

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра Машинобудування, транспорту і зварювання

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Підготовка фахівців машинобудівної галузі з формування структури і
властивостей антифрикційних покриттів з твердих сплавів
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 5 курсу, групи ДІТ-
ПОМ23мг

спеціальності: 015.34 «Професійна освіта
(Машинобудування)»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

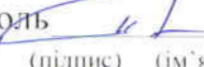
 / Денис ДОЛЖЕНКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник  / Олександр ПЕРМЯКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент  / Наталія АНТОНЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль  / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК  / Валентина СКОРКІНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»

Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання

Спеціальність 015.34 Професійна освіта (Машинобудування)

Освітньо-професійна програма Професійна освіта (Машинобудування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТіЗ

 О.Л. Подоляк

“ 12 ” 10 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

другого (магістерського) рівня вищої освіти

студенту (ці) Денису ДОЛЖЕНКОВУ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підготовка фахівців машинобудівної галузі з формування структури і властивостей антифрикційних покриттів з твердих сплавів

затверджена наказом 4801-5/3345 від 12.10. 2024 р.

2. Термін здачі магістрантом закінченої роботи 5 грудня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи: Зразки деталей з твердих сплавів з антифрикційними покриттями, нормативні документи, паспортні дані обладнання, каталоги, стандарти на засоби технічного оснащення..

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): Вступ. Стан питання, мета, завдання дослідження. теоретичне обґрунтування та розробка сумещеної обробки шліфувально-полірувальними черв'ячними кругами. Вибухове пресування як метод одержання порошкових твердих сплавів і покриттів з них. Експлуатаційні властивості порошкових карбідохромових твердих сплавів з титановим зв'язком і технологія їх нанесення на деталі вузлів трення вибухом. Методичний розділ. Висновки. Список джерел інформації. Додатки.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів: У вигляді презентації PowerPoint.

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	
педагогічний	Вероніка БАКАТАНОВА			

7. Дата видачі завдання «12» 10 2024р.

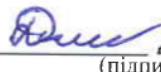
Керівник

Олександр ПЕРМЯКОВ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

Денис ДОЛЖЕНКОВ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Вибір теми й обґрунтування проблеми дослідження. Визначення об'єкта, предмета, мети й завдань.		
2.	Складання плану роботи. Підбор літератури й інших джерел		
3.	Оформлення завдання проектування для затвердження теми кваліфікаційної роботи		
4.	Підготовка аналітичної частини		
5.	Підготовка теоретичної частини		
6.	Розробка дослідницької частини		
7.	Розробка методичного розділу		
8.	Підготовка графічного матеріалу		
9.	Доробка проекту по зауваженнях наукового керівника		
10.	Доробка проекту по зауваженнях консультантів		
11.	Оформлення кваліфікаційної роботи. Підготовка до захисту.		
12.	Захист кваліфікаційної роботи		

Здобувач вищої освіти

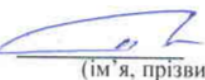


(підпис)

Денис ДОЛЖЕНКОВ

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль



(підпис)

(ім'я, прізвище)

Олег ПОДОЛЯК

Додаток 2 до Порядку проведення перевірки наукових праць, навчально-методичних видань та дипломних робіт (проектів) працівників та здобувачів вищої освіти на наявність запозичень з інших документів (нова редакція)

Введено в дію:

наказ ректора № 0204 -1/088 від 27.02.2020 р.

Протокол контролю оригінальності дипломної роботи (проекту)

Підготовка фахівців машинобудівної галузі з формування структури і властивостей антиф-
рикційних покриттів з твердих сплавів

(назва роботи)

студента

ДОЛЖЕНКОВ Денис Сергійович

(прізвище, ім'я та по батькові)

науковий керівник

Пермяков Олександр Анатолійович

(прізвище, ім'я та по батькові)

В результаті перевірки роботи в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com встановлено наступні значення Коефіцієнтів Подібності

Коефіцієнт Подібності 1: 0,36,

Коефіцієнт Подібності 2: 0,00,

Сигнал „Тривога!": ☐ – немає; ☐ – є, кількість разів у тексті ____.

Вченою радою факультету (навчально-наукового інституту) затверджено наступні показники оригінальності (за значенням коефіцієнту K1):

не більше 20% – оригінальна робота,

від __% до __% – задовільно оригінальна робота,

від __% до __% – умовно оригінальна робота,

більше __% – неоригінальна робота.

Відповідно до цього, робота може бути класифікована як:

☒ оригінальна,

☐ задовільно оригінальна,

☐ умовно оригінальна,

☐ неоригінальна.

Висновок:

☒ робота може бути допущена до захисту,

☐ необхідно провести розгляд Повного Звіту Подібності із залученням фахівців із тематики дипломної роботи (проекту).

Примітки Системного Оператора про виявлені запозичення:

Системний Оператор

(підпис)

Скоркін А.О.

(прізвище та ініціали)

28.11.24

(дата)

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1 Актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі	8
2. Вибухове пресування як метод одержання порошкових твердих сплавів і покриттів з них	14
3. Матеріали і методи дослідження	26
4. Отримання покриттів з твердих сплавів	44
5. Експлуатаційні властивості порошкових карбідохромових твердих сплавів з титановим зв'язком і технологія їх нанесення на деталі вузлів трення вибухом	53
Розділ 6 Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «структура і властивості антифрикційних покриттів з твердих сплавів» для фахівців машинобудівної галузі	63
Висновки	78
Список використаних джерел	81

Реферат магістерської кваліфікаційної роботи з теми “Підготовка фахівців машинобудівної галузі з формування структури і властивостей антифрикційних покриттів з твердих сплавів”

РЕФЕРАТ

Робота містить 78с., 39 рис., 22 табл., 24 джерел.

Кваліфікаційна робота (дипломний проєкт) присвячений науковому обґрунтуванню та вдосконаленню системи підготовки фахівців машинобудівної галузі з формування структури і властивостей антифрикційних покриттів з твердих сплавів.

У першому розділі розглянуто актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі з технологічного забезпечення та підвищення якості поверхневого шару евольвентних поверхонь зубів.

У другому розділі виконано огляд досліджень та публікацій з проблеми формування структури і властивостей антифрикційних покриттів з твердих сплавів.

У третьому розділі виконано теоретичне обґрунтування та вибір матеріалів для проведення дослідження.

У четвертому розділі виконано розробку методики проведення експериментальних досліджень для антифрикційних покриттів з твердих сплавів.

У п'ятому розділі виконано дослідження експлуатаційних властивостей порошкових карбідохромових твердих сплавів з титановим зв'язком і технологія їх нанесення на деталі вузлів трення вибухом.

Запропонована методика може бути покладена в основу інноваційних технологій під час навчання для отримання кваліфікованих фахівців машинобудівної галузі.

Ключові слова: професійна підготовка, машинобудівна галузь, фахівець, шліфування, твердий сплав, покриття, методика практичного заняття.

Abstract of the master's qualification work on the topic “Training of specialists in the mechanical engineering industry in the formation of the structure and properties of antifriction coatings made of hard alloys”

ABSTRACT

The work contains 78 pages, 39 figures, 22 tables, 24 sources.

The qualification work (diploma project) is devoted to the scientific substantiation and improvement of the system of training specialists in the mechanical engineering industry in the formation of the structure and properties of antifriction coatings made of hard alloys.

The first section considers the relevance of professional training of specialists in the mechanical engineering industry in technological support and improving the quality of the surface layer of involute tooth surfaces.

The second section reviews research and publications on the problem of forming the structure and properties of antifriction coatings made of hard alloys.

The third section provides theoretical justification and selection of materials for conducting the study.

In the fourth section, a methodology for conducting experimental research for antifriction coatings made of hard alloys was developed.

In the fifth section, a study of the operational properties of powder carbidochromium hard alloys with a titanium bond and the technology of their application to parts of friction units by explosion was carried out.

The proposed methodology can be used as the basis for innovative technologies during training to obtain qualified specialists in the mechanical engineering industry.

Keywords: professional training, mechanical engineering industry, specialist, grinding, hard alloy, coating, practical training methodology.

ВСТУП

Прогрес низки областей техніки визначається успіхами у створенні нових матеріалів для використання у вузлах тертя, які здатні успішно працювати в незвичайних, більш важких умовах: при підвищених температурах, високих швидкостях ковзання та питомих навантаженнях, в агресивних середовищах, вакуумі, в умовах сильної радіації тощо .п. Одним із перспективних напрямів сучасного матеріалознавства у зв'язку з цим є розробка нових порошкових твердих сплавів триботехнічного призначення та способів їх отримання, заснованих на застосуванні таких джерел високоенергетичного впливу на речовину, як вибух.

Дослідження таких відомих зарубіжних фахівців, як RA Pruemmer (Karlsruhe Institute of Technology, Campus South, Institut für Werkstoffkunde II, Karlsruhe, Germany), K. Hokamoto (Kumamoto University, Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumato (University of California, San Diego, Департамент з NanoEngineering, San Diego, United States), LE Murr (College of Metallurgical, Materials and Biomedical Engineering, University of Texas в El Paso, Texas, United States), AG Mamalis (Project Center for Nanotechnology and Advanced Engineering, Athens , Greece) та ін [77 ... 83], забезпечили до В даний час високий рівень теоретичного розуміння процесів, що протікають при вибуховій обробці порошкових і композиційних матеріалів.

Досягнуті результати дозволили знайти рішення ряду важливих прикладних завдань, серед яких слід виділити вибухове пресування великогабаритних трубчастих заготовок з п'єзокерамічних порошків [84], вибухове пресування мішеней, що розпилюються, з оксидних порошків без зв'язки [85...88], вибухове формування електрокорундових [89, 90], вибухове брикетування стружки швидкорізальних сталей [91]; вибухове виготовлення металокерамічних контейнерів для транспортування та зберігання радіоактивних речовин [92]. Досвід показує, однак, що їхнє практичне використання має місце

тільки в тому випадку, коли не існує альтернативних, не пов'язаних з використанням вибухових речовин (ВВ), методів вирішення подібних виробничих завдань, або коли використання вибуху забезпечує досягнення більш високих якісних показників виробів і матеріалів, ніж інші технології. Пошук та освоєння подібних областей застосування вибухового компактування та консолідації порошків, що дозволяють реалізувати потенційні можливості методу, зараз є дуже актуальним.

Дуже перспективною з наукової та практичної точок зору є можливість обійти це обмеження шляхом використання при компактуванні порошкових сумішей карбідів з металами енергії вибуху. Вибухова обробка порошків дозволяє одночасно досягати тисків і температур, достатніх як ущільнення порошків до практично безпористого стану, так зварювання структурних компонентів порошкового матеріалу [97...100]. Специфіка вибухового навантаження дає можливість поєднати процес формування твердого сплаву із суміші порошків з його нанесенням у вигляді покриття на поверхню заготовок деталей [101...103]. При цьому товщина покриття може бути істотно вищою, ніж при використанні традиційних способів напилення [104...106].

РОЗДІЛ 1

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ

1.1. Стан професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі в Україні

Машинобудування є однією з провідних галузей промисловості України, що забезпечує виробництво широкого спектру машин, обладнання та транспортних засобів. Для успішного функціонування галузі необхідні висококваліфіковані фахівці з відповідними знаннями, навичками та компетенціями.

Професійна підготовка фахівців машинобудівної галузі в Україні здійснюється в закладах вищої та професійно-технічної освіти. В останні роки спостерігається зростання попиту на фахівців з машинобудування, що пов'язано з розвитком галузі та впровадженням нових технологій.

У сучасному світі машинобудування займає одне з ключових місць у розвитку промисловості та економіки. Це обумовлено тим, що машинобудування є основою для створення технічних засобів, які забезпечують функціонування інших галузей, таких як автомобільна, авіаційна, енергетична та багато інших. В умовах швидкого технологічного прогресу та глобалізації ринку, професійна підготовка фахівців у цій сфері стає надзвичайно актуальною.

По-перше, зростаюча конкуренція на міжнародному ринку вимагає від фахівців високого рівня знань та навичок. Сучасні технології, такі як автоматизація, робототехніка та комп'ютерне моделювання, вимагають від спеціалістів не лише теоретичних знань, але й практичних навичок, які можна отримати лише через якісну професійну підготовку.

По-друге, інновації в машинобудуванні, такі як використання нових

матеріалів, екологічні технології та енергоефективність, потребують фахівців, здатних адаптуватися до змін та впроваджувати нові рішення. Це підкреслює важливість постійного навчання та підвищення кваліфікації, що є невід'ємною частиною професійної підготовки.

По-третє, розвиток національної економіки безпосередньо залежить від якості підготовки кадрів у машинобудівній галузі. Висококваліфіковані фахівці здатні забезпечити конкурентоспроможність продукції, що, в свою чергу, сприяє зростанню інвестицій та розвитку підприємств.

Отже, актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі обумовлена потребами сучасного ринку праці, технологічними змінами та вимогами до якості продукції. Інвестування в освіту та підготовку кадрів є запорукою успішного розвитку машинобудування та економіки в цілому.

Підготовка фахівців машинобудівної галузі у закладах вищої освіти здійснюється за освітньо-професійними програмами бакалаврату та магістратури за такими спеціальностями:

- 131 «Прикладна механіка»;
- 132 «Матеріалознавство»;
- 133 «Галузеве машинобудування»;
- 134 «Енергетичне машинобудування»;
- 135 «Зварювання»;
- 136 «Металургія»;
- 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»;
- 142 «Теплоенергетика»;
- 143 «Атомна енергетика»;
- 144 «Гідроенергетика».

Програми підготовки фахівців машинобудівної галузі в закладах вищої освіти розробляються з урахуванням потреб ринку праці та сучасних вимог до професійних компетентностей.

Професійна підготовка фахівців машинобудівної галузі у закладах професійно-технічної освіти здійснюється за професіями:

- Монтажник технологічного обладнання;
- Токар;
- Фрезерувальник;
- Слюсар-інструментальник;
- Зварник;
- Електрогазозварник;
- Коваль;
- Терміст;
- Ливарник.

Програми підготовки фахівців машинобудівної галузі в закладах професійно-технічної освіти спрямовані на формування практичних навичок та компетенцій, необхідних для роботи на виробництві.

У сучасному світі машинобудування займає ключову позицію в економіці багатьох країн, оскільки забезпечує виробництво техніки та обладнання, необхідного для різних галузей промисловості. Актуальність професійної підготовки фахівців у цій сфері зумовлена кількома факторами:

1. Технологічний прогрес: швидкий розвиток нових технологій, таких як автоматизація, робототехніка та комп'ютерні технології, вимагає від фахівців глибоких знань і навичок. Вища освіта повинна відповідати цим змінам, забезпечуючи студентів сучасними знаннями.

2. Конкуренція на ринку праці: зростаюча конкуренція в машинобудівній галузі вимагає від фахівців не лише технічних знань, але й умінь працювати в команді, вирішувати проблеми та адаптуватися до змін. Професійна підготовка повинна включати розвиток м'яких навичок.

3. Вимоги до якості продукції: сучасні споживачі вимагають високої якості продукції, що потребує від фахівців знань у сфері контролю якості,

управління проектами та інноваційних технологій. Підготовка повинна включати ці аспекти.

4. Екологічні та енергетичні виклики: зростаюча увага до екологічних питань та енергоефективності вимагає від фахівців знань у сфері сталого розвитку та екологічних технологій. Це стає важливим аспектом професійної підготовки.

5. Співпраця з промисловістю: взаємодія закладів вищої освіти з підприємствами машинобудування дозволяє студентам отримувати практичний досвід, що підвищує їх конкурентоспроможність на ринку праці.

Таким чином, професійна підготовка фахівців машинобудівної галузі є надзвичайно актуальною, оскільки вона забезпечує не лише теоретичні знання, але й практичні навички, необхідні для успішної кар'єри в умовах швидко змінюваного технологічного середовища.

1.2. Проблеми професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі в Україні

Незважаючи на досягнуті успіхи в професійній підготовці фахівців машинобудівної галузі в Україні, існують певні проблеми, які потребують вирішення:

- Недостатнє фінансування закладів освіти, що обмежує можливості оновлення матеріально-технічної бази та впровадження сучасних технологій навчання.

- Розрив між теоретичною підготовкою фахівців та практичними вимогами виробництва.

- Низький рівень співпраці між закладами освіти та підприємствами машинобудівної галузі.

- Відсутність єдиної системи оцінки та сертифікації професійних компетенцій фахівців машинобудівної галузі.

Для вирішення існуючих проблем та удосконалення професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі в Україні необхідно вжити таких заходів:

- Збільшення фінансування закладів освіти, що дозволить оновити матеріально-технічну базу та впровадити сучасні технології навчання.

- Посилення співпраці між закладами освіти та підприємствами машинобудівної галузі, що сприятиме узгодженню навчальних програм з практичними вимогами виробництва.

- Розробка та впровадження єдиної системи оцінки та сертифікації професійних компетенцій фахівців машинобудівної галузі.

- Підвищення кваліфікації викладацького складу закладів освіти з метою впровадження сучасних методів навчання та використання нових технологій.

- Залучення до освітнього процесу представників підприємств машинобудівної галузі, які мають практичний досвід роботи та можуть передавати студентам актуальні знання та навички.

Професійна підготовка фахівців у галузі машинобудування є надзвичайно важливою в умовах сучасного розвитку промисловості та технологій. Сучасні вимоги до якості продукції, інноваційності та ефективності виробництв вимагають від фахівців не лише глибоких знань у своїй спеціальності, але й здатності адаптуватися до швидко змінюваного технологічного середовища.

1. Високі вимоги до кваліфікації

Сьогодні машинобудівна галузь стикається з новими викликами, такими як автоматизація, цифровізація та впровадження нових матеріалів. Це вимагає від фахівців знань у галузі комп'ютерних технологій, програмування, а також навичок роботи з сучасним обладнанням. Тому професійна підготовка повинна

включати не лише теоретичні знання, але й практичні навички, що дозволяють випускникам ефективно працювати в умовах сучасного виробництва.

2. Інтеграція науки і виробництва

Важливим аспектом підготовки фахівців є тісна співпраця між закладами вищої освіти та промисловістю. Це дозволяє студентам отримувати актуальні знання та навички, які відповідають потребам ринку праці. Спільні проекти, стажування та практики на підприємствах сприяють формуванню у студентів практичного досвіду, що є критично важливим для їх подальшої кар'єри.

3. Інноваційні технології

Впровадження нових технологій, таких як 3D-друк, робототехніка та штучний інтелект, змінює підходи до проектування та виробництва. Фахівці, які мають знання в цих сферах, стають більш конкурентоспроможними на ринку праці. Тому важливо, щоб програми підготовки включали курси, що охоплюють ці новітні технології.

4. Глобалізація та міжнародна співпраця

Глобалізація економіки вимагає від фахівців здатності працювати в міжнародному середовищі. Знання іноземних мов, культурних особливостей та міжнародних стандартів стає необхідним для успішної кар'єри в машинобудуванні. Заклади вищої освіти повинні забезпечити студентам можливості для вивчення мов та участі в міжнародних програмах обміну.

Висновки до розділу 1

Отже, професійна підготовка фахівців машинобудівної галузі в закладах вищої освіти є надзвичайно актуальною. Вона повинна відповідати сучасним вимогам ринку праці, інтегрувати науку і виробництво, впроваджувати інноваційні технології та враховувати глобалізаційні процеси. Це дозволить підготувати висококваліфікованих фахівців, здатних ефективно працювати в умовах швидко змінюваного світу.

2. ВИБУХОВЕ ПРЕСУВАННЯ ЯК МЕТОД ОДЕРЖАННЯ ПОРОШКОВИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ І ПОКРИТТІВ З НИХ

2.1 Ударні хвилі у порошках

При вибуховому пресуванні порошків ударні хвилі (УВ) в них збуджуються або за рахунок зіткнення з порошком розігнаного до високих швидкостей енергією вибуху ударника (метод гальмування, рис. 2.1 а), або за рахунок безпосереднього впливу детонаційної хвилі, що виходить на поверхню навантаження при вибуху накладного заряду ВР (метод відображення, рис. 1.1, б) [1, 6, 53, 112].

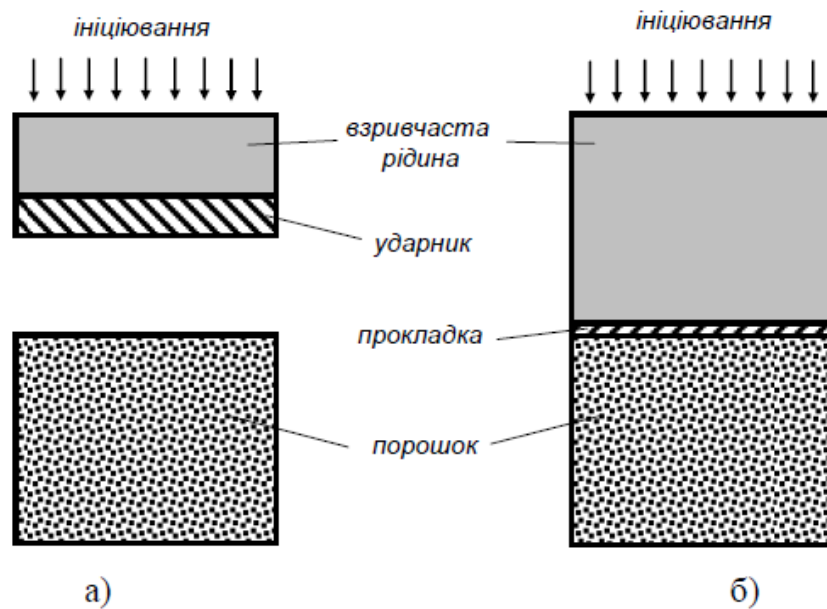


Рис.2.1. Схеми порушення порошку ударної хвилі: а – метод гальмування, б – метод відображення.

Порушена на поверхні порошку ударна хвиля поширюється в глибину. При цьому обсяг порошку перед хвилею знаходиться у вихідному ненавантаженому стані, а позаду хвилі – у стислому. Перехідний шар між цими станами є фронтом ударної хвилі.

Процес стиснення у фронті ударної хвилі протікає без теплообміну з навколишнім середовищем і є нерівноважним, що проходить зі збільшенням ентропії [1, 6, 53]. Зазвичай вважають, що всередині ударного фронту відсутнє

накопичення маси, імпульсу, енергії, тому шириною фронту можна знехтувати і розглядати його як розрив. Тоді закони збереження маси, імпульсу та енергії набувають вигляду співвідношень Ренкіна - Гюгонію, що зв'язують параметри стану порошку (як, втім, і будь-якого іншого середовища, що стискається) безпосередньо перед розривом і за ним [1, 6, 53, 77, 113...115]:

$$\rho(D-u) = \rho_0 D \quad (1.1)$$

$$P - P_0 = \rho_0 D u \quad (1.2)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0) \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (1.3)$$

Для того, щоб при відомих параметрах незбуреного порошку однозначно описати всі можливі стани ударно стисненого матеріалу, до співвідношень Ренкіна - Гюгонію повинно бути додано ще одне рівняння, що будь-яким чином пов'язує параметри стану, що шукаються. Один із варіантів - використовувати для цього емпіричні залежності виду:

$$D = c_0 + \lambda u, \quad (1.4)$$

Де - експериментальні константи c_0, λ

Сукупність рівнянь (1.1) ... (1.4) дозволяє будувати рівняння, що попарно пов'язують такі характеристики ударних хвиль, як $D - u$, $P - u$, $P - v$ і т.д. Найчастіше користуються залежністю $P - v$, яка аналітично може бути представлена у вигляді [53] :

$$P_{\pi} = \frac{c_0^2 \cdot (v_0 - v)}{[v_0 - \lambda(v_0 - v)]^2} \quad (1.5)$$

і зветься кривою Гюгонію. На рис. 2.2 наведено схематичний вигляд такої кривої. Пряма, що з'єднує початковий $O(P_0, v_0)$ і кінцевий $A(P, v)$ стан ударного стиснення, називається лінією Релея. Її нахил характеризує швидкість ударної хвилі, а площа заштрихованого трикутника під нею - питому внутрішню енергію, що купується речовиною в ударному фронті. Частина заштрихованої площі, що

лежить вище за криву холодного стиснення (адіабати Пуассона) P_X , також наведена на рис. 2.2 дорівнює тепловій складовій цієї енергії E_T і характеризує ступінь підвищення температури матеріалу у фронті ударної хвилі [1, 6, 53].

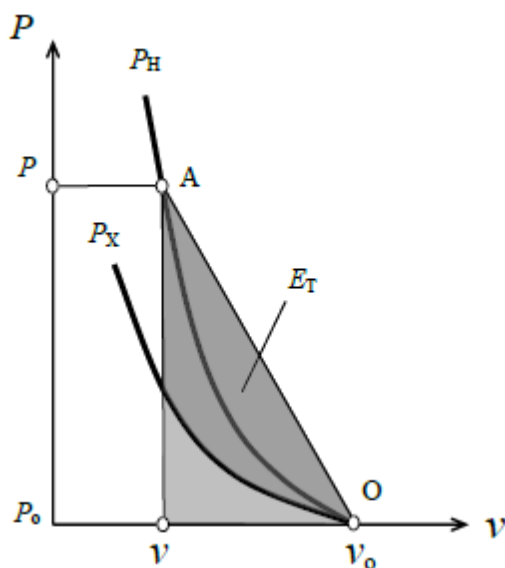


Рис.2.2. Ударна адіабата (P_H) та крива холодного стиску (P_X)

Внаслідок значно більшого початкового питомого об'єму порошку v_0 порівняно з питомим об'ємом відповідного компактного матеріалу v_k внутрішня енергія речовини в стисломому стані, а, отже, його температура, як правило, виявляється істотно більшою (рис. 2.3) порівняно зі стисненням компактної речовини [1, 2, 8, 9, 19, 53, 115 ... 118].

Так, наприклад, вимірювання температури в пористому NaCl показало величину 400 ... 9500С при тисках 10 ... 30 ГПа [119]. При плоскому ударному стисканні підпресованих мідного та нікелевого порошоків у роботі [32] визначено температуру від 120 до 11000С при тисках від 0,9 до 6,5 ГПа. У роботах [120, 121] зареєстровані температури у пористій міді від 578 до 1196 К при тисках від 1,2 до 6,0 ГПа.

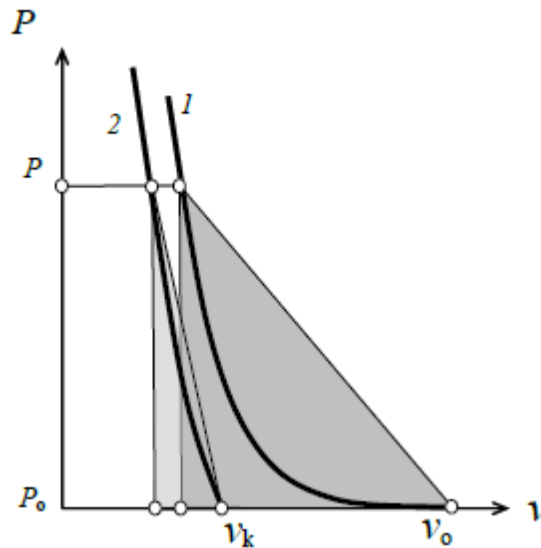


Рис.2.3. Ударна адіабату порошкового (1) та компактного матеріалів (2)

У цілому нині літературні дані свідчать [53], що з навантаженні порошків сильними ударними хвилями в стислому матеріалі може бути досягнуто температури кілька тисяч градусів. В області відносно невисоких тисків, які найчастіше використовуються у технологічних розробках, має місце розігрів порошків до температур 200...10000С.

Зі збільшенням пористості температура (при заданому тиску) також підвищується. Зростання температури перешкоджає стиску, і за деяких її значеннях може реалізуватися ситуація, коли зі зростанням тиску щільність стисненої речовини як збільшується, і навіть зменшується [8].

5.1 Параметри ударно-хвильового стиснення порошків

Як зазначалося в розділі 2.1, при русі по невозмущеному порошку ударної хвилі зі швидкістю D останній стискається до тиску P і набуває масової швидкості u у напрямку переміщення фронту ударної хвилі. При цьому його густина підвищується від вихідного значення ρ_0 до ρ , а внутрішня енергія зростає від E_0 до E .

При розробці технологій вибухової обробки порошків найчастіше користуються однією з перерахованих характеристик ударного стиснення масовою швидкістю частинок порошкового матеріалу u . Причина подібного

підходу пов'язана з тим, що при відомому значенні u інші параметри можуть бути обчислені на підставі співвідношень Ренкіна - Гюгоніо (1.1) ... (1.3) за формулами [1, 6, 53, 77, 113 ... 115]:

$$D = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} u \quad (1.6)$$

$$P = \rho_0 D u = \frac{\rho \rho_0}{\rho - \rho_0} u^2 \quad (1.7)$$

$$E = E_0 + \frac{u^2}{2} \quad (1.8)$$

де D , u , P -хвильова, масова швидкість і тиск на ударному фронті; ρ_0 та ρ -початкова щільність порошку та щільність пресування.

При розрахунку масової швидкості частинок u в порошок у разі його навантаження за схемою з високошвидкісним ударником (рис. 2.1, а) зазвичай припускають, що в кожний момент часу її значення для всієї речовини позаду ударної хвилі однаково. Нехтуючи пружною деформацією ударника і спресованого порошку і вважаючи, що зменшення масової швидкості відбувається за рахунок збільшення загальної маси, що рухається (ударник + спресований порошок), на підставі законів збереження маси і імпульсу [1, 6] можна розрахувати величину маси m і швидкості u руху речовини в момент досягнення ударною хвилею координати x , що відраховується від поверхні удару в глибину порошку [53]:

$$m = m_0 + \rho_0 x, \quad (1.9)$$

$$u = \frac{u_0}{1 + \rho_0 x / m_0}, \quad (1.10)$$

Тиск ударної хвилі P можна оцінити, прийнявши припущення, що за фронтом хвилі щільність спресованого порошку мало відрізняється від щільності матеріалу частинок k . Тоді, використовуючи вираз (1.7), отримаємо [53]:

$$P \cong \frac{\rho_k \rho_0}{\rho_k - \rho_0} u^2 \quad (1.11)$$

У виразі (1.11) масова швидкість згідно (1.10) залежить від x і тим самим визначає розподіл x тиску ударної хвилі P . Якщо відома ударна адіабата навантаженого порошку, то розрахунок згасання хвилі можна зробити більш строго.

Більшість наявних в даний час розрахункових методів визначення параметрів ударної хвилі в порошку при його навантаженні накладним зарядом вибухової речовини (рис. 2.1 б) засноване на вирішенні задачі про метання продуктами детонації тіл змінної маси [53, 59]. Застосовувана у своїй методика розрахунку виходить з розгляду розрахункової схеми, наведеної на рис. 1.4. При цьому рух продуктів детонації, пластини поршня та стисненого порошкового матеріалу вважається одновимірним та спрямованим уздовж осі Ox . Пластина-поршень належить несжимаемой і тому представляється як нескінченно тонкий шар з питомою масою m_0 на одиницю площі.

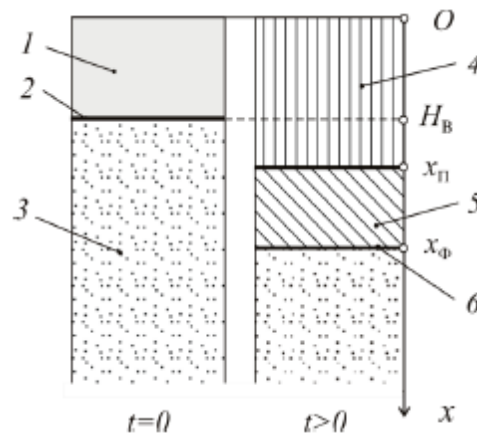


Рис. 2.4. Розрахункова схема руху пластини-поршня [53]

1 - ВР; 2 – пластина-поршень; 3 – порошок; 4 – ПД; 5 – спресований порошок; 6 – ударний фронт.

Оскільки при ударному стиску зазвичай відбувається ущільнення порошку до щільностей, близьких до граничної, то передбачається, що за ударним фронтом щільність пресування однакова і дорівнює щільності відповідного монолітного матеріалу ρ_k .

Результати розрахунків наведено на рис. 2.5 у вигляді розподілу безрозмірної швидкості ударного стиснення

$$\tilde{u} = \frac{u_{\pi}}{D_{\text{в}}} \quad (1.12)$$

Вздовж безрозмірного шляху пластини-поршня

$$\alpha = \frac{\rho_{\text{к}} \rho_{\text{о}}}{\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{о}}} \cdot \frac{H_{\text{в}}}{m_{\text{о}}}, \quad (1.14)$$

I

$$\eta = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho_{\text{в}} H_{\text{в}}}{m_{\text{о}}}, \quad (1.15)$$

При визначенні абсолютних значень для конкретних варіантів схеми навантаження необхідно розрахувати величину $m_{\text{о}} = \rho_{\text{п}} h_{\text{п}}$ (де $\rho_{\text{п}}$ і $h_{\text{п}}$ – щільність і товщина пластини), α та η (1.14) і (1.15), потім вибрати відповідну криву з представлених на рис. 2.5 і перерахувати безрозмірні координати графіка швидкість ударного стиснення.

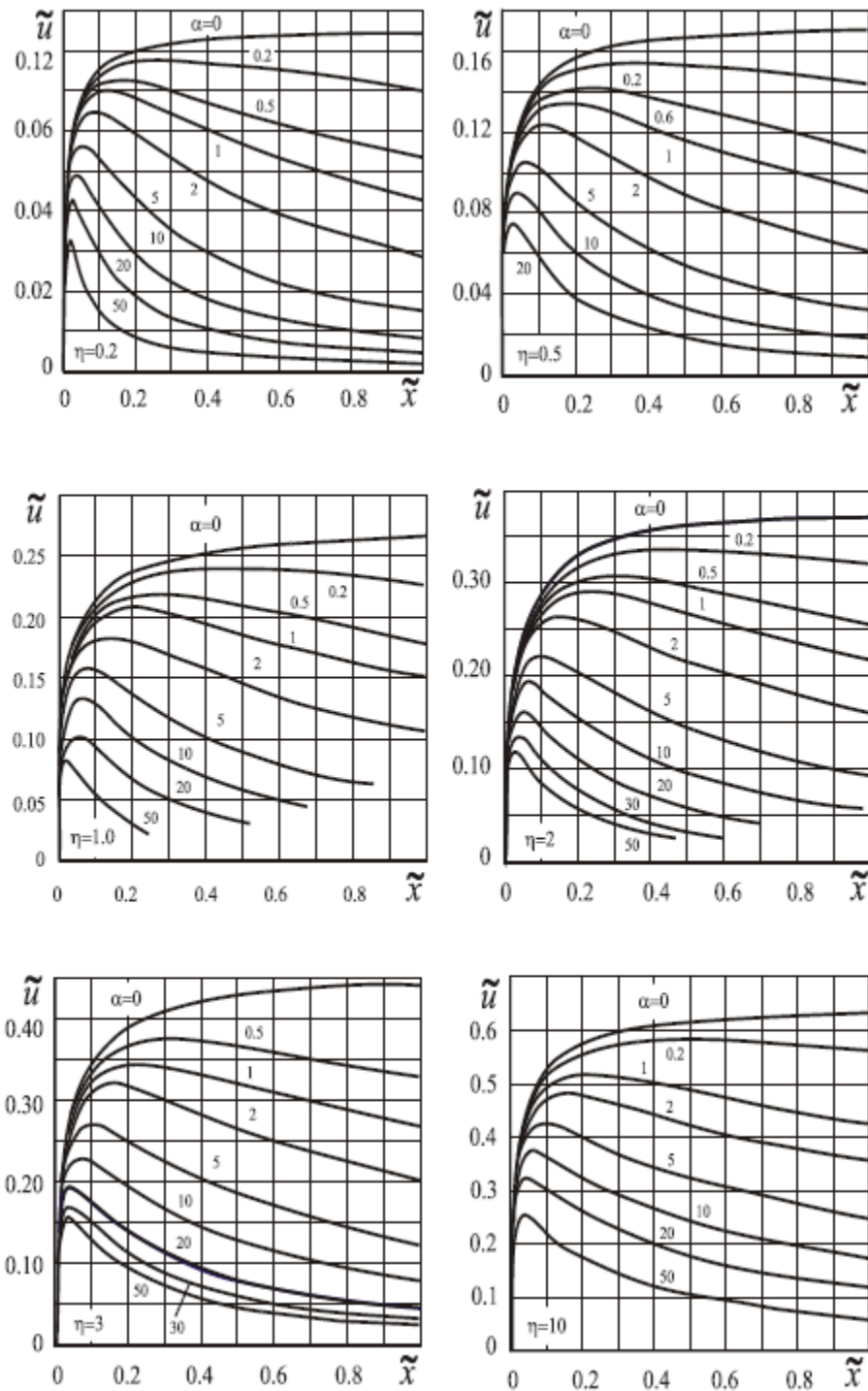


Рис.2.5. Розподіл швидкості ударного стиску вздовж траєкторії
пластини-поршня для різних значень η [53]

До недоліків розглянутих методик слід віднести той факт, що в них не враховуються ударно-хвильові процеси в ударнику та прокладці, а також не розглядається відображення хвилі від поверхні якої-небудь основи, яка в

більшості випадків присутня в схемах навантаження і на якій розташовується порошковий порошковий шар. Ця обставина обмежує розрахунок розглядом тільки першої ударної хвилі, що поширюється по вихідному неущільненого порошку, і не дозволяє оцінити параметри його багатохвильового стиснення у відбитих ударних хвилях. Незастосовні описані методики і у разі використання ковзного навантаження порошку, оскільки в них розглянуті лише варіанти метання ударника в напрямку, перпендикулярному його поверхні, або одномірного розльоту ПД.

Оскільки оцінка фізичних параметрів стиснення є необхідною умовою розуміння фізичної сторони процесу формування твердих сплавів при ударно-хвильовому навантаженні сумішей порошків карбідів з металами, то проведення досліджень даного процесу без розробки відповідних методик розрахунку неможливо.

5.2 Зварювання частинок порошку під час вибухового пресування

Отримання консолідованих матеріалів із сумішей порошків вибуховим (як, втім, і будь-яким іншим) методом передбачає формування міцного з'єднання його компонентів.

Останніми десятиліттями процеси, що відбуваються при цьому, стали предметом численних досліджень [36, 61...66, 128...137]. Однак, незважаючи на велику кількість накопиченого експериментального матеріалу і безперечні успіхи в області вибухового компактування порошків, належного теоретичного розуміння і єдиної точки зору на фактори, що зумовлюють реалізацію міцного з'єднання їх частинок в умовах впливу високих динамічних тисків, не вироблено.

У цьому зв'язку представляється цікавим зіставити умови та критерії отримання міцного з'єднання частинок при компактуванні порошків і пластин при зварюванні вибухом [36, 62]. зіткнення і, відповідно, деформація на контактах частинок пресованих порошків відрізняються високою гетерогенністю: якщо режими зварювання можна описати певним набором

параметрів зіткнення, то ввести подібні величини, наприклад, як усереднених характеристик для компактування порошків в принципі неможливо, т.к. в [62] і наведена картина хвилеутворення між великими частинками міді при компактування, у разі деформування частинок порошку середніх і дрібних фракцій у динамічному режимі, достатньому для утворення міцних зв'язків, формування хвиль не спостерігалось [63, 128].

Відповідно до існуючих уявлень [97, 130 ... 138], формування з'єднання при зварюванні вибухом протікає за механізмом тристадійної топохімічної реакції з утворенням фізичного контакту (зминання мікронерівностей на поверхнях, що з'єднуються, і їх зближення на відстані дії вандерваальсівських сил); активацією поверхонь, що знаходяться у фізичному контакті (освіта активних центрів), в результаті якої відбувається валентна міжатомна взаємодія з формуванням між атомами матеріалів, що з'єднуються хімічних зв'язків (схоплювання); об'ємною взаємодією, що починається з моменту утворення активних центрів і закінчується злиттям дискретних вогнищ взаємодії в площині контакту.

Відповідно до теорії топохімічних реакцій активація контактних поверхонь є необхідною і достатньою умовою утворення сполуки у твердій фазі. При зварюванні з високоінтенсивним силовим впливом, до якого належить як зварювання вибухом, так і вибухове пресування порошків, основним (найбільш ймовірним) каналом активації поверхневих атомів є дислокаційний, що призводить до утворення міжатомних зв'язків між взаємодіючими металами (схоплювання) на активних центрах. 2.6)

термодинамічними характеристиками матеріалів, умовами навантаження.

У роботах [36, 63, 64, 128] показано, що утворення міцного з'єднання компонентів при компактуванні, так само як при зварюванні вибухом, можливе при створенні на контактах частинок, що пресуються області інтенсивної пластичної деформації (рис. 2.7).

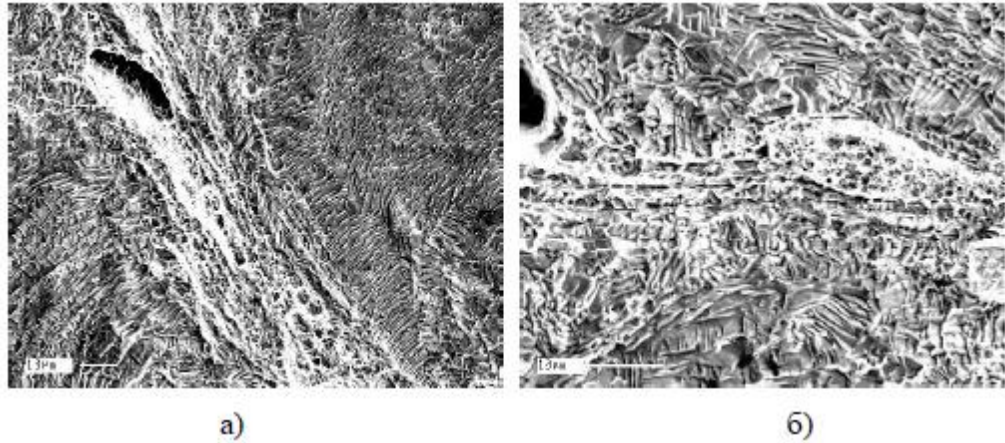


Рис. 2.7. Мікроструктура контактних зон компактів: неокисленого (а) та внутрішньо окисленого (б) порошків міді

Відомо, що при зварюванні вибухом розмір області R , в межах якої величина деформації ϵ змінюється від 0,7 і вище, визначається виразом $R = (0,015 \dots 0,02)\sigma$, де σ – товщина пластини, що метається, причому міцне з'єднання і характерна мікроструктура створюються в тій частині області, де $\epsilon > 2$. При цьому ширина і мікроструктура області R залежить як від параметрів навантаження, що визначають ступінь пластичного перебігу в області з'єднання, так і від природи матеріалу, що зварюється.

Експериментально встановлено, що при компактуванні порошків вибухом розмір області R інтенсивної пластичної деформації поверхневих шарів частинок підпорядковується тієї ж залежності, що і при зварюванні вибухом, з тією відмінністю, що як величина σ виступає не товщина пластини, що метається, а розмір елементів, що з'єднуються (часток) порошкового матеріалу [63]. При зменшенні розміру фракції, що пресується, значення R зменшується.

Поява на межах частинок областей інтенсивної пластичної деформації, що

з'єднуються, подібних до спостерігається при зварюванні вибухом, спочатку було виявлено методом рекристалізації [36]. Подальші дослідження [63, 64] з використанням електронної мікроскопії високої роздільної здатності показали, що при створенні міцного зв'язку між частинками пресованої фракції в зоні контакту утворюється високофрагментована мікроструктура, що представляє собою витягнуті вздовж кордону фрагменти, шириною менше 1 мкм, які, у свою чергу, розбитий на блоки ще меншого розміру. І перші, і другі відрізняються наявністю в них зрушень із незначною розорієнтацією.

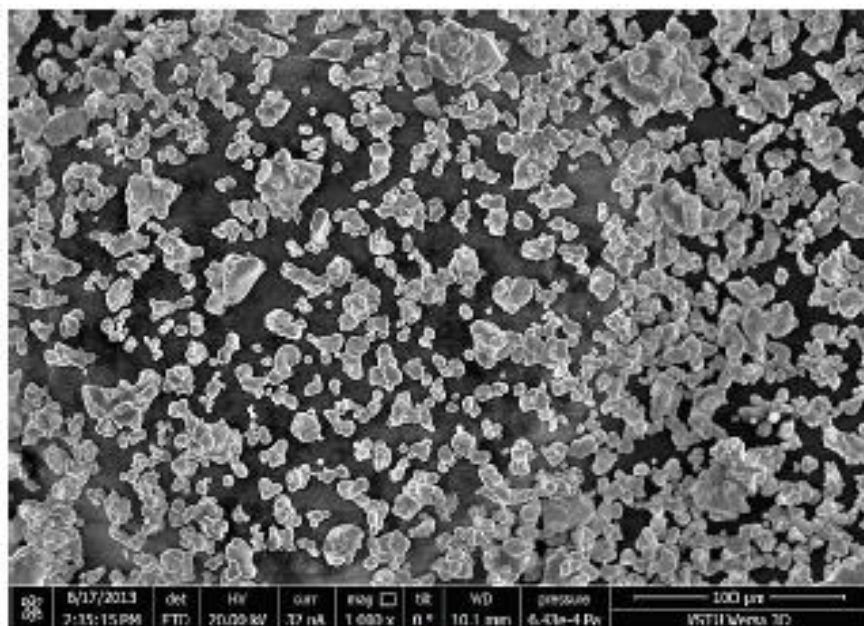
3. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Матеріали, вибухові речовини та схеми навантаження

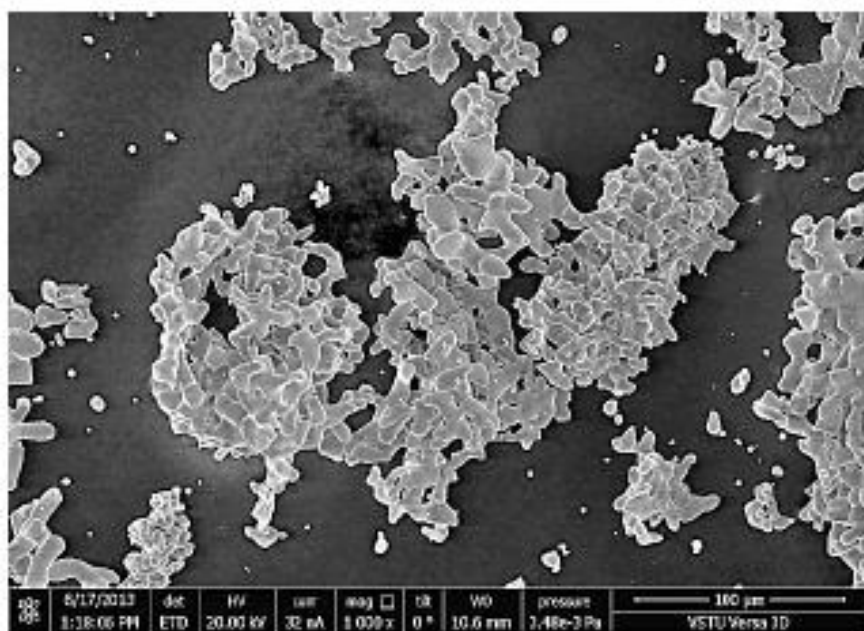
При проведенні досліджень процесу формування твердих сплавів із сумішей порошків на основі карбіду хрому використовувалися порошки карбіду хрому Cr₃C₂ (ТУ 48-19-294-78), титану ПТС (ТУ 14-1-958-74), нікелю ПНЕ-1 (ГОСТ 9722 -97) та міді ПМА (ГОСТ 4960-75).

Використання титану, нікелю та міді як зв'язування твердого сплаву на основі карбіду хрому дозволило ввести в розгляд різні фактори, пов'язані з властивостями металевої складової порошкової суміші. Насамперед, це її фізико-хімічні властивості, і, зокрема, схильність до карбідоутворення: титан є сильнішим карбідоутворювачем, ніж хром, що входить до складу основного карбіду твердого сплаву, нікель – менш сильним, а мідь взагалі не карбідоутворюючий елемент [179] . Крім того, використовувані метали володіють різними фізичними властивостями, і, зокрема, різною щільністю і акустичною жорсткістю [1, 6, 168, 180], що безсумнівно повинне якимось чином позначатися на характері перебігу частинок металевої зв'язки при ударно-хвильовому стисканні вихідної суміші порошків, а, отже, і характері ущільнення матеріалу як цілого.

Вихідні порошки відрізнялися один від одного дисперсністю (рис. 3.1) та формою частинок (рис. 3.2). Частинки порошку карбіду хрому мали округлу форму (рис. 3.2, а) та розмір 1...5 мкм (рис. 3.1, а), що відповідає, зокрема, розміру зерна в таких відомих крупнозернистих твердих сплавах, як ВК4-В, ВК8- В, що використовуються для буріння гірських порід (ГОСТ 3882-74). Частинки порошку титану, нікелю та міді мали на порядок більший розмір (рис. 3.1, б, в, г), виражену полікристалічну будову та дендритну (у разі нікелю та міді) або губчасту (для титану) форму (рис. 3.2, б, в, г).

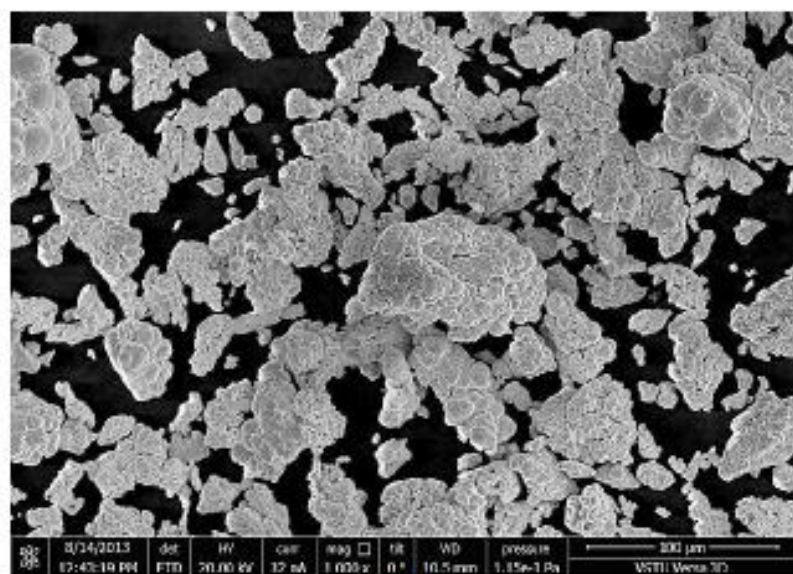


a)

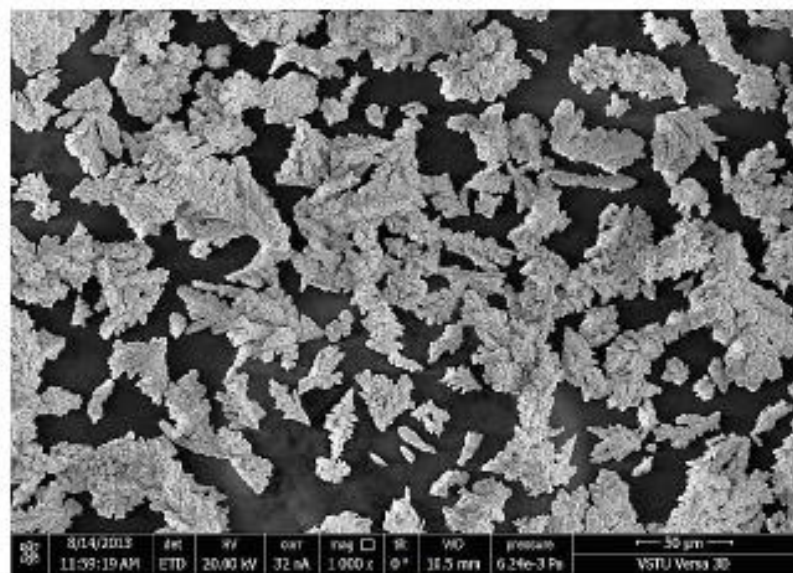


b)

Рис. 3.1. Дисперсність порошків, що використовуються, РЕМ,
Versa 3D:
а - Cr_3C_2 ; б - Ti.



В)



Г)

Рис. 3.1 (продовження). Дисперсність порошків, що використовуються, РЕМ, Versa 3D: в - Ni; г -Cu.

З метою підвищення однорідності гранулометричного складу (видалення окремо зустрічаються великих частинок або їх конгломератів) перед використанням вихідні порошки піддавали просів через сито з розміром осередку 70 мкм, а потім змішувалися в необхідних пропорціях. З метою досягнення однорідності хімічного складу порошкових сумішей застосовували сухе перемішування без розмольних тіл в барабанному змішувачі типу "п'яна бочка".

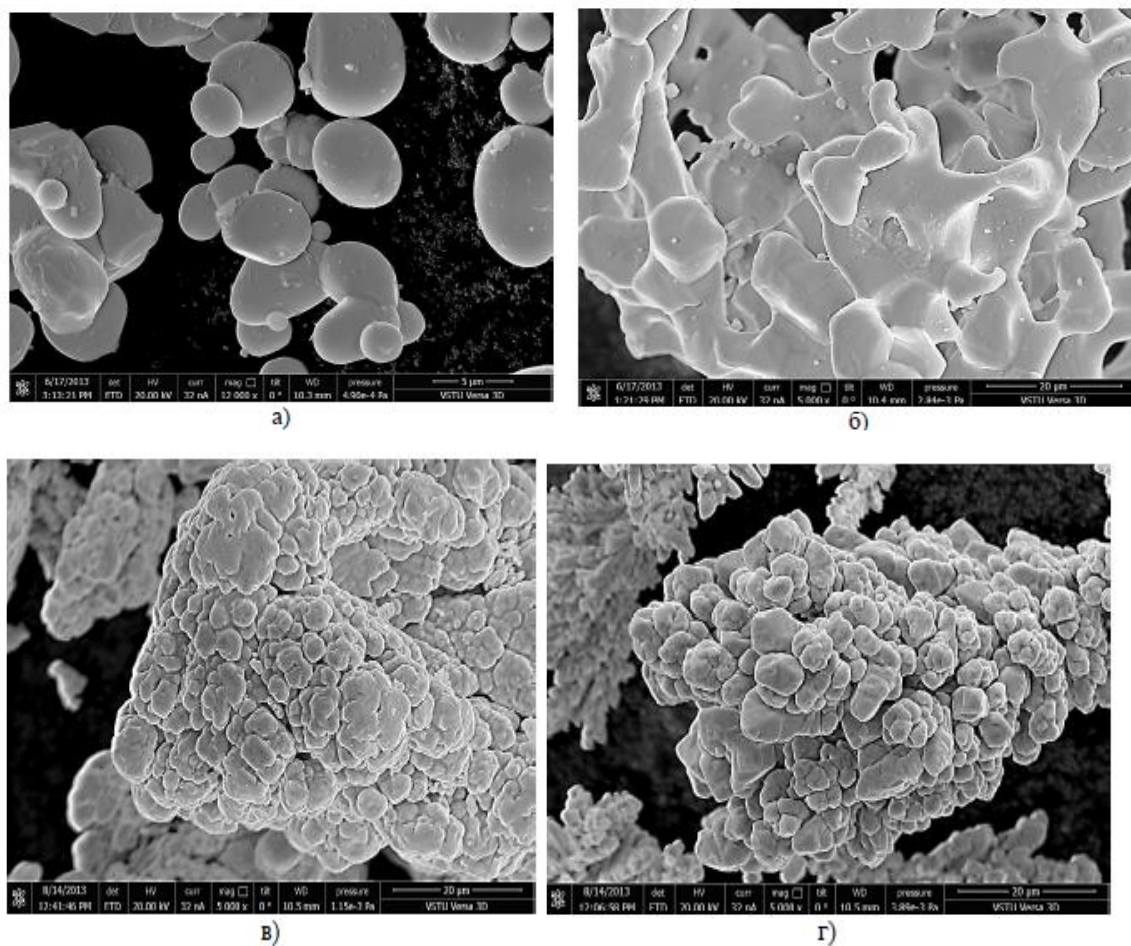


Рис. 3.2. Форма частинок порошків РЕМ, що використовуються, Versa 3D:

а - Cr_3C_2 ; б - Ti. в - Ni; г - Cu.

Для вивчення впливу типу металевої зв'язки на процес формування твердих сплавів на основі карбіду хрому при ударнохвильовій обробці використовувалися суміші порошку карбіду хрому з порошками титану, нікелю та міді в різних вагових співвідношеннях (див. табл. 3.1).

При цьому об'ємний вміст зв'язки в порошкових сумішах був однаковим і дорівнював 30%.

Насипну щільність порошкових сумішей визначали експериментально шляхом зважування відповідно до ГОСТ 19440-94. Виміряні значення насипної ваги порошкових сумішей, що використовуються в роботі, у стані вільного засипання, а також після утряски наведені в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Насипна щільність порошкових сумішей на основі карбіду хрому

Метал зв'язки	Склад зв'язки, %		Насичена щільність, г/см ³	
	по об'єму	по вазі	при вільній засипці	після утряски
Мідь	30	37	2,15	3,11
Нікель	30	36	2,71	3,82
Титан	20	14	2,16	3,09
	30	22	1,91	2,63
	40	31	1,64	2,38
	50	40	1,42	2,02

Як буде показано далі, мінімальна пористість і найбільш високі характеристики міцності при отриманні твердих сплавів на основі карбіду хрому ударно-хвильовою обробкою без спікання можу бути досягнуті при використанні в якості металевої зв'язки титану. Тому для досліджень впливу вмісту зв'язки та вихідної щільності порошкової суміші на процес формування та властивості одержаних вибуховим здатним порошкових матеріалів і покриттів, використовувалися суміші порошків карбіду хрому і титану з об'ємним вмістом металевої зв'язки, рівним 20, 30, 40 і 50% (см. табл. 3.1).

Для вибухової обробки порошків застосовувалася схема навантаження, представлена на рис. 3.3, і використовувалися амоніт №6ЖВ (ГОСТ 21984-76) та його суміші з гранульованої аміачної селітрою марки Б (ГОСТ 2-75) у співвідношенні 1:1, 1:2 та 1:3 (суміші 50/50, 33/66 та 25/75), що дозволяють забезпечити широкий діапазон швидкостей детонації (від 2,9 до 4,2 км/с).

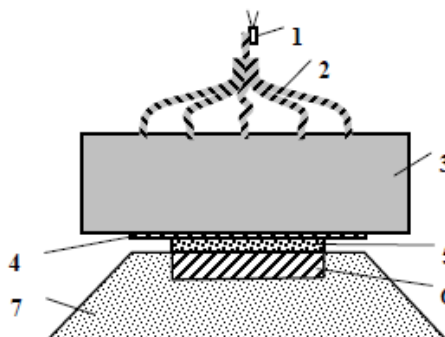


Рис. 3.3. Схема навантаження порошку плоскою нормально падає детонаційною хвилею:

1 – електродетонатор; 2 – шнур, що детонує; 3 – заряд ВР;
4 – проміжне прокладання; 5 – порошок; 6 – сталева основа; 7 – піщана подушка

Висота заряду встановлювалася рівною 70, 100, 130 та 160 мм, товщина проміжної прокладки дорівнювала 0,75 мм, висота шару вихідної порошкової суміші – 7 мм, а товщина основи – 8 мм. У плані зібраний для вибухової обробки пакет мав розміри 60×120 мм. Величина бічних написань заряду встановлювалася рівною висоті заряду, а для ініціювання детонації вибухової речовини застосовувався генератор плоскої хвилі детонації, зібраний з відрізків детонуючого шнура однакової довжини [183, 184].

З метою вивчення можливості використання ковзного навантаження для отримання покриттів з карбідохромових твердих сплавів та виявлення умов їх збереження на поверхні металевих підкладок застосовувалася схема навантаження, наведена на рис. 3.4 і відрізняється від схеми, використаної для вивчення основних закономірностей формування твердих сплавів із сумішей порошків (див. рис. 3.3), лише розмірами заряду вибухової речовини і способом ініціювання його детонації.

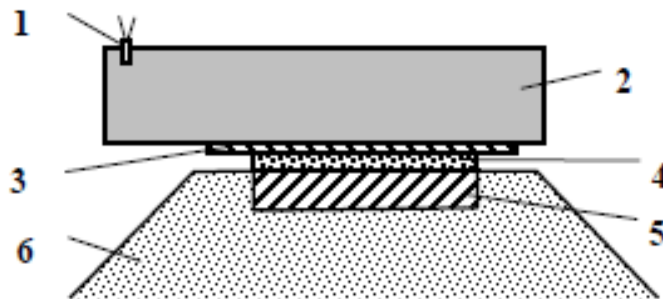


Рис. 3.4. Схема ковзного навантаження порошку:

1-електродетонатор, 2-заряд ВР, 3-проміжна прокладка, 4-порошок, 5-сталева основа, 6-піщана подушка.

Висота заряду у досліджах становила 40 мм і перевищувала значення

критичної висоти заряду для всіх застосовуваних у дослідженні вибухових речовин [138]. Величина нависання заряду встановлювалася рівною: переднього нависання 1,5 висоти заряду, бічних та заднього – 0,7. При виготовленні зарядних форм передбачалося наявність у заряду ВР у місці ініціювання кута, що забезпечує незначну кривизну фронту хвилі детонації при виході її на робочу ділянку [112, 138, 168].

В якості матеріалів основи та проміжної прокладки між вибуховою речовиною та піддається ударнохвильовій обробці порошковим матеріалом використовувалися сталі 20 (ГОСТ 4543-71) та 14X17H2 (ГОСТ 5632-72).

3.2 Методика розрахунку параметрів стиснення та її програмна реалізація

При розробці методики розрахунку параметрів стиснення для випадку вибухової обробки порошків та їх сумішей на монолітних підкладках накладним зарядом вибухової речовини через проміжну прокладку було використано розрахункову схему, наведену на рис. 3.5.

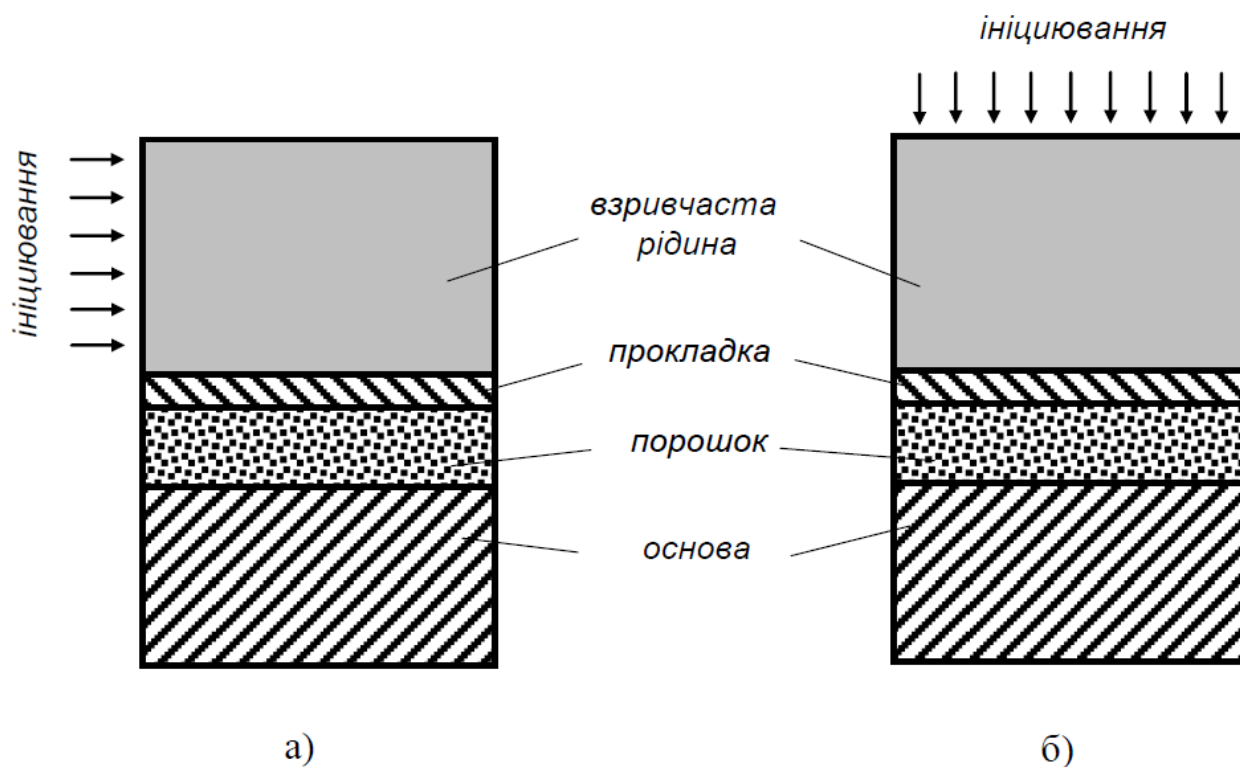


Рис. 3.5. Схема навантаження порошкових сумішей вибухом:

а - ковзне навантаження;

б - навантаження нормально падаючої детонаційної хвилею.

При детонації заряду ВР продукти вибуху, впливаючи через прокладку на порошок, викликають появу у ньому ударної хвилі, що рухається до основи. Ця ударна хвиля відбивається від підкладки і рухається нагору. Досягши внутрішньої поверхні проміжної прокладки, вона знову відбивається і починає рухатися вниз. При цьому в прокладці також виникає ударна хвиля, яка після виходу на зовнішню поверхню прокладки перетворюється на хвилю розвантаження, що проходить послідовно через прокладку і спресований порошок, знімаючи тиск в останньому (тривалість основного імпульсу тиску, таким чином, залишається постійною по висоті шару порошку і визначатиметься товщиною проміжної прокладки та швидкістю ударної хвилі в ній).

Основним завданням розрахунку в даному випадку є визначення максимального тиску стиснення порошкового матеріалу та температури його розігріву в процесі проходження ним ударних хвиль. У повному обсязі і точній постановці, однак, завдання, що розглядається, практично не піддається вирішенню, у зв'язку з чим виникає необхідність наближеного рішення, яке найбільш зручно здійснити методом (P,u) -діаграм, заснованому на поетапному визначенні характеристик падаючих і відбитих хвиль шляхом аналізу перетинів ударних адіабат прокладки, порошку, основи та продуктів детонації в координатах "тиск - масова швидкість" [1, 6].

Оскільки при ковзному навантаженні кут, що складається косою ударною хвилею в порошок, з поверхнею підкладки зазвичай не перевищує 10° , то для аналізу ударно-хвильових процесів у схемі (див. рис. 3.5) можна користуватися одномірною моделлю, незалежно від напрямку ініціювання заряду вибухового речовини [42].

Використання при моделюванні методу (P,u) - діаграм передбачає знання

ударних адіабат продуктів детонацій, прокладки, порошку та основи.

Побудова адіабат металевих підстави і проміжної прокладки, як правило, не викликає особливих труднощів: в діапазоні тисків, що цікавить практику, навіть у разі протікання фазових перетворень, як впливає з рис. 3.6, задовільним є акустичне наближення:

$$P = \rho_0 c_0 u \quad (2.1)$$

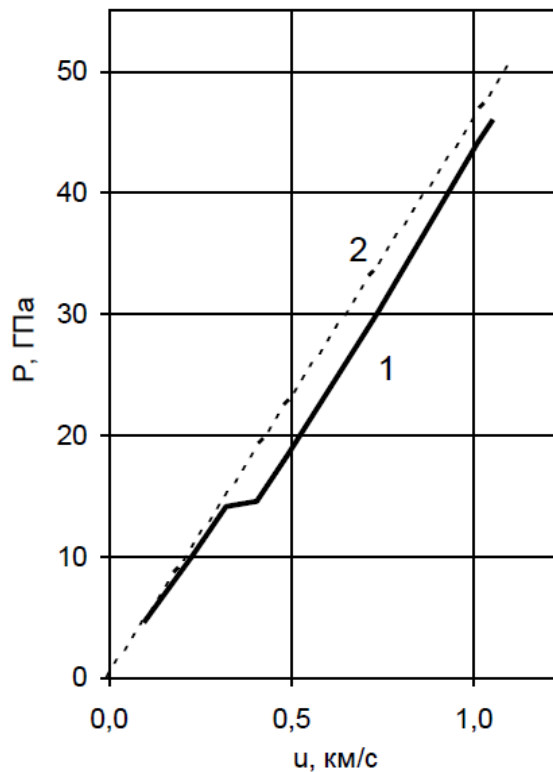


Рис. 3.6. Ударна адіабату заліза:

1 – експеримент; 2 – розрахунок у акустичному наближенні, $c_0 = 5,85$ км/с; $\rho_0 = 7,87$ г/см³

Для побудови ударних адіабат двох-, трьох-і більше кратного стиснення порошкового матеріалу, матеріалу проміжної прокладки та підстави та ізоентроп розвантаження матеріалу проміжної прокладки можна в першому наближенні використовувати відомий принцип відображення.

Маючи адіабати Гюгоніо продуктів детонації, порошку, прокладки та

основи, можна послідовно визначити тиск та масову швидкість в падаючій та відбитих ударних хвилях, що рухаються по елементах схеми навантаження у процесі ударно-хвильової обробки. Порядок дій у своїй у вигляді можна подати так (рис. 3.7).

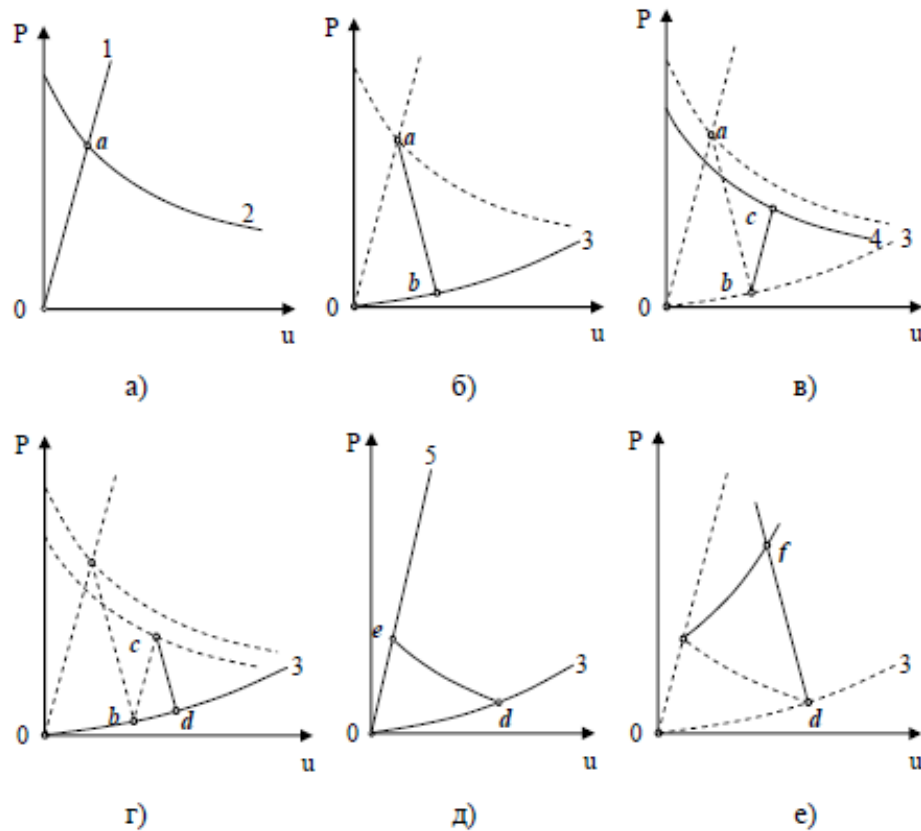


Рис 3.7. Послідовність визначення параметрів ударних хвиль під час вибухового навантаження шару порошку на металевій підкладці.

Вихід хвилі детонації на поверхню розділу з проміжною прокладкою викличе появу в ній ударної хвилі, що поширюється у напрямку до порошку.

У момент виходу хвилі в прокладці на поверхню розділу з порошком тиск на її фронті визначатиметься точкою а перетину ударної адіабати матеріалу прокладки 1 з ударною адіабатою продуктів детонації 2 розрахованої за вищевикладеною методикою з урахуванням часу проходження ударною хвилею прокладки (рис. 3.7 а).

Вихід цієї ударної хвилі на поверхню розділу з порошком викликає поява в ньому ударної хвилі, а в прокладці - хвилі розрідження. Стан матеріалів за

фронтами цих хвиль характеризується точкою b перетину ударної адіабати порошку. З та ізоентропи розвантаження матеріалу прокладки ab , отриманої шляхом відображення його ударної адіабати Ob у точці a (рис. 3.7, б).

Хвиля розвантаження вийде на поверхню прокладки і зміниться новою ударною хвилею, інтенсивність якої в момент виходу до поверхні розділу з порошком визначатиметься по перетину ударної адіабати матеріалу прокладки bc , отриманої шляхом відображення ізоентропи ab в точці b , і адіабати продуктів детонації 4, побудованої для відповідного часу (рис. 3.7, в).

Оскільки швидкість звуку в стислому порошку більша, ніж швидкість ударної хвилі, то в першому наближенні вважатимемо, що друга хвиля стиснення миттєво наздожене фронт першої ударної хвилі і далі по порошку поширюватиметься ударна хвиля з параметрами, що визначаються перетином ізоентропи розвантаження прокладки cd і адіабати 3 (рис. 3.7, г).

Припустимо, що ударна хвиля досягла поверхні підкладки з параметрами, що визначаються точкою d (рис. 3.7, д). Тоді тиск у відбитій від підкладки хвилі може бути визначено точкою e перетину ударної адіабати основи 5 і адіабати подвійного стиснення порошку de отриманої шляхом відображення його ударної адіабати 3 в точці d .

Оскільки товщина шару порошку при стисканні істотно зменшується, а швидкість поширення по ньому ударної хвилі зростає, то практично немає сенсу враховувати зміну стану проміжної прокладки за час, протягом якого відбита від підкладки ударна хвиля в стислому порошку повернеться до поверхні прокладки.

Послідовне виконання перерахованих вище етапів розрахунку дозволяє отримати повну (P,u) -діаграму процесу (рис. 3.8), яка дає досить точне уявлення про ударно-хвильові процеси, що протікають при вибуховій обробці сумішей порошків.

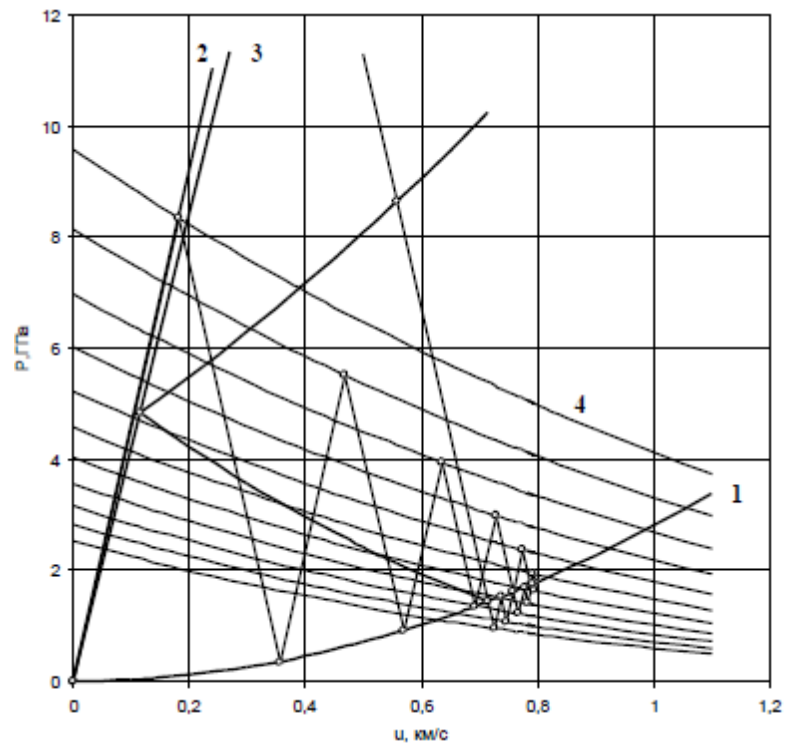


Рис. 3.8. Приклад (P,u)-діаграми процесу вибухового пресування: 1 - ударна адіабату порошкового матеріалу; 2 - ударна адіабату проміжної прокладки; 3 - ударна адіабату основи; 4 – адіабати продуктів детонації у різні моменти часу.

Наведений на рис 3.8 приклад побудований для випадку вибухового пресування порошкової суміші хрому карбиду з 22% титанової зв'язки і вихідною щільністю 1,91 г/см³. Товщина шару порошку становила 10 мм, навантаження здійснювалося за схемою, наведеною на рис. 2.3 на мідній підкладці накладним зарядом амоніту №6 ЖВ висотою 70 мм через сталеву проміжну прокладку товщиною 2,8 мм.

Розрахунок температури порошку при ударно-хвильовій обробці за обраною схемою навантаження був заснований на обліку того, що його основне розігрів відбувається в першій ударній хвилі [21]. При цьому зазвичай пружна складова внутрішньої енергії порошку мала в порівнянні з температурною і за фронтом ударної хвилі, що розповсюджується по незбуреному порошку, встигає встановити теплову рівновагу.

У умовах можна вважати, що:

$$C_V \Delta T = \Delta E$$

де ΔT – приріст температури порошку; c_V - середнє значення питомої теплоємності порошку в інтервалі температур його розігріву; ΔE – збільшення внутрішньої енергії порошку за фронтом першої ударної хвилі.

Використання співвідношень Ренкіна-Гюгоніо [1, 6] дозволяє перетворити вираз до вигляду, зручного для безпосередніх обчислень:

$$\Delta T = \frac{u_1^2}{2C_V}$$

Оскільки температури розігріву порошків при ударно-хвильовій обробці досить високі і, як правило, завжди перевищують температуру Дебая відповідних монолітних матеріалів, то для визначення їх теплоємності C_V можна скористатися правилом Коппа-Неймана, згідно з яким молярна теплоємність з'єднання (проміжної фази, твердого розчину) сумі атомних теплоємностей компонентів, і навіть законом Дюлонга і Пти, відповідно до яким атомна теплоємність більшості простих речовин, у твердому стані дорівнює $3R$ (R – газова стала) [180]. Значення теплоємності порошкових сумішей може бути обчислено за правилом адитивності, виходячи з вагового вмісту і теплоємності кожної зі складових суміші.

Присвоєння значень змінним, що використовується для зберігання параметрів розрахунку, (введення вихідних даних), а також виведення результатів розрахунку здійснюється за допомогою екранної форми, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 3.9.

У вікні передбачено вибір схеми навантаження та введення необхідних для моделювання характеристик ВР, порошкового матеріалу, а також матеріалів проміжної прокладки та основи, на якому розташовується порошок. В результаті розрахунку за моделлю в полі табличного виведення видаються параметри падаючих і відбитих ударних хвиль у прокладці, порошку та підставі, за якими

може бути побудована повна (P,u) – діаграма процесу.

Оскільки застосований при складанні розрахункового модуля варіант мови Microsoft Visual Basic сумісний (в рамках можливостей системи, використаних при реалізації проекту) з вбудованою у Microsoft Excel мовою Visual Basic for Applications, альтернативним варіантом організації проведення розрахунків може бути включення описаного модуля в VBA-проект.

Исходные данные для расчета:

Схема нагружения
☒ нормально падающей детонационной волной
☐ скользящее нагружение

Скорость детонации ВВ, км/с: 4.2

Давление в точке Чепмена-Жуга, ГПа: 4.4

Высота заряда ВВ, мм: 70

Толщина промежуточной прокладки, мм: 2.8

Плотность материала прокладки, г/куб.см: 7.87

Скорость звука в прокладке, км/с: 5.85

Скорость звука в основании, км/с: 4.7

Плотность материала основания, г/куб.см: 8.33

Толщина слоя порошка, мм: 10

Плотность порошка, г/куб.см: 1.91

Плотность монолитного материала, г/куб.см: 6.03

Теплоемкость порошка, Кдж/кг*град: 0.553

Параметры падающей ударной волны в порошке

X, мм	P, ГПа	u, км/с
0.000000	0.353160	0.355434
0.457579	0.502682	0.568315
1.294214	1.335496	0.831185
2.282595	1.603235	0.757307
3.323618	1.734528	0.787796
4.427356	1.771674	0.796096
5.542722	1.747795	0.790712
6.650546	1.687900	0.777046
7.739223	1.608531	0.758557
8.801995	1.519557	0.737376
9.835083	1.428892	0.714546

Параметры отраженных ударных волн в сжатом порошке

отражение	P, ГПа	u, км/с
пересе	4.832133	0.115130
второе	8.639002	0.558339

Результаты расчета:

Температура разогрева порошкового материала, град: 412.7592

Максимальное давление ударного сжатия, ГПа: 8.639002

Длительность импульса максимального давления, мкс: .957265

Расчет Выход

Рис. 3.9 Вигляд робочого вікна програми

При цьому з метою здійснення введення вихідних даних та виведення результатів розрахунку проект необхідно включити відповідний інтерфейсний модуль. Найпростіший варіант тексту такого модуля наведено на рис.3.10. При його використанні в Excel створюється функція користувача CalcTPt, яку при виклику в якості параметрів слід передати вихідні дані для розрахунку; повертає вона готові результати обчислень.

Даний варіант реалізації розрахункової системи дуже зручний при проведенні масових розрахунків і, крім того, дозволяє повною мірою використовувати досить ефективні вбудовані можливості Excel для вирішення зворотних завдань типу «підбору параметра» або «пошуку рішення».

```
Function CalcTPt(CxHarp As Single, СкорДет As Single, ДавлЧЖ As Single, ВысЗар
As Single, ТолщПрокл As Single, ПлотПрокл As Single, СкЗвПрокл As Single, СкЗ-
вОсн As Single, ПлотОсн As Single, ТолщСлПорош As Single, ПлотПорош As Sin-
gle, ПлотМон As Single, ТеплоемкПорош As Single) As Variant
```

```
'-----задание переменных-----
N = CxHarp
D = СкорДет
P4 = ДавлЧЖ
L = ВысЗар
G1 = ПлотПрокл * СкЗвПрокл
G2 = ПлотОсн * СкЗвОсн
T2 = ТолщПрокл / СкЗвПрокл
H = ТолщСлПорош
R1 = ПлотПорош
R2 = ПлотМон
Q = 1 - R1 / R2
с = ТеплоемкПорош / 1000000 '( Дж/кг*град -> МДж/кг*град )
```

```
'-----расчет-----
Calc
```

```
'-----вывод результата-----
Dim RezRasPU(1 To 3) As Single
RezRasPU(1) = TG
RezRasPU(2) = P
RezRasPU(3) = T3
CalcTPt = RezRasPU
```

```
End Function
```

Рис. 3.10. Лістинг модуля користувальницької функції Excel

З метою порівняння результатів, отриманих з використанням методу (р, u)-діаграм, та результатів обчислень за методикою, заснованою на розгляді метання продуктами вибуху тіл змінної маси, проводився розрахунок розподілу масової швидкості за фронтом ударної хвилі, що падає, по глибині вихідного порошкового шару h для випадку навантаження порошку з вихідною пористістю 68% і насипною вагою 1,9 г/см³ нормально падаючої детонаційної хвилею при використанні заряду амоніту 6ЖВ висотою 70 мм і проміжної сталевий прокладки товщиною 2,8 мм. Результати розрахунків наведено на рис. 3.11.

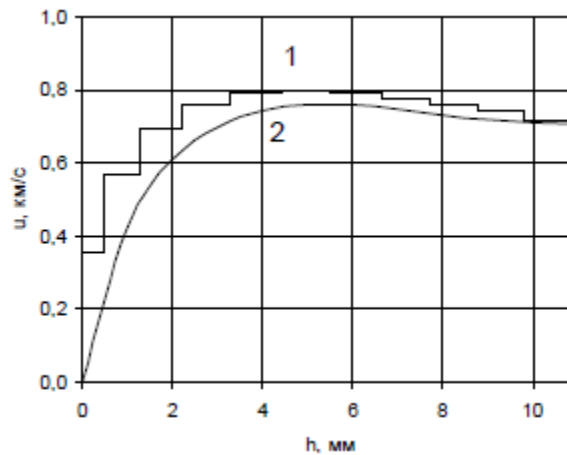


Рис. 3.11. Зіставлення результатів розрахунків масової швидкості частинок порошку за фронтом ударної хвилі, що падає: 1 – розрахунок за ударними адіабатами;

2 – розрахунок метання тіла змінної маси

З наведеного малюнка видно, що при малих глибинах опрацювання ударною хвилею вихідного порошкового шару отримані результати суттєво відрізняються, що цілком природно, тому що розрахунок за методикою метання тіла змінної маси передбачає поступовий набір швидкості як проміжною прокладкою, так і стислим порошком, починаючи від її нульового значення, тоді як насправді порошковий матеріал набуває швидкості практично миттєво, хоча і поетапно відповідно до ударно-хвильових процесів на його кордоні з проміжною прокладкою. Однак надалі, коли в результаті багаторазового проходження ударними хвилями і хвилями розвантаження проміжної прокладки різниця їх амплітуд зменшується, результати розрахунків, виконаних за обома методиками, практично збігаються.

Запропонована методика розрахунку параметрів ударно-хвильового стиску при вибуховій обробці порошкових шарів на монолітних підкладках може досить точно передбачити значення максимального тиску, часу його дії та середньої температури розігріву порошку в процесі обробки. Достовірність перших двох параметрів особливих сумнівів не викликає. Використання третього

вимагає, однак, певної обережності. до. відомо, що при проходженні ударної хвилі по порошку розподіл температури перерізу його частинок може бути істотно нерівномірним внаслідок зосередженості процесів високошвидкісної деформації в поверхневих шарах частинок [63, 64]. У зв'язку з цим оцінка часу вирівнювання температури по перерізу частинок порошку є важливим етапом розгляду процесу стиснення порошку в ударних хвилях.

4. ОТРИМАННЯ ПОКРИТТІВ З ТВЕРДИХ СПЛАВІВ

4.1 Формування покриттів в умовах навантаження нормально падаючої хвилі детонації

Як зазначалося раніше, при навантаженні порошків на металевій підкладці плоскої нормально падаючої детонаційної небезпека «зносу» матеріалу покриття в процесі ударно-хвильової обробки відсутня, а саме покриття при використанні оптимальних режимів навантаження повинно формуватися з усього шару вихідної порошкової суміші і повністю залишатися на поверхні монолітної основи .

Відокремитися від підкладки в цих умовах покриття може тільки в хвилях розвантаження, або ж надалі при охолодженні або при механічній обробці двошарової заготовки за рахунок внутрішніх напруг, що релаксують шляхом утворення та розвитку тріщини між покриттям і основою.

Як показали дослідження, результатом дослідів з вибухового навантажених сумішей порошків карбіду хрому з титановою зв'язкою на сталевих підкладках на режимах, що забезпечують розігрів оброблюваного матеріалу до температур, достатніх для формування твердих сплавів на стадії пресування, може бути (див. рис. 4.1):

1. утворення покриттів, міцно з'єднаних з основою по всій поверхні, що покривається;
2. часткове відшарування покриттів від основи, яке, як правило, призводить до повного відшарування останніх при механічній обробці (різанні зразків);
3. одержання плоских пресувань з твердого сплаву, не пов'язаних із поверхнею сталеві підкладки.



4.1. Загальний вигляд зразків після вибухового навантаження сумішей порошків карбіду хрому з титаном на сталевій підкладці

Залежність одержаного результату від технологічних параметрів вибухової обробки наведена на рис. 4.2.

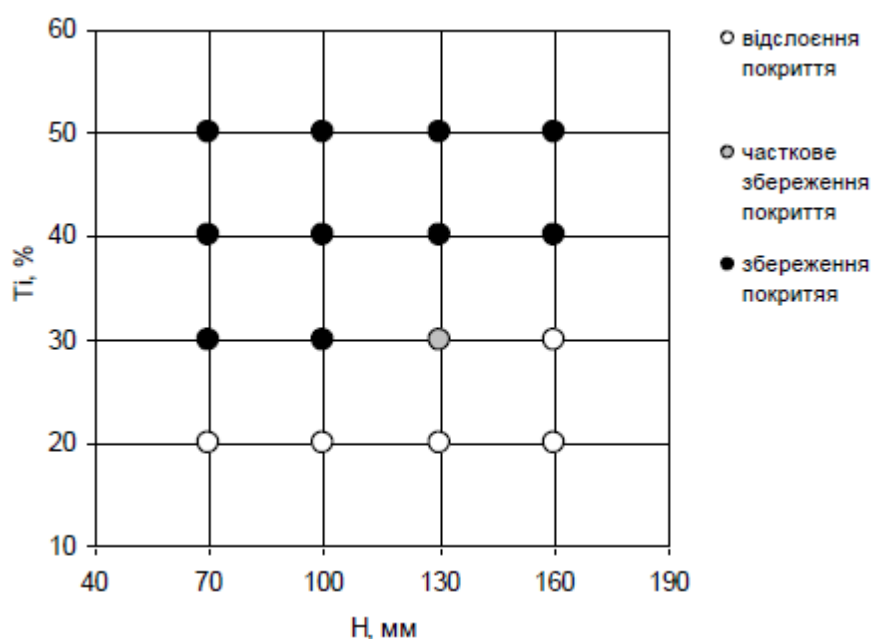


Рис. 4.2. Вплив висоти заряду H та вмісту титанової зв'язки на збереження покриттів із твердих сплавів після вибухового навантаження

Аналіз наведеної залежності показує, що проблем зі збереженням покриттів на поверхні, що покривається (при значенні вихідної висоти шару порошку, рівному $h = 7$ мм) не виникає при використанні титанової зв'язки в кількості 40 і 50 об.%. При вмісті титану у вихідній порошковій суміші, що дорівнює 30 об.%, можна спостерігати як збереження, так і часткове або повне відшарування покриттів, а при вмісті титану, що дорівнює 20 об.%, отримання покриттів з товщиною 2,4... 2,5 мм, що відповідає обраному значенню h , взагалі

неможливо.

Слід зазначити, що при формуванні міцно з'єднаних з підкладкою покриттів останні, як правило, зберігають свій зв'язок з основою при механічній обробці, що включає різання зразків і виготовлення з них шліфів шляхом шліфування та полірування, що свідчить про достатню міцність цього зв'язку. Дослідження мікроструктури (рис. 4.3) показує відсутність нових фаз, перехідних зон, несплошностей чи слідів руйнування у місці з'єднання твердого сплаву зі сталевією основою.

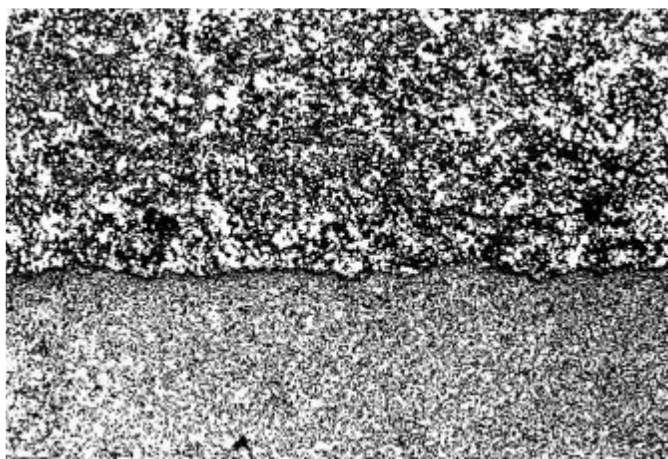
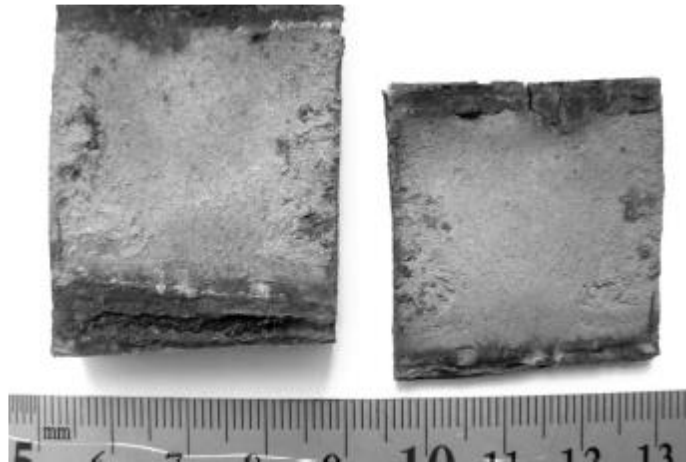


Рис. 4.3. Структура зони з'єднання зі сталевією основою покриття з твердого сплаву хрому карбіду з титаном, шліф, оптична мікроскопія, МІМ-8М, х100

При відшаруванні покриття руйнування відбувається прилеглими до лінії з'єднання шарами твердого сплаву. При цьому на підкладці залишається міцно з'єднаний з нею тонкий шар порошкового матеріалу (рис. 4.4, а), вид якого повністю відповідає виду внутрішньої поверхні покриття, що відшаровується (рис. 4.4, б). Примітно, що обидві поверхні, що розглядаються на відміну від зовнішньої поверхні матеріалу покриття мають видимі ознаки окислення при підвищених температурах у вигляді «квітів втечі» лише по краях і не мають їх у центральній частині. Це свідчить про те, що відшарування покриттів відбувається вже після зняття тиску за рахунок розльоту продуктів детонації, починається за відносно високої температури матеріалу покриття і закінчується після практично

повного остигання твердого сплаву та сталевोї підкладки.



а) б)

Рис. 4.4. Зовнішній вигляд поверхні руйнування при відшаруванні покриття із твердого сплаву від сталевोї основи:

а – поверхня підкладки; б – внутрішня поверхня покриття

Даний факт дозволяє припустити, що причиною відшарування покриттів з твердих сплавів є внутрішні термічні напруги, обумовлені тим, що в момент зняття тиску розподіл залишкової температури в двошарової заготовці виявляється гранично нерівномірним. близьку до температури розігріву в процесі ударно-хвильового стиснення [53, 77, 78], а монолітна підкладка – температуру, лише на кілька десятків градусів відмінну від початкової [6]. внаслідок наявності міцного зв'язку порошкового шару з основою, відбуватиметься гальмування цієї усадки, внаслідок чого в покритті, незалежно від значення коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів, неминуче виникатимуть розтягуючі напруги.

Наведені міркування вказую на той факт, що при нанесенні вибухом покриттів із твердих сплавів повинні існувати деякі обмеження на допустимі температури розігріву вихідної порошкової суміші в процесі компактування. 3.5) свідчить на користь цього припущення і показує, що допустима температура розігріву суттєво зростає зі збільшенням вмісту титанової зв'язки у вихідній суміші порошків. спостерігати описане вище відшарування покриття.

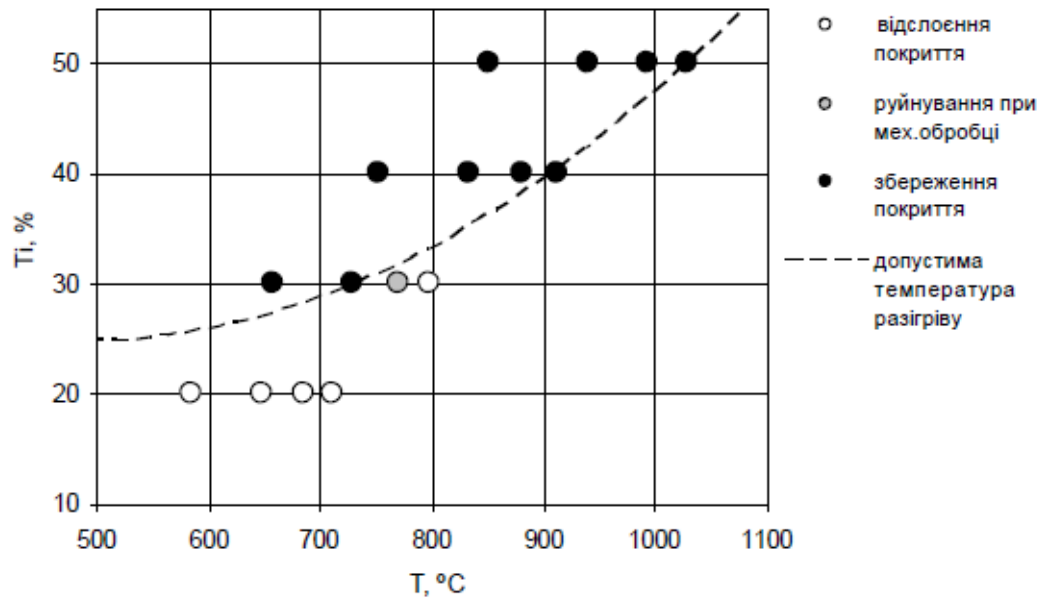


Рис. 4.5. Вплив температури розігріву T при вибуховому навантаженні та вмісту титанової зв'язки на збереження зв'язку покриттів із твердих сплавів із поверхнею підкладки

Міцність з'єднання покриття зі сталеву основою на зріз при сколюванні, визначена за методикою, описаною в п.3.3 гл.3, знаходиться в межах від 25 до 40 МПа. При цьому руйнування зразків відбувається переважно за матеріалом покриття (рис 4.6), що говорить про досягнення рівномірності на межі розділу «твердий сплав – підкладка».

Значення величини міцності з'єднання (у разі збереження покриття) зростає зі збільшенням вмісту титану у складі твердого сплаву, а для кожного із складів порошкової суміші – при зростанні тиску ударно-хвильового навантаження (рис. 4.7). Оскільки твердість сплавів карбіду хрому з 40 і 50 об.% титанової зв'язки на вибраних режимах навантаження залишається практично незмінною, то, не дивлячись на характер руйнування покриттів при проведенні випробувань (рис. 4.6), пов'язати виявлену зміну міцності з'єднання тільки з властивостями міцності матеріалу покриття не є можливим.

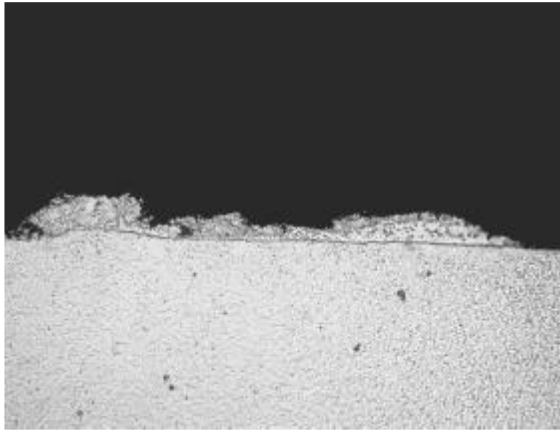


Рис. 4.6. Макроструктура зони руйнування образів після випробування на зріз, оптична мікроскопія, Carl Zeiss Axiovert, x50

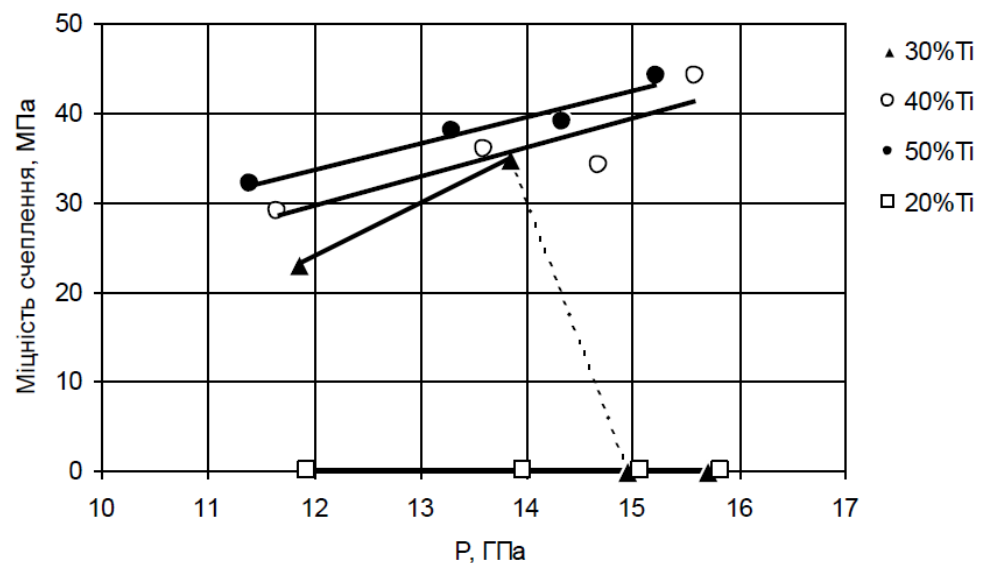


Рис. 4.7. Міцність з'єднання покриттів зі сталеву основою в залежності від вмісту титану та тиску ударно-хвильової обробки

Очевидно, основним фактором, що визначає величину міцності з'єднання покриттів з твердих сплавів, сформованих вибухом, зі сталеву основою так само, як і причиною відшарування покриттів після розвантаження спресованого матеріалу, є внутрішні напруги в отриманій двошарової заготовки.

З цих позицій зазначене зростання міцності сполуки зі збільшенням вмісту титану у вихідній порошковій суміші можна пояснити зниженням коефіцієнта лінійного термічного розширення твердих сплавів від $10,1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ до $9,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

6 °С -1 [272] при збільшенні вмісту в них титанової зв'язки від 20 до 50% за обсягом, а в якості причини зростання міцності з'єднання зі збільшенням тиску ударно-хвильової обробки назвати зазначений ефект зростання пресувань після зняття тиску за рахунок пружного післядії, який у ситуації, що розглядається послаблювати ефект гальмування усадки покриття у процесі охолодження.

З метою перевірки гіпотези про провідну роль у процесах, що визначають міцність з'єднання покриттів з твердих сплавів з основою, внутрішніх напруг була спроба добитися їх зниження шляхом модифікації використовуваної схеми навантаження (рис. 3.3) за рахунок введення між шаром вихідної порошкової суміші карбіду хрому з титановим зв'язуванням додаткового порошкового прошарку титану товщиною 1 мм (рис. 3.8).

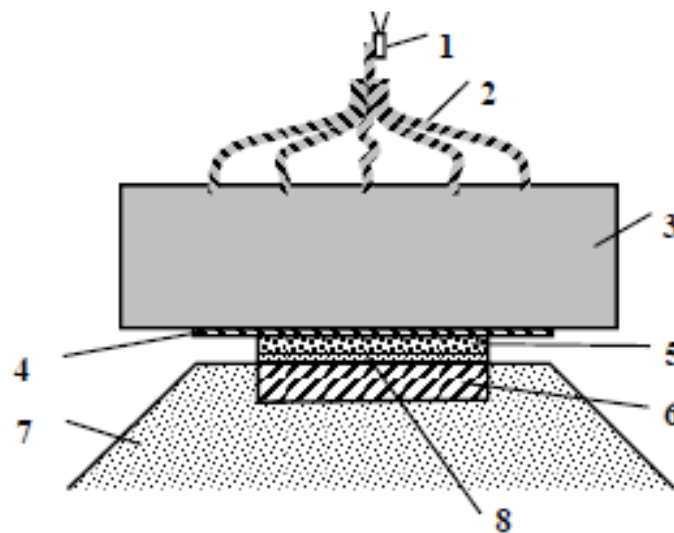


Рис. 4.8. Схема нанесення покриттів із твердого сплаву нормально падаючої детонаційної хвилею:

- 1 – електродетонатор; 2 – шнур, що детонує; 3 – заряд ВР;
4 – проміжне прокладання; 5 - шар порошкової суміші $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Ti}$;
6 – сталева основа; 7 – піщана подушка; 8 – прошарок порошку Т

В ході експериментів варіювали вміст титанової зв'язки порошкової суміші. Товщина сталевий проміжної прокладки, як і в попередніх дослідях, дорівнювала 0,75 мм, товщина шару порошкової суміші карбіду хрому з титаном

- 6 мм (загальна висота шарів порошку, як і раніше, становила 7 мм). Як вибухова речовина використовувався амоніт №6ЖВ, висота заряду встановлювалася рівною 130 мм. Результати експериментів наведено у табл. 4.1.

Табл. 4.1. Міцність з'єднання покриттів системи Cr3C2-Ti з титановим прошарком залежно від змісту зв'язки

№ опита	Склад зв'язки, %		Температура розігріву порошкової суміші, °C	Відслоєння або збереження покриття	Міцність з'єднання покриття на зріз, τ , МПа
	по об'єму	по вазі			
1	20	14	688	Відслоювання при мех. обробці	-
2	30	22	771	збереження	69
3	40	31	878	збереження	72
4	50	40	987	збереження	81

Зіставлення даних табл. 4.1 з отриманими раніше даними (див. рис. 3.2, 3.5) показує, що введення прошарку пластичного титану між шаром твердого сплаву та сталеву підкладкою дозволяє частково (при вмісті 20% титанової зв'язки) або повністю (при 30% титану) зберегти зв'язок з поверхнею підкладки покриттів на режимах, при використанні яких без прошарку відбувається повне або часткове відшарування покриттів.

Дослідження зразків, отриманих шляхом вибухового нанесення на сталеву підкладку порошкових сумішей хрому карбіду з різним вмістом титанової зв'язки і використанням підшару титану, показало, що покриття, що містить 20% зв'язки, відшаровується від підкладки в результаті механічної обробки. При цьому руйнування відбувається на межі «прошарку - твердий сплав» (рис. 4.9), проміжний шар титану залишається міцно з'єднаним з металевою основою, а на поверхні прошарку можна розрізнити сліди твердого сплаву.

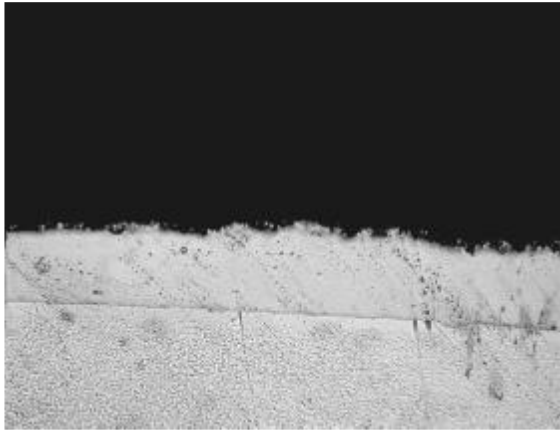


Рис. 4.9. Макроструктура зони відшарування покриттів при різанні образів, оптична мікроскопія, Carl Zeiss Axiovert, x50

Тверді сплави, що містять 30, 40 і 50% зв'язки після вибухового пресування, утворюють міцне з'єднання з підкладкою, яке зберігається при механічній обробці.

Дослідження мікроструктури зони з'єднання покриття з основою (рис. 4.10) показує, що вихідний порошковий прошарок титану в результаті вибухового пресування консолідується в монолітний шар товщиною 130 ... 160 мкм, міцно пов'язаний як з поверхнею твердого сплаву, так і з поверхнею сталевих підстави.

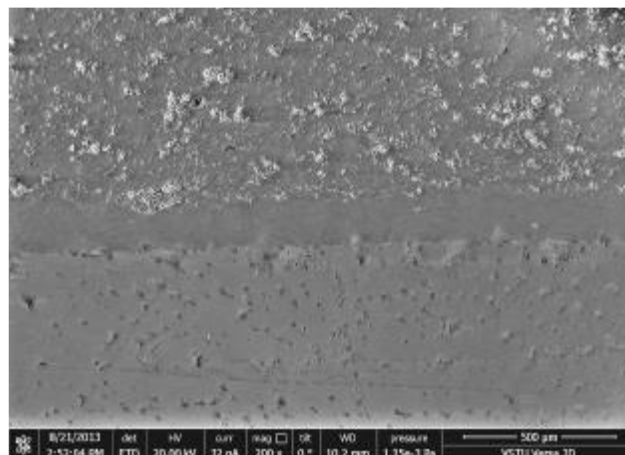


Рис. 4.10. Мікроструктура зони з'єднання твердого сплаву з хрому карбіду з 50% титану зі сталеву основою через прошарок титану: шліф, РЕМ, Versa 3D LoVac:

Аналіз даних по міцності з'єднання покриттів з основою (рис. 4.11)

показує, що при введенні титанового порошкового прошарку міцність з'єднання для сплавів, що містять 40 і 50% титану, досягає 70 ... 80 МПа і зростає більше, ніж у два рази, порівняно з її значеннями для покриттів тих самих складів, але одержаних без прошарку, що відповідає зробленим при постановці дослідів припущенням.

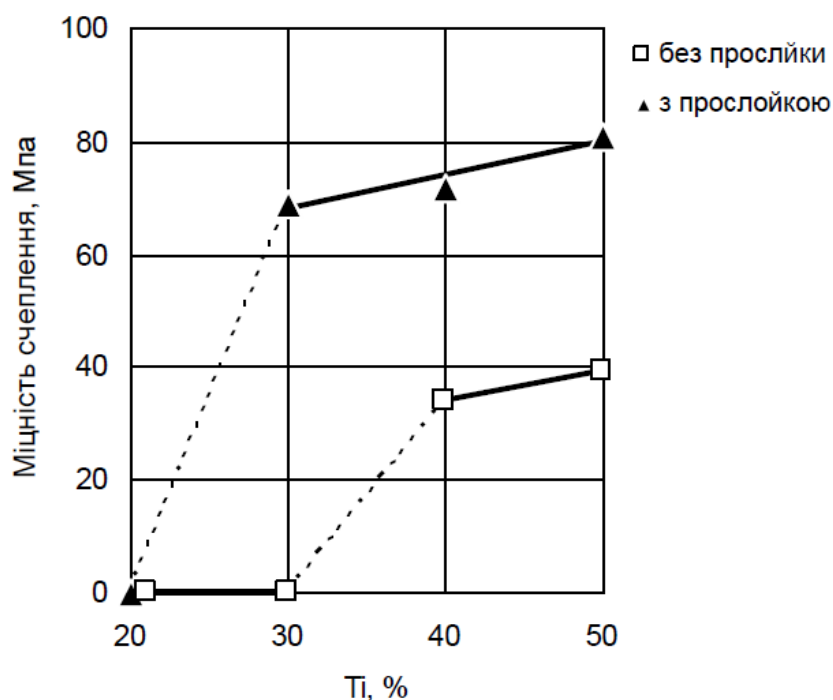


Рис. 4.11. Міцність з'єднання покриттів зі сталеву основою в залежності від вмісту зв'язки титану (HЗ=130 мм)

5. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКОВИХ КАРБІДОХРОМОВИХ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ З ТИТАНОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ І ТЕХНОЛОГІЯ ЇХ НАНЕСЕННЯ НА ДЕТАЛІ ВУЗЛІВ ТРЕННЯ ВИБУХОМ

Фазовий склад твердих сплавів карбіду хрому Cr_3C_2 з титановою зв'язкою, отриманих вибуховим пресуванням, термодинамічно нерівноважним. Отже, вплив досить високих температур на ці сплави в принципі має викликати зміну їхнього фазового складу та структури. Це може стати істотним фактором, що визначає температурні межі умов експлуатації, в яких можуть застосовуватися дані матеріали та покриття з них.

З метою вивчення термічної стійкості отриманих вибухом твердих сплавів карбіду хрому і титану їх нагрівали до температур від 300 до 1200°C в електричній печі опору без захисної атмосфери протягом 1 години.

Як показало вивчення зразків, що містять 40% титану за вагою, їх вихідний двофазний стан і специфічна будова межфазних кордонів при цьому зберігаються практично в незмінному вигляді аж до температур нагріву близько 600 °C (рис. 5.1 і рис. 5.2 а, б, в . г, д).

Єдиним перетворенням, яке вдається зафіксувати в даному температурному інтервалі, є рекристалізація титану при 400°C (рис.5.2, в) та інтенсивне зростання рекристалізованого зерна до температур близько 500°C (рис. 5.2, г).

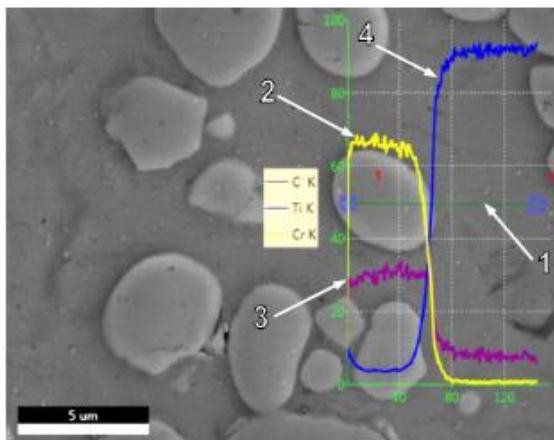


Рис. 5.1. Розподіл елементів між фазами твердого сплаву Cr_3C_2 з 40 вагу.

% Ti після нагрівання до 600°C , PEM Versa 3D LoVac:

1 – лінія сканування складу;

2, 3 і 4 - зміст Cr, C і Ti відповідно

Зі збільшенням температури нагріву сплаву після вибухової обробки до 650°C (рис. 5.2, е) всередині міжфазного граничного шару спостерігається поява дрібнодисперсних зародків нових фаз, які при 700°C (рис. 5.2, ж) зливаються і утворюють два окремих дифузійних шари, які зростають у протилежних напрямках. За рахунок їх зростання при температурі 1200°C вихідні фази у сплаві повністю зникають і він знову стає двофазним (рис. 5.2, з та рис. 5.3).

Дослідження розподілу елементів між фазами у сплаві, що містить 40% титану за вагою, після нагрівання до температури 1200°C (рис. 5.4) показує, що перехід від вихідного фазового складу до нового здійснюється в основному за рахунок дифузії вуглецю, який перерозподіляється між структурними складовими сплаву, як і передбачалося раніше.

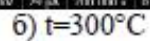
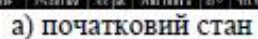
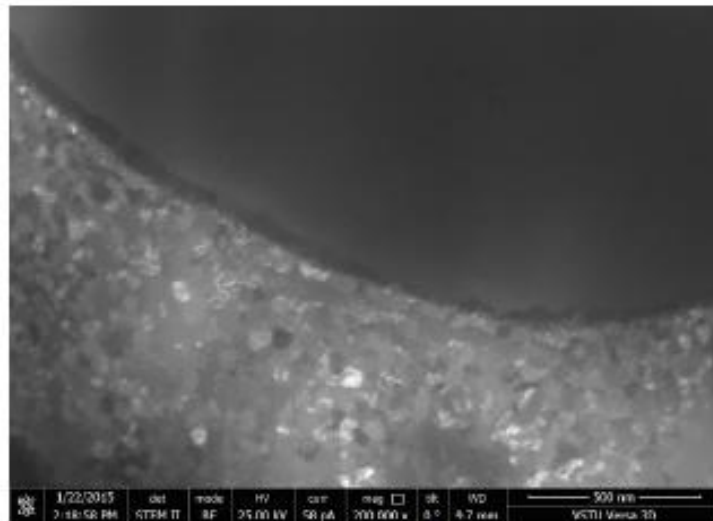
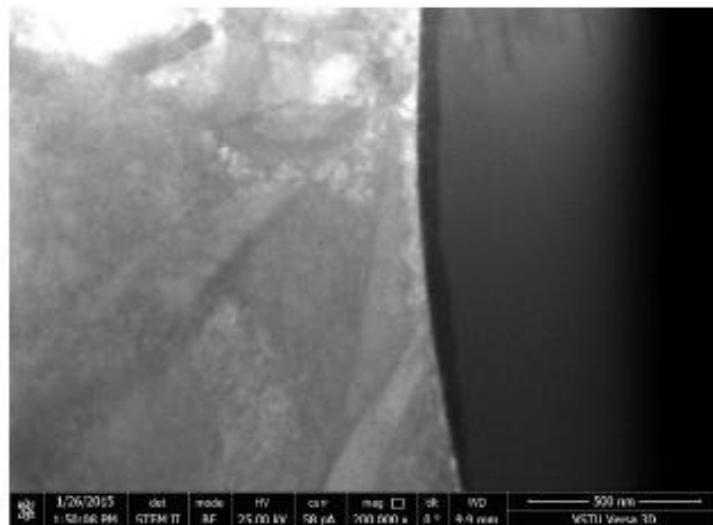


Рис. 5.2. Мікроструктури твердих сплавів, отриманих вибуховим пресуванням порошкових сумішей хрому карбіду с 40 вагу. % титану після нагрівання до різних температур, PEM, Versa 3D LoVac

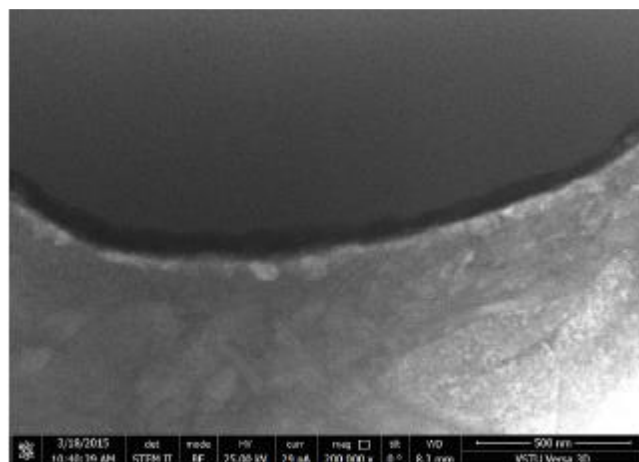


в) $t=400^{\circ}\text{C}$

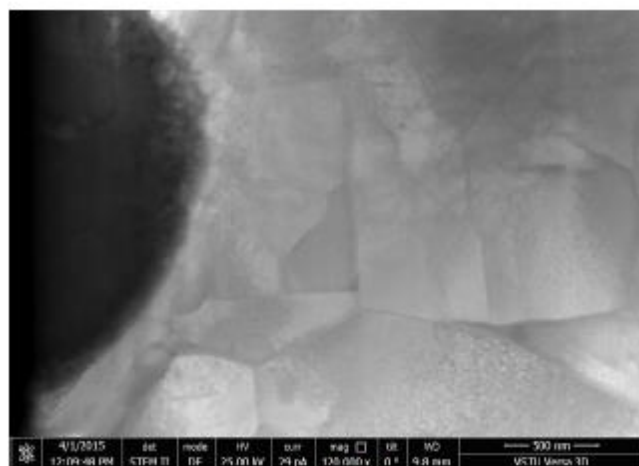


г) $t=500^{\circ}\text{C}$

Рис. 5.2 (продовження). Мікроструктури твердих сплавів, отриманих вибуховим пресуванням порошкових сумішей хрому карбіду с 40 вагу. % титану після нагрівання до різних температур, PEM, Versa 3D LoVac

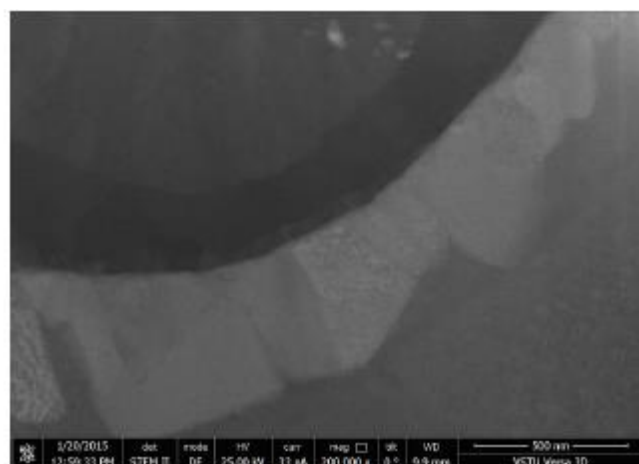


д) $t=600^{\circ}\text{C}$

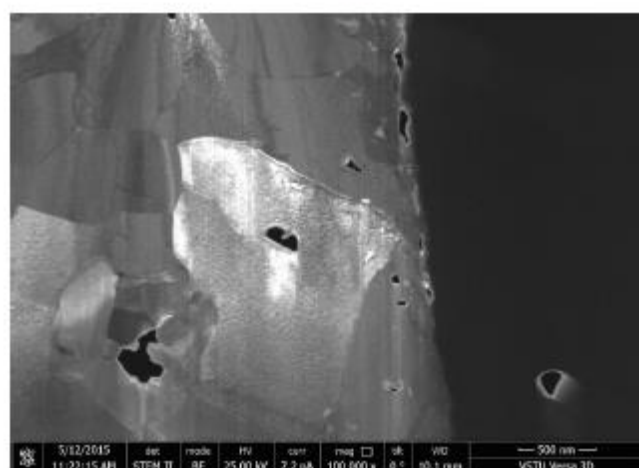


е) $t=650^{\circ}\text{C}$

Рис. 5.2 (продовження). Мікроструктури твердих сплавів, отриманих вибуховим пресуванням порошкових сумішей хрому карбіду с 40 вагу. % титану після нагрівання до різних температур, PEM, Versa 3D LoVac



ж) $t=700^{\circ}\text{C}$



з) $t=1200^{\circ}\text{C}$

Рис.5.2 (продовження). Мікроструктури твердих сплавів, отриманих вибуховим пресуванням порошкових сумішей хрому карбіду с 40 вагу. % титану

після нагрівання до різних температур, PEM, Versa 3D LoVac

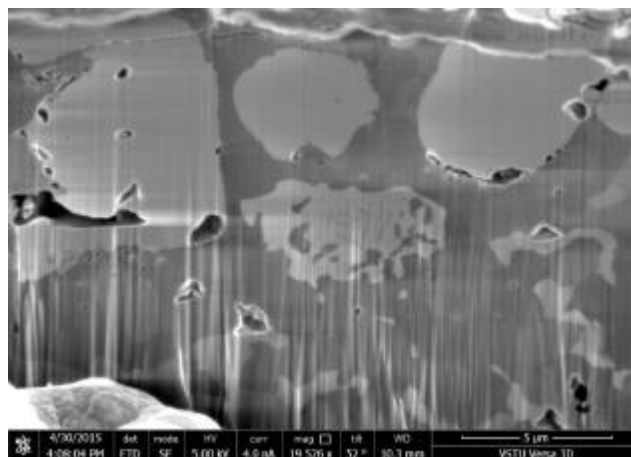


Рис. 5.3. Мікроструктури твердого сплаву Cr_3C_2 з 40 вагу. % Ti , що сформувалася внаслідок міжфазної взаємодії при температурі 1200°C , PEM, Versa 3D LoVac

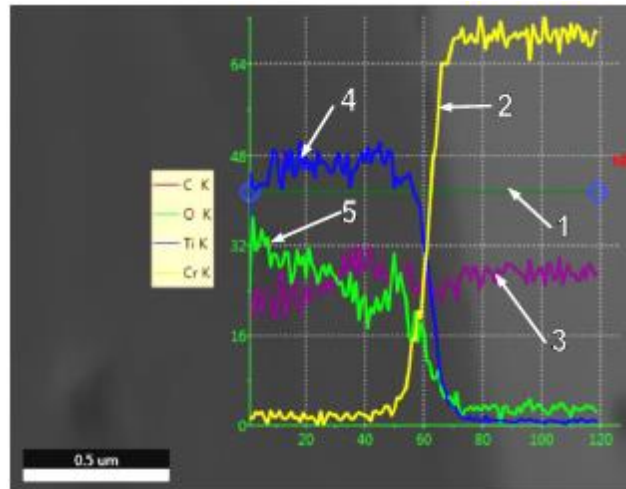


Рис. 5.4. Розподіл елементів між фазами твердого сплаву Cr_3C_2 з 40 вагу. % Ti після нагрівання до 1200°C , PEM Versa 3D LoVac:

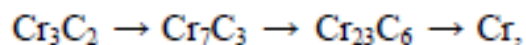
1 – лінія сканування складу;

2, 3, 4 та 5 – зміст Cr , C , Ti та O відповідно

Співвідношення концентрацій елементів у нових фазах (рис. 5.5) дозволяє ідентифікувати їх як карбід хрому Cr_{23}C_6 та оксикарбід титану $\text{TiC}_{0,6}\text{O}_{0,7}$. Сумарний вміст кисню та вуглецю в оксикарбідній фазі при цьому близький до межі її гомогенності.

Наявність у структурі матеріалу, підданого нагріванню в окислювальній атмосфері до температури 1200°C , оксикарбидної фази замість теоретично передбаченого TiC пов'язано, мабуть, з високотемпературним насиченням сплаву киснем, який практично повністю розчиняється в карбіді титану, образу фаз твердого сплаву - карбиду хрому та титану (див. рис. 5.4, 5.5).

Знижений порівняно з TiC вміст вуглецю в оксикар-бідній фазі TiC_xO_y призводить до того, що перехід



пов'язаний зі збідненням вихідного карбиду хрому вуглецем, відбувається

не до кінця і замість теоретично очікуваного для сплавів карбіду хрому з 40 вагу. % титану твердого розчину на основі хрому як другий фазової складової матеріалу в результаті ми отримуємо карбід хрому Cr_{23}C_6 .

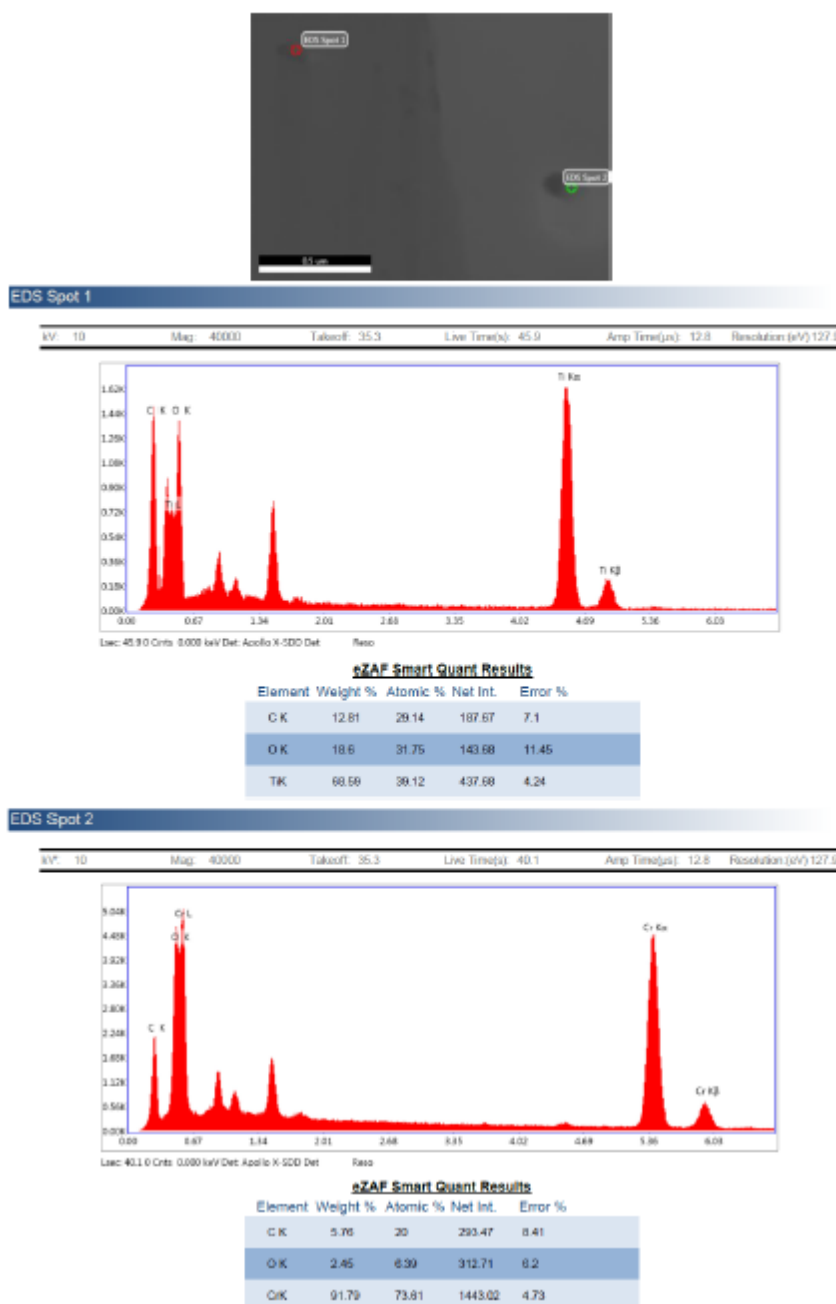


Рис. 5.5. Хімічний склад фаз твердого сплаву Cr_3C_2 з 40 вагу. % Ті після нагрівання до 1200°C , PEM Versa 3D LoVac

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що заміна одного з елементів пари тертя «силицирований графіт по силицированному графіту» на

деталь з покриттям з твердого сплаву на основі карбіду хрому з титановою зв'язкою забезпечує поліпшення реакції пари на посилення умов роботи (граничні навантаження переважно рідинного тертя та захоплювання зростають) та суттєве зниження сумарного зносу її елементів.

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗАНЯТТЯ НА ТЕМУ «СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ АНТИФРИКЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ З ТВЕРДИХ СПЛАВІВ» ДЛЯ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ

6.1. Постановка цілей факультативного заняття (оперативних цілей)

В таблиці 6.1 наведено оперативні цілі з теми.

Таблиця 6.1

Постановка цілей факультативного заняття

Цілі факультативного заняття	Цілі формування різних рівнів засвоєння навчального матеріалу	Умови досягнення	Результат у вигляді дій здобувачів освіти
1	2	3	4
Сформувати вміння розкривати композиційну структуру та антифрикційні властивості твердого сплаву, підданого термогідрохімічній обробці (ТГХО). ТДХО включає хімічну обробку в оксидному вододисперсному середовищі та термообробку. Описувати технологію, що	I-IV рівень	Базові знання з дисципліни «Матеріалознавство»	Сформовані вміння у здобувачів освіти щодо композиційної структури та антифрикційних властивостей твердого сплаву, підданого термогідрохімічній обробці (ТГХО). ТДХО включає хімічну обробку в оксидному вододисперсному середовищі та термообробку. Опис технології, що

Продовження табл. 6.1

1	2	3	4
підвищує стійкість твердосплавних ріжучих інструментів 1,3-4,0 рази в порівнянні з традиційними; описувати структуру композиції "твердозмашувальний шар - перехідний шар - матриця", що складається з макроеlementів (матриця, шар) з різними властивостями; описувати нанокомпозитну структуру твердозмашувального покриття після його нагрівання вище 500 °С, в якій оптимально чергуються нано- та мікроеlementи (нано- та полікристаліти)			підвищує стійкість твердосплавних ріжучих інструментів 1,3-4,0 рази в порівнянні з традиційними; описувати структуру композиції "твердозмашувальний шар - перехідний шар - матриця", що складається з макроеlementів (матриця, шар) з різними властивостями; опис нанокомпозитної структури твердозмашувального покриття після його нагрівання вище 500 °С, в якій оптимально чергуються нано- та мікроеlementи (нано- та полікристаліти)

6.2. Перелік літературних джерел з теми

1. Баланюк Г. В. Підвищення точності та якості багаторізевого розточування ступінчастих отворів на основі дослідження динаміки технологічної системи : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук / Баланюк Ганна Василівна ; МОН України, Одеський нац. політехн. ун-т. – Одеса, 2018. – 23 с. 713825 К 621.9

2. Барандич К. С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук / Барандич Катерина Сергіївна ; МОН України, Нац. техн. ун-т України "КПІ імені І. Сікорського". – Київ, 2018. – 22 с. К 128902 621.7

3. Батигін Ю. В. Устаткування для практичної реалізації індукційного нагрівання в сучасних технологіях машинобудування / Ю. В. Батигін, О. С. Сабокар, В. А. Стрельнікова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 4. – С. 70-74. – Бібліогр.: с. 73 (5 назв). Р/О126.

6.3. Конструювання дидактичних матеріалів: аналіз структури навчального матеріалу факультативного заняття

План викладення теми: «Структура і властивості антифрикційних покриттів з твердих сплавів».

1. Класифікація композиційних структур, сформованих шляхом зміцнення обробки сплавів

2. Структура зламу (а) та мікрорельєф (б, в) поверхні твердого сплаву ВК6, підданого ТГХО в оптимальному вододисперсному середовищі на основі ТЮ2+М о03 (при різному збільшенні)

3. Вплив нагрівання після ДХВ твердого сплаву ВК6 на розмір зерен у покритті

4. Розподіл органічної сполуки (світлий фон) у твердому сплаві ВК6, підданого ТГХО в оптимальному вододисперсному середовищі на основі ТiO₂+MgO₃ (при різному збільшенні)

5. Результати спектрального аналізу поверхні твердого сплаву ВК6, підданого ТГХО в оптимальній вододисперсній середовищі на основі TiO₂+MgO₃

6. Результати рентгеноспектрального аналізу поверхні твердого сплаву ВК6, підданого ТДХО в оптимальному вододисперсному середовищі на основі TiO₂+MgO₃

6.4. Аналіз базових умов навчання

В таблиці 6.2 приведено вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань.

Таблиця 6.2

Вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань

Перелік базових понять, законів, способів дії	Назва дисциплін і тем, в яких формуються базові знання і дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій	Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій
1	2	3	4
Тверді сплави	Дисципліна «Матеріалознавство»	Метод – усне опитування Форма – фронтальна. Засіб – контрольні питання. Приклади питань: 1. Які основні вимоги висуваються до інструментальних матеріалів? 2. Перелічити основні групи інструментальних матеріалів.	Нагадування основних моментів

Перелік базових понять, законів, способів дії	Назва дисциплін і тем, в яких формуються базові знання і дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій	Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій
1	2	3	4
		3. Яка теплостійкість різних груп інструментальних матеріалів?	

Продовження табл. 6.2

1	2	3	4
		4. Які фізико-механічні властивості, склад та сфери застосування вуглецевих та легованих інструментальних сталей? 5. Назвіть хімічний склад, фізико-механічні властивості та сфери застосування швидкорізальних сталей. 6. На які групи за хімічним складом діляться тверді сплави? 7. Назвіть сфери раціонального використання кожної групи твердих сплавів? 8. Назвіть переваги та недоліки різальної кераміки та області їх раціонального застосування.	

6.5. Проєктування мотиваційних технологій навчання

На рис. 6.2 представимо характеристику мотиваційних технологій навчання, а в таблиці 6.3 – текст мотивації до нашого заняття

Таблиця 6.3

Визначення способів реалізації мотивації

Способи реалізації мотивації	Внутрішня мотивація
1	2
Вступна мотивація Прийом: віднесення до ситуації	Рівень розвитку сучасної техніки характеризується високою інтенсивністю експлуатації інструментів підвищеної теплостійкості, особливо твердосплавних. Це вимагає істотного поліпшення їх експлуатаційних властивостей, що можна досягти формуванням у твердому сплаві композиційної структури в результаті зміцнювальної обробки. Найбільший науковий та практичний інтерес у цьому плані представляє процес ТДХО, оскільки застосовний для готових до

1	2
	експлуатації інструментів, що не змінює їх початкові розміри, форму та структуру.

6.6. Проектування технології формування орієнтовної основи діяльності на факультативному занятті

Вибір методів, форм та засобів формування ООД наведено в таблиці 6.4

Таблиця 6.4

Способи формування ООД на факультативному занятті

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
I	Фронтальна	Інтерактивні освітні технології є одним із видів інноваційних технологій навчання. Вони орієнтовані широке взаємодія учнів як із викладачем, і друг з одним у процесі набуття професійних знань і умінь. Основною відмінністю інтерактивних освітніх технологій є розвиток особистої ініціативи, вироблення у студентів прагнення до отримання нових знань і умінь, що лежить в основі компетентнісного та особистісно-орієнтованого підходів у навчанні. Викладач виконує роль координатора, консультанта з питань і проблем, що виникають, створює умови для самостійного	Презентаційні слайди з теми плакати, відеоматеріали з теми.
II			
III			
IV			

		оволодіння знаннями, що навчаються, і вміннями в процесі	
--	--	--	--

Продовження табл. 6.4

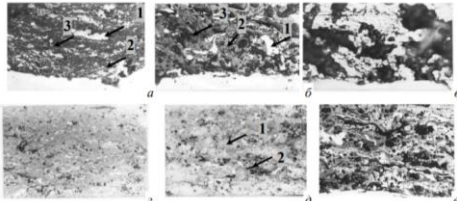
1	2	3	4
		пізнавальної діяльності через діалогове спілкування: лекція-бесіда-диспут, ілюстрація	

6.7 Проектування технології формування виконавчих дій на факультативному занятті

Вибір методів, форм та засобів формування виконавчих дій наведено в таблиці 6.5.

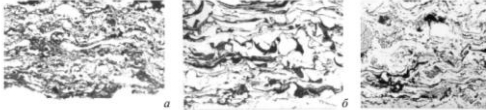
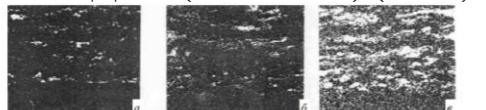
Таблиця 6.5

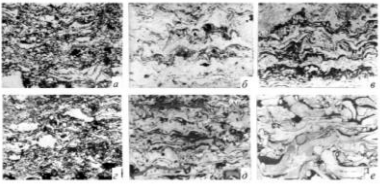
Способи формування виконавчих дій з теми

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
I, II, III, IV	Фронтальна	Вправи, самостійна робота	Завдання 1. Опишіть вплив методів напилення на структуру покриттів: а - у КП FeCr-TiCMo-C; г - е КП Cr₂O₃-TiO₂-CaF₂; а, г - ДН; б, д - СВГПН; в, е - ПН-Ar+H₂; (x400)  Завдання 2. Опишіть вплив методів напилення на структуру покриттів із

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
			механічної суміші FeCSi+10% CaF ₂ : а – ДН; б - ВДПН; в – СВДПН (x400)

Продовження табл. 6.5

1	2	3	4
			 Завдання 3. Опишіть розподіл твердого мастила за обсягом покриттів із механічної суміші FeCSi+CaF₂: а – ДН (10% CaF₂); б - СВГПН (10% CaF₂); в – СВДПН (20% CaF₂) (x350)  Завдання 4. Опишіть вплив методу напilenня та вмісту твердого мастила на структуру покриттів: а – FeCSi+ 10% FemOn (ДН); б - FeCSi +10% FemOn (СВДПН); в – FeCSi +20% FemOn (ВДПН); г - FeCSi + 20% FemOn (ДН); д - FeCSi +20% FemOn (СВДПН); е – FeCSi +20% FemOn (ПН-Ar+H₂); (x400)

			
--	--	--	---

6.8 Проєктування контрольних дій з теми

Вибір методів, форм та засобів формування контрольних дій наведено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6

Засоби контролю з теми факультативного заняття

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
IV рівень	Фронтальна	Письмове опитування: картки завдання	Доповніть речення: 1. В результаті проведених досліджень встановлено, що при взаємодії з газовою струменем в обсязі частинок КП FeCr-TiC-Mo-C відбувається 2. При ДН нагрівання в частинках Cr₂O₃-TiO₂-CaF₂ супроводжується взаємодією компонентів із формуванням складних оксидів 3. Високотемпературні методи напилення (СВГПН та ДН) забезпечують формування дрібнодисперсної структури, з товщиною ламелів до та рівномірним розподілом включень твердого мастила в об'ємі покриттів, а також підвищеної, При дозвукових плазмових методах напилення товщина ламелей сягає Перевага ДН та СВГПН методів напилення у вищій міцності зчеплення з основою, при напиленні КП та при напиленні механічних сумішей, проти 4. Структура, фазовий склад, мікротвердість та інші властивості, що визначають якість покриттів, а саме, що найбільш перспективними є покриття,

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
			отримані методом ДН з КП FeCr-TiCMo-C та Cr2O3-TiO2-CaF2, а

Продовження табл. 6.6

1	2	3	4
			також отримані методами ДН та СВГПН із порошку FeCSi+20% CaF2 та FeCSi+20% FemOn.

6.9 Розробка сценарію факультативного заняття

Сценарій заняття, його структура й зміст структурних елементів представлені у вигляді табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Сценарій заняття з теми заняття «Структура і властивості антифрикційних покриттів з твердих сплавів»

№ з/п	Структурні елементи заняття	Зміст структурних елементів
1	2	3
1	Організаційний момент	Вітання, фіксація відсутніх, перевірка зовнішньої обстановки в аудиторії. Вітання викладача. Студенти підтверджують присутності у момент переклички, налагоджуються на здійснення навчальної діяльності.
2	Повідомлення теми і мети заняття	Повідомлення теми заняття: «Структура і властивості антифрикційних покриттів з твердих сплавів». Мета: сформувати вміння у здобувачів освіти щодо формування структури і властивостей антифрикційних покриттів з твердих сплавів.
3	Мотивація	Повідомлення важливості вивчення даної теми:

	мети	«Структура і властивості антифрикційних покриттів з твердих сплавів». Текст для формування внутрішньої мотивації представлений в табл. 4.3.
4	Актуалізація базових знань	Проведення фронтального опитування. Метод – письмове опитування. Форма – фронтальна. Засіб – тестові завдання. Перелік тестових питань представлений в таблиці 4.2.

Продовження табл. 6.7

1	2	3
5	Формування ООД	Викладач викладає новий навчальний використовуючи методи традиційні – пояснення, бесіда, демонстрація та інноваційні – лекція-дискусія з елементами мозкового штурму відповідно за планом заняття, який представлений у п. 4.3.
6	Формування ВД	Викладач проводить закріплення навчального матеріалу за допомогою методу – рішення задач, видаючи кожному студенту картки-завдання. Приклади завдань представлений в табл. 4.5.
7	Формування КД	Викладач проводить письмове опитування. Картки-завдання представлені в таблиці 4.6.
8	Підбиття підсумків, видача домашнього завдання	Узагальнення засвоєного шляхом нагадування в узагальненому вигляді основних питань, розглянутих на занятті Відновлення в пам'яті основних моментів матеріалу заняття. Видає домашнє завдання: Написати реферат по темі.

Висновки до розділу 6

У цьому розділі була проведена розробка факультативного заняття на тему «Структура та властивості антифрикційних покриттів з твердих сплавів» для спеціалістів у сфері машинобудування. Зокрема, були визначені дидактичні цілі факультативного заняття, проведено аналіз основних умов навчання, обрано тип мотивації та сформульовано відповідний текст, створено системи задач і

завдань для виконання під час заняття, розроблено методи формування орієнтовної основи діяльності та виконавчих дій, організовано виконання завдань і розв'язання задач, а також здійснено контроль сформованих навичок і підготовлено сценарій факультативного заняття.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Використання вибухового навантаження сумішей порошків карбідів з металами забезпечує можливість отримання консолюдованих твердих сплавів з підвищеними експлуатаційними характеристиками на стадії пресування без подальшого спікання.

2. На процес формування твердих сплавів із сумішей порошків Cr_3C_2 з металами при вибуховому навантаженні впливають акустична жорсткість використовуваного як зв'язування металу та його схильність до карбідоутворення. Від величини першої з них залежить ступінь ущільнення порошкових сумішей при ударно-хвильовій обробці, а від значення другий-міцність формуються меж між карбідною і металевою складовими твердого сплаву. З цих позицій оптимальним зв'язуванням при отриманні твердих сплавів та покриттів на основі Cr_3C_2 вибухом є титан.

3. В результаті проведених досліджень розроблені склади та технологічні прийоми, що дозволяють отримувати вибухом без спікання практично безпористі покриття системи Cr_3C_2 -Ti, що мають високу твердість і міцність з'єднання з поверхнею, що покривається, термічну стабільність, стійкість до окислення і істотно кращі трибо-технічні характеристики при терті по силіцированному графіту у воді, ніж існуючі матеріали.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Synthesis and Characterization of Ti-Si-C-N Films / D. V. Shtansky, E. A. Levashov, A. N. Sheveiko, J. J. Moore // Metallurgical and Materials Transaction. – 1999. – Vol. 30A, №9. – Pp. 2439–2447.
2. The Wear-Resistance and Antifrictional Properties of Hard Alloys of Chromium Carbide with Titanium Produced By the Explosive Compaction of Powders / A. V. Krokhaliev, V. O. Kharlamov, M.A. Tupitsin, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak // Key Engineering Materials. - 2016. - Vol. 684. - C. 198-203.
3. A.Nayeem Faruqui, P. Manikandan, T. Sato, Y. Mitsuno, K. Hokamoto. “Mechanical milling and synthesis of Mg-SiC composites using underwater shock consolidation”, Metals and Materials International, February 2012, Volume 18, Issue 1, pp 157-163.
4. M. A. Meyers, S.S. Shang and K. Hokamoto, “The Role of Thermal Energy in Shock Consolidation”, Shock Waves in Materials Science, Ed. A.B. Sawaoka, Springer-Verlag, Tokyo, 1993. –pp. 145-176
5. Mamalis, A. G. On the modelling of the compaction mechanism of shock compacted powders / Mamalis A.G., Vottea I.N. , Manolakos D.E. // Journal of Materials Processing Technology 108 (2001) pp.165-178.
6. Synthesis of Cr₃C₂ coatings for tribological applications / Da-Yung Wang, Ko-Wei Weng, Chi-Lung Chang, Wei-Yu Ho // Surface and Coatings Technology. –1990. – № 120–121. – Pp. 622–628.
7. Tribological Properties of Plasma-Sprayed Coatings Under Water Lubricated Sliding/ LI Jian-Feng; HUANG Jing-Qi; ZHANG Ye-Fang; DING Chuan-Xian (Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences Shanghai 200050 China) JOURNAL OF INORGANIC MATERIALS (1998-04).
8. Головенкін В. П. Інженерна педагогіка [Електронний ресурс] : підруч. / В. П. Головенкін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. Режим доступу: http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna_pedagogika.pdf

9. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 204 с.

10. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 174 с.

11. Лебедик Л.В., Стрельніков В.Ю., Стрельніков М.В. Сучасні технології навчання і методики викладання дисциплін: Навчально-методичний посібник для слухачів курсів підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів середньої, професійної (професійно-технічної), фахової передвищої та вищої освіти / Л. В. Лебедик, В. Ю. Стрельніков, М. В. Стрельніков. – Полтава : АСМІ, 2020. – 303 с.

12. Методика професійної освіти : навч. посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 015 «Професійна освіта» галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» / Д. О. Чернишев, К. І. Почка, Г. Л. Корчова, Ю. С. Красильник, М. В. Руденко. – Київ : Компринт, 2024. – 224 с.

13. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 015 Професійна освіта (за спеціалізацією) / Укр. інж.-пед. акад.; упоряд.: О. Е. Коваленко, Н. О. Брюханова, Н.В. Божко, Н.В. Корольова – Харків: УІПА, 2024. – 82 с.