

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Р. Д. Іскович-Лотоцький, О. В. Зелінська, Я. В. Іванчук

**ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНКИ
ПАРАМЕТРІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ
ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ
НА ВІБРОПРЕСОВОМУ ОБЛАДНАННІ
З ГІДРОІМПУЛЬСНИМ ПРИВОДОМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2018

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/397>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 629.979:621.768.4.06:621.777.01

I-86

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 25.01.2018 р.)

Рецензенти:

І. П. Паламарчук, доктор технічних наук, професор

І. В. Севостьянов, доктор технічних наук, професор

Іскович-Лотоцький, Р. Д.

I-86

Технологія моделювання оцінки параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, О. В. Зелінська, Я. В. Іванчук. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 152 с.

ISBN 978-966-641-723-0

Визначено високу ефективність вібраційного і віброударного формоутворення заготовок з порошкових матеріалів. Розглянуто системний підхід і на основі нечітких множин зроблено оцінку ефективності функціонування технологічного комплексу формоутворення. Розроблено автоматизовану систему розрахунку і експериментально досліджені основні параметри системи технологічного комплексу формоутворення заготовок.

Розрахована на інженерів-спеціалістів, науковців інженерно-технічного спрямування, студентів та аспірантів технічних вузів.

УДК 629.979:621.768.4.06:621.777.01

ISBN 978-966-641-723-0

© Р. Іскович-Лотоцький, О. Зелінська, Я. Іванчук, 2018

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....	9
1.1 Загальні відомості про процеси формоутворення.....	9
1.2 Процеси вібраційної та віброударної обробки	13
1.3 Використання вібраційного та віброударного навантаження при формоутворенні заготовок з порошкових матеріалів	15
1.4 Вібропресове обладнання для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів	21
2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІБРОУДАРНОГО ПРЕСУВАННЯ	30
2.1 Фізико-механічні властивості заготовок під віброударним пресуванням	30
2.2 Інерційний вібропрес-молот з гідроімпульсним приводом	35
2.3 Основні робочі режими роботи ІВПМ	39
2.4 Технологічний комплекс для віброударного пресування	42
2.5 Теоретичні основи оцінки ефективності та надійності роботи складових технологічного комплексу для віброударного пресування	47
2.6 Оцінка ефективності функціонування технологічного комплексу для віброударного пресування	51
2.7 Оцінка надійності роботи системи ІВПМ.....	56
3 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ	60
3.1 Розробка моделі функціонування ІВПМ технологічного комплексу віброударного пресування	60
3.2 Аналіз моделі функціонування ІВПМ технологічного комплексу віброударного пресування	68
3.3 Використання нечіткої логіки для оцінки ефективності функціонування технологічного комплексу віброударного пресування.....	77

3.4 Метод оцінювання стану технологічного комплексу на базі математичного апарату нечітких множин	85
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ВІБРОПРЕСОВОМУ ОБЛАДНАННІ З ГІДРОІМПУЛЬСНИМ ПРИВОДОМ.....	100
4.1 Параметри експериментальних зразків заготовок для віброударного пресування	100
4.2 Експериментальна установка ІВПМ для дослідження віброударного пресування	101
4.3 Аналіз і обробка результатів експериментальних даних	107
4.3.1 Теоретичні основи обробки і аналізу статистичних даних	107
4.3.2 Результати експериментальних досліджень.....	110
5 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІБРОУДАРНОГО ПРЕСУВАННЯ.....	118
5.1 Автоматизація розрахунку і проектування технологічного комплексу для віброударного пресування.....	118
5.2 Оцінка ефективності та прогнозування роботи технологічного комплексу	126
5.3 Визначення ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії	130
5.4 Функціонально-вартісний аналіз технологічного комплексу	132
ВИСНОВКИ.....	137
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	139

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВМ – вібраційна машина
ВУМ – віброударна машина
ВУ – віброударний (метод обробки, процес)
ВУП – віброударне пресування
ГП – гідроімпульсний привод
ІВПМ – інерційний вібропрес-молот
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина
НЕФ – низьковольтний електрофарфор
ТО – технологічне обладнання
ФМ – формувальна машина
ФВА – функціонально-вартісний аналіз

ВСТУП

Розвиток сучасного машинобудування є значущим чинником технічного прогресу, оскільки корінні перетворення в будь-якій сфері виробництва можливі лише в результаті створення досконаліших машин і розробки принципово нових технологій. Широке використання знаходять вібраційні та віброударні технологічні процеси, а також обладнання для їх реалізації.

Встановлено, що прикладання до об'єктів обробки корисних вібрацій або ударних імпульсів дозволяє значно інтенсифікувати протікання ряду технологічних процесів, забезпечити оптимальність параметрів навантаження і одержати виріб з високими якісними параметрами, зокрема, при пресуванні заготовок виробів з порошкових матеріалів (карбідів, боридів та ін.), які повинні мати відповідні міцність, щільність і рівнощільність по об'єму в умовах безвідходного виробництва для того, щоб заготовку можна було транспортувати до камери спікання без втрати форми. Тому до вібраційного обладнання для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів висуваються підвищені вимоги. Таке обладнання повинно мати порівняно просту конструкцію, високу надійність, низькі металоємність і енергоємність, забезпечувати якість формованого виробу.

Значний внесок у вирішення цих питань внесли І. І. Блехман, Р. Д. Іскович-Лотоцький, П. С. Берник, О. М. Лаптев, І. Б. Матвеєв, Р. Р. Обертюх, В. М. Потураєв, В. Д. Рудь, Т. О. Сиріцин, І. О. Ушаков, М. А. Халфін, К. В. Фролов, В. М. Ям та інші вчені. Проблема підвищення ефективності процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом є важливим техніко-економічним завданням, вирішення якого відкриває шляхи для науково-обґрунтованого призначення показників ефективності. Підвищення ефективності складного процесу є серйозним резервом для економії засобів, матеріалів, енергії і трудових витрат. Розвиток комплексного підходу до проблеми підвищення ефективності процесу формоутворення, при раціональному поєднанні фундаментальному вирішенні питань теорії надійності і прикладних завдань підвищення ресурсу машин і конструкцій, є одним з актуальних і найважливіших завдань сучасного машинознавства.

У монографії докладно висвітлені основні етапи науково-дослідницької діяльності, розглянуто коло основних проблем, пов'язаних із забезпеченням результативності та об'єктивності наукової діяльності: вибір напрямку та теми наукового дослідження, пошук, накопичення і обробка наукової інформації, визначення об'єкта і предмета, методології дослідження, оформлення результатів наукової роботи.

У першому розділі монографії проаналізовані основні технологічні процеси, в яких використовуються вібраційні та віброударні впливи. Розглянуто вібраційну машину як структуровану технологічну систему. Вібраційну машину з гідроімпульсним приводом подано у вигляді технологічної системи, яку можна визначити сукупністю її структурних складових та взаємозв'язків між ними, що упорядковані з метою виконання певної виробничої функції в умовах робочого режиму. Визначено основні напрямки підвищення ефективності процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні.

У другому розділі монографії досліджено структурні та функціональні зв'язки між складовими простіших систем та всередині них і доведено доцільність використання системного підходу дослідження вібраційної машини як технологічного комплексу.

Досліджено фізико-механічні властивості заготовок та робочі процеси ІВПМ з ГПП. Розглянуто два варіанти підключення вібробудувача, який визначає можливість реалізації на ІВПМ різних робочих параметрів віброударного пресування. Розглянуто класифікацію основних робочих режимів ІВПМ і виділено три робочих режими.

Проаналізовано параметри кожної з систем і залежність між собою. Доведено, що системний підхід до проблеми підвищення ефективності процесів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом є одним з актуальних і найважливіших завдань.

В третьому розділі монографії побудовано моделі та вибрані методи для підвищення ефективності процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на ІВПМ з ГПП. Наведена загальна схема оцінювання ефективності функціонування систем короткочасної дії та систем тривалої дії.

Визначено, що ефективність функціонування такої системи залежить від складових, які можна покращити, використавши метод локального випадкового пошуку або алгоритмічну модель випадкового пошуку ідентифікації багатостадійного технологічного процесу, а також, використавши напрацювання експертних систем, де розроблені методи досліджень різноманітних об'єктів, що функціонують в умовах невизначеності.

Розроблено підходи і алгоритми оцінювання точності чисельних розрахунків надійності та ефективності роботи елементів ІВПМ. Створено узагальнену модель складання й обґрунтування множин вхідних та вихідних параметрів для оцінювання ефективності функціонування процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з ГПП. Вперше побудовано метод оцінювання процесу формоутворення на базі математичного апарату нечітких множин.

В четвертому розділі монографії на основі проведених експериментальних досліджень пресування чотирьох заготовок різних матеріалів еталонних зразків на ІВПМ було отримано числову базу даних якісних характеристик досліджуваного процесу.

Статистичний аналіз експериментальних даних за методом комплексного ранжирування вхідних параметрів дозволив визначити оптимальні технологічні параметри обробки досліджуваних матеріалів, а також підтвердив правильність підходів до розробки методу оцінювання процесу формоутворення на базі математичного апарату нечітких множин.

Завершується монографія розглядом розробленої програми для автоматизації розрахунку параметрів інерційного навантаження кінцевої продукції та алгоритму розрахунку конструктивних параметрів ІВПМ. Переваги цієї програми в розрахунку основних значень технологічного комплексу, за якими можна аналізувати ефективність функціонування всього процесу. Монографія є результатом узагальнення науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи, виконаної авторами на кафедрі Галузевого машинобудування Вінницького національного технічного університету. Вказана робота виконувалась за координаційними планами науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Загальні відомості про процеси формоутворення

Технології, які характеризуються процесами формоутворення заготовок, в яких реалізується текучість матеріалів із складною реологією в умовах складного навантаження, потребують нових розробок, вивчення та вдосконалення. Вони неможливі без застосування як розрахунково-експериментальних методів, традиційних теорій пружно-пластичності та обробки металів тиском, так і створення нових підходів для вирішення різних прикладних задач.

Технологічний процес виготовлення виробів з нових високо-ефективних матеріалів [21, 42, 117] на основі порошків металів і неметалів, їх сплавів та з'єднань з наповнювачами, можна уявити послідовно виконуваними операціями підготовки шихти (порошкового матеріалу), формоутворення заготовок та їх термообробки [24, 50, 89, 114].

Для підготовки однорідної шихти заданого складу необхідно здійснити змішування порошкових компонентів і наповнювача в кульових млинах, планетарних, шнекових, лопатевих і вібраційних змішувачах або осадження одного з компонентів шихти на поверхню частинок іншого. Для цього використовуються механічні (вихровий розмел, подрібнення в кульових і вібраційних млинах, розпилення водою і газом) і хімічні (електроліз, відновлення, розкладання, металотермія) методи для приготування порошків, що визначають форму (осколкову, сферичну, пелюсткову та інші) та дисперсність частинок порошку. Поділ порошків за фракціями здійснюється шляхом ситового аналізу, сепарування або мікроскопічного аналізу. Як наповнювачі широко використовуються рідкий бакеліт, розчин синтетичного каучуку в бензині, парафін, парафіно-воскові сплави, солі жирних кислот, захисні колоїди, гас, бензол та інші [111, 115].

Методами пресування здійснюється формоутворення заготовок, вільне насипання у форму, лиття суспензій і паст, ущільнення, утрамбування і рядом їх комбінацій [111]. Найпоширеніше формоутворення заготовок методом пресування реалізується різними способами, наприклад, простим [24, 830], східчастим [53, 52], ізостатичним [52, 53],

мундштуковим [24, 115], імпульсним [23, 87, 86], ударним [54], вібраційним [36, 39, 93], віброударним [69, 127, 129]. Пресування здійснюється на відповідному пресовому обладнанні за рахунок тиску, створеного пуансоном під дією осьового зусилля на відкритій поверхні порошкового матеріалу, розміщеного в контейнері звичайної прес-форми закритого типу [110], або стисненням однорідним середовищем (рідиною, газом) при використанні оболонкових форм [52, 94]. Задану схему пресування забезпечує конструктивне виконання прес-форми (одно- або двостороннє; з плаваючою матрицею; з рухомим пуансоном тощо) [110]. Застосування інших методів формоутворення визначається їх можливостями і залежить від вимог, що висуваються до складу шихти, геометричних і фізико-механічних характеристик заготовок [111, 114].

Перетворення заготовки в міцні вироби із заданими фізико-механічними властивостями забезпечує термообробка. Сушінню або низькотемпературній термообробці (при температурі до 200 °С) після формоутворення піддаються заготовки практично зі всіх порошкових матеріалів з метою їх додаткового зміцнення перед транспортуванням, складанням або завантаженням в зону високотемпературної термообробки (спікання, випалу).

Спікання [50, 111, 114] супроводжується нагріванням і витримкою заготовки при температурі спікання T_{cn} нижчій температури плавлення $T_{пл}$ частинок металу і характерне для металопорошків. Звичайно $T_{cn} = (0,7...0,9)T_{пл}$ [21]. До основних видів спікання належать: спікання у твердій фазі і рідкофазне спікання. Випал [92, 109] характерний для одержання виробів з багатокомпонентних оксидних порошоків вогнетривких і керамічних матеріалів і передбачає в процесі термообробки рідкофазне спікання тільки деяких компонентів складу шихти. Насправді, випал і спікання є ідентичними операціями.

Структурна класифікація методів та обладнання процесів формоутворення заготовок показана на рис. 1.1 [75, 26].

Розв'язання на основі методів порошкової металургії задач одержання для різних галузей економіки нових прогресивних матеріалів із заданими властивостями безпосередньо пов'язано з вирішенням низки проблем виготовлення виробів з даних матеріалів, що виникають на відповідних етапах технологічного процесу.

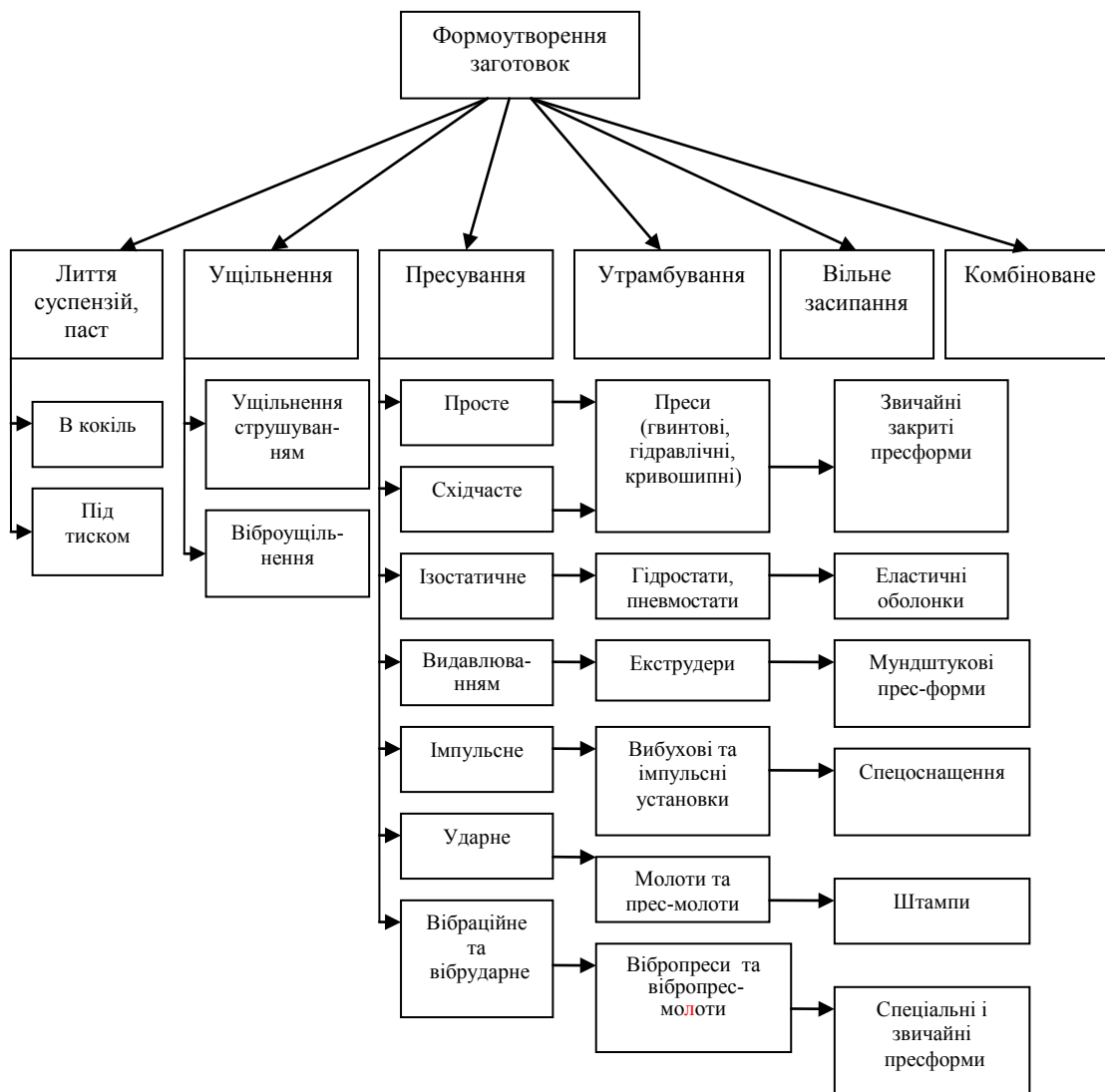


Рисунок 1.1 – Класифікація вібропресових формувальних машин

З аналізу вказаних проблем бачимо, що задача реалізації процесів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів, особливо складної конфігурації і великих габаритів, є однією з найактуальніших та найважливіших. Існуючі методи розв’язання цієї задачі часто не забезпечують можливості розширення та відновлення номенклатури й асортименту випуску виробів із прогресивних порошкових матеріалів у зв’язку з тим, що заготовки вказаних виробів не відповідають (або відповідають частково) низці технічних вимог – заданим оптимальним значенням:

- густини та допустимої нерівноцільності;
- механічної міцності для безпечного виймання виробу з пресформи, його транспортування та складування;

– пористості та фізичного стану дисперсних частинок, як основи порошкового матеріалу;

– ступеня відповідності конфігурації заготовки готовому виробу.

Метод пресування з відомих методів формоутворення є найрозповсюдженішим, внаслідок своєї економічності та простоти реалізації. Способи пресування дозволяють під час формоутворення заготовок забезпечити переважно виконання деяких пунктів зазначених вище технічних вимог і, в результаті, одержати виріб з потрібними експлуатаційними властивостями. Наприклад, застосування способу простого пресування може забезпечити високу густину і, як наслідок, достатню міцність заготовок невеликих виробів простої конфігурації (типу втулки, вкладиші тощо) з відношенням висоти до ширини (діаметра), що лежать в межах 2,0...2,5 [111]. Але він є непридатним для формоутворення великогабаритних заготовок через неможливість забезпечення їх високої рівногустини по об'єму та міцності, а також внаслідок необхідності застосування обладнання, що створює високі питомі зусилля на заготовці від 100 до 1000 МПа, в залежності від марки пресованого матеріалу [109, 114]. Просте пресування є також неприйнятним при необхідності формоутворення заготовок виробів складної конфігурації. Винятком є заготовки невеликих виробів, що піддаються додатковій обробці різанням [114], внаслідок чого істотно підвищується їх вартість у цілому.

Ізостатичне пресування є технологічним процесом, заготовки під впливом ізостатичного тиску та високої температури в газовому середовищі пресуються майже до своєї теоретичної питомої щільності [109]. Різновид цього способу – гідростатичне пресування при робочому тиску до 1000 МПа широко використовується на заводах вогнетривів під час випуску унікальних виробів для хімічної промисловості та чорної металургії [52, 94].

Східчасте пресування забезпечує кращу релаксацію пружних напружень, сприяє витісненню повітря в результаті стиснення порошку, підвищенню густини та рівногустини заготовок, зниженню в них пружних деформацій [79, 108]. Такий спосіб пресування рекомендується для формоутворення великогабаритних заготовок простої конфігурації, але має низьку продуктивність.

Вищу густину заготовки може забезпечити тільки імпульсний спосіб пресування, але його реалізація в низці випадків супроводжується певними труднощами, пов'язаними з експлуатацією обладнання.

Так, імпульсне вибухове пресування в порошковій металургії застосовується порівняно рідко, головним чином, у дослідному одиничному або дрібносерійному виробництві плит, труб, профілів довжиновимірних тонкостінних виробів [114] тощо. Імпульсне гідродинамічне пресування застосовується для формоутворення заготовок невеликих виробів типу втулок і кілець [23, 42, 87].

Таким чином, визначення способів ВУ та ВУП в даний час пов'язане з труднощами, які полягають у тому, що деякі автори визначають процес формоутворення заготовки з порошкового матеріалу в прес-формі закритого типу, як «формування» під впливом тиску на неї з боку пуансона [106]. З урахуванням існуючих розбіжностей низка аналогічних способів формоутворення при одночасному накладенні вібрацій (або вібрацій і ударів) на елементи прес-форми був визначений як віброформування [41, 43, 124], віброущільнення [37, 64] або віброударне ущільнення [128, 129]. Однак, відповідно до загальноприйнятої в теорії процесів обробки тиском термінології [118], у прес-формі під впливом тиску на заготовку з боку пуансона здійснюється процес пресування. Тому, на нашу думку, вказані способи одержання заготовок слід віднести до способів формоутворення заготовок методом пресування, доповнивши ними відомі способи, наприклад, вібраційного [36, 86, 93] та віброударного [69, 109] пресування.

1.2 Процеси вібраційної та віброударної обробки

У порівнянні з іншими способами пресування, вібраційне та віброударне пресування забезпечує виконання технічних вимог до заготовки більш економно. Останнє пояснюється значним (у десятки і навіть сотні разів) зниженням робочого зусилля порівняно з зусиллям статичного пресування [66, 90], зменшенням зносу деталей прес-форм, а також забезпеченням можливості виготовлення заготовок з тонкими стінками [68]. Ефективність вібраційного пресування відзначається при формоутворенні заготовок виробів складної конфігурації і великих габаритів, виробництво яких раніше було утруднено або практично неможливе [40, 41].

В основі реалізації вібраційної технології лежить дія вібраційного поля, тобто заданого амплітудно-частотного режиму коливань на оброблювані деталі. Ця дія відбувається або за рахунок вібраційного переміщення деталей або безпосереднього впливу вібрації на вироби для

формування необхідних їм властивостей. Вібраційне навантаження реалізується в машинах із жорстко приєднаними вібробудувачами (машини для формування, ущільнення, стабілізації, руйнування та інші), або за рахунок дії спеціально підібраного вільногранульованого робочого середовища, коливальні рухи якого визначають мікро- та макроструктуру поверхневого шару деталей, що використовуються для реалізації очисних, мийних, шліфувальних, полірувальних та інших операцій з оздоблювально-зачисної обробки; для поверхневого віброзміцнення, зняття задирок, заокруглення різальних кромки, видалення небажаного шару на поверхні деталей [22].

Отже, коливальні процеси, які реалізуються з порівняно малою амплітудою та частотою (в межах 10...100 Гц), можна вважати технологічними вібраціями. Технологічна дія вібрації полягає у цілеспрямованому впливі на об'єкт змінних за часом параметрів, серед яких можна відзначити кінематичні, силові та енергетичні.

Кінематичні параметри характеризують закономірності руху виконавчих органів вібраційної машини. Силові параметри вібрації зумовлюють закономірності технологічної дії на об'єкт обробки. Енергетичні характеристики відображають закони взаємоперетворення енергії, що споживається або витрачається коливальною системою.

Для реалізації вібраційної технологічної дії коливальна система, як правило, примусово виводиться з положення рівноваги внаслідок створення умов для виникнення силової та моментної незрівноваженості. До основних енергетичних параметрів вібрації відносять роботу внутрішніх та зовнішніх сил коливальної системи; складові потужності, що витрачаються та споживаються системою при здійсненні технологічного циклу.

У вібраційному полі зчеплення між частинками технологічної маси послаблюється, що призводить до виникнення в системі станів псевдозрідження і псевдотекучості [16]. Такий стан оброблюваного середовища характеризується створенням сприятливих умов як для ефективного перемішування маси за рахунок збільшення площі контактної взаємодії, так і для зниження витрат на переміщення матеріалу внаслідок зменшення величини внутрішнього тертя.

Таким чином, універсальність вібраційної обробки полягає в тому, що вона є найбільш ефективним серед механічних методів загальним засобом регулювання динамічного стану продукції при здійсненні різноманітних технологічних задач [10].

Так, внаслідок коливного руху робочих органів вібромашини спостерігаються достатньо складні траєкторії руху часток робочого середовища і запасастся значна потенціальна енергія внаслідок якісної зміни характеру положень рівноваги структурних елементів системи. Вібрація спричиняє розділення часток продукції в залежності від їхніх фізико-механічних властивостей, інтенсивно переміщує маси матеріалу, руйнує структуру матеріалу в резонансних режимах та інші фізичні ефекти, що знаходять використання в широкому спектрі технологій [75].

Вібраційні та віброударні процеси застосовуються практично в усіх галузях промисловості. Висока ефективність цих процесів забезпечується завдяки реалізації найоптимальніших силових впливів на об'єкт обробки, а також досягненням в результаті цього його необхідних внутрішніх фізико-механічних параметрів, в тому числі міцності та щільності.

Класифікація процесів за ознаками вібраційних та віброударних дій здійснюється залежно від того, яка зі складових навантаження коливальна (пульсуюча) або ударна (імпульсна) є основною в даній конкретній технології. Саме названі складові і є факторами інтенсифікації цих процесів [10, 13, 30].

Під час реалізації вібраційних процесів об'єкт обробки або виконавчий робочий елемент машини здійснюють коливальні рухи з великою (порядку кілька міліметрів або часток міліметра) і достатньо високою (до 100 Гц) частотою [125].

В табл. 1.1 наведено основні технологічні процеси, в яких використовуються вібраційні або віброударні навантаження. Реалізація таких процесів здійснюється на основі серійного або дослідно-конструкторського вібраційного та віброударного обладнання [34, 27, 2].

1.3 Використання вібраційного та віброударного навантаження при формоутворенні заготовок з порошкових матеріалів

З важливих етапів виготовлення виробів з порошкових матеріалів є процес формоутворення напівфабрикату. Він забезпечує задані показники якості напівфабрикату, а саме: рівнощільність, щільність, механічну міцність та ін. з урахуванням особливостей підготовки однорідної шихти і вибраних методів формоутворення [16, 68, 75].

Поряд з традиційними методами формоутворення широко застосовуються їхні нові прогресивні різновиди (способи), що передбачають застосування корисних вібрацій, віброущільнення, вібраційне та віброударне пресування [8, 45, 51].

Підвищити якість готових виробів, знизити потужності пресового устаткування дозволяють вібраційні способи оформлення напівфабрикату, а в деяких випадках і є єдино можливими. Ефективність впливу вібрації пов'язана з підвищенням ступеня рухомості матеріалу в процесі формоутворення, завдяки зниженню сил тертя-зчеплення між окремими частинками матеріалу і між матеріалом і стінками прес-форми [75].

Вібрууцільнення порошкових матеріалів в порошковій металургії частіше застосовується як підготовче при ізостатичному пресуванні. Використовуючи вібрацію, домагаються оптимальної, з точки зору подальших операцій, щільності укладання порошку при високому ступені рівномірності укладання за обсягом форми. Це важливо при виготовленні деталей складної конфігурації, характерних для ізостатичного пресування, тому що істотно підвищується вихід придатних виробів [126, 27].

Вібрууцільнення ефективно при роботі з важко деформованими непластичними порошками кераміки, твердими і жароміцними сплавами. Характерною особливістю цього способу є те, що вібрууцільнення проводять без використання додаткового вантажу на відкритій поверхні ущільнюваної порошкової шихти. Під дією вібрації порошок переходить у «псевдозріджений» стан, який добре заповнює порожнини форми, прагнучи досягти найбільш ефективного упакування. Діапазон технологічних режимів, при яких відбувається одночасне «зрідження» і ущільнення порошку, досить вузький. Підвищення інтенсивності вібрацій призводить до розуцільнення матеріалу – віброкипіння і розшарування порошку по фракціях – сегрегації [10, 75]. Для поліпшення умов ущільнення порошкової шихти у верхній частині форми відкриту поверхню навантажують питомим зусиллям до 1 МПа. Однак у цих умовах процес вібрууцільнення відповідно до загальноприйнятої в теорії процесів обробки тиском термінології, на нашу думку, більш відповідає вібропресуванню. Підвищення ефективності вібрууцільнення досягається використанням коливань несиметричної форми [10, 16]. Таке навантаження дозволяє створювати великі значення прискорень при русі частинок порошку вниз, ніж при їх русі вгору. Також ефективність вібрууцільнення значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей порошку: гранулометричного складу, форми і міцності зерен [16].

Таблиця 1.1 – Основні вібраційні та віброударні технологічні процеси

Технологічний процес	Технологічна операція	Метод обробки	Галузь економіки	Примітка
Отримання заготовок виробів з непластичних порошкових матеріалів	Ущільнення, формоутворення, пресування	ВУ	Електротехнічна промисловість, металургія, машино-, автомобілебудування	Промислове впровадження, НДР
Отримання виробів з пластичних матеріалів при обробці тиском	Витягування, осадження, штампування, калібрування, волочіння, розкочування	В	Машинобудування, Сільське господарство	
Остаточна обробка виробів абразивними матеріалами	Шліфування, полірування, доробка, зміцнення	В	Машинобудування	
Виготовлення ливарних форм	Формоутворення, ущільнення	ВУ	Металургія, ливарне виробництво	Промислове впровадження
Випробовування деталей та вузлів	Ресурсні, форсовані та інші типові випробовування	В, ВУ	Приладобудування, радіотехніка, авіа-, тракторо-, машинобудування	Промислове впровадження, НДР
Навантажувально-розвантажувальні роботи	Розвантаження ємностей із сипкими вантажами, гранспортування, навантаження	В, ВУ	Залізничний і автомобільний транспорт, Сільське господарство	
Будівельно-монтажні роботи	Забивання палів, ущільнення ґрунтів, пісків, бетонів	ВУ	Будівництво	Промислове впровадження
Садово-збиральні роботи	Збирання урожаю фруктів і ягід	ВУ	Сільське господарство	НДР

Механізм процесів віброущільнення досить добре вивчений, що дозволяє обґрунтувати вимоги до вибору технологічних режимів вібронанавантаження. Складність полягає в необхідності забезпечення рівних умов вібронанавантаження матеріалу по всьому об'єму форми.

Відомо використання віброущільнення для попереднього заповнення капсул в технологічній лінії з виробництва газотурбінних дисків. Ущільнювальним матеріалом є порошок жароміцного сплаву з розміром зерен від 40 до 80 мкм і кутом природного відкосу 20° . Цим порошком у вакуум-камері заповнюються тонкостінні сталеві капсули. Остаточне пресування і спікання проводиться в газостаті [75].

Перехід від віброущільнення до вібропресування відбувається, як зазначалося вище, практично при створенні тиску на відкритій поверхні порошкового матеріалу у формі. Необхідність навантаження відкритої поверхні порошкового матеріалу обумовлена вимогами до підвищення якості напівфабрикату виробу в процесі формоутворення при неможливості наступних формотворчих операцій. Тому вібропресування використовується, головним чином, як самостійна операція формоутворення напівфабрикату перед термообробкою (спіканням або випалюванням).

Вібропресування, як і віброущільнення, дозволяє підвищити ступінь рухомості порошкового матеріалу, забезпечити рівномірний його розподіл у формі із заданою щільністю.

Вібраційне пресування має низку переваг порівняно зі статичним пресуванням:

- дозволяє значно зменшити перепади щільності в тілі напівфабрикату, особливо при холодному пресуванні важкодеформівних порошків, наприклад, твердих сплавів;
- полегшує вихід повітря з пресування, значно знижує пружне розширення напівфабрикату при витяганні його з прес-форми;
- дозволяє знизити в кілька разів зусилля пресування, що усуває необхідність застосування потужних, дорогих і важких пресів.

Зазвичай вібропресування здійснюється в прес-формах закритого типу при навантаженні заготовки статичним пресовим зусиллям у поєднанні з вібраційним впливом на елементи прес-форми. Залежно від застосовуваної схеми пресування вібраційному впливу можуть піддаватися один або обидва пуансони чи матриця.

В останніх дослідженнях авторами отримані результати, які підтверджують найбільш високу ефективність формоутворення напівфабрикатів виробів з порошкових матеріалів способом віброударного пресування. Цей спосіб реалізується при інерційній схемі навантаження порошкового матеріалу в прес-формі за допомогою верхнього пуансона, пов'язаного з рухомою поперечиною і змінною інерційною масою, та нижньому вібраційному приводі робочого столу преса [2, 3, 67].

Віброударне пресування напівфабрикату в закритій прес-формі (як і вібраційне) умовно можна розділити на три етапи.

Перший – початковий етап відбувається при відносно низьких тисках до 1...2 МПа, які визначаються масою інерційного додаткового навантаження, і характеризується відсутністю сформованої структури в матеріалі та значним осадженням зразків. На цьому етапі пресування поведінка порошкового матеріалу може бути описана в'язко-пластичною моделлю, оскільки пружні його властивості виражені слабо. Вібраційний вплив, в цих умовах, сприяє перерозподілу порошку і забезпечує рівномірне його укладання, що особливо важливо для виробів складної конфігурації з різною висотою пресування.

Другий етап – пружно-в'язко-пластичний – пов'язаний з утворенням жорсткого «скелета» з частинок основи, який на третьому етапі чинить значний опір подальшій пружно-в'язкій деформації напівфабрикату. Зростання розпірних зусиль збільшує сили тертя між напівфабрикатом і прес-формою, погіршує пропресовування, збільшує необхідні осьові зусилля пресування. Структура матеріалу характеризується великою кількістю утворень типу «арок» і «місточків», що визначають значну пористість заготовки [10, 16].

Для руйнування такої структури і подальшого підвищення щільності порошку при статичному пресуванні необхідно збільшити тиск пресування до критичних значень порядку 100...200 МПа. Однак для непластичних порошків з малою кількістю пластифікаторів і сполучних добавок навіть такі тиски не дозволяють отримати достатню щільність матеріалу і хороше пропресовування заготовки по висоті.

Вібраційний вплив на «скелет» напівфабрикату дозволяє отримати більш щільне рівномірне укладання частинок за рахунок усунення дефектів структури, чому сприяє часткове обливання зерен порошку в процесі обробки. Ефект поліпшення якості напівфабрикату пов'язаний з викладеним нижче.

По-перше, під дією вібрації істотно знижується коефіцієнт тертя між порошком і стінками прес-форми, що зменшує перепади пресового тиску по висоті заготовки [51].

Цьому сприяє «вичавлювання» рідкої фази (зв'язки, пластифікатора) на поверхню контакту матеріал-прес-форма внаслідок руйнування, під дією вібрації, оболонок навколо часток порошку.

По-друге, відбувається зниження внутрішнього тертя в матеріалі, про що свідчить зростання коефіцієнта бокового розпору, і зменшуються значення граничних напружень зсуву. Якщо інтенсивність вібраційного впливу перевищує певний рівень, то в матеріалі виникають циклічні зсувні деформації часток порошку завдяки більш ефективному упакуванню.

Проведені експерименти з одностороннього пресування циліндричних заготовок з нітриду кремнію показали [75], що для заготовки з відношенням висоти до діаметра $h/d = 1,4$ співвідношення тисків на рухомому пуансоні і дні прес-форми при вібропресуванні склало 1,7 проти 5 для статичного пресування (тиск пресування до 20 МПа).

Середнє, за час навантаження, значення коефіцієнта бокового розпору збільшилося з 0,45 до 0,75, а максимальні значення досягли 0,9...0,95.

Ударний (імпульсний) періодичний силовий вплив на «скелет» напівфабрикату сприяє інтенсивному руйнуванню його тимчасових утворень – «арок» і «місточків», – оскільки у кожен момент дискретного навантаження напівфабрикату змінюються його фізико-механічні властивості. Наприклад, при ущільненні напівфабрикату порошкового матеріалу в 1,6...1,8 рази (за відношенням значень кінцевої і початкової площин) його жорсткість може відрізнятись в десятки разів. У зв'язку з тим, що при віброударному пресуванні кожен удар (імпульс) кінцевої тривалості містить пакет моногармонічних імпульсів зовнішніх сил у вигляді косинусоїдальних (або синусоїдальних) хвиль з кутовими частотами, що лежать в діапазоні, в «скелеті» напівфабрикату при проходженні хвиль будуть виникати резонансні явища на частотах цього діапазону, що сприяють руйнуванню його «арок» і «місточків» і більш щільному укладанню частинок порошкового матеріалу [10, 16].

Режими вібронавантаження є дуже важливим фактором, оскільки визначають ефективність розглянутих способів. Неправильне призначення режимів може призвести до «віброкипіння» та сегрегації частинок

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. с. 149998 СССР, Кл. 49 g, 10₀₁. Одноцилиндровый инерционный гидравлический пресс / И. В. Кононов, И. Б. Матвеев, Р. Г. Давыдова (СССР). – № 751160/25-8 ; заявлено 09.11.61 ; опубл. 01.09.62, Бюл. № 17. – 3 с.

2. А. с. 337259 СССР, В28в 1/08. Способ изготовления пористых керамических изделий / И. П. Горлов, Б. Х. Седунов, В. Н. Соков (СССР). – № 14850000/29-33 ; заявлено 03.11.70 ; опубл. 04.06.72, Бюл. № 15. – 2 с.

3. А. с. 429877 СССР, М. Кл. В21j 9/06. Гидравлический инерционный вибропресс / И. В. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий, В. А. Пишенин (СССР). – № 1793622/25-27 ; заявлено 31.05.72 ; опубл. 30.05.74, Бюл. № 20. – 2 с.

4. А. с. 515657 СССР, М. Кл.² В30в 15/02. Пресс-форма для вибрационного прессования порошка / Ю. В. Трухан, Ю. М. Шуляков (СССР). – № 2037917/29-33 ; заявлено 25.06.74 ; опубл. 12.07.76, Бюл. № 26. – 3 с.

5. А. с. 577076 СССР, М. Кл.² В21j 9/06. Вибропресс с импульсным гидроприводом / Р. Д. Искович-Лотоцкий и др. (СССР). – № 2310997/25-27 ; заявлено 06.01.76; опубл. 25.10.77, Бюл. № 39. – 4 с.

6. А. с. 595550 СССР, М. Кл.² F15В21/12. Гидравлический вибратор / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Б. Н. Пентюк (СССР). – № 2319462/25-28 ; заявлено 30.01.76 ; опубл. 28.02.78, Бюл. № 12. – 3 с.

7. А. с. 601509 СССР, М. Кл.² F16k17/10. Клапан для гидроимпульсного привода / И. В. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий (СССР). – № 2126930/25-08 ; заявлено 21.04.75 ; опубл. 05.04.78, Бюл. № 13. – 2 с

8. А. с. 626296 СССР, М. Кл.² F16k17/10. Импульсный клапан / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Н. Н. Вирник (СССР). – № 2464462/25-06 ; заявлено 21.03.77 ; опубл. 30.09.78, Бюл. № 36. – 3 с.

9. А. с. 647112 СССР, М. Кл.² В28В1/08. Виброплита к устройству для прессования изделий с подвижных материалов / Р. Д. Искович-Лотоцкий и др. (СССР). – № 2425399/29-33 ; заявлено 01.12.76 ; опубл. 15.02.79, Бюл. № 6. – 2 с.

10. Азарова А. О. Математичні моделі та методи оцінювання фінансового стану підприємства / А. О. Азарова, О. В. Рузакова. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 172 с.
11. Аксенов П. Н. Оборудование литейных цехов / П. Н. Аксенов. – М. : Машиностроение, 1977. – 510 с.
12. Артоболевский И. И. О машинах вибрационного действия / И. И. Артоболевский, А. П. Бессонов, А. В. Шляхтин. – М. : Изд. АН СССР, 1956. – 47 с.
13. Бабичев А. П. Вибрационная обработка деталей / А. П. Бабичев. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Машиностроение, 1974. – 134 с.
14. Баранов В. Н. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные машины / В. Н. Баранов, Ю. Е. Захаров. – М. : Машиностроение, 1977. – 326 с.
15. Іскович-Лотоцький Р. Д. Основи резонансно-структурної теорії віброударного розвантаження транспортних засобів / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2014. – № 5(53). – С. 109–118.
16. Беликов О. А. Системно-структурный метод проектирования автоматических формовочных машин / О. А. Беликов // Литейное производство. – 1978. – № 4. – С. 10–13.
17. Бальшин М. С. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М. С. Бальшин. – М. : Металлургия, 1972. – 336 с.
18. Бауман В. А. Вибрационные машины и процессы в строительстве / В. А. Бауман, И. И. Быховский. – М. : Высшая школа, 1977. – 255с.
19. Башта Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта. – М. : Машиностроение, 1972. – 354 с.
20. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Белов. – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.
21. Берник П. С. Конвеєрні вібраційні машини для оздоблювально-зміцнювальної обробки / П. С. Берник, І. П. Паламарчук. – К. : Вища школа, 1996. – 237 с.
22. Богоявленский К. Н. Исследование электрогидро-импульсного прессования огнестойких порошковых материалов / К. Н. Богоявленский, В. А. Кузнецов // Огнеупоры. – 1982. – № 9. – С. 45–49.

23. Бондаренко В. П. Прессование заготовок с твердосплавных смесей / В. П. Бондаренко, Г. Ю. Фрейдин, В. С. Мендельсон. – Киев : Техніка, 1974. – 140 с.

24. Бочаров Ю. А. Основы общей теории гидравлических кузнечно-штамповочных машин / Ю. А. Бочаров // Машины и технология обработки металлов давлением : тр. МВТУ. – 1980. – № 335. – С. 12–40.

25. Бочаров Ю. А. Структурно-морфологическая классификация кузнечно-штамповочных машин и установок / Ю. А. Бочаров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 11. – С. 30–35.

26. Быховский И. И. Основы теории вибрационной техники / И. И. Быховский. – М. : Машиностроение, 1969. – 363 с.

27. Варсанюфьев В. Д. Некоторые вопросы теории и расчета вибрационных машин с гидравлическим приводом / В. Д. Варсанюфьев, И. Ф. Гончаревич. – Люберцы : ИГД. им. А. А. Скочинского, 1965. – 178 с.

28. Вербицкий В. И. Современные тенденции совершенствования встряхивающих формовочных машин / В. И. Вербицкий, О. И. Гайн // Литейное производство. – 1983. – № 3. – С. 30–31.

29. Веселовська Н. Р. Задачі моделювання технологічних систем / Н. Р. Веселовська, В. Б. Струтинський, О. В. Зелінська // Вібрації в техніці та технологіях. – 2007. – № 2(47). – С. 16–20.

30. Веселовська Н. Р. Задачі математичного моделювання для оптимізації технологічних систем / Н. Р. Веселовська, В. М. Лисогор, О. В. Зелінська // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – Том 11, № 1. – С. 143–151.

31. Веселовська Н. Р. Загальні принципи підвищення надійності та ефективності діагностування обладнання з гідроімпульсним приводом / Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Промислова гідравліка і пневматика. – 2012. – № 1(35). – С. 103–108.

32. Веселовська Н. Р. Створення адекватної моделі системи підтримки прийняття рішень / Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Інновації та трансфер технологій: від ідеї до прибутку : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 189–190.

33. Вибрации в технике : справочник в 6-ти т. / пред. ред. совет: В. Н. Челомей. – М. : Машиностроение, 1981. – Т. 4 : Вибрационные процессы и машины / под ред. Е. Е. Лавендела. – 1981. – 509 с

34. Вибрационное прессование огнеупорных масс / В. М. Ям, В. Т. Олейник, У. Ф. Степанов и др. // Огнеупоры. – 1973. – № 10. – С. 1–7.
35. Вибрационное уплотнение карбид-кремниевых масс / В. М. Ям, Н. К. Евсеенко, В. Т. Олейник и др. // Огнеупоры. – 1966. – № 10. – С. 30–33.
36. Вибрационные машины в строительстве и производстве : справочник / [под ред. В. А. Баумана, И. И. Быховского и Б. Г. Гольштейн]. – М. : Машиностроение, 1970. – 548 с.
37. Вибропрессование фасонных огнеупорных изделий / В. Т. Олейник, В. М. Ям, Н. И. Выростков и др. // Огнеупоры. – 1981. – № 4. – С. 27–31.
38. Вибропрессование фасонных шамотных изделий / В. Т. Олейник, В. М. Ям, У. У. Власов и др. // Огнеупоры. – 1978. – № 6. – С. 31–34.
39. Виброформование заготовок для получения изделий из монолитного поликристаллического карбида кремния на Броварском заводе порошковой металлургии / [В. В. Иващенко, Г. Г. Гнесин, Э. Я. Попиченко и др.] // Порошковая металлургия. – 1976. – № 7. – С. 96–99.
40. Влияние технологических факторов на характеристики брикетов из огнеупорных материалов при гидродинамическом прессовании / [Л. Н. Афанасьев, С. Г. Барай, О. В. Роман и др.] // Огнеупоры. – 1983. – № 9. – С. 5–9.
41. Волошин-Челпан Э. К. Определение оптимальных режимов вибрационного формования / Э. К. Волошин-Челпан, Г. Н. Петров // Тр. Всесоюз. научно-техн., конф. по металлокерамическим материалам и изделиям. – Ереван, 1973. – С. 105–108.
42. Гончаревич И. Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. – М. : Наука, 1981. – 320 с.
43. Горбатов А. В. Перспективы использования виброволновых методов обработки сырья в пищевой промышленности. / А. В. Горбатов, А. В. Гноевой, Ю. А. Мачихин. – М., 1985. – 407 с.
44. Горский А. И. Расчет машин и механизмов автоматических линий литейного производства / А. И. Горский. – М. : Машиностроение, 1978. – 551 с.

45. Гидропривод сваепогружающих и грунтоуплотняющих машин / [М. Е. Иванов, И. Б. Матвеев, Р. Д. Искович-Дотоцкий и др.]. – М. : Машиностроение, 1977. – 174 с.

46. Джонс В. Д. Основы порошковой металлургии. Прессование и спекание / В. Д. Джонс. – М. : Мир, 1965. – 326 с.

47. Искович-Лотоцький Р. Д. Підвищення ефективності розвантаження матеріалів під дією періодичних ударних імпульсів / Р. Д. Искович-Лотоцький, Я. В. Іванчук // Вібрації в техніці і технологіях. – 2008. – № 2(51). – С. 8–11.

48. Дородный Б. А. Исследования и разработки технологии изостатического прессования крупногабаритных огнеупорных изделий : автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.11. – Свердловск, 1978. – 21 с.

49. Дородный Б. А. Вибровакуумное уплотнение тонкодисперсных порошков и его влияние на гидростатическое прессование / Б. А. Дородный, Е. У. Дегтярева // Огнеупоры. – 1977. – № 8. – С. 32–38.

50. Живов Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование. Молоты. Ротационные машины. Импульсные штамповочные устройства / Л. И. Живов, А. Г. Овчинников. – Киев : Вища школа, 1972. – 279 с.

51. Жданович Г. М. Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович. – М. : Металлургия, 1969. – 184 с.

52. Зелінська О. В. Актуальні проблеми підвищення надійності та ефективності діагностування сільськогосподарської техніки / О. В. Зелінська, Р. Д. Искович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська // Галузеве машинобудування, будівництво : збірник наукових праць. – Полтава, 2009. – Том 2, вип. 3(25). – С. 91–94.

53. Зелінська О. В. Математичні задачі моделювання для оптимізації структур та параметрів технологічних і інформаційних систем / О. В. Зелінська // Інноваційний розвиток: економіка, управління, інформаційні технології, право, освіта : матеріали II міжнародної науково-методичної конференції. – Вінниця, 2014. – С. 95–99.

54. Зелінська О. В. Методи діагностування вібраційних машин / О. В. Зелінська // Технічні науки : збірник наукових праць ВНАУ. – 2010. – Випуск № 5. – С. 23–27.

55. Зелінська О. В. Методи діагностування ресурсу роботи гідроімпульсного приводу вібропресової машини [Електронний ресурс] / О. В. Зелінська // Сучасні вібраційні технології, машини, обладнання

та динамічні процеси в них. – 2013. – Режим доступу: <http://www.vibrokonf.vntu.edu.ua>.

56. Зелінська О. В. Оцінка ефективності і надійності функціонування гідроімпульсних приводів. / О. В. Зелінська // Аспірант і соискатель. – 2013. – № 6. – С. 150–155.

57. Іскович-Лотоцький Р. Д. Автоматизація процесу діагностування вібраційних машин з гідроімпульсним приводом / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення : Міжнародна наук. технічна конференція. – Севастополь : Видавництво СевНТУ, 2009. – С. 203–205.

58. Іскович-Лотоцький Р. Д. Вібраційні та віброударні пристрої для розвантаження транспортних засобів : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2012. – 156 с.

59. Іскович-Лотоцький Р. Д. Оптимізація конструктивних параметрів інерційного вібропрес-молота // Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Вісник машинобудування та транспорту. – 2016. – № 2. – С. 43–50.

60. Іскович-Лотоцький Р. Д. Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода з однокаскадним клапаном пульсатором / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Вібрації в техніці та технологіях. – 2017. – № 3(86). – С. 10–19.

61. Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасний стан впровадження безвідходних та маловідходних технологій з використанням вібрацій / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів : збірник наукових праць III Міжнародної науково-технічної конференції ТК-2014. – ЛНТУ, 2014. – С. 28–30.

62. Іскович-Лотоцький Р. Д. Віброударна головка бурильної установки з гідроімпульсним приводом / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнародний збірник наукових праць. – Донецьк : ДонНТУ, 2005. – Вип. 30. – С. 92–96.

63. Іскович-Лотоцький Р. Д. Застосування вібраційного гідроімпульсного привода в будівельних і дорожніх машинах / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук // Збірник наукових праць Харківської державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2008. – № 88. – С. 48–54.

64. Искович-Лотоцкий Р. Д. Підвищення ефективності функціонування вібропреса з гідроімпульсним приводом / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Вібрації в техніці та технологіях. – 2015. – № 2(78). – С. 75–79.

65. Иванов М. Е. Специальная аппаратура управления короткоходными возвратно-поступательными и вращательными перемещениями / М. Е. Иванов, Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. В. Коц. – М. : НИИ-Маш, 1982. – 52 с.

66. Иващенко В. В. Влияние инерционного нагружения на процесс вибрационного уплотнения порошковых материалов / В. В. Иващенко // Порошковая металлургия. – 1972. – № 5. – С. 18–21.

67. Иващенко В. В. Исследование некоторых параметров и особенностей вибрационного уплотнения порошковых материалов : дис. ... канд. техн. наук : 0.171. – Киев, 1966. – 223 с.

68. Искович-Лотоцкий Р. Д. Разработка, теоретическое и экспериментальное исследование новой конструкции вибропресе-молота для прессования деталей из материала на основе карбида кремния : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Искович-Лотоцкий Ростислав Дмитриевич. – М. : 1974. – 213 с.

69. Искович-Лотоцкий Р. Д. Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода навісного обладнання для зондування ґрунтів / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Я. В. Иванчук, Є. І. Івашко // Вібрації в техніці та технологіях : XVI Міжнародна науково-технічна конференція, 26-27 жовтня 2017 р. : тези доповідей. – Вінниця, 2017. – С. 147–149.

70. Искович-Лотоцкий Р. Д. Машины вибрационного и виброударного действия / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. В. Матвеев, В. А. Крат. – Киев : Техніка, 1982. – 208 с.

71. Использование вибрационного уплотнения для повышения прочности прессовок / З. М. Полукарова, И. Г. Шаталова, Р. К. Юсупов, Е. Д. Щукин // Порошковая металлургия. – 1968. – № 6. – С. 54 – 56.

72. Исследование и разработка технологии формования карбидкремниевых капсул / А. Д. Пивоваров, В. М. Ям, Г. Е. Карась и др. // Огнеупоры. – 1978. – № 4. – С. 10–13.

73. Искович-Лотоцкий Р. Д. Автоматизований контроль якості виробів машинобудування / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2008. – Випуск 4 (51), частина 2. – С. 155–158.

74. Іскович-Лотоцький Р. Д. Спеціальні методи і технології контролю багатокординатного механообробного обладнання / Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. Б., Струтинський, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Промислова гідравліка і пневматика. – 2009. – № 2(24). – С. 83–88.

75. Іскович-Лотоцький Р. Д. Управління ефективністю та надійністю технологічних процесів в гнучких інтегрованих виробничих системах / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Вісник НТУУ. – 2009. – С. 266–270.

76. Іскович-Лотоцький Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 338 с.

77. Іскович-Лотоцький Р. Д. Визначення робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів / Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов, Я. В. Іванчук // Промислова гідравліка і пневматика. – 2012. – № 4(38). – С. 57–65.

78. Іскович-Лотоцький Р. Д. Аналіз використання гідроімпульсних вібророзвантажувальних пристроїв на автомобільному транспорті / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6. – С. 228–231.

79. Іскович-Лотоцький Р. Д. Моделювання робочих процесів в піролізній установці для утилізації відходів / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – Том 1, № 8(79). – С. 11–20.

80. Іскович-Лотоцький Р. Д. Установка для утилизации отходов / Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. І. Повстенюк, О. М. Данилюк, Я. В. Іванчук // Мир техники и технологий : международный промышленный журнал. – 2007. – № 12(73). – С. 36–37.

81. Іскович-Лотоцький Р. Д. Вібраційні та віброударні процеси та машини у ливарному виробництві : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, М. М. Вірник, Н. Р. Веселовська. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2007. – 198 с.

82. Іскович-Лотоцький Р. Д. Математичне моделювання робочих процесів інерційного вібропрес-молота з електрогідравлічною системою керування гідроімпульсного привода для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів // Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. П. Місь-

ков, Я. В. Іванчук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2016, – № 3(237). – С. 176–180.

83. Іскович-Лотоцький Р. Д. Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода з однокаскадним клапаном пульсатором / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Вібрації в техніці та технологіях : XVI Міжнародна науково-технічна конференція, 26–27 жовтня 2017 р. : тези доповідей. – Вінниця, 2017. – С. 170–172.

84. Канарчук В. Є. Надійність машин : підручник. / В. Є. Канарчук. – К. : Либідь, 2003. – 424 с.

85. Кильчевский Н. А. Теория соударения твердых тел / Н. А. Кильчевский. – Киев : Наукова думка, 1969. – 237 с.

86. Кононов И. В. Новые гидравлические кузнечно-прессовые машины и гидроприводы / И. В. Кононов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 7. – С. 26–28.

87. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 831 с.

88. Кунин Н. Ф. Закономерности прессования порошков разных материалов / Н. Ф. Кунин, Б. Д. Юрченко // Порошковая металлургия. – 1964. – № 2. – С. 39–41.

89. Лисогор В. М. Алгоритмічна модель випадкового пошуку задач ідентифікації багатостадійного технологічного процесу. / В. М. Лисогор, С. В. Сорокун // Вісник Хмельницького університету. – 2009. – № 1. – С. 217–220.

90. Магнезиальные стаканы для скоростного разливания стали, изготовленные вибропрессованием / [В. М. Ям, В. В. Мирошниченко, Л. Я. Осипова и др.] // Огнеупоры. – 1978. – № 3. – С. 6–13.

91. Малюшевский П. П. Использование электрогидравлического эффекта в порошковой металлургии / П. П. Малюшевский, А. Б. Толстых // Порошковая металлургия. – 1979. – № 5. – С. 22–26.

92. Масленников И. Е. Разработка и исследование гидравлических прессов с пульсирующей нагрузкой для калибрования труб и профилей : автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук : 05.04.04. / И. Е. Масленников. – М., 1975. – 25 с.

93. Матвеев И. Б. Гидропривод машин ударного и вибрационного действия / И. Б. Матвеев. – М. : Машиностроение, 1974. – 184 с.

94. Мудров В. И. Методы обработки измерений / В. И. Мудров, В. Л. Кушко. – М. : Советское радио, 1976. – 192 с.

95. Муха И. М. Вибрационное прессование твердосплавных порошков / И. М. Муха, М. Н. Довбишук, А. Л. Мороз // Технология и организация производства. – 1969. – № 3. – С. 83–85.

96. Об опыте изготовления погружных стаканов и стопор-моноблоков методом гидростатического прессования / В. Г. Сиваш, Е. Д. Посохова, Н. Т. Дырда и др. // Огнеупорные материалы для оптического стекловарения : сб. тр. Госуд. оптич. ин-та. – М., 1977. – С. 26–27.

97. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Г. А. Гулый, П. П. Малюшевский, Е. В. Кривицкий и др. ; под ред. Г. А. Гулого. – М. : Машиностроение, 1977. – 320 с.

98. Опытно-промышленный образец вибропресса усилием 20 тс. / И. Б. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий, Р. Р. Обертюх и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – № 5. – С. 34–37.

99. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / [Г. А. Гулый, П. П. Малюшевский, Е. В. Кривицкий и др.] ; под ред. Г. А. Гулого. – М. : Машиностроение, 1977. – 320 с.

100. Паламарчук І. П. Науково-технічні основи розроблення енергозберігаючих вібромашин механічної дії харчових і переробних виробництв : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.18.12 / І. П. Паламарчук ; Київ. нац. ун-т харч. технологій. – К., 2008. – 44 с.

101. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – М. : Наука, 1980. – 270 с.

102. Патент № 88882 Україна МПК (2014.01) G01M 13/00. Спосіб визначення ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії / Веселовська Н. Р., Зелінська О. В., Рубаненко О. О., заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № U2013 09935 ; заявл. 09.08.2013 ; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.

103. Пат. 34261А Україна, МПК6 B28B 3/00. Спосіб вібропресування формувальних сумішей / Р. Д. Іскович-Лотоцький, М. М. Вірник, О. А. Рагозін, В. О. Пішенін, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № 99063425; заявл. 18.06.99; опубл. 15.02.2001, Бюл. № 2. – 5 с.

104. Пат. 10469 Україна, МПК Е 21 В1/00. Гідроударник / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u200504193; заявл. 04.05.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. №11.

105. Платонов Б. П. Пневматика или гидравлика / Б. П. Платонов // Литейное производство. – 1997. – № 3. – С. 11–12.

106. Попильский Р. Я. Прессование керамических порошков / Р. Я. Попильский, Ф. В. Кондрашов. – М. : Metallurgiya, 1968. – 272 с.

107. Потураев В. Н. Исследование процесса вырубki на гидравлических прессах с применением вибраций / В. Н. Потураев, А. Ф. Миронюк // Кузнечно-штамповочное производство. – 1969. – № 11. – С. 21–22.

108. Потураев В. Н. Некоторые результаты исследования вибрационного уплотнения металлических порошков на вибропрессах / В. Н. Потураев, А. Ф. Миронюк, Н. Н. Пендраковский // Порошковая металлургия. – 1975. – № 12. – С. 23–27.

109. Принципы классификации процессов формования порошковых материалов / К. Н. Богоявленский, В. А. Кузнецов, К. К. Мартенс и др. // Порошковая металлургия. – 1985. – № 6. – С. 89–94.

110. Прищепионок Л. А. Исследование экспериментального образца пресса для вибрационной зачистки модели ИМ-61 / Л. А. Прищепионок, В. А. Мельник, А. Л. Рягузов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 9. – С. 27–28.

111. Производство огнеупоров полусухим способом / А. К. Карклит, А. П. Ларин, С. А. Лосев [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1972. – 368 с.

112. Радомысельский И. Д. Конструкционные порошковые материалы / И. Д. Радомысельский, Г. Г. Сердюк, Н. И. Щербань. – Киев : Техніка, 1985. – 152 с.

113. Розрахунок температурних полів в робочих зонах піролізної установки / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Н. Р. Веселовська, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // НАУКОВІ НОТАТКИ : міжвузівський збірник наукових праць. – Луцьк, 2013. – Випуск 42. – С. 113–120.

114. Радомысельский И. Д. Производство и использование порошковых деталей в легкой промышленности / И. Д. Радомысельский, Д. С. Ясь, В. И. Павленко. – Киев : Техніка, 1982. – 175 с.

115. Разработка и исследование вибрационного импульсного пресса для формообразования заготовок порошковой металлургии : отчет НИР / Винницкий политехнический институт ; рук. И. Б. Матвеев ; отв. исп.

Р. Д. Искович-Лотоцкий. – № ГР76026910 ; инв. № Б491804. – Винница, 1976. – 122 с.

116. Растрингин Л. А. Введение в идентификацию объектов управления / Л. А. Растрингин, Н. Е. Маджаров. – М. : Энергия, 1997. – 215с.

117. Ротштейн О. П. Интеллектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі / О. П. Ротштейн. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 320 с.

118. Свойства порошков металлов, тугоплавких соединений и спеченных материалов : информационный справочник. – Киев : Наукова думка, 1978. – 184 с.

119. Севостьянов И. В. Теоретические исследования процессов потокового фильтрования влажных дисперсных сред в пищевой промышленности // И. В. Севостьянов, Я. В. Иванчук // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – V. 15, No. 4. – С. 90–96.

120. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

121. Тябликов Ю. Е. Гидравлическое возбуждение переменных нагрузок и движений в технике механических испытаний : дис. ... докт. техн. наук : 01.02.06. / Тябликов Ю. Е. – М., 1974. – 2 т. : Т. 1. – 287 с.; Т. 2. – 267 с.

122. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1966. – 724 с.

123. Урьев Н. Б. Физико-химическая механика в технологии дисперсных систем / Н. Б. Урьев. – М. : Знание, 1975. – 65 с.

124. Установка для утилізації медичних відходів з відбором тепла та охолодження / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Я. В. Иванчук, В. І. Повстенюк, [та ін.] // Технічні науки : збірник наукових праць ВНАУ. – Вінниця, 2011. – № 7. – С. 98–103.

125. Файкин В. И. Исследование процесса вибрационного формирования пористых труб из порошковых материалов. : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. тех. наук : спец. 0.171. / В. И. Файкин. – М., 1970. – 21 с.

126. Файкин В. И. О влиянии пригрузки при виброформовании изделий из порошковых материалов / В. И. Файкин, Г. Н. Петров, Э. К. Волошин-Челпан // Уч. записки Моск. ин-та тонких хим. технологий. – 1970. – № 2. – С. 202–207.

127. Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials / R. D. Iskovych-Lototsky, O. V. Zelinska, Y. V. Ivanchuk, N. R. Veselovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems. – 2017. – V. 1, № 1(85). – P. 9–17.

128. Hofman D. Handbuch Messtechnik und Qualitätssicherung / D. Hofman. – [2-e bearb. Auflage]. – Berlin : VEB Verlag Technik, 1981. – 472 p.

129. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/>.

130. Iskovich-Lototkiy R. D. Dynamics of vibration machines by hydroimpulsive drive / R. D. Iskovich-Lototkiy. – Poznan : Vibration in physical systems, 1996. – P. 1170-1173.

131. Iskovich-Lototkiy R. D. New hydraulic and pneumatic vibration exciters of technology machines / R. D. Iskovich-Lototkiy. – Poznan : Vibration in physical systems, 1998. – P. 818–812.

132. Nelson D. B. Performance and methodology of a digital random w vibration control system / D. B. Nelson // Annual technical meeting Proceedings / Institute of Environmental Scienses, 1973. – P. 187–191.

Наукове видання

**Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович
Зелінська Оксана Владиславівна
Іванчук Ярослав Володимирович**

**ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ
ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ
МАТЕРІАЛІВ НА ВІБРОПРЕСОВОМУ ОБЛАДНАННІ
З ГІДРОІМПУЛЬСНИМ ПРИВОДОМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Я. Іванчуком

Підписано до друку 4.03.2018 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,78.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2018-07

Вінницький національний технічний університет,
ІРВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 65-18-06.

press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.