цифрових двійників.

Технічні характеристики:

- робоча пам'ять: 150 КБ (код), 1 МБ (дані);
- інтерфейс: PROFINET (2 порти);
- напруга живлення: 24 В DC.



Рисунок 1.22 – логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1500

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Кількість контролерів визначається за кількістю автономних вузлів синтезу:

$$N_{\text{кнт}} = n_{\text{прес}} \cdot k_{\text{од}} = 3 \cdot 1 = 3,$$

де $n_{\text{прес}}$ – кількість НРНТ-пресів (3 шт.);

$k_{\text{од}}$ – кількість контролерів на один прес (1 шт.).

Для монтажу контролерів, модулів вводу-виводу та комутаційного обладнання передбачено використання промислових електротехнічних шаф керування. Шафа забезпечує захист обладнання від пилу, механічних пошкоджень та несанкціонованого доступу, а також створює умови для безпечної експлуатації системи автоматизації.

Для розміщення обладнання обрано промислову шафу типу Rittal VX SE з габаритами $2000 \times 800 \times 600$ мм та ступенем захисту IP55. Усередині шафи розміщуються контролер Siemens SIMATIC S7-1500, модулі розширення, блоки живлення, мережеве обладнання та комутаційна апаратура.

Приймаємо: 3 одиниці Siemens SIMATIC S7-1500 та 1 шафу керування Rittal VX SE.

1.10.8 Система збору даних NI CompactDAQ

Для високошвидкісної реєстрації сигналів від сенсорної мережі та їх передачі до обчислювального центру (DT1) обрано модульні системи NI CompactDAQ.

Технічні характеристики:

- кількість слотів шасі: 4;
- інтерфейс: USB 3.0 / Ethernet;
- частота опитування: до 1 МГц.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52



Рисунок 1.23 – Система збору даних NI CompactDAQ

Кожен прес потребує власної системи телеметрії:

$$N_{\text{сист}} = n_{\text{прес}} = 3 \cdot 1 = 3 \text{ шт.}$$

Приймаємо: 3 комплекти NI CompactDAQ.

1.10.9 Датчики тиску Omega PX409

Для безперервного прецизійного вимірювання тиску в гідравлічних контурах апаратів високого тиску обрано датчики серії Omega PX409 (рис. 1.24). Вони інтегруються в систему DT1 для контролю зусилля стиснення та виявлення відхилень у режимах НРНТ-спікання. Висока стабільність сигналу та захищеність від перевантажень дозволяють використовувати їх у важких умовах інструментального цеху.

Технічні характеристики:

- точність: 0,08 %;
- матеріал корпусу: нержавіюча сталь 316L;
- вихідний сигнал: від 0 В до 10 В або від 4 мА до 20 мА;
- робоча температура: до 120 °С.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53



Рисунок 1.24 – датчики Omega PX409

Кількість датчиків визначається кількістю точок контролю на кожен прес для моніторингу основного циліндра та допоміжних систем:

$$N_{\text{дт}} = n_{\text{прес}} \cdot n_{\text{сенс}} = 3 \cdot 3 = 9 \text{ шт.},$$

де $n_{\text{прес}}$ – кількість установлених пресів Cubic Press (3 шт.);

$n_{\text{сенс}}$ – кількість датчиків на один прес (прийнято 3 шт.).

Приймаємо: 9 одиниць Omega PX409.

1.10.10 Датчики вібрації Brüel & Kjær 4524

Для реалізації стратегії предиктивного обслуговування та моніторингу вібраційного фону насосних станцій високого тиску використовуються п'єзоелектричні акселерометри Brüel & Kjær 4524 (рис. 1.25). Аналіз вібросигналу дозволяє системі DT1 завчасно виявляти знос підшипників та кавітаційні процеси в гідравліці, запобігаючи аварійним зупинкам лінії.

Технічні характеристики:

- чутливість: 10 мВ/г;
- частотний діапазон: від 0,25 Гц до 18 000 Гц;
- маса: 4,8 г (мініатюрний корпус);

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

– тип монтажу: клейовий або на шпильку.



Рисунок 1.25 – Датчики вібрації Brüel & Kjær 4524

Кількість датчиків вібрації відповідає кількості основних агрегатів моніторингу:

$$N_{\text{дт}} = n_{\text{прес}} \cdot n_{\text{вібр}} = 3 \cdot 3 = 9 \text{ шт},$$

де $n_{\text{прес}}$ – кількість пресів (3 шт.);

$n_{\text{вібр}}$ – кількість точок встановлення акселерометрів на насосну установку одного преса (3 шт.).

Приймаємо: 9 одиниць Brüel & Kjær 4524.

1.10.11 Робоча станція Dell Precision 5860

Для забезпечення функціонування системи цифрових двійників (DT2), виконання складних FEM-моделювань процесів різання в ПЗ AdvantEdge та обробки великих масивів даних телеметрії обрано професійні станції Dell Precision 5860 (рис. 1.26). Вибір зумовлений високою потужністю багатоядерних процесорів та спеціалізованих графічних прискорювачів, що дозволяють проводити розрахунки зносу інструменту в реальному часі.

Технічні характеристики Dell Precision 5860:

- процесор: Intel Xeon W (до 24 ядер);
- відеокарта: NVIDIA RTX A6000 (48 ГБ відеопам'яті);

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

- оперативна пам'ять: 128 ГБ DDR5;
- накопичувачі: NVMe SSD з підтримкою RAID-масивів;
- габарити (Д/Ш/В), мм: 430 / 175 / 500.

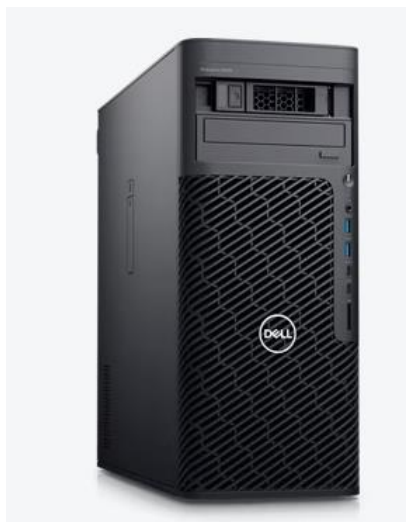


Рисунок 1.26 – Робоча станція Dell Precision 5860

Кількість станцій визначається за функціональним розподілом завдань моніторингу та моделювання на дільниці:

$$N_{рс} = n_{синт} + n_{оброб} + n_{втки} = 1 + 1 + 1 = 3 \text{ шт},$$

де $n_{синт}$ – кількість станцій для моніторингу НРНТ-синтезу та роботи DT1 (1 шт.);

$n_{оброб}$ – станція для розрахунків режимів EDM-обробки та моделювання в AdvantEdge (1 шт.);

$n_{втки}$ – станція для автоматизованого збору та архівації даних контролю якості (1 шт.).

Приймаємо: 3 одиниці Dell Precision 5860.

1.10.12 Цифровий мікроскоп Keyence VHX-7000

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для проведення 100% вихідного контролю геометрії різальної кромки, вимірювання радіуса заокруглення після VMAM-обробки та аналізу мікроструктури РсBN-шару обрано цифрову систему Keyence VHX-7000 (рис. 1.27). Обладнання дозволяє створювати 3D-моделі поверхонь із великою глибиною різкості та автоматично виявляти мікросколи, що критично для серійного випуску інструменту класу точності G.

Технічні характеристики Keyence VHX-7000:

- діапазон збільшення: від 20х до 6000х;
- функції: автоматичне фокусування, 3D-профілометрія, підрахунок часток;
- моторизований столик: можливість пакетного сканування касет із пластинами;
- габарити (Д/Ш/В), мм: 700 / 800 / 1200.



Рисунок 1.27 – Цифровий мікроскоп Keyence VHX-7000

Добова трудомісткість операцій контролю розраховується виходячи з річної програми 150000 шт. (600 шт/добу) та часу контролю одного виробу хв:

$$T_{\text{контр}} = \frac{Q_{\text{доб}} \cdot t_{\text{вим}}}{60} = \frac{600 \cdot 2}{60} = 20 \text{ год/добу},$$

де $Q_{\text{доб}}$ – добова програма випуску (600 шт.);

$t_{\text{вим}}$ – час на повне вимірювання геометрії однієї пластини (2 хв).

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Розрахункова кількість одиниць при двозмінній роботі (год):

$$N_{\text{розр}} = \frac{T_{\text{контр}}}{T_{\text{ф}} \cdot \eta \cdot k_{\text{авт}}} = \frac{40}{16 \cdot 0,8 \cdot 1,6} = 1,95,$$

де η – коефіцієнт ефективності використання часу (0,8);

$k_{\text{авт}}$ – коефіцієнт інтенсифікації контролю завдяки використанню автоматизованих алгоритмів Keyence та пакетного завантаження (1,6).

Приймаємо 1 установку ОТЕС CF 18 з коефіцієнтом завантаження $K_3 = 0,98$.

1.10.13 Сушильна шафа Binder FDL 115

Для видалення залишків органічного розчинника (бензину) з армованої шихти марки BN100+ після операції замішування з 5 % пластифікатором обрано вибухозахищену вакуумну сушильну шафу Binder VDL 115 (рис. 1.28) (із сертифікацією АТЕХ). Процес сушіння у вакуумному середовищі є критичним для безпечного видалення легкозаймистих компонентів бензину, забезпечення необхідної текучості прес-порошку та запобігання дефектам структури під час подальшої НРНТ-консолідації. Обладнання виконане у вибухозахищеному виконанні (гарантує безпеку всередині камери відповідно до зони АТЕХ 2), оснащене стійкою до тиску скляною панеллю із захисним екраном та системою повного заземлення елементів.

Технічні характеристики Binder VDL 115:

- робочий об'єм: 119 л;
- діапазон робочих температур: від +9 °С вище кімнатної до +110 °С (опціонально до +200 °С);
- максимальне сумарне навантаження камери: 65 кг (максимальне

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

- навантаження на одну полицю: 20 кг);
- споживана потужність: приблизно 1,2 кВт;
- габарити (Ш/В/Г), мм: 830 / 900 / 1350.



Рисунок 1.28 – Сушильна шафа Binder FDL 115

Добова маса вологої шихти, що потребує сушіння, складає $G_{\text{доб}} = 2,5121$ кг. Розрахункова кількість одиниць визначається за формулою:

$$N_{\text{розр}} = \frac{G_{\text{доб}}}{m_{\text{зав}} \cdot n_{\text{цикл}}} = \frac{2,5121}{4 \cdot 4} = 0,1572,$$

де $G_{\text{доб}}$ – добова потреба в шихті (2,5121 кг);

$m_{\text{зав}}$ – маса завантаження шихти на один піддон (прийнято 4 кг для забезпечення тонкого шару);

$n_{\text{цикл}}$ – кількість циклів сушіння на добу (прийнято 4 цикли тривалістю по 3–4 год кожен).

Приймаємо: 1 сушильну шафу Binder FDL 115 з коефіцієнтом завантаження $K_z = 0,16$.

						Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.10.14 Вакуумна піч Centorr Vacuum Industries Series 3000

Для реалізації власного виробництва компонентів керамічної матриці шляхом карботермічного синтезу карбіду титану (TiC) обрано вакуумну піч Centorr Series 3000 (рис. 1.29). Власне виробництво TiC дозволяє гарантувати високу фазову чистоту матриці та знизити собівартість PcBN-інструменту. Обладнання забезпечує стабільне підтримання температури 1800 °С у глибокому вакуумі, що необхідно для отримання бездефектної структури зв'язки.

Технічні характеристики Centorr Series 3000:

- максимальна температура: 3000 °С (робоча 1800 °С);
- рівень вакууму: до Па;
- тип нагрівальних елементів: графітові;
- робоче середовище: вакуум або інертні гази;
- споживана потужність: 45 кВт.
- Габарити (Д/Ш/В), мм: 2500 / 2000 / 2800



Рисунок 1.29 – Centorr LF модель 22-3000

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Добова програма випуску TiC (згідно з річною потребою у 247 кг)

при 250 робочих днях на рік добова програма випуску складає:

$$G_{TiC \text{ доб}} = \frac{247}{250} = 0,988 \text{ кг/добу.}$$

Розрахункова кількість одиниць обладнання визначається за формулою:

$$N_{\text{розр}} = \frac{G_{TiC \text{ доб}}}{P_{\text{цикл}} \cdot n_{\text{цикл}}} = \frac{0,494}{5 \cdot 1} = 0,0988,$$

де $G_{TiC \text{ доб}}$ – необхідна добова маса синтезованого карбіду титану (0,988 кг);

$P_{\text{цикл}}$ – вихід продукту за один тривалий цикл синтезу (прийнято 5 кг);

$n_{\text{цикл}}$ – кількість циклів на добу (1 цикл, з урахуванням часу на інерційне нагрівання та охолодження печі).

Приймаємо: 1 вакуумну піч Centorr Series 3000 з коефіцієнтом завантаження $K_z = 0,10$.

1.10.15 Гідравлічний лабораторний прес Fontijne LabTop 300

Для операції холодного пресування заготовок PcBN на твердосплавній підкладці обрано автоматизований гідравлічний прес Fontijne LabTop 300 (рис. 1.30). Обладнання забезпечує формування «таблеток» заданої щільності перед їх завантаженням у реакційну комірку НРНТ-преса. Використання інтелектуальної системи керування ProView з 15-дюймовим сенсорним екраном дозволяє програмувати цикли навантаження з високою повторюваністю зусилля, що критично для уникнення дефектів типу «перепресовка».

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Технічні характеристики LabTop 300:

- максимальне зусилля стискання: 300 кН;
- розмір плити: 250 x 250 мм;
- максимальна температура (опційно): до 300 °С;
- відстань між плитами (Daylight): 175 мм;
- габарити (Д/Ш/В), мм: 930 / 490 / 840.

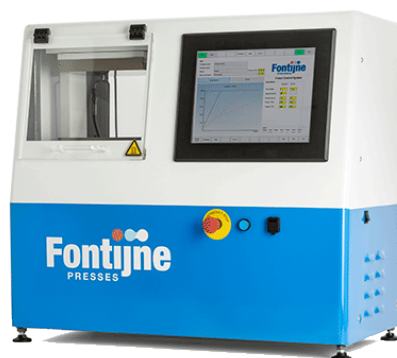


Рисунок 1.30 – Гідравлічний прес Fontijne LabTop 300

Виходячи з потреби у випуску 1200 пластин на добу та використання багатомісних прес-форм (по 4 заготовки на цикл):

$$N_{\text{розр}} = \frac{Q_{\text{доб}}}{n_{\text{цикл}} \cdot P_{\text{год}} \cdot T_{\text{ф}}} = \frac{600}{4 \cdot 12 \cdot 16} = 0,7813,$$

де $n_{\text{цикл}}$ – кількість гнізд у прес-формі (4 шт.);

$P_{\text{год}}$ – продуктивність преса (прийнято 12 циклів/год з урахуванням часу на завантаження шихти та підкладок);

$T_{\text{ф}}$ – добовий фонд часу (16 год).

Приймаємо: 1 одиниці Fontijne LabTop 300 з середнім коефіцієнтом завантаження $K_3 = 0,78$.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

1.10.16 Спеціалізована гідравлічна станція ZZSM

Для забезпечення роботи основних циліндрів кубічних пресів Нумен та прецизійної підтримки тиску в реакційній комірці обрано спеціалізовану гідравлічну станцію виробництва ZZSM (рис. 1.31) (Zhengzhou Abrasives & Grinding Research Institute). Це обладнання розроблене спеціально для систем термобаричного синтезу і забезпечує стабільну подачу масла під надвисоким тиском до шести робочих циліндрів преса одночасно.

Технічні характеристики гідростанції ZZSM:

- робочий тиск: до 110 МПа (забезпечує стабільне стиснення навіть при пікових навантаженнях);
- ресурс роботи: понад 200 000 циклів синтезу;
- сумісність: повна інтеграція з шафами електричного керування та ПЛК Siemens для автоматизації циклів НРНТ-спікання.



Рисунок 1.31 – Спеціалізована гідравлічна станція ZZSM

Кількість гідравлічних станцій повинна відповідати кількості встановлених НРНТ-пресів для забезпечення повної автономності кожного виробничого вузла:

$$N_{\text{гс}} = n_{\text{прес}} = 3 \text{ шт},$$

де $n_{\text{прес}}$ – кількість установлених пресів Нумен Cubic Press (3 шт.).

Приймаємо: 7 одиниць гідравлічних станцій ZZSM.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

2 БУДІВЕЛЬНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Компонування виробничої дільниці

Проектування плану розміщення обладнання та визначення розмірів виробничого приміщення виконано згідно з ДБН та технологічним ходом процесу з метою забезпечення найкоротших шляхів транспортування шихти і напівфабрикатів без перехресних потоків.

Планування дільниці загальним габаритом 18 × 42 м реалізовано за дворядним лінійно-функціональним принципом із центральним транспортним коридором шириною 3,0 м, що чітко розділяє технологічні зони. Маємо наступні зв'язані приміщення: у верхньому ряду (рух зліва направо) від об'єднаного складу вихідних матеріалів та сировини порошки надходять на дільницю підготовки, млива та змішування шихти, де зосереджено 2 млини Retsch PM 300 та 1 змішувач PerMix PDR. Звідси суміш передається на дільницю сушіння, грануляції та складання комірок, яка оснащена 1 сушильною шафою Binder, 1 грануляторами YK-160 та 1 пресами Fontijne LabTop для попереднього пресування. Далі підготовлені комірки спрямовуються у цех НРНТ-спікання, де працюють 1 вакуумна піч Centorr Series 3000, 3 пресів НРНТ Нупен та 3 гідростанцій ZZSM.

Спікані блоки РсВН переходять у нижній ряд приміщень (рух справа наліво), де спочатку потрапляють у цех електроерозійної обробки EDM, оснащений 4 верстатами Sodick AQ325L для контурного вирізання пластин. Після цього заготовки передаються на дільницю обробки різальної кромки на 1 установку ОТЕС CF для фінішної VMAM-обробки. Перед відправленням на склад готової продукції всі партії проходять контроль у лабораторії вихідного контролю ВТК та ІТ-блоці, куди з метою оптимізації умов експлуатації

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Зайцев В.П.				БУДІВЕЛЬНИЙ РОЗДІЛ		Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Наконечний С.О							65	115
Рецензент	Іващенко Є.В						НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21		
Н. Контр	Бірюкович Л.О								
Затвердив	Богомол Ю. І.								

винесено електроніку: стійок NI CompactDAQ, 3 робочі станції Dell обчислювального комплексу, а також 1 мікроскоп Keyence для вимірювання геометрії.

2.2 Розрахунок виробничих площ

Загальна площа виробничої ділянки $F_{\text{заг}}$ визначається на основі сумарної площі, зайнятої обладнанням у плані, та коефіцієнта технологічних проходів і зон обслуговування за формулою 2.1:

$$F_{\text{заг}} = K_{\Pi} \cdot \sum_{i=1}^n (f_i \cdot N_i), \quad (2.1)$$

де: f_i – площа одиниці обладнання в плані ($D \times Ш$), м^2 ;

N_i – кількість одиниць обладнання, шт.;

K_{Π} – коефіцієнт проходів та проїздів (для важкого пресового та прецизійного обладнання приймається $K_{\Pi} = 4,14$).

Розрахунок площі під обладнанням ($\sum f_i \cdot N_i$):

- млини Retsch PM 300: $0,9 \times 0,8 \times 2 = 1,44 \text{ м}^2$
- змішувач PerMix PDR: $1,8 \times 1,2 \times 1 = 2,16 \text{ м}^2$
- сушильна шафа Binder: $0,830 \times 1,350 \times 1 = 1,12 \text{ м}^2$
- гранулятор YK-160: $1,26 \times 0,85 \times 1 = 1,071 \text{ м}^2$
- преси Fontijne LabTop: $0,93 \times 0,49 \times 1 = 0,46 \text{ м}^2$
- піч Centorr Series 3000: $2,5 \times 2,0 \times 1 = 5,00 \text{ м}^2$
- преси HPHT Hymen: $4,0 \times 3,0 \times 3 = 36 \text{ м}^2$
- гідростанції ZZSM: $2,5 \times 1,5 \times 3 = 11,25 \text{ м}^2$
- верстати Sodick AQ325L: $2,3 \times 2,55 \times 4 = 23,46 \text{ м}^2$
- установки OTEC CF: $1,5 \times 1,5 \times 1 = 2,25 \text{ м}^2$
- робочі станції Dell: $0,685 \times 0,335 \times 3 = 0,69 \text{ м}^2$
- стійки NI CompactDAQ: $0,6 \times 0,6 \times 6 = 2,16 \text{ м}^2$

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

– мікроскопи Keyence: $0,7 \times 0,8 \times 2 = 1,12 \text{ м}^2$

Разом під обладнанням: $F_{\text{обл}} = 88,18 \text{ м}^2$

Розрахунок загальної площі:

$$F_{\text{заг}} = 4,14 \cdot 88,18 = 365,05 \text{ м}^2$$

Приймається стандартна будівельна сітка колон (крок колон – 6 м). З метою уніфікації будівельних рішень та відповідно до стандартної сітки колон, отримане значення довжини округлюється у більший бік до найближчого конструктивного номіналу – 24 м. При заданій ширині в 18 м. Відповідно до цього площа ділянки буде становити 432 м^2

2.3 Розрахунок складських приміщень

Розрахунок площі складів вихідних матеріалів та готової продукції виконується за методом питомого навантаження на 1 м^2 корисної площі підлоги з урахуванням тримання нормативного запасу матеріалів.

Площа складу $F_{\text{скл}}$ визначається за формулою 2.2:

$$F_{\text{скл}} = \frac{G_{\text{доб}} \cdot T_z \cdot K_v}{q}, \quad (2.2)$$

де $G_{\text{доб}}$ – добова потреба в матеріалах (або добовий вихід готової продукції), кг/добу;

T_z – нормативний запас зберігання матеріалів, діб (приймається $T_z = 30$ діб);

K_v – коефіцієнт, що враховує площу проходів та проїздів між стелажми (приймається $K_v = 2,0$);

q – допустиме питоме навантаження на одиницю площі підлоги, кг/м^2 (для порошкових матеріалів та дрібних інструментальних виробів у тарі приймається $q = 50 \text{ кг/м}^2$).

1. Склад вихідних матеріалів (шихти):

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Добова потреба у вихідній свіжій шихті за матеріальним балансом становить $G_{\text{доб}} = 2,5121 \text{ кг/добу}$.

$$F_{\text{скл. мат}} = \frac{2,5121 \cdot 30 \cdot 2,0}{50} = 4,77 \text{ м}^2.$$

З урахуванням розміщення нормативних стелажів для зберігання дорогоцінних і надтвердих компонентів, конструктивно приймаємо мінімальну уніфіковану площу складу матеріалів разом із ділянкою дозування – 12 м^2 (еквівалентно одному стандартному будівельному модулю або сітці $2 \times 6 \text{ м}$).

2. Склад готової продукції:

Добовий вихід готових багатограних змінних пластин РСВН становить $G_{\text{доб}} = 3,75 \text{ кг/добу}$.

$$F_{\text{скл. гот}} = \frac{3,75 \cdot 30 \cdot 2,0}{50} = 4,5 \text{ м}^2.$$

Враховуючи необхідність пакування, маркування, розміщення столів для сортування та стелажів для зберігання готових коробок з інструментом, конструктивно приймаємо площу складу готової продукції – 12 м^2 (еквівалентно одному стандартному будівельному модулю або сітці $2 \times 6 \text{ м}$).

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Конструювання реакційної комірки

Реакційна комірка є ключовим вузлом апарата високого тиску, у якому безпосередньо реалізуються параметри НРНТ-синтезу для отримання наноармованого композиту марки BN100+. Конструкція комірки розроблена з урахуванням необхідності підтримання стабільного тиску від 5 ГПа до 8 ГПа та температури від 1400 °С до 1600 °С. Головною вимогою при проєктуванні є забезпечення ізотермічних умов у робочому об'ємі, що дозволяє сформувати гомогенну структуру РсBN та запобігти термічному руйнуванню зміцнюючих нановолокон нітриду кремнію.

Основним елементом комірки є контейнер, виготовлений із пірофіліту або спеціальної кераміки (на основі хлориту чи кальциту). Цей матеріал одночасно виконує функції середовища, що передає тиск у квазіізостатичному режимі, та ефективного теплоізолятора, який захищає деталі апарата від перегріву. Всередині контейнера розміщується нагрівальний елемент трубчастого або стаканного типу, виготовлений із високочистого графіту. Для забезпечення стабільного електричного контакту та рівномірного розподілу струму використовуються струмовводи з молібдену або сталі.

Внутрішня частина комірки містить реакційну шихту (суміш сBN, TiC, Al₂O₃ та нановолокон S₃N₄), яка розміщується безпосередньо на твердосплавній підкладці WC–Co.

Така збірка дозволяє отримати двошарову пластину SNGN 120408 із міцним адгезійним зв'язком між надтвердим шаром та основою. Для запобігання дифузії газів та шкідливих домішок із матеріалу контейнера в зону реакції застосовуються захисні гільзи та екрани з тугоплавких металів.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розробив	Зайцев В.П.				СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ			Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевірів	Наконечний С.О								69	115
Рецензент								НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21		
Н. Контр	Бірюкович Л.О.									
Затвердив	Богомол Ю. І.									

Геометрія внутрішніх елементів оптимізована за допомогою імітаційного моделювання у системі цифрового двійника для мінімізації термічних градієнтів та досягнення максимальної щільності композиту [19].

3.2 Проєктування прес-форми для холодного пресування заготовок

Проєктування прес-форми для виготовлення заготовок із PсBN є критичним етапом, що визначає точність розмірів та рівномірність щільності таблеток перед їх завантаженням у апарат високого тиску. Враховуючи високу абразивність порошку cBN та карбіду титану, для виготовлення оснастки обрано комбіновану матрицю: осердя виконується з твердого сплаву WC–Co (марки BK15 або BK20), а обойма – з конструкційної сталі 45. Це забезпечує необхідну зносостійкість при тисках пресування до 100 МПа та запобігає деформації робочих поверхонь [21].

Вихідні дані для розрахунку параметрів заготовки та робочих елементів прес-форми наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні параметри для розрахунку оснастки

Параметр деталі (SNGN 120408)	Значення, мм	Коефіцієнт / Технологічний параметр	Значення
Сторона пластини (α_n)	12,7	Коефіцієнт усадки при НРНТ (K_y)	1,25
Товщина пластини (H_n)	4,76	Коефіцієнт обтиснення порошку ($K_{об}$)	2,20
Маса заготовки (з підкладкою)	3,417 г	Робочий тиск пресування	100 МПа

Визначення формуючих розмірів заготовки проводять із урахуванням об'ємних змін, що відбуваються під час НРНТ-спікання. Для компенсації усадки розміри «сирої» таблетки розраховуються за формулами 3.1 та 3.2:

$$\alpha_{\Pi} = \alpha_{\text{н}} \cdot K_{\text{у}}, \quad (3.1)$$

$$H_{\Pi} = H_{\text{н}} \cdot K_{\text{у}}, \quad (3.2)$$

де α_{Π} , H_{Π} – сторона та висота пресовки відповідно.

Розрахункові значення для BN100+: $\alpha_{\Pi} = 12,7 \cdot 1,25 = 15,875$ мм;
 $H_{\Pi} = 4,76 \cdot 1,25 = 5,95$ мм.

Внутрішній квадратний отвір твердосплавної матриці повинен відповідати розміру $15,875 \cdot 15,875$ мм. Висота камери засипки (H_3) визначається за формулою:

$$H_3 = H_{\Pi} \cdot K_{\text{об}} = 5,95 \cdot 2,2 = 13,09 \text{ мм.}$$

Розрахованої висоти матриці ($H_{\text{матр}}$) має бути достатньо для забезпечення автоматичного циклу роботи преса з урахуванням допусків на вхід пуансонів. Приймаємо технологічний вхід для нижнього пуансона $h_{\text{ниж ч.}} = 15$ мм, для верхнього $h_{\text{верх ч.}} = 10$ мм.

$$H_{\text{матр}} = H_3 + h_{\text{верх ч.}} + h_{\text{ниж ч.}} = 13,09 + 10 + 15 = 38,09 \text{ мм.}$$

Для уніфікації приймаємо висоту матриці $H_{\text{матр}} = 40$ мм. Робоча частина верхнього пуансона повинна забезпечувати хід на глибину камери засипки. Робочий хід пуансона при односторонньому пресуванні складає близько 1/3 від висоти матриці, що в нашому випадку становить 13,3 мм. Неробоча частина для кріплення до плити преса приймається висотою 30 мм та діаметром 60 мм.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нижній пуансон у даній конструкції виконує функцію дна камери та виштовхувача готової заготовки. Його робоча висота відповідає висоті матриці (40 мм) з додаванням технологічного кріплення (20 мм). Оскільки обрана марка пластин SNGN 120408 є суцільною та не має центрального отвору, використання формуючого стержня в даній конструкції прес-форми не передбачено [19], [23].

Розрахованої висоти камери засипки ($H_3 = 13,09$ мм) недостатньо для стабільної роботи преса в автоматичному режимі. Конструкція матриці повинна враховувати технологічні допуски на вхід пуансонів: для нижнього пуансона ця відстань становить 15 мм, а для верхнього – 10 мм. З урахуванням цих параметрів повна висота твердосплавної матриці складає:

$$H_{\text{матр}} = H_3 + h_{\text{верх ч.}} + h_{\text{ниж ч.}} = 13,09 + 10 + 15 = 38,09 \approx 40 \text{ мм.}$$

Висота пуансонів розрахована для формування двошарової заготовки із заданою щільністю. Робоча частина включає величину робочого ходу та технологічні зазори. Для пресування порошків PсBN робочий хід становить приблизно 1/3 висоти матриці — 13,3 мм. Висота хвостовика, призначеного для фіксації в плиті преса, прийнята 30 мм при діаметрі 60 мм. Внутрішній контур робочої частини відповідає формі пластини та має розмір $15,875 \times 15,875$ мм.

Нижній пуансон є нерухомим під час пресування та забезпечує виштовхування готової «таблетки» з матриці. Його загальна висота становить 40 мм із додатковими 20 мм для кріплення. Оскільки непереточувана пластина SNGN 120408 є суцільною і відповідно до ISO 1832:2017 [9] не має центрального отвору, формуючий стержень у конструкції прес-форми не передбачено.

Це технічне рішення дозволяє прецизійно контролювати масу шихти (3,417 г) та отримувати заготовки з рівномірним розподілом армуючих нановолокон перед стадією НРНТ-синтезу.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Охорона праці включає систему правових, соціально-правових, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на забезпечення життя, здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Охорона праці є надзвичайно важливою складовою при проєктуванні виробничої ділянки, особливо в контексті виготовлення наноармованих РсBN-пластин за методами порошкової металургії та НРНТ-спікання, адже вона включає систему заходів, спрямованих на запобігання нещасним випадкам, професійним захворюванням та шкоді здоров'ю працівників під час їхньої праці [22].

Мета розділу "Охорона праці" полягає в забезпеченні безпеки, здоров'я та добробуту працівників, а також в запобіганні потенційних ризиків, які можуть виникнути під час складного виробничого процесу синтезу марки BN100+. Основним завданням розділу у проєктуванні ділянки є створення безпечного робочого середовища, мінімізація шкідливого впливу дрібнодисперсних порошків та високих температур, а також запобігання травматизму при роботі з обладнанням високого тиску [23].

4.1 Загальна характеристика виробничої ділянки

Виробнича ділянка призначена для виготовлення армованих РсBN-пластин марки BN100+, що застосовуються для високопродуктивної чистової обробки загартованих сталей. З точки зору охорони праці, ділянка проєктується як сучасний інтелектуальний комплекс із повним циклом виробництва – від карботермічного синтезу TiC до фінішної VMAM-підготовки кромки.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив	Зайцев В.П.				РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ			Літ.	Арк.	Акрюшів	
Перевірів	Наконечний С.О.									73	115
Рецензент	Іващенко Є.В.							НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21			
Н. Контр	Бірюкович Л.О.										
Затвердив	Богомол Ю. І.										

Виробничий цех забезпечує випуск 150000 виробів на рік. Технологічний процес передбачає використання розчину синтетичного каучуку в бензині як тимчасової зв'язки (у співвідношенні 10:1), що вимагає застосування вибухозахищеного обладнання та спеціальних систем вентиляції. Специфікація обраного обладнання наведена в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Специфікація обладнання для виготовлення виробу

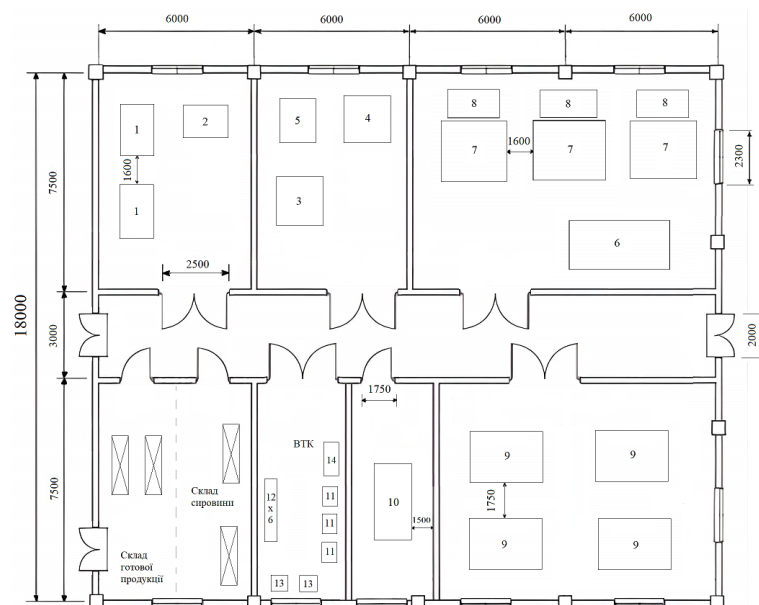
№	Обладнання	Габарити, мм	Основні параметри	К-ть
1	НРПТ-прес Hymen	4000×3500×4500	60 000 кН; 5–8 ГПа; 45 кВт	3
2	Гідростанція ZZSM	2500×1500×1500	до 110 МПа	3
3	Sodick AQ325L	2430×2202×2042	±0,002 мм; 250 мм ² /хв	4
4	Retsch PM 300	900×800×1200	800 об/хв; 1,1 кВт	2
5	Dell Precision 5860	430×175×500	Хеон W; RTX A6000	3
6	Fontijne LabTop 300	930×490×840	300 кН	1
7	OTEC CF 18	1500×1500×1800	18 л; до 500 об/хв	1
8	Keyence VHX-7000	700×800×1200	20× – 6000×	2
9	Rittal VX SE	2000×800×600	IP55; S7-1500	1
10	Centorr 3000	2500×2000×2800	до 1800 °С; 45 кВт	1
11	PerMix PDR-50	1800×1200×2200	35 л; 30 об/хв	1
12	YK-160	1260×850×1250	46 об/хв; 2,2 кВт	1
13	Binder VDL 115	830×900×1350	ATEX Zone 2	1
14	NI CompactDAQ	модульна	до 1 МГц; USB 3.0	3
15	Omega PX409	мініатюрний	0,08 %	9
16	Brüel & Kjær 4524	мініатюрний	0 мВ/г	9

З таблиці 4.1 видно, що виробництво потребує використання великогабаритного та прецизійного обладнання, яке має бути розміщене відповідно до загальних принципів проектування виробничих дільниць і вимог

нормативної документації. З урахуванням необхідних робочих відстаней та зон обслуговування розроблено планувальну схему цеху з виробництва наноармованих пластин марки BN100+ (рис. 4.1).

Загальна площа виробничої ділянки становить 432 м², що забезпечує достатній простір для виконання технологічних операцій і безпечного переміщення персоналу. У структурі ділянки передбачено 7 спеціалізованих приміщень, які забезпечують повний виробничий цикл.

Склад готової продукції призначений для зберігання атестованих надтвердих пластин перед відвантаженням замовнику. Для запобігання механічним пошкодженням і забезпечення безпечного зберігання продукції приміщення обладнується спеціальними сейфами та стелажами з м'якими ложементами.



- 1 – планетарний млин; 2 – барабанний змішувач; 3 – гранулятор;
 4 – сушильна шафа; 5 – гідравлічний прес; 6 – вакуумна піч; 7 – НРНТ-прес;
 8 – гідравлічна станція; 9 – електроерозійний верстат; 10 – установка фінішної обробки; 11 – робоча станція; 12 – шафа керування; 13 – цифровий мікроскоп.
 14 – керувальна шафа

Рисунок 4.1 – Планувальна схема ділянки з виробництва РсBN-пластин марки BN100+

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Проектована дільниця з виробництва наноармованих PсBN-пластин марки BN100+ інтегрує повний цикл синтезу та механічної обробки заготовок. Планування цеху загальною площею 432 м² базується на функціональному зонуванні спеціалізованих зон для мінімізації виробничих ризиків та оптимізації логістичних потоків.

Склад сировини та готової продукції. Призначений для ізольованого зберігання порошків (сBN, Al₂O₃, TiC, Si₃N₄) та готової продукції. З огляду на високу вартість та чутливість компонентів до вологи, складування проводиться у герметичних сейфах у зоні, що має найкоротший шлях до дільниці підготовки шихти.

Дільниця підготовки, млива та змішування шихти. Здійснює подрібнення (Retsch PM 300), гомогенізацію (PerMix PDR) та грануляцію (YK-160). Технологія передбачає використання бензинової зв'язки, що створює ризик вибуху парів. Приміщення оснащене вибухозахищеною сушильною шафою Binder та локальною витяжною вентиляцією з 10-кратною кратністю повітрообміну.

Цех НРНТ-спікання (Гарячий цех). Включає зону синтезу в апаратах Hymen Cubic Press (тиск до 8 ГПа, температура до 1600 °С) та вакуумну піч Centorr. Захист забезпечується стаціонарними екранами, автоматизацією циклу через ПЛК Siemens та системами аварійного скидання тиску. Через високе енергоспоживання та тепловиділення, кімната обладнана автономною системою промислового кондиціонування.

Цех електроерозійної обробки (EDM). Виконує прецизійне різання на верстатах Sodick. Для захисту від ураження струмом при роботі з високою напругою передбачено обов'язкове захисне заземлення корпусів та електронні блокування доступу. Зона розташована суміжно з Гарячим цехом для мінімізації логістичного шляху переміщення гарячих заготовок.

Дільниця фінішної обробки та ВТК. Включає встановлення OTEC CF, робочі станції Dell, стійки NI CompactDAQ та мікроскопи Keyence. Згідно з

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нормами ДБН, рівень штучної освітленості робочих місць становить не менше 500 лк.

Побутове приміщення та гардероб. Розраховане на 5 операторів на одній зміні, обладнане зонами відпочинку та місцями зберігання антистатичного одягу. Розташоване біля входу в дільницю для забезпечення швидкої евакуації та дотримання санітарно-гігієнічних норм при роботі з хімічними речовинами.

Ефективність охорони праці на дільниці досягається через системне навчання персоналу та безперервний моніторинг середовища за допомогою системи датчиків тиску та вібрації. Порівняльні характеристики проєктованої дільниці наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Реальні та нормативні характеристики приміщення і розміщення обладнання

№ п/п	Параметр приміщення	Реальне значення	Нормативне значення
1	Площа на 1 працюючого	86,4 м ²	не менше 4,5 м ²
2	Об'єм на 1 працюючого (при Н = 4,5 м)	388,8 м ³	не менше 15 м ³
3	Мінімальна ширина проходу	3,0 м	не менше 1,5 м

4.2 Аналіз параметрів мікроклімату

Параметри мікроклімату виробничих приміщень дільниці з виготовлення наноармованих РСBN-пластин марки BN100+ є критично важливими з точки зору охорони праці, оскільки вони безпосередньо впливають на тепловий обмін працюючих та їхню працездатність. Внутрішнє середовище цеху визначається поєднанням температури повітря, його вологості, швидкості руху та інтенсивності теплового випромінювання від обладнання. Враховуючи необхідність обслуговування НРНТ-пресів Нупен та виконання прецизійних операцій на EDM-верстатах, роботи на дільниці за рівнем енерговитрат

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

(від 176 Вт до 232 Вт) належать до категорії Па – фізичні роботи середньої важкості.

Температура. У виробничих залах важливо підтримувати оптимальний температурний режим для забезпечення комфорту персоналу та уникнення перегріву, зумовленого роботою вакуумної печі Centorr Series 3000 (45 кВт) та трьох апаратів високого тиску. Згідно з нормами для категорії робіт Па, температура повітря у холодний період року повинна становити 17–21 °С, а у теплий період допускається підвищення до 28 °С. Для стабілізації температури передбачено використання теплозахисних екранів та промислових систем кондиціонування, що інтегровані в загальну систему керування дільницею.

Вологість. Запиленість повітря під час підготовки шихти та дозування субмікронних порошків cBN і TiC потребує суворого контролю вологості для запобігання захворюванням дихальної системи. Оптимальний рівень відносної вологості має підтримуватися в межах 40–60 %. Особливістю технології є використання бензину як розчинника зв'язку, що вимагає підтримання вологості на рівні, який виключає накопичення статичної електрики, та водночас забезпечує ефективну роботу систем пилоподавлення.

Рух повітря. Забезпечення оптимальної швидкості руху повітря (від 0,2 м/с до 0,3 м/с) має велике значення для розсіювання тепла та видалення парів бензину із зони сушіння шихти. Виробнича дільниця площею 432 м² обладнана потужною припливно-витяжною вентиляцією, яка забезпечує достатню циркуляцію повітря та відведення шкідливих речовин безпосередньо від робочих місць операторів змішувачів та грануляторів.

Системний моніторинг параметрів мікроклімату, аналіз даних через систему цифрового двійника та своєчасне коригування режимів вентиляції дозволяють створити безпечну робочу середу. В Україні параметри мікроклімату виробничих приміщень регламентуються нормативним документом ДСН 3.3.6.042-99 [24].

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

4.3 Аналіз виробничого освітлення

Освітлення приміщень дільниці проєктується згідно з вимогами ДБН В.2.5-28:2018 [25] для забезпечення точності операцій та зорового комфорту персоналу. Система освітлення має відповідати таким критеріям:

1. Інтенсивність. Для прецизійних робіт (контроль геометрії пластин SNGN 120408, налаштування пірометрів) освітленість робочих зон має становити

від 300 до 500 лк. У лабораторії ВТК для роботи з мікроскопами Keyence рівень штучного освітлення встановлюється не нижче 500 лк.

2. Рівномірність. Забезпечується регулярним розташуванням світильників відповідно до кроку колон приміщення (6 м). Це мінімізує тіні біля пресів Нупен та верстатів Sodick, запобігаючи виробничому травматизму.

3. Кольорова температура. Рекомендовано нейтральне світло (~4000 К), що забезпечує точне візуальне розрізнення компонентів шихти (Al_2O_3 , TiC) та знижує втому очей при моніторингу інтерфейсів цифрових двійників на робочих станціях Dell.

4. Запобігання відблискам. У зонах фінішної обробки на установках ОТЕС, де поверхні пластин набувають високого класу чистоти, застосовуються світильники з антибліковими розсіювачами та матове покриття стін для усунення відбитої блискості.

5. Комбінована система. Використовується поєднання природного світла через світлові прорізи (розрахунок КПО виконується з урахуванням затінення обладнанням) та штучного освітлення.

Для дільниці площею 432 м² та висотою 4,5 м обрано систему LED-світильників зі ступенем захисту IP55 (через наявність дрібнодисперсного пилу та парів MOP), що гарантує енергоефективність та стійкість до вібраційного фону від гідростанцій ZZSM.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

4.4 Шум та вібрація

Шум і вібрація є домінуючими шкідливими чинниками на ділянці з виробництва наноармованих PсBN-пластин марки BN100+, оскільки їх тривалий вплив негативно позначається на функціональному стані центральної нервової та серцево-судинної систем персоналу. Відповідно до вимог ДСН 3.3.6.037-99 та ДСН 3.3.6.039-99, рівні цих факторів на робочих місцях операторів підлягають жорсткому нормуванню для запобігання професійним захворюванням, таким як вібраційна хвороба та сенсоневральна приглухуватість.

Основними джерелами акустичного та вібраційного навантаження у проєктованому технологічному циклі є планетарні млини Retsch PM 300 та змішувачі PerMix PDR, які генерують високочастотний шум та вібрацію під час інтенсивного подрібнення компонентів керамічної матриці. Робота силового блоку, що включає гідравлічні станції ZZSM та три НРНТ-преси Нупен Cubic Press, супроводжується значними механічними коливаннями низької частоти та імпульсним шумом у моменти циклічного стиснення реакційних комірок до тиску 8 ГПа. Додаткове шумове навантаження створюють системи примусового охолодження вакуумних печей Centorr, а також робочі органи EDM-верстатів Sodick та установок фінішної обробки OTEC під час мікровидалення матеріалу з поверхонь пластин SNGN 120408.

Постійна експозиція до зазначених чинників спричиняє підвищену втому, стрес та зниження концентрації уваги, що є критично небезпечним при виконанні прецизійних операцій з дозування порошків та налаштування лазерних пірометрів. Для мінімізації негативного впливу на ділянку площею 432 м² передбачено комплекс технічних заходів, що включає встановлення трьох важких пресів на індивідуальні віброізолювальні фундаменти та використання амортизувальних опор для млинів. Звукоізоляція приміщень підготовки шихти та виведення робочих станцій керування цифровими двійниками Dell в окрему зону ВТК дозволяють суттєво зменшити час

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

перебування операторів у зонах інтенсивного шумового впливу. У випадках проведення сервісних робіт безпосередньо біля працюючого обладнання персонал забезпечується засобами індивідуального захисту – протишумними навушниками та вкладишами відповідного класу фільтрації.

4.5 Аналіз загазованості та запиленості

Технологічний процес виготовлення наноармованих пластин BN100+ супроводжується виділенням у повітря робочої зони субмікронного пилу компонентів шихти (сBN, TiC, Al₂O₃), а також парів бензину, що використовується як розчинник тимчасової зв'язки. Наявність зазначених виробничих факторів зумовлює необхідність організації ефективної системи вентиляції, здатної забезпечити дотримання санітарно-гігієнічних вимог щодо якості повітря робочої зони. Крім видалення шкідливих речовин, вентиляційна система повинна компенсувати теплові надлишки, що утворюються під час роботи технологічного обладнання (вакуумної печі Centorr Series 3000, трьох НРНТ-пресів Нупен та чотирьох EDM-верстатів Sodick).

Відповідно до вимог «Гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони», при проєктуванні вентиляції за основний критерій було прийнято забезпечення концентрацій шкідливих речовин на рівні, що не перевищує встановлені гранично допустимі концентрації (ГДК). Для досягнення цієї умови на ділянці запроєктовано комплексну систему вентиляції (рис. 4.5), яка поєднує місцеву витяжну та загальнообмінну вентиляцію.

1. Місцева витяжна вентиляція (МВВ). Система призначена для локального видалення шкідливих речовин безпосередньо в місцях їх утворення, що відповідає принципам пріоритетного вловлювання виробничих виділень до їх поширення в робочій зоні. Витяжні пристрої підключені до вибухозахищеної шафи Binder VDL 115 для видалення парів бензину, планетарних млинів Retsch РМ 300 для вловлювання пилу компонентів шихти, а також до вакуумної печі

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

Centorr та EDM-верстатів Sodick для відведення масляного аерозолі (МОР).
Загальна продуктивність місцевої витяжної системи становить 5700 м³/год.

2. Загальнообмінна вентиляція. Загальнообмінна система забезпечує підтримання нормативних параметрів повітряного середовища в усьому об'ємі виробничих приміщень шляхом організації 10-кратного повітрообміну в зонах підготовки шихти та цеху синтезу. За загального об'єму приміщень 1944 м³ необхідна продуктивність системи становить 19 440 м³/год, що забезпечує розбавлення залишкових концентрацій шкідливих речовин і відведення надлишкового тепла.

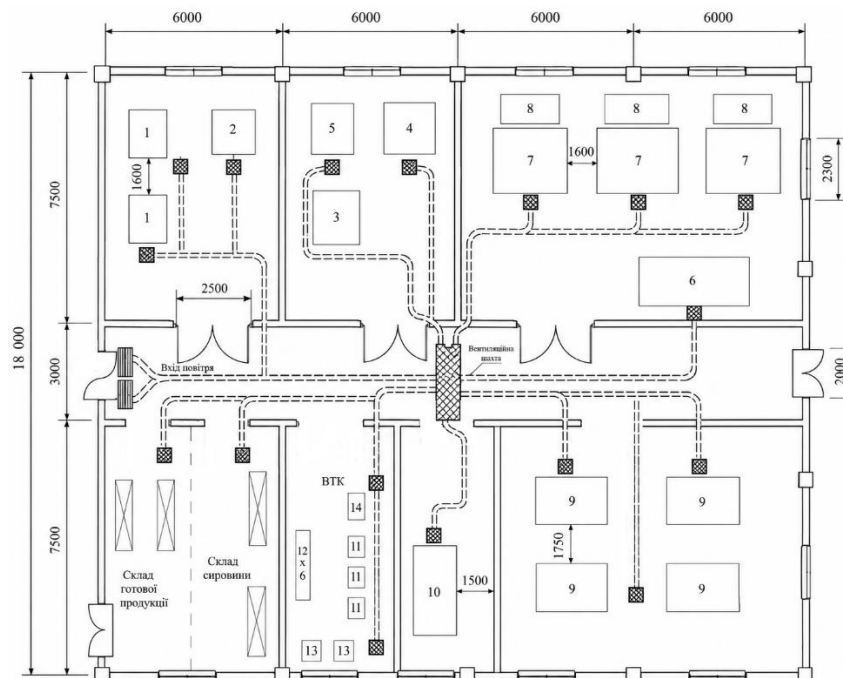


Рисунок 4.5 – Схема розведення систем припливно-витяжної та місцевої вентиляції дільниці.

Таким чином, параметри запроєктованої системи вентиляції визначені з урахуванням вимог та спрямовані на забезпечення концентрацій виробничого пилу й парів органічних розчинників нижче встановлених ГДК у повітрі робочої зони. Контроль якості повітряного середовища здійснюється інтегрованими датчиками в режимі реального часу з передачею інформації на

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

панель керування цифрового двійника дільниці, що дозволяє оперативно контролювати відповідність умов праці вимогам зазначених Гігієнічних регламентів.

4.6 Електробезпека

При проєктуванні дільниці з виготовлення наноармованих PсBN-пластин марки BN100+ проведено ретельний аналіз аспектів електробезпеки, оскільки виробничий цикл передбачає використання енергоємного обладнання, під'єданого до промислової мережі напругою 220 В та 380 В. Основними споживачами електроенергії є силові блоки трьох НРНТ-пресів Нумеп (40,5 кВт), вакуумна піч Centorr Series 3000 (45 кВт) та чотири EDM-верстати Sodick (12 кВА), що використовують високовольтні розряди для формування контуру виробів. Особливим фактором ризику є використання бензину як розчинника зв'язки, що вимагає вжиття додаткових заходів для запобігання розрядам статичної електрики у зонах підготовки шихти.

Забезпечення електробезпеки на дільниці площею 432 м² має вирішальне значення для запобігання травматизму, пожежам та вибухам парів ЛЗР. Недостатня увага до стану ізоляції або цілісності заземлювальних провідників може призвести до ураження персоналу електричним струмом, що загрожує життю працівників. Правильне проєктування систем електропостачання та автоматизації на базі ПЛК Siemens дозволяє мінімізувати ці ризики.

Електричний струм при потраплянні в організм людини чинить термічну, електролітичну та біологічну дію, викликаючи опіки, порушення ритму серця та ураження нервової системи. Ступінь важкості травм залежить від сили струму, тривалості його впливу та шляху проходження через тіло працівника. Для гарантування безпеки персоналу технологічної зміни на виробництві впроваджено систему таких заходів [28]:

1. Забезпечення належного захисного заземлення усіх металевих неструмопровідних частин обладнання (корпусів пресів Нумеп, вакуумних

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

установок Centorr та шаф керування Rittal) для захисту від напруги дотику та відведення зарядів статичної електрики.

2. Встановлення пристроїв захисту, включаючи автоматичні вимикачі та пристрої захисного відключення (ПЗВ), які забезпечують оперативне розірвання ланцюга у разі перевантажень, коротких замикань або витоків струму на корпус.

3. Використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ): діелектричних рукавиць, взуття та килимків, а також застосування антистатичного одягу персоналом, що контактує з бензиною зв'язкою [29].

4. Проведення регулярних перевірок, вимірювань опору ізоляції та технічного обслуговування електричних систем для виявлення та усунення несправностей на ранніх стадіях.

5. Систематичне навчання працівників правилам безпеки при роботі з НРНТ-апаратами та EDM-верстатами, а також проведення планових інструктажів з електробезпеки.

Впровадження зазначеної системи дозволяє забезпечити безпеку працівників під час експлуатації складного технологічного комплексу та мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій на виробництві пластин марки BN100+.

4.7 Засоби індивідуального захисту працівників

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) на дільниці синтезу PсBN-пластин марки BN100+ є критичним бар'єром безпеки, що мінімізує вплив шкідливих чинників, які неможливо повністю усунути технічними методами. З огляду на використання субмікронних порошків cBN і TiC та бензину як розчинника, впроваджено таку систему захисту:

Спеціальний захисний одяг. Персонал забезпечується антистатичними комбінезонами, що запобігають накопиченню статичного заряду та іскроутворенню в зонах приготування шихти з бензиною зв'язкою.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

Для захисту від термічних впливів під час обслуговування НРНТ-пресів Нупел (1600 °С) та вакуумної печі Centorr (1800 °С) використовуються термостійкі рукавиці та фартухи.

Захист органів дихання. Через високу дисперсність порошків (від 1 мкм до 2 мкм) та ризик вдихання парів ЛЗР обов'язковим є використання респіраторів та фільтруючих пристроїв згідно з ДСТУ EN 133:2005 [27]. Це запобігає розвитку силікозу та подразненню дихальних шляхів високоактивними компонентами керамічної матриці.



Рисунок 4.2 – Захисний одяг робітників виробництва.



Рисунок 4.3 – Засоби захисту органів дихання.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

Захист органів зору. Робота з абразивними компонентами та рідкими діелектриками в EDM-верстатах Sodick передбачає використання захисних окулярів або щитків для запобігання механічним пошкодженням та подразненням слизових оболонок від бризок розчинників.

Ефективність ЗІЗ підтримується через регулярне навчання 5 операторів дільниці методам їх правильного використання, своєчасну заміну фільтрів та контроль цілісності антистатичного покриття. Належна організація видачі ЗІЗ дозволяє забезпечити виконання робочих обов'язків у безпечних умовах термобаричного синтезу.

4.8 Пожежна безпека

Пожежна безпека на дільниці з виготовлення наноармованих РсBN-пластин марки BN100+ є пріоритетним аспектом через поєднання високотемпературних процесів та використання легкозаймистих речовин. Належний аналіз виробничого циклу дозволяє ідентифікувати потенційні джерела загоряння та вжити заходи згідно з вимогами Кодексу цивільного захисту України.

Основними джерелами пожежної та вибухонебезпеки у проєктованому процесі є:

- пари бензину. Використання розчину каучуку в бензині як тимчасової зв'язки створює критичний ризик утворення вибухонебезпечних сумішей під час сушіння та грануляції шихти.
- субмікронні порошки. Компоненти керамічної матриці (TiC , Al_2O_3) та cBN при нанорозмірній дисперсності можуть виявляти пірофорні властивості, що призводить до спонтанного займання при контакті з киснем повітря.
- високотемпературне обладнання. Вакуумна піч Centorr ($1800\text{ }^\circ\text{C}$) та силовий блок НРНТ-пресів ($1600\text{ }^\circ\text{C}$) є джерелами інтенсивного теплового випромінювання, що при порушенні режимів може викликати займання навколишніх матеріалів [30].

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

– електромережі. Значні енерговитрати обладнання (до 45 кВт на одиницю) підвищують ризик пожеж через короткі замикання або перевантаження в шафах керування Rittal.

З метою попередження пожеж та захисту персоналу (5 операторів) на ділянці площею 432 м² впроваджено систему таких заходів:

1. Використання вибухозахищеного обладнання (сертифікація АTEX), зокрема вакуумної шафи Binder VDL 115, та встановлення безіскрових систем вентиляції у зонах роботи з бензином.

2. Впровадження автоматичних систем аерозольного пожежогасіння (згідно з ДСТУ 4490:2005 [31]) та димових датчиків, інтегрованих у загальну систему моніторингу цифрових двійників.

3. Організація локальної аспірації безпосередньо у зонах виділення парів розчинників та дрібнодисперсного пилу для підтримки їхньої концентрації нижче вибухонебезпечної межі.

4. Зберігання активних порошків у герметичних сейфах під шаром захисного розчинника або в інертному середовищі.

5. Проведення регулярних інструктажів та тренувань персоналу щодо дій у разі виникнення пожежної небезпеки.

Для забезпечення оперативного реагування на ділянці розроблено план евакуації персоналу (рис. 4.4).

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

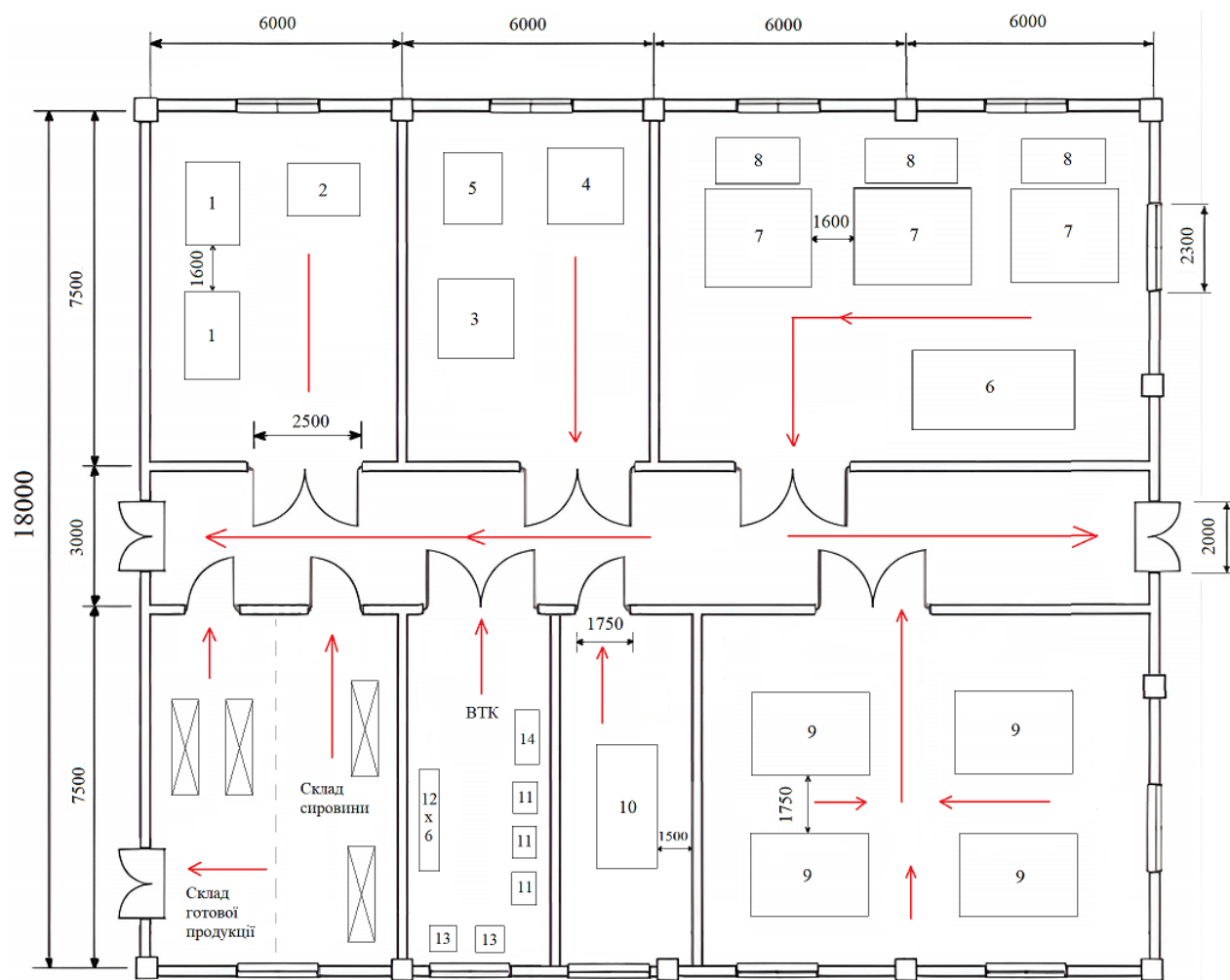


Рисунок 4.4 – План евакуації з виробничої дільниці.

Дотримання цих вимог дозволяє повністю мінімізувати ризики для життя працівників та запобігти матеріальним збиткам при виробництві надтвердого інструменту.

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Розрахунок чисельності виробничих робітників

Чисельність працівників, зайнятих на нормованих роботах ($\text{Ч}_{\text{р.н}}^{\text{пл}}$), розраховують за формулою 5.1:

$$\text{Ч}_{\text{р.н}}^{\text{пл}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot m_i}{T_{\text{р.ч}} \cdot K_{\text{в.н}}}, \quad (5.1)$$

де n – кількість найменувань продукції;

t_i – планова трудомісткість одиниці i -го виду продукції, нормо-годин;

m_i – кількість продукції i -го виду, одиниць;

$T_{\text{р.н}}$ – розрахунковий ефективний час роботи одного робітника, год.

$K_{\text{в.н}}$ – очікуваний коефіцієнт виконання норми (1,0 – 1,5).

Чисельність основних робітників, зайнятих на ненормованих роботах ($\text{Ч}_{\text{ос}}^{\text{пл}}$) розраховують за нормами обслуговування, а саме формулою 5.2:

$$\text{Ч}_{\text{ос}}^{\text{пл}} = \frac{m_0 \cdot \Pi_{\text{зм}} \cdot K_{\text{п}}}{H_{\text{об}}}, \quad (5.2)$$

де m_0 – кількість обслуговуваних об'єктів;

$\Pi_{\text{зм}}$ – кількість робочих змін протягом доби;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт переведення явочної чисельності в облікову;

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ОРГАНІЗАЦІЙНО- ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ								
Розробив	Зайцев В.П.									Літ.		Арк.	Акрушіє
Перевірів	Наконечний С.О											89	115
Рецензент	Іващенко Є.В									НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21			
Н. Контр	Бірюкович Л.О												
Затвердив	Богомол Ю. І.												

$N_{об}$ – норма обслуговування (кількість одиниць обладнання, що обслуговує один працівник).

Таблиця 5.1 – Баланс робочого часу середньооблікового працівника

Показники	Планові значення
Кількість календарних днів	365
Вихідні та святкові дні	109
Час на планово-попереджувальний ремонт, днів	10
Номінальний фонд робочого часу, днів	246
Невиходи на роботу, днів з них:	26
відпустка	20
захворювання	4
дозволені законом	1
з дозволу адміністрації	0,5
прогули	0,5
цілодобові простої	0
страйки	0
Явочний робочий час, днів	220
Середня тривалість робочого дня, год	7,9
Внутрішньозмінні втрати робочого часу та простої, год	0,3
Робочі години	7,6
Ефективний фонд робочого часу за рік, год	1672

Чисельність допоміжних працівників ($\mathcal{C}_д^{пл}$), для яких неможливо встановити норму обслуговування та розрахувати трудомісткість робіт, визначають за кількістю робочих місць за формулою 5.3:

$$\mathcal{C}_д^{пл} = \mathcal{P}_{р.м} \cdot \mathcal{P}_{зм} \cdot \mathcal{K}_{п}. \quad (5.3)$$

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

Результати розрахунків чисельності основних і допоміжних робітників
(за робочими місцями) наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Чисельність основних і допоміжних робітників дільниці

Професія, спеціаль- ність	Кваліфі- каційний розряд	Явочна чисельність по змінах			Зага- лом на добу	Коефіці- єнт пере- ведення явочної чисель- ності в облікову	Облі- кова чисе- льність
		1-а	2-а	3-а			
1	2	3	4	5	6	7	8
Основні робітники							
Оператор порошкової металургії	4	1	1	-	2	1,118	3
Апаратник синтезу надтвердих матеріалів	5	1	1	-	2	1,118	3
Оператор електроероз ійних верстатів з ЧПК	5	1	1	-	2	1,118	3
Оператор верстатів фінішної обробки	4	1	1	-	2	1,118	3
Контролер ВТК	5	1	1	-	2	1,118	3
Разом		5	5	-	10		15

Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Допоміжні працівники							
Налагоджувальник технологічного устаткування	6	1	-	-	2	1,118	3
Електромонтер з обслуговування електроустатк.	5	1	1	-	2	1,118	3
Комірник	3	1	-	-	1	1,118	2
Прибиральники виробничих приміщень	2	1	1	-	2	1,118	3
Разом		4	3	-	7		11
Усього робітників		9	8	-	17		26

5.2 Визначення фондів заробітної плати

Диференціацію заробітної плати на підприємствах різних форм власності обґрунтовують за допомогою тарифно-посадової системи, яка включає тарифно-кваліфікаційні довідники, довідники посад для керівників і службовців, тарифні сітки, ставки та схеми посадових окладів.

Тарифна сітка, що визначає співвідношення в оплаті праці залежно від кваліфікації працівників, складається з переліку тарифних розрядів та відповідних їм коефіцієнтів. Параметри цієї системи, що діють в Україні, представлені у таблиці 5.3.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			92

Таблиця 5.3 – Типова тарифна сітка робітників різногалузевих підприємств та організацій

Показник	Тарифні розряди							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Тарифні коефіцієнти	1,0	1,088	1,204	1,350	1,531	1,800	1,892	2,0

Важливим елементом тарифної системи є тарифна ставка. Її абсолютну величину визначають згідно зі встановленим державою мінімальним розміром заробітної плати. України на 2026 рік мінімальна заробітна плата становить: у місячному розмірі – 8 647 грн, у погодинному розмірі – 52 грн. Так, якщо на підприємстві тарифну ставку для першого розряду встановлено на рівні 52 грн, то ставка другого розряду становитиме $52 \times 1,088 = 56,58$ грн, третього розряду $52 \times 1,204 = 62,61$ грн і т. д.

Результат розрахунку фондів зарплати управлінського та обслуговуючого персоналу наведено у таблиці 5.4, а основних і допоміжних робітників у таблиці 5.5.

Таблиця 5.4 – Розрахунок фонду заробітної плати управлінського та обслуговуючого персоналу

Штатна посада	Чисельність, осіб	Місячний посадовий оклад, грн	Річний фонд заробітної плати, грн
Керівники			
Начальник цеху	1	36000	432 000
Разом			432 000
Спеціалісти			
Провідний інженер-технолог	1	32 000	384 000
Разом			384 000
Службовці та молодший обслуговуючий персонал (МОП)			
Обліковець	1	15 000	180 000
Разом			180 000
Усього по цеху (дільниці)			996000

Таблиця 5.5 – Розрахунок фонду заробітної плати основних і допоміжних робітників

Профе-сія, спе-ціаль-ність	Квалі-фіка-ційний розряд	Годинна тарифна ставка, грн.	Облі-ковий склад, осіб	Кількість годин роботи за рік		Основна заробі-тна плата, грн.	Розрахунок додаткової заробітної плати, грн					Загаль-ний фонд заробіт-ної плати, грн.
				Одного робіт-ника	Усіх		Надбавки та доплати				Разом	
							Премії	За роботу в особли-вих умо-вах	Оп-лата відпу-сток	Інші до-плати та надбавки		
Основні (технологічні) робітники												
Оператор Порошко-металургії	4	70,20	3	1672	5016	352123,20	70 424,64	35 212,32	35212,32	17 606,16	158 455,44	510 578,64
Апаратник синтезу	5	79,61	3	1672	5016	399323,76	79 864,75	39 932,38	39932,38	19 966,19	179 695,70	579 019,46
Оператор Електроероз	3	79,61	3	1672	5016	399323,76	79 864,75	39 932,38	39932,38	19 966,19	179 695,70	579 019,46
Оператор Фінішної обробки	4	70,20	3	1672	5016	352123,20	70 424,64	35 212,32	35212,32	17 606,16	158 455,44	510 578,64
Контр. ВТК	5	79,61	3	1672	5016	399323,76	79 864,75	39 932,38	39932,38	19 966,19	179 695,70	579 019,46
Разом						1 902 217,68	380 443,53	190 221,78	190221,78	95 110,89	856 000,98	2 758 215,66

ФН21.2106.4203.003.01ПЗ

Продовження таблиці 5.5

Профе-сія, спе-ціаль-ність	Квалі-фіка-ційний розряд	Годинна тарифна ставка, грн.	Облі-ковий склад, осіб	Кількість годин роботи за рік		Основна заробі-тна плата, грн.	Розрахунок додаткової заробітної плати, грн					Загаль-ний фонд заробіт-ної плати, грн.
				Одного робіт-ника	Усіх		Надбавки та доплати				Разом	
							Премії	За роботу в особли-вих	Оп-лата відпу-сток	Інші до-плати та надбавки		
Допоміжні (обслуговуючі) робітники												
Налагоджу-вальник Тех. устаткув.	6	93,60	3	1672	5016	469497,60	93 899,52	46 949,76	46 949,76	23 474,88	211 273,92	680 771,52
Електро-монтер	5	79,61	3	1672	5016	399323,76	79 864,75	39932,38	39 932,38	19 966,19	179 695,70	579 019,46
Комірник	3	62,61	2	1672	3344	209367,84	41 873,57	0,00	20 936,78	10 468,39	73 278,74	282 646,58
Прибираль-Вироб. Приміщ.	2	56,58	3	1672	5016	283805,28	56 761,06	0,00	28 380,53	14 190,26	99 331,85	383 137,13
Разом						1 361 994,48	272 398,90	86 882,14	136 199,45	68 099,72	563 580,21	1 925 574,69

5.3 Розрахунок продуктивності праці

Ефективність діяльності персоналу, що характеризується продуктивністю праці, визначається як частка від ділення річного обсягу випуску продукції на загальну чисельність працівників цеху, куди входять робітники, адміністративний апарат та обслуговуючий персонал.

Звідси, продуктивність праці Π – це річний обсяг продукції, виготовленої з розрахунку на одного працівника цеху розраховується за формулою 5.4:

$$\Pi \frac{G}{\sum \text{Ч}}, \quad (5.4)$$

де G – обсяг продукції, виготовленої цехом (дільницею) за рік, кг;

$\sum \text{Ч}$ – чисельність працівників усіх категорій (робітників, управлінського та об-слуговуючого персоналу).

Річний обсяг робіт визначається через різноманітні показники. Зокрема, застосовують натуральні або умовно-натуральні одиниці: штуки, комплекти, тонни та інше. Також до розрахунків включають вартісні показники (у гривнях) та трудові (у нормо-годинах).

Для даного проекту:

$$\Pi \frac{G}{\sum \text{Ч}} = \frac{468,75}{29} = 16,16 \text{ кг/особу.}$$

При тому що:

- основні робітники = 15 осіб
- допоміжні робітники = 11 осіб
- управлінський персонал = 3 особи

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.4. Розрахунок капітальний вкладень

Інвестиції в об'єкт будівництва включають витрати на основні засоби (виробничі площі, різноманітне технічне оснащення, транспортні пристрої тощо) та формування оборотних активів (запаси сировини, комплектуючі, інструменти, обсяги незавершеного виробництва).

Розрахунок інвестицій у техніку та транспортні засоби виконується на основі даних таблиці 5.6. При цьому до ціни обладнання додаються витрати на його доставку, монтаж та налаштування, які зазвичай становлять 10–25 % від початкової вартості одиниці техніки.

Таблиця 5.6 – Розрахунок капітальних вкладень в обладнання

Найменування устаткування, його модель або технічна характеристика	Кількість, одиниць	Вартість за одиницю, тис. грн	Загальна вартість, тис. грн	Витрати на транспортування та монтаж, тис. грн	Усього, тис. грн
1	2	3	4	5	6
Основне технологічне устаткування					
НРПТ-прес Нymen	3	9000	2700	900	27900
Гідростанція ZZSM	3	800	2400	80	2480
Sodick AQ325L	4	2200	8800	220	9020
Retsch PM300	2	700	1400	70	1470
Dell Precision 5860	3	180	540	18	558
Fontijne LabTop 300	1	1800	1800	180	1980

Продовження таблиці 5.6

1	2	3	4	5	6
Основне технологічне устаткування					
OTEC CF18	1	650	650	65	715
Keyence VHX-7000	2	1500	3000	150	3150
Rittal VX SE	1	250	250	25	275
Centorr 3000	1	3800	3800	380	4180
PerMix PDR-50	1	500	500	50	550
YK-160	1	220	220	22	242
Binder VDL115	1	450	450	45	495
NI CompactDAQ	3	70	270	7	217
Omega PX409	9	12	108	1,2	109,2
Brüel & Kjær 4524	9	20	180	2	182
Разом основне технологічне устаткування					54 523,2
Допоміжне та підйомно-транспортне устаткування					
-	-	-	-	-	-
Разом допоміжне та підйомно-транспортне устаткування					-
Загалом по цеху (виробничій дільниці)					54 523,2

Допоміжне та підйомно-транспортне устаткування не є потрібним оскільки вага на добу готових деталей та сировини яка надходить не перевищує 5 кг.

Витрати на капітальні вкладення у промислові будівлі та споруди розраховують на основі площі виробничого приміщення та середніх нормативних показників вартості будівельних конструкцій і інженерних мереж (табл. 5.7).

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

Таблиця 5.8 – Усереднені ринкові ціни на елементи будівельно-монтажних робіт

Елементи будівельно-монтажних робіт	Вартість, грн/м ³	Загальна вартість, тис. грн.
1. Виробничі будівлі	3000	5832
2. Водопостачання виробничих приміщень	35	0
3. Каналізація виробничих приміщень	30	0
4. Електропроводка виробничих приміщень	55	106,92
5. Вентиляція виробничих приміщень	75	145,8
6. Зовнішній благоустрій	80	0
7. Невраховані витрати	700	0
Загальна вартість будівлі		6084,72

Для забезпечення безперебійної та стабільної роботи проектованої ділянки необхідний певний обсяг оборотних коштів. Мінімально достатня їх сума, що гарантує безперервність виробничого процесу, визначається як норматив оборотних засобів.

Найвагомішою складовою цього нормативу (яка може сягати до 70% від загального обсягу) є поточний запас матеріалів. Він формується для того, щоб підприємство не зупинялося у проміжках між послідовними поставками ресурсів.

Розрахунок середнього поточного запасу (Z_m) виконується за формулою 5.5:

$$Z_m = M_d \cdot \frac{T_{\text{пост}}}{2}, \quad (5.5)$$

де M_d – середньодобове споживання сировини та матеріалів, грн;

$T_{\text{пост}}$ – інтервал між поставками матеріалів у днях (приймається в межах 15–30 днів).

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		100

Середньодобове споживання матеріалів (M_d) знаходять діленням сумарної річної вартості всіх матеріальних ресурсів на 360 днів.

Усі інші компоненти оборотного капіталу (зокрема транспортний, підготовчий та страховий запаси, обсяги незавершеного виробництва, витрати майбутніх періодів, а також залишки готової продукції на складах) сумарно оцінюються у розмірі 50% від величини розрахованого поточного запасу.

З огляду на це, підсумковий загальний норматив оборотних коштів ($H_{\text{заг}}$) для проєктованого об'єкта обчислюється так:

$$H_{\text{заг}} = 1,5 \cdot 25,00 = 37,50 \text{ тис. грн.}$$

На основі отриманих результатів формується підсумковий розрахунок загального обсягу капітальних інвестицій у проєктований об'єкт (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок загальних капітальних вкладень

Елементи капіталовкладень	Сума	
	тис. грн.	%
1. Виробнича будівля	6084,72	10,03%
2. Устаткування	54523,20	89,90%
2.1. Основне технологічне		
2.2. Допоміжне та підйомно-транспортне	0,00	0,00%
3. Норматив оборотних засобів	37,50	0,07%
Всього капіталовкладень у виробничі засоби	60645,42	100,00%

5.5 Визначення планової собівартості одиниці продукції

Типова номенклатура калькуляційних статей витрат для більшості підприємств різних галузей виглядає так:

- 1) сировина та матеріали (за вирахуванням зворотних відходів);
- 2) паливо та енергія на технологічні цілі;
- 3) основна заробітна плата технологічних робітників;
- 4) додаткова заробітна плата технологічних робітників;

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		101

- 5) єдиний соціальний внесок;
- 6) витрати на утримання та експлуатацію устаткування;
- 7) загальновиробничі витрати;
- 8) загальногосподарські витрати;
- 9) витрати на підготовку та освоєння виробництва;
- 10) позавиробничі витрати (на збут продукції, на маркетинг).

На основі виконаних розрахунків складається планова калькуляція собівартості продукції (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 – Планова калькуляція собівартості річного обсягу виробництва продукції

Найменування статей витрат	Одиниця виміру	Кількість на річну програму	Ціна за одиницю, грн	Витрати на річну програму
1. Сировина та матеріали	кг	593	4 500	2 668 500,00
1.1. Порошок cBN	кг	148	350	51 800,00
1.2. Порошок Al ₂ O ₃	кг	60	1 200	72 000,00
1.3. Нановолокна S ₃ N ₄	кг	150	195	29 250,00
1.4. Діоксид титану TiO ₂	кг	50	50	2 500,00
1.5. Технічний вуглець (сажа)				
Разом за статтею 1				2 824 050,00
2. Паливо та енергія на технологічні цілі (енергоносії)				450 000,00
3. Основна заробітна плата технологічних робітників				640 000,00
4. Додаткова заробітна плата технологічний робітників				128 000,00
5. Єдиний соціальний внесок				168 960,00
6. Утримання та експлуатація устаткування				1 450 000,00
7. Загальновиробничі витрати				380 000,00
8. Загальногосподарські витрати				220 000,00
9. Витрати на підготовку та освоєння виробництва				90 000,00
10. Позавиробничі витрати				200 000,00
Виробнича собівартість річної програми				6 351 010,00
Повна собівартість річної програми				6 551 010,00

Повну собівартість одиниці продукції розраховують як відношення повної собівартості річної програми випуску продукції до річного обсягу випуску продукції дільницею:

$$C_{\text{п}} = \frac{6551010}{468,75} = 13975,49 \text{ грн/кг},$$

$$C_{\text{п}} = \frac{6551010}{150000} = 43,67 \text{ грн/шт.}$$

5.6. Розрахунок показників економічної ефективності

Оцінку ефективності спроектованої дільниці доцільно розпочати з визначення трудомісткості продукції, яка характеризує витрати живої праці на виготовлення одного виробу. Оскільки трудомісткість є показником, оберненим до продуктивності праці, її зниження є пріоритетним завданням для технологічного процесу. Розрахунок здійснюється як відношення загальних витрат робочого часу персоналу до річної програми випуску:

$$t = \frac{\text{Ч}_{\text{ос}} \cdot \Phi_{\text{еф}}^{\text{пл}}}{G} = \frac{15 \cdot 1672}{150000} = 0,1672 \frac{\text{нормо} - \text{годин}}{\text{шт}},$$

де $\text{Ч}_{\text{ос}}$ – загальна чисельність основних (технологічних) робітників, осіб;

$\Phi_{\text{еф}}^{\text{пл}}$ – плановий ефективний фонд робочого часу одного працівника за рік, год.;

G – річний обсяг (програма) випуску продукції.

Цей показник демонструє високу технологічність дільниці, де використання автоматизованих систем дозволяє мінімізувати частку ручної праці в загальному циклі виробництва.

Наступним кроком є визначення капіталомісткості виробництва, яка показує рівень інвестицій на одиницю продукції. Враховуючи високу вартість

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		103

наукомісткого обладнання, цей показник характеризує капіталоємну природу виробництва інноваційних надтвердих матеріалів:

$$K_G = \frac{60696170}{150000} = 404,64 \text{ грн/шт.}$$

Ключовим моментом економічного обґрунтування є ціноутворення, оскільки саме ціна забезпечує повернення інвестицій. Для інноваційної продукції, що володіє унікальними експлуатаційними властивостями, ціну доцільно визначати через економічний ефект у споживача. Враховуючи підвищення надійності інструменту в 2–8 разів завдяки VMAM-обробці та моніторингу через цифровий двійник DT2, ми застосовуємо коефіцієнт цінності ($K_{\text{інн}} = 3,0$). Такий підхід дозволяє перетворити технологічну перевагу в фінансовий прибуток:

$$\Pi = C_{\Pi} \cdot (1 + R_{\Pi}) \cdot K_{\text{інн}} = 43,67 \cdot 1,25 \cdot 3,0 \approx 165,00 \text{ грн,}$$

де C_{Π} – повна собівартість одиниці продукції, грн;

R_{Π} – коефіцієнт нормативної рентабельності, що враховує прибутковість виробництва (прийнято 0,25);

$K_{\text{інн}}$ – коефіцієнт інноваційності, що відображає приріст експлуатаційної надійності виробу порівняно з аналогами.

Завершальним етапом є розрахунок періоду окупності, який підтверджує фінансову спроможність проекту. Грошовий потік, що генерується дільницею, враховує як чистий прибуток, так і амортизаційні відрахування, що забезпечують оновлення основних фондів:

$$\Gamma P_p = 0,82 \cdot (\Pi - C_{\Pi}) \cdot G + \sum A = 4073590 \text{ грн,}$$

де 0,82 – коефіцієнт, що враховує частку чистого прибутку у валовому (після сплати податку на прибуток 18%);

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						104
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(Ц - С_п) – прибуток від реалізації одиниці продукції, грн;

G – річний обсяг виробництва продукції, шт;

ΣА – загальна річна сума амортизаційних відрахувань на основні засоби, грн.

Таким чином, період окупності інвестицій становить:

$$P_{\text{ок}} = \frac{60696170}{4073590} \approx 3,7.$$

Отриманий термін окупності, що не перевищує нормативного показника в 5-7 років, математично доводить доцільність впровадження проекту. Важливо підкреслити, що закладена рентабельність у поєднанні з технологічними перевагами інструменту забезпечує не лише швидке повернення капіталу, а й формування стратегічної конкурентної переваги на ринку різального інструменту.

Економічна частина проекту закінчується складанням зведеної порівняльної таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Порівняльні техніко-економічні показники спроектованого об'єкта

Найменування показників	Одиниця виміру	Спроектоване виробництво
1	2	3
1. Річний плановий обсяг виробництва продукції (G)	шт/рік	150000
2. Загальна площа ділянки	м ²	432
3. Виробнича площа ділянки	м ²	238
4. Капіталомісткість продукції (K _G)	грн шт	404,64

Продовження таблиці 5.10

1	2	3
5. Загальна чисельність у тому числі: основний (технологічний) персонал допоміжний (технологічний) персонал управлінський та обслуговуючий персонал	осіб	15 8 7
6. Загальний річний фонд заробітної плати	грн	1 092 960
7. Середньомісячна заробітна плата одного працівника	грн	18 500
8. Річний виробіток на одного працівника (продуктивність праці)	$\frac{\text{шт}}{\text{особу}}$	10 000
9. Технологічна трудомісткість продукції (t)	$\frac{\text{нормо} - \text{годин}}{\text{шт}}$	0,167
10. Цехова собівартість одиниці продукції	$\frac{\text{грн}}{\text{шт}}$	43,67
11. Період окупності (P _{ок})	років	3,7

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено дільницю з виробництва надтвердого інструменту на основі кубічного нітриду бору марки BN100+, призначеного для чистової обробки загартованих сталей і чавунів. Результатом роботи стала розробка конструкторської документації інтелектуальної технологічної лінії продуктивністю 150 000 різальних пластин на рік.

Обґрунтовано склад наноармованого композиту групи BL (60 % cBN, 25 % TiC, 15 % Al₂O₃), що забезпечує підвищення міцності матеріалу до 850–900 МПа при збереженні високої твердості. Розроблено технологічний процес виробництва, який включає карботермічний синтез карбіду титану та термобаричне спікання за надвисоких тисків.

Запропоновано архітектуру подвійних цифрових двійників для моделювання процесів спікання та прогнозування зносу інструменту. Використання цифрового супроводу разом із вібро-магнітно-абразивною обробкою дозволяє знизити виробничий брак з 10 % до 3 %, досягти шорсткості поверхні Ra = 0,04 мкм та підвищити надійність інструменту у 2–8 разів.

Виконано компонування виробничої дільниці площею 432 м², розроблено конструкцію реакційної комірки для НРНТ-синтезу та прес-форми для холодного пресування заготовок. У розділі охорони праці запропоновано комплекс технічних рішень для безпечної роботи з легкозаймистими речовинами та обладнанням надвисокого тиску.

Економічні розрахунки підтвердили ефективність проєкту: річний прибуток становить 4,91 млн грн, а термін окупності капітальних вкладень — 3,7 року. Розроблені технічні рішення відповідають вимогам міжнародних стандартів ISO 513:2012 [7] та ISO 1832:2017 [9] і можуть бути використані у високотехнологічних галузях машинобудування.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ		
Розробив		Зайцев В.П.					
Перевірів		Наконечний С.О.					
Рецензент		Іващенко Є.В.					
Н. Контр		Бірюкович Л.О.					
Затвердив		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Акрушіє
						107	115
					НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21		

CONCLUSIONS

In this diploma project, a production unit for manufacturing superhard cutting tools based on cubic boron nitride BN100+ was developed for the finishing machining of hardened steels and cast irons. The main outcome of the work is the development of design documentation for an intelligent production line with a capacity of 150,000 cutting inserts per year.

The composition of a nano-reinforced BL-group composite (60% cBN, 25% TiC, and 15% Al₂O₃) was substantiated, providing a bending strength of 850–900 MPa while maintaining high hardness. A manufacturing process was developed, including carbothermic synthesis of titanium carbide and thermobaric sintering under ultra-high-pressure conditions.

A dual digital twin architecture was proposed for modeling sintering processes and predicting tool wear. The implementation of digital twin technology together with vibro-magnetic abrasive machining (VMAM) makes it possible to reduce the defect rate from 10% to 3%, achieve a surface roughness of Ra = 0.04 μm, and increase tool reliability by 2–8 times.

A production facility layout with a total area of 432 m² was designed, along with a reaction cell for HPHT synthesis and a die for cold pressing of blanks. The occupational safety section proposes a set of engineering measures ensuring safe operation with flammable substances and ultra-high-pressure equipment.

Economic calculations confirmed the feasibility of the project: the annual profit is estimated at UAH 4.91 million, while the payback period of capital investments is 3.7 years. The developed technical solutions comply with the requirements of ISO 513:2012 [7] and ISO 1832:2017 [9] and can be applied in high-tech industries.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	CONCLUSIONS			
Розробив		Зайцев В.П.						
Перевірів		Наконечний С.О.						
Рецензент		Іващенко Є.В.						
Н. Контр		Бірюкович Л.О.						
Затвердив		Богомол Ю. І.						
					Літ.	Арк.	Акрушіє	
							108	115
					НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21			

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Лавріненко В. І. Надтверді матеріали: посібник для допитливих [Текст] : навч. посіб. / В. І. Лавріненко. – Київ : Академперіодика, 2018. – 336 с.
2. Evolution of the Microstructure and Mechanical Properties of cBN-Based Cutting Tools with Silicides Compounds as Binder Phase [Text] / K. Slipchenko [et al.] // Advances in Manufacturing Technology XXXIV : Proceedings of the 18th International Conference on Manufacturing Research. – IOS Press, 2020. – P. 428–433.
3. Preventive action of silicon nitride at HT-HP sintering of cubic boron nitride [Текст] / I. A. Petrusha [et al.] // Journal of Superhard Materials. – 2015. – Vol. 37, № 4. – P. 222–233.
4. Румянцева Ю. Ю. Влияние микроволокон SiC и Al₂O₃ на свойства армированных композитов на основе кубического нитрида бора [Текст] / Ю. Ю. Румянцева, В. Н. Бушля, В. З. Туркевич // Сверхтвердые материалы. – 2019. – № 6. – С. 27–34.
5. Davim J. Paulo. Cutting tool materials and tool wear [Text] / J. Paulo Davim. – London : Springer, 2016. – 200 p.
6. The curved uncut chip thickness model: A general geometric model for mechanistic cutting force predictions [Текст] / D. Hajdu [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2023. – Vol. 188. – 104019.
7. ISO 513:2012. Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges [Текст]. – Geneva : International Organization for Standardization, 2012. – 15 p. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/59932.html> (дата звернення: 31.05.2026). – Назва з екрана.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Зайцев В.П.			СПИСОК ДЖЕРЕЛ		
Перевірів		Наконечний С.О.					
Рецензент		Іващенко Є.В.					
Н. Контр		Бірюкович Л.О.					
Затвердив		Богомол Ю. І.					
						Літ.	Арк.
							109
						Акрушів	115
						НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21	

8. Працездатність різального інструменту, оснащеного ПКНБ групи BL, при швидкісній обробці загартованої сталі [Текст] / А. О. Чумак [та ін.] // Технічна інженерія. – 2023. – № 1(91). – С. 17–25.
9. ISO 1832:2017. Indexable inserts for cutting tools – Designation [Текст]. – Geneva : International Organization for Standardization, 2017. – 36 р. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/69202.html> (дата звернення: 31.05.2026).– Назва з екрана.
10. Степанчук А. М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук [Текст] : підручник / А. М. Степанчук. – Київ : Політехніка, 2006. – 410 с.
11. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови [Текст] : ДСТУ 3292–95. – Чинний від 1997–01–01. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 54 с.
12. Кокс пековий електродний. Технічні умови [Текст] : ДСТУ 4389:2005/ГОСТ 3213-2006. – Київ : Держспоживстандарт України, 2005.
13. ТУ 6-09-492-75. Карбід титану. Технічні умови [Текст].
14. Пат. 20240228387 A1 United States, IPC C04B 35/5831. Polycrystalline cubic boron nitride body [Електронний ресурс] / R. M'Saoubi, F. Lenrick, V. Bushlya ; Seco Tools AB. – № 18/563,111 ; заявл. 25.05.2022 ; опубл. 11.07.2024. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US20240228387A1/en> (дата звернення: 31.05.2026). – Назва з екрана.
15. Davim J. Paulo. Machining of Hard Materials [Text] / J. Paulo Davim. – London : Springer, 2011. – 221 p.
16. Liew W. Y. H. Wear characteristics of PCBN tools in the ultra-precision machining of stainless steel at low speeds [Text] / W. Y. H. Liew, B. K. A. Ngoi, Y. G. Lu // Wear. – 2003. – Vol. 254, № 3-4. – P. 265–277.
17. The Precision Analysis of Cutting Edge Preparation on CBN Cutting Inserts Using Rotary Ultrasonic Machining [Text] / M. Kuruc [et al.] // Micromachines. – 2022. – Vol. 13, № 10. – Art. 1562.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		110

18. Фінішна обробка різальних пластин з композиту на основі кубічного нітриду бору групи BL [Текст] / А. О. Чумак [та ін.] // Cutting & Tools in Technological System. – 2021. – Вип. 94. – С. 102–114. – DOI: 10.20998/2078-7405.2021.94.12.
19. Hard turning of AISI D2 steel with cubic boron nitride cutting inserts [Text] / S. Kumar [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2023. – Vol. 72. – P. 215–221.
20. Optimization of Ultra-Precision CBN Turning of AISI D2 Using Hybrid GA-RSM and Taguchi-GRA Statistical Tools [Text] / A. Tura [et al.] // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – Art. e31849.
21. Охорона праці та цивільний захист [Текст] / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний [та ін.] ; за ред. О. Г. Левченка. – Київ : Основа, 2019. – 472 с.
22. Про охорону праці [Електронний ресурс] : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII / Верховна Рада України. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 27.05.2026). – Назва з екрана.
23. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Текст] : ДСН 3.3.6.042-99. – Чинні від 01.12.1999. – Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 1999.
24. Державні і будівельні норми України. Природне і штучне освітлення [Текст] : ДБН В.2.5.28-2006. – Чинний з 2006-05-15. – Київ : Мінбуд України, 2006. – 76 с.
25. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації [Текст] : ДСН 3.3.6.039-99. – Чинні від 01.12.1999. – Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 1999.
26. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація [Текст] : ДСТУ EN 133:2005. – Чинний від 01.07.2006. – Київ : Держспоживстандарт України, 2006.
27. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок [Текст]. – Київ : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
28. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : НПАОП 40.1-1.21-98. – Чинні від 20.02.1998. – Київ, 1998.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

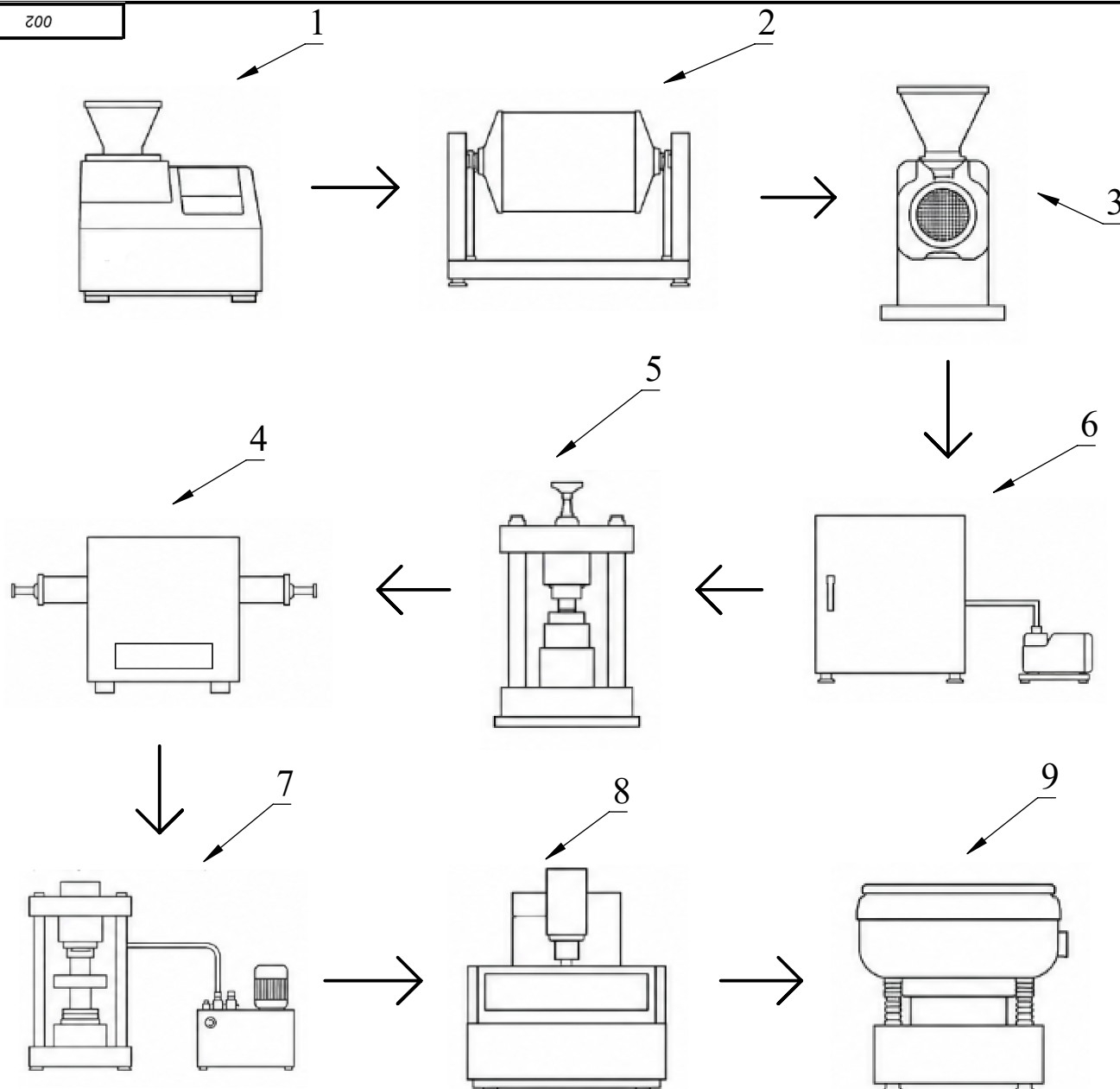
29. Пожежна безпека об'єктів будівництва [Текст] : ДБН В.1.1.7-2016. – [Чинний з 2017-06-01]. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. – 47 с.
30. Установки автоматичні аерозольного пожежогасіння. Проектування, монтування та експлуатування [Текст] : ДСТУ 4490:2005. – [Чинний з 2006-07-01]. – Київ : Міністерство надзвичайних ситуацій України, 2006. – 4 с.
31. Козик В. В. Економіка підприємства [Текст] : підручник / В. В. Козик, О. Ю. Ємельянов, О. Я. Загорецька. – Львів : Новий Світ – 2000, 2025. – 278 с.
32. Волкова І. Калькуляція собівартості продукції, робіт та послуг [Текст] : підручник / І. Волкова, О. Оксанич, О. Миронова. – Київ : Центр учбової літератури, 2023. – 326 с.
33. Магістерська дисертація за освітньо-професійною програмою [Електронний документ] : рекомендації до проектування : навч. посіб. для студ. спеціальності 132 “Матеріалознавство” освітньої програми “Нанотехнології та комп’ютерний дизайн матеріалів” : 2 частини / НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського” ; уклад.: А. М. Степанчук, А. В. Мініцький, С. В. Нараєвський. – Електронні текстові дані (1файл: 775 Кбайт). – Частина 2. – Київ : НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2021. – 87 с.

					ФН21.2106.4203.003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		112

Форм.		№ з/п	Позначення	Найменування	Кіл.	Приміт.
				Документація		
			ФН21.2106.4203.003.02АС			
A4				Апаратарутрно-технолонічна схема		
				Обладнання		
		1		Планетарний млин Retsch	2	
		2		Барабанний змішувач PerMix	1	
		3		Гранулятор УК-160	1	
		4		Сушильна шафа Binder	1	
		5		Гідравлічний прес Fontijne	1	
		6		Вакуумна піч Centorr	1	
		7	ФН21.2106.1103.003.04СА	НРНТ-прес Нутен	3	
		8		Електроерозійний верстат	4	
				Sodick AQ325L		
		9		Установка фінішної обробки	1	
				ОТЕС CF		

[illegible]

Форм.		№ з/п	Позначення			Найменування	Кіл.	Приміт.
						<u>Документація</u>		
A4			ФН21.2106.4203.003.03ПД			План діляниці		
						<u>Обладнання</u>		
		1				Планетарний млин Retsch	2	
		2				Барабанний змішувач PerMix	1	
		3				Гранулятор УК-160	1	
		4				Сушильна шафа Binder	1	
		5				Гідравлічний прес Fontijne	1	
		6				Вакуумна піч Centorr	1	
		7	ФН21.2106.1103.003.04СА			НРНТ-прес Нупен	3	
		8				Гідравлічна станція ZZSM	3	
		9				Електроерозійний верстат	4	
		10				Установка фінішної обробки	1	
		11				Робоча станція Dell	3	
		12				NI CompactDAQ	6	
		13				Цифровий мікроскоп Keyence	2	
		14				Керувальна шафа	1	
						Rittal VX SE		
						ФН21.2106.4203.003.01ПЗ		
			ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.		Зайцев В.П.				План діляниці	Лист	Листів
Керівн.		Наконечний С.О.					115	115
Консульт.		Іващенко Є.В.					НТУУ «КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21	
Н/контр.		Бірюкович Л.О.						
Зав.каф.		Богомол Ю. І.						



ФН21.0308.4203.003.02АС

**Апаратно-
технологічна
схема**

Літ. Маса Маштаб

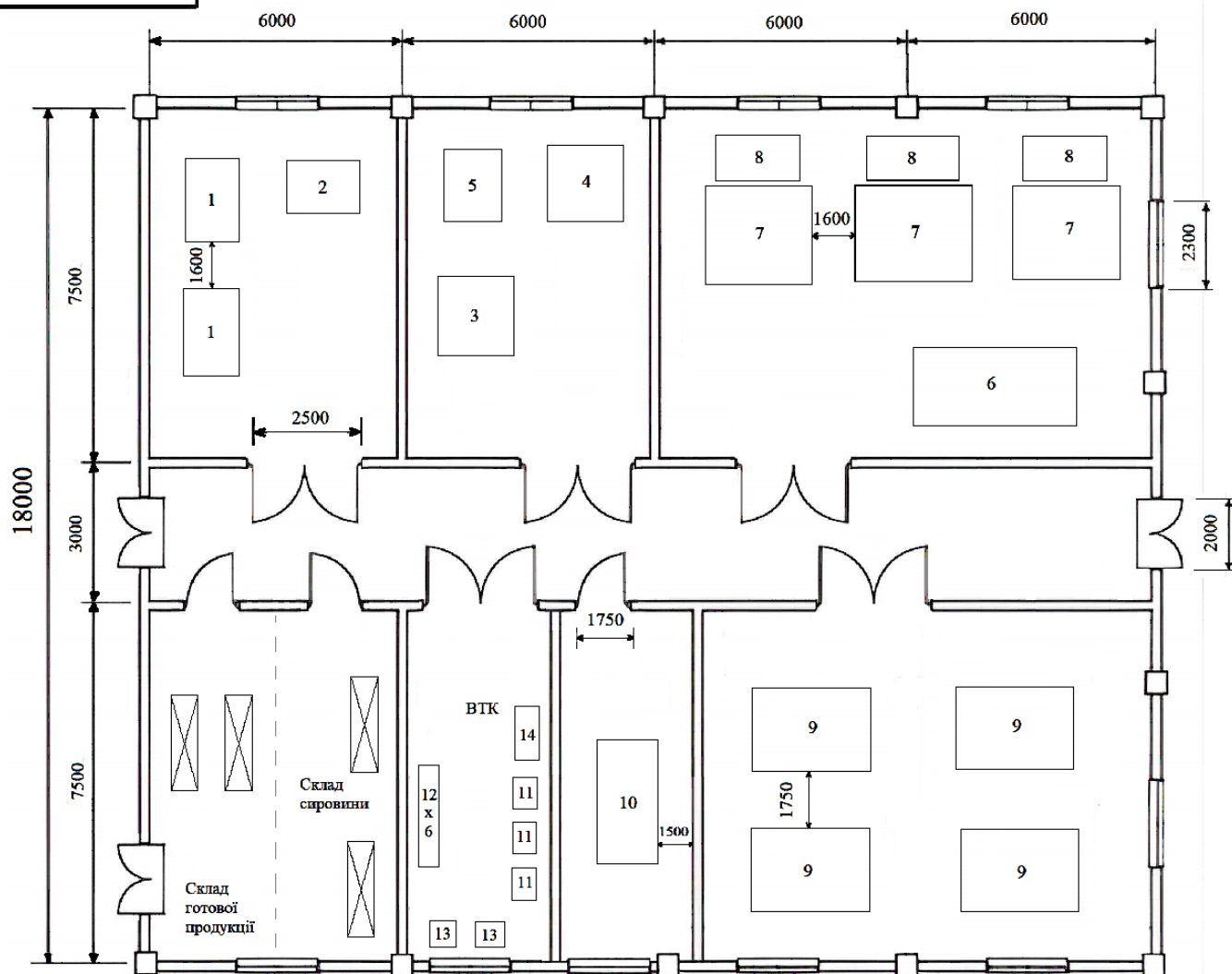
1:200

116 Листів 1

НТУУ «КПІ»
Каф. ВТМ та ПМ
Гр. ФН-21

Дата	№ докум.	Підпис	Дата
Розробив	Зайцев В.П.		
Провірів	Наконечний С.О.		
Консульт.	Іващенко Є.В.		
Н. контр.	Бірюкович Ю.О.		
Затверд.	Богомол Ю.І.		

£00



ФН21.0308.4203.003.03ПД

ПЛАН ДІЛЬНИЦІ

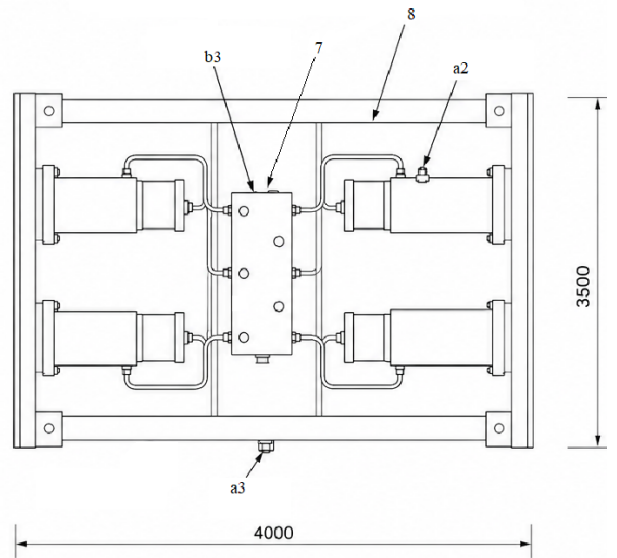
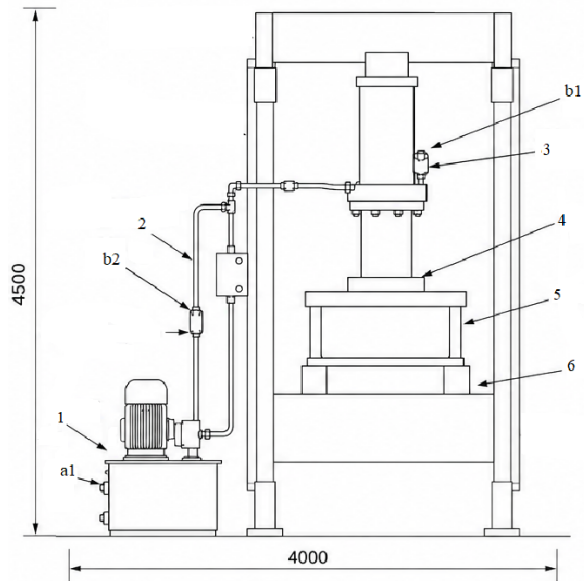
Літ. Маса Маштаб

1:200

117 Листів 1

НТУУ «КПІ»
Каф. ВТМ та ПМ
Гр. ФН-21

Дата	№ докум.	Підпис	Дата	
Розробив	Зайцев В.П.			
Провірів	Наконечний С.О.			
Консульт.	Іващенко Є.В.			
Н. контр.	Бірюкович Ю.О.			
Затверд.	Богомол Ю.І.			



					ФН21.0308.4203.003.04СА											
					НТНР-ПРЕС						Літ.		Маса	Маштаб		
	Дата	№ докум.	Підпис	Дата												1:100
Розробив	Зайцев В.П.															
Провірів	Наконечний С.О.															
											119		Листів 1			
Консульт.	Іващенко Є.В										НТУУ«КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-21					
Н. контр.	Бірюкович Ю.О															
Затверд.	Богомол Ю.І.															



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

ZaitsevVP_FN21

Автор

Зайцев Всеволод Павлович

Науковий керівник / Експерт

Наконечний Сергій Олегович

ІД документу

334308921

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

**National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv
Politech Institute**

підрозділ

**ІМЗ, К-ра високотемпературних матеріалів та порошкової
металургії**

ЗВІТ

Дата звіту

6/13/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.

**20893**

Кількість слів

158843

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		27
Інтервали		0
Мікропробіли		1
Білі знаки		10
Парафрази (SmartMarks)		283

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://ela.kni.ua/bitstreams/240a4362-ed6e-4a2c-babb-25f18c29b4da/download	84 (14 %)

ЗАУВАЖЕННЯ

до дипломного проекту на здобуття ступеня бакалавра студента
ЗАЙЦЕВА Всеволода Павловича

Зауваження	Відмітка
ТИТУЛЬНА СТОРІНКА	
Див. в тексті	
ВІДОМІСТЬ ДП	
Формат креслеників і плакату А4	
Правильний шифр кафедри	4203
ЗАВДАННЯ	
Пронумерувати сторінки завдання	
Не входить до записки, а є окремим файлом, тому треба змінити нумерацію сторінок записки	
Відсутня дата видачі завдання	
РЕФЕРАТ	
Змінити нумерацію сторінок	
Правильно заповнити штамп	
ЗМІСТ	
ТЕКСТ РОБОТИ	
Приклади посилань на інформаційні джерела, [1], [5]; [1]–[5]; [1], [5]–[8]	Увесь текст
Невірно оформлені таблиці з продовженням. Відсутній рядок із позначенням номера стовпчика	Табл 1.2
Крапка є тільки розділом знаком у номері підрозділу, пункту, таблиці, рисунку, формули	
Після формул (рівнянь математичних і хімічних) необхідно ставити розділові знаки. Якщо далі нове речення, то крапку, якщо пояснення, то кому!	
Номер формули друкують у правому крайньому положенні на рядку	
Посилання повинні бути на усі нормативні документи (текст, таблиці), бібліографічні описи яких мають бути занесені до ПЕРЕЛІКУ ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	
ДОДАТКИ	
Скласти правильно шифр записки, специфікацій та креслеників	
КРЕСЛЕНИКИ	
Усі кресленики для теки виконат на А4	
В основних написах виправити шифр	
План ділянки. Багато вільних виробничих площ. Зайві колони. Двері відкриваються назовні. Відсутні розміри дверей.	
ПРЕЗЕНТАЦІЯ	

Відповідальний за нормо контроль
кафедри ВТМ та ПМ

Ліна БІРЮКОВИЧ
15.06.2026