

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

**Грибков Едуард Петрович**

УДК 621.762.04/06; 621.762.4.047

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ І УДОСКОНАЛЕННЯ  
ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЕФОРМУВАННЯ ДОВГОМІРНИХ  
МЕТАЛОПОРОШКОВИХ ВИРОБІВ В ОБОЛОНЦІ**

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Краматорськ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА, м. Краматорськ) Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор

**Сатонін Олександр Володимирович,**

Донбаська державна машинобудівна академія Міністерства освіти і науки України (м. Краматорськ), професор кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання».

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України

**Гогаєв Казбек Олександрович,**

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України (м. Київ), завідуючий відділом диспергування матеріалів та пластичної деформації прокатуванням;

доктор технічних наук, професор

**Драгобецький Володимир В'ячеславович,**

Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського МОН України (м. Кременчук), завідувач кафедри технології машинобудування

доктор технічних наук, професор

**Тришевський Олег Ігорович,**

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка (м. Харків), завідувач кафедри технології матеріалів

Захист відбудеться «01» грудня 2016 року у 10<sup>00</sup> години на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 по захисту дисертацій в Донбаській державній машинобудівній академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, 1-й навчальний корпус).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, 1-й навчальний корпус).

Автореферат розісланий «29» жовтня 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 12.105.01  
кандидат технічних наук, доцент

Ю. К. Доброносів

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність теми.* Питання енергозбереження, економії матеріальних ресурсів і використання вторинної сировини в Україні роблять актуальним розвиток процесів порошкової металургії з використанням методів обробки тиском. Використання порошкових матеріалів дозволяє отримувати вироби з унікальним поєднанням експлуатаційних характеристик, які знайшли широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема в зварювальному і металургійному виробництвах. До довгомірних металопорошкових виробів відносять порошкові стрічки і дроти, які являють по собі ущільнений порошковий сердечник в металевій оболонці, герметичність якої забезпечується за допомогою замкового з'єднання. Виробництво виробів з порошкових матеріалів за допомогою безперервних технологій, таких як прокатка і волочіння, мають ряд переваг і характеризуються високою ефективністю.

Стандартами на порошкові стрічки, дроти для зварювання і наплавлення, а також на дріт для позапічної обробки сталі, крім геометричних характеристик, регламентуються розподіл коефіцієнта заповнення по довжині заготовки, відсутність проколів оболонки і забезпечення відсутності висипання порошку при зварюванні та транспортуванні. Рекомендації щодо забезпечення якісних показників при виробництві довгомірних металопорошкових виробів в оболонці в даний час носять емпіричний характер і засновані на узагальненні виробничого досвіду. Використання широкого спектру як матеріалів оболонки, так і порошкового сердечника вимагає численних промислових експериментів з виготовлення такого виду продукції.

Якість металопорошкових виробів в оболонці зумовлюється оптимальними технологічними параметрами процесів, конструктивними параметрами устаткування і раціональним вибором вихідної заготовки, що забезпечується використанням автоматизованих систем управління на основі математичного апарату, що дозволяє на стадії проектування устаткування і технології прогнозувати параметри технологічного процесу та якість отриманої продукції.

Теоретичні дослідження обробки порошкових матеріалів тиском наведені досить широко в роботах вітчизняних і зарубіжних вчених. Ґрунтуючись на використанні різних умов пластичності для пористих тіл в даних роботах досить точно описані закономірності формування щільності та напружено-деформованого стану, але в них досліджено процес деформації виключно порошкового сердечника, в той час як при наявності оболонки певної форми, розмірів і властивостей змінюється характер пластичної деформації. В результаті існуючі методи розрахунку дають завищені результати по щільності порошкового сердечника та енергосилових параметрах процесів виготовлення, що призводить до зниження експлуатаційних характеристик готової продукції і підвищення витрат на виробництво та обладнання. Також невирішеними проблемами залишаються раціональний вибір форми, геометричних характеристик, матеріалу оболонки і збереження її форми і цілісності при спільній деформації з порошковим сердечником. Зазначене характерно для всіх процесів отримання довгомірних порошкових виробів в оболонці, що в результаті знижує їх ефективність, тому розвиток наукових основ з урахуванням впливу оболонки є важливою науковою проблемою і обумовлює актуальність даної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації відповідає науковому напрямку однієї з провідних наукових шкіл Донбаської державної машинобудівної академії «Створення нових і вдосконалення діючих технологій, обладнання та засобів автоматизації в прокатному виробництві». Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт відповідно до координаційних планів Міністерства освіти і науки України (№ держ. реєстрації 0104U004039 наказ № 746 від 7.11.2003 р., № держ. реєстрації 0110U006160, № держ. реєстрації 0113U000611 наказ № 1193 від 25.10.2012 р., № держ. реєстрації 0113U003979, № держ. реєстрації 0114U002537 наказ № 1611 від 22.11.2013 р., № держ. реєстрації 0115U003125 наказ № 1243 від 31.10.2014 р.), при виконанні яких автор був виконавцем, а також в рамках госпдоговірних науково-дослідних робіт з ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ) (№ держ. реєстрації 0108U005803, 0113U004776), при виконанні яких автор був відповідальним виконавцем.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи – підвищення техніко-економічних показників процесів виготовлення довгомірних металопорошкових виробів в оболонці на основі розвитку наукових основ деформації порошкових матеріалів спільно з мономатеріалами, а також розробки рекомендацій щодо вдосконалення та автоматизованого проектування технологічних режимів роботи та конструктивних параметрів механічного обладнання прокатних і волочильних станів.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені такі основні задачі:

- уточнити вихідні передумови та граничні умови осередку деформації при реалізації різних технологічних схем процесів виробництва порошкових стрічок та дроту в металевій оболонці;
- розробити чисельні математичні моделі напружено-деформованого стану при прокатці порошкових стрічок, плющенні та волочінні порошкового дроту в металевій оболонці;
- розробити чисельні математичні моделі основних показників якості порошкових стрічок і дроту на кожному з етапів промислового виробництва;
- проаналізувати вплив, вибрати критерії та розробити програмні засоби з автоматизованого проектування різних технологій і обладнання для виробництва порошкових стрічок і дроту;
- розробити та апробувати рекомендації щодо вдосконалення діючих технологій та обладнання, що забезпечують підвищення техніко-економічних показників процесу виробництва композиційних матеріалів, які містять порошкові складові.

**Об'єкт дослідження.** Процеси та обладнання для виробництва довгомірних металопорошкових виробів в оболонці.

**Предмет дослідження.** Основні закономірності та методи розрахунку напружено-деформованого стану й основних показників якості при виробництві довгомірних металопорошкових виробів в оболонці.

**Методи дослідження.** В основу теоретичних досліджень були покладені методи теорії пружності та пластичності, що включають інженерні та чисельні підходи, методи кінцевих різниць і кінцевих елементів, а також методи теорії дослідження операцій, в тому числі вирішення завдань оптимізаційного плану й імітаційного моделю-

вання. Експериментальні методи включали в себе фізичне моделювання і натурні дослідження в лабораторних умовах, методи тензометрії, вимірювання геометричних параметрів і механічних властивостей, методи математичної статистики, а також експертні оцінки.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Наукову новизну дисертаційної роботи складають наступні її основні положення:

1 Вперше для процесів виробництва довгомірних металопорошкових виробів встановлено вплив форми, товщини і механічних властивостей матеріалу оболонки на параметри осередку деформації та показники якості готової металопродукції.

2 Вперше для процесу прокатки металопорошкових матеріалів у відкритій та закритій оболонці встановлені закономірності формування щільності порошку і енергосилових параметрів в залежності від форми і матеріалу металевої оболонки на основі визначення зон її прогину і прилягання та, відповідно, товщини порошкового шару на вході в осередок деформації, що дозволило підвищити точність розрахунку технологічних режимів процесу.

3 Вперше для процесу прокатки двошарових металопорошкових матеріалів в оболонці встановлені залежності щільності шарів порошку та силових характеристик від параметрів металевої оболонки і величини обтиснення шарів порошку, що дозволило визначити технологічні режими прокатки з урахуванням потрібних параметрів порошкової стрічки.

4 Вперше для процесу плющення порошкового дроту в оболонці встановлена закономірність формування геометрії стрічки, щільності сердечника і величин енергосилових параметрів в залежності від товщини і матеріалу оболонки, що дозволило підвищити точність розмірів порошкової стрічки та забезпечити задану щільність порошку.

5 Уточнено для процесу волочіння порошкового дроту в оболонці механізм формування показників якості продукції та забезпечення стабільності процесу в залежності від величини обтиснення дроту та натяжінь оболонки, що дозволило знизити кількість переходів за рахунок максимальних разових обтиснень.

6 Уточнено умову пластичності порошкових матеріалів для випадків плоского та вісісиметричного напруженого стану, що дозволило підвищити достовірність математичних моделей процесів прокатки і волочіння порошків за рахунок наближення до реальних взаємозв'язків між напруженнями, деформаціями і щільністю пористих тіл.

**Практична цінність отриманих результатів.** Практичну цінність результатів виконаного дослідження становлять наступні розробки:

– комплекс математичних моделей і програмних засобів з автоматизованого розрахунку напружено-деформованого стану матеріалу й енергосилових характеристик при виготовленні довгомірних виробів з металопорошків в оболонці, що дозволяють виконувати автоматизоване проектування технологічних режимів, здійснювати вибір оптимальних вихідних параметрів заготовки та конструктивних параметрів обладнання;

– методика та програмні засоби з автоматизованого розрахунку основних показників якості при виробництві довгомірних виробів з металопорошків в оболонці, що

дозволяють визначати рівні допустимих відхилень вихідної щільності порошку, початкових геометричних параметрів заготовки, точності виготовлення робочого інструменту в залежності від необхідної точності кінцевого продукту і припустимого діапазону відхилення щільності сердечника;

– алгоритми автоматизованого проектування технологічних режимів процесів виготовлення порошкових матеріалів в металевій оболонці на основі використання розроблених математичних моделей, що дозволяють визначати оптимальні режими обтиснень і здійснювати раціональний вибір вихідної заготовки;

– удосконалена установка для експериментального визначення фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів, що заснована на пресуванні заготовки в закритій матриці та визначенні взаємозв'язку між нормальними, радіальними напруженнями і щільністю;

– нові способи і пристрої для виробництва порошкових стрічок і дроту, що дозволяють поліпшити технологічні, якісні та експлуатаційні характеристики продукції, підвищити продуктивність процесу і знизити кількість обладнання необхідного для його реалізації;

– практичні рекомендації та науково-обґрунтовані технічні рішення щодо вибору матеріалу, форми і товщини оболонки, співвідношення товщин двошарової порошкової композиції, призначення режимів обтиснень, радіусів валків і коефіцієнта асиметрії для реалізації процесів прокатки порошкових матеріалів в металевій оболонці, спрямовані на розширення сортаменту і підвищення рівня споживчих властивостей металопродукції при одночасному забезпеченні економії матеріальних ресурсів на стадіях як створення, так і освоєння технологій і обладнання;

– практичні рекомендації та науково-обґрунтовані технічні рішення щодо вибору матеріалу і товщини оболонки, призначення кількості переходів і режимів обтиснень, призначення рівня натяжін для реалізації процесів волочіння і плющення порошкового дроту в металевій оболонці, спрямовані на розширення сортаменту і підвищення рівня споживчих властивостей металопродукції при одночасному забезпеченні економії матеріальних ресурсів на стадіях як створення, так і освоєння технологій і обладнання прокатних і волочильних станів.

Результати дисертаційної роботи у вигляді програмних продуктів, технічних рішень і практичних рекомендацій використані на ПАТ «Науково-дослідний і проектно-технологічний інститут машинобудування» (м. Краматорськ), ПрАТ «Фінпрофіль» (м. Харків), ПрАТ «Краматорський завод металевих конструкцій» (м. Краматорськ), ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ) і в Донбаській державній машинобудівній академії. Економічний ефект за рахунок зниження трудомісткості проектно-конструкторських і проектно-технологічних робіт склав 2653 тис. гривень.

Окремі положення дисертації використовуються на кафедрі «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» Донбаської державної машинобудівної академії в рамках викладання ряду спеціальних дисциплін, а також при виконанні науково-дослідних робіт, курсових та дипломних проектів студентами спеціальностей 7,8.05050311 «Металургійне обладнання».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові результати автором отримані самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, автору належить розробка математичних моделей, алгоритмів і програмних засобів, участь в проведенні експериментів, аналіз та узагальнення результатів теоретичних, а також експериментальних досліджень, розробка практичних рекомендацій та участь у впровадженні їх в промислове виробництво процесів виготовлення довгомірних металопорошкових виробів в оболонці. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора відображений в анотації до списку опублікованих робіт.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних, всеукраїнських та регіональних науково-технічних (НТК) та науково-практичних (НПК) конференціях, в тому числі: міжнародних НТК (МНТК) з проблем дослідження та вдосконалення технології та обладнання обробки тиском 2002-2015 рр. (м. Краматорськ, ДДМА); IX регіональній НТК (м. Маріуполь, 2002); IX МНТК «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів» (м. Запоріжжя, 2003); I МНТК «Машинобудування та металообробка–2003» (м. Кіровоград, 2003); XI регіональній НТК (м. Маріуполь, 2004); міжнародній НПК (МНПК) «Интеллектуальные технологии – производству 2005» (м. Краматорськ, 2005); III, V МНТК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2005, 2007); VIII НТК ПАТ «АМК» (м. Алчевськ, 2007); I, II МНТК «Машини та пластична деформація металів» (м. Запоріжжя, 2007, 2012); міжнародному науковому семінарі «Научно-технический прогресс в металлургии» (м. Череповець, Росія, 2012); IX, X міжнародних конференціях «Стратегия качества в промышленности и образовании» (м. Варна, Болгарія, 2013, 2014); III МНТК «Азовмаш – 2013» (м. Маріуполь, 2013); I МНТК «Научно-технический прогресс в чёрной металлургии» (м. Череповець, Росія, 2013); I МНПК «Актуальные проблемы в машиностроении» (м. Новосибірськ, Росія, 2014); VI МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 2014); X МНТК «Пластична деформація металів» (м. Дніпропетровськ, 2014); VI МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (м. Київ, 2015); на НТК професорсько-викладацького складу ДДМА (м. Краматорськ, 2002-2014); науковому семінарі при спеціалізованій раді Д 12.105.01 ДДМА (2016 р.), наукових семінарах НТУУ «КПІ» (м. Київ, 2015 р.) і Національної металургійної академії України (м. Дніпро, 2016 р.).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 64 роботах, в тому числі 31 стаття в фахових виданнях, 7 – у зарубіжних виданнях, з них 4 статті в міжнародних наукових журналах, включених в базу даних Scopus. 7 статей опубліковано без співавторів. Також матеріали опубліковані в 3 колективних монографіях. Нові технічні рішення захищені 14 патентами України на корисну модель.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертація складається зі вступу, сімох розділів, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм роботи 394 сторінки, в тому числі 262 сторінки основного тексту, 168 рисунків та 5 таблиць, список використаних джерел з 306 найменувань та 7 додатків на 39 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми та показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами. Сформульовано мету та задачі, що були вирішені, дано характеристики об'єкту та предмету, розглянуті методи теоретичних та експериментальних досліджень. Показані наукова новизна, практична цінність, апробація і публікація отриманих результатів. Відзначено особистий внесок здобувача.

**В першому розділі** виконано аналіз стану питання в області технологій і обладнання процесів виготовлення довгомірних металопорошкових виробів в оболонці методами обробки тиском. На основі проведеного аналізу встановлено напрямки подальшого вдосконалення процесів прокатки, плющення і волочіння композицій з порошковими матеріалами.

Технологія виробництва порошкових стрічок і дроту полягає у формуванні оболонки, заповненні її порошковим сердечником і подальшому деформуванні. При цьому виникають проблеми, які пов'язані із забезпеченням максимально необхідної щільності порошкового сердечника для здійснення зварювальних процесів та мінімальної щільності, достатньої для транспортування і використання, що виключає його висипання. Також для якісного здійснення процесу зварювання важливим є забезпечення геометричних характеристик порошкових стрічок. Забезпечення вказаних вимог доцільно здійснювати на основі теоретичного аналізу процесів обробки тиском.

Значний внесок у розвиток теорії і технології обробки тиском порошкових матеріалів внесли такі провідні вітчизняні й зарубіжні вчені як Баглюк Г.А., Бейгельзімер Я.Ю., Виноградов Г.А., Гогаєв К.О., Друянов Б.А., Ісаєвич Л.О., Каташинський В.П., Катрус О.О., Лаптев О.М., Ложечников Є.Б., Петросян Г.Л., Рябічева Л.О., Сатонін О.В., Степаненко О.В., Штерн М.Б., а також ряд інших вчених і фахівців.

Теоретичні дослідження обробки порошкових матеріалів ґрунтуються на спільному вирішенні диференціальних рівнянь руху і умов пластичності. Найбільш практичне застосування знайшла еліптична умова пластичності, що поєднує відносну простоту опису властивостей порошкових матеріалів і точність розрахунку.

Крім аналітичних широко використовуються кінцево-елементні моделі, особливістю яких є опис деформації порошку на основі таких моделей пластичності, як моделі Друкера-Прагера, Кулона-Мора, CAP-моделі, що вимагають проведення досить складних експериментальних досліджень. Також при використанні даних моделей важко вирішити задачі автоматизованого проектування внаслідок значного часу на їх реалізацію.

До невирішених задач в існуючих роботах слід віднести відсутність для процесів виготовлення довгомірних металопорошкових виробів врахування поведінки монометалевої оболонки, яка змінює геометричні характеристики осередку деформації і впливає на перебіг процесу пластичної деформації та якість готової продукції.

В результаті проведеного огляду обґрунтовано необхідність подальшого розвитку наукових основ і вдосконалення технологічних процесів і обладнання для реалізації процесів прокатки порошкових стрічок, волочіння та плющення порошкових



дротів, що вимагає проведення комплексних досліджень. Рішення цієї наукової проблеми може бути здійснено на основі розвитку методів розрахунку процесів виготовлення довгомірних металопорошкових виробів в оболонці методами обробки тиском.

**В другому розділі** обґрунтовано та виконано вибір напрямку і методів досліджень процесів виготовлення довгомірних виробів в металевій оболонці.

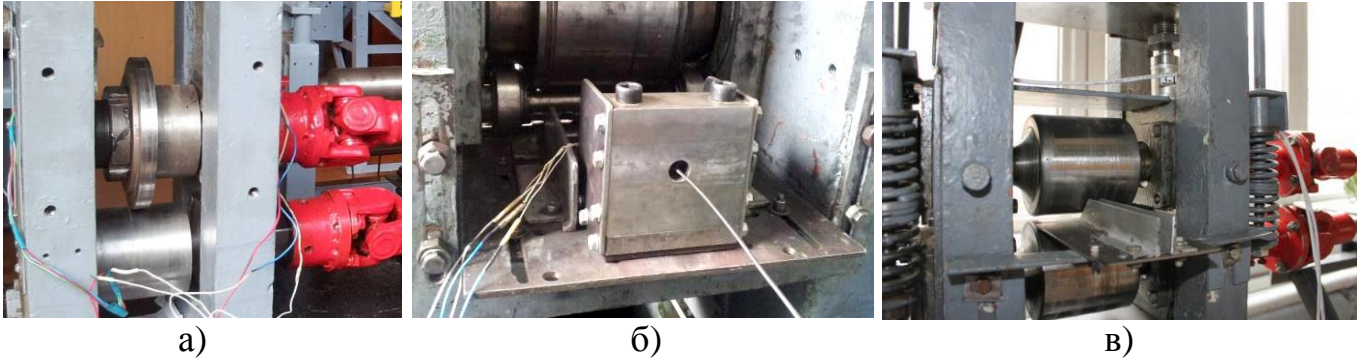
Сучасні вимоги, що висуваються до результатів теоретичних досліджень, в найзагальнішому випадку, і до результатів безпосереднього математичного моделювання, зокрема, роблять необхідним проведення попереднього аналізу вихідних передумов при одночасному уточненні граничних умов процесів, що досліджуються. Стосовно до виготовлення порошкових стрічок і дроту в оболонці основні закономірності напружено-деформованого стану, а також методики визначення фізико-механічних властивостей, геометричних параметрів і умов контактного тертя в осередку деформації були отримані на основі результатів теоретико-експериментальних методів дослідження з їх подальшим кількісним і якісним описом.

Наявність тенденції щодо подальшого вдосконалення математичних методів розрахунку поряд з інтенсивним розвитком сучасних обчислювальних засобів і підвищенням ступеня комп'ютеризації проектно-технологічних і проектно-конструкторських робіт обумовлюють розробку чисельних математичних моделей, основною відмінною рисою яких є можливість максимально повного і коректного урахування реального характеру розподілів граничних умов осередку деформації. Зазначене в сукупності з використанням досить строгого математичного апарату дозволяє підвищити точність і розширити об'єм надаваної інформації, а це, в свою чергу, сприяє підвищенню ступеня наукової обґрунтованості розроблюваних в кожному окремому випадку конкретних практичних рекомендацій.

При моделюванні процесів прокатки порошкових стрічок, волочіння та плющення порошкового дроту був використаний кінцево-різницевий підхід, який широко використовується в теорії обробки тиском і поєднує простоту реалізації та точність розрахунків. Суть цього методу полягає в сумісному рішенні диференціальних рівнянь руху з умовою пластичності. Крім кінцево-різницевих були використані кінцево-елементні моделі з метою перевірки правомірності прийнятих при моделюванні припущень, а також в сукупності з імітаційними моделями, основаними на методі Монте-Карло – для розробки рекомендацій з вибору технологічних режимів та конструктивних параметрів обладнання для забезпечення якісних показників готової продукції.

Основною метою експериментальних досліджень були оцінка ступеня достовірності отриманих математичних моделей напружено-деформованого стану в осередку деформації та уточнення вихідних даних для їх чисельної реалізації. Експериментальним шляхом було визначено фізико-механічні властивості досліджуваних порошкових композицій, які були використані при реалізації математичних моделей. Перевірка адекватності розроблених теоретичних моделей була проведена шляхом фізичного моделювання процесів прокатки, волочіння і плющення порошкових електродів (рис. 1) з подальшою статистичною обробкою результатів.

**Третій розділ присвячений** уточненню умов пластичності при описі процесів деформації композиційних заготовок з використанням порошкових матеріалів.



а) – прокатка; б) – волочіння; в) – плющення

Рисунок 1 – Загальні вигляди експериментальних установок

Для визначення величин осьових та контактних напружень було адаптовано еліптичну умову пластичності для пористих матеріалів, сформульованої зокрема в роботі Лаптева О.М. Уточнена умова пластичності у випадку плоского деформованого стану, а саме при прокатці, базується на наступних співвідношеннях для головних напружень:

$$\sigma_3 = \sigma_x; \sigma_1 = p_x, \sigma_2 = \frac{1-2\alpha}{2(1+\alpha)} (\sigma_1 + \sigma_3) = \frac{1-2\alpha}{2(1+\alpha)} (p_x + \sigma_x), \quad (1)$$

де  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – головні напруження, що діють на деформований порошковий сердечник;  $\sigma_x, p_x$  – нормальні та нормальні контактні напруження, що діють в осередку деформації при прокатці;  $\alpha = a(1-\gamma_x)^m$ ;  $\beta = \gamma_x^{2n}$  – коефіцієнти, що враховують специфіку деформації порошкової композиції;  $\sigma_s$  – умовна межа плинності матеріалу основи порошкової композиції;  $\gamma_x = \rho_x/\rho_0$  – поточне значення відносної щільності порошку;  $\rho_x, \rho_0$  – значення щільності даної порошкової композиції та її твердої фази, відповідно;  $a, m, n$  – постійні коефіцієнти, які визначаються для кожного конкретного складу порошкового середовища і характеризують залежність зміни коефіцієнтів  $\alpha$  і  $\beta$  від зміни відносної щільності  $\gamma_x$ .

На основі цього умова пластичності для випадку прокатки стрічок приймає вид:

$$p_x^2 - 2 \frac{1-2\alpha}{1+4\alpha} p_x \sigma_x + \sigma_x^2 = \frac{4}{3} \frac{1+\alpha}{1+4\alpha} \beta \sigma_s^2. \quad (2)$$

Відносна деформація порошкового матеріалу в разі плоскої задачі в кінцево-різницевій формі матиме вигляд:

$$\varepsilon_{xi} = \frac{\sigma_{xi2}(1+4\alpha_{xi2}) - p_{xi2}(1-2\alpha_{xi2})}{p_{xi2}(1+4\alpha_{xi2}) - \sigma_{xi2}(1-2\alpha_{xi2})} \frac{h_{xi1} - h_{xi2}}{h_{xi1}}, \quad (3)$$

де  $h_{xi1}, h_{xi2}$  – поточні значення товщини порошкового шару в кінцево-різницевій формі.

Необхідно зауважити, що закон збереження об'єму не виконується в разі прокатки порошкових матеріалів внаслідок їх ущільнення, тому для проведення подальших перетворень використовувався закон збереження маси. З урахуванням зазначеного, рівняння для відносної щільності приймає наступний вигляд:

$$\gamma_{xi2} = \gamma_{xi1} \frac{h_{xi1}}{h_{xi2} \left( 1 + \frac{\sigma_{xi2}(1+4\alpha_{xi2}) - p_{xi2}(1-2\alpha_{xi2})}{p_{xi2}(1+4\alpha_{xi2}) - \sigma_{xi2}(1-2\alpha_{xi2})} \frac{h_{xi1} - h_{xi2}}{h_{xi1}} \right)}, \quad (4)$$

де  $\gamma_{x1}, \gamma_{x2}$  – відносна щільність порошкового матеріалу в кінцево-різницевій формі.

У разі волочіння порошкового дроту, тобто в разі вісесиметричного напруженого стану головні напруження дорівнюють  $\sigma_1 = \sigma_x$ ;  $\sigma_2 = \sigma_3 = p_x$ .

Провівши математичні перетворення, отримаємо умову пластичності, що відображає напружений стан при волочінні:

$$\sigma_x^2 - 2\sigma_x p_x \frac{1-4\alpha_x}{1+\alpha_x} + p_x^2 \frac{1+4\alpha_x}{1+\alpha_x} = \frac{1}{(1+\alpha_x)} \beta_x \sigma_{sx}^2. \quad (5)$$

Відповідно показник ступеня відносної деформації  $\varepsilon_{Lx}$  в кінцево-різницевій формі буде дорівнювати

$$\varepsilon_{Lx} = 2 \frac{\sigma_x(1+\alpha_x) - p_x(1-2\alpha_x)}{p_x(1+4\alpha_x) - \sigma_x(1-2\alpha_x)} \frac{F_{x1}}{F_{x1} - F_{x2}}, \quad (6)$$

де  $F_{x1}, F_{x2}$  – поточні значення площі поперечного перерізу дроту в кінцево-різницевій формі.

Поточне значення відносної щільності порошку буде відповідати:

$$\gamma_{x2} = \gamma_{x1} \frac{F_{x1}}{F_{x2} \left( 1 + 2 \frac{\sigma_x(1+\alpha_x) - p_x(1-2\alpha_x)}{p_x(1+4\alpha_x) - \sigma_x(1-2\alpha_x)} \frac{F_{x1}}{F_{x1} - F_{x2}} \right)}. \quad (7)$$

Отримані залежності були використані в математичних моделях процесів прокатки порошкових стрічок, плющення та волочіння порошкового дроту.

Одними з основних характеристик, що використовуються при розрахунку різних технологічних процесів обробки порошкових матеріалів, є функціональні зв'язки коефіцієнтів умов пластичності (2) і (5) та відносної щільності, тобто функціональні зв'язки  $\alpha(\gamma)$ ,  $\beta(\gamma)$  і  $\sigma_s(\gamma)$ . Для їх визначення були проведені експериментальні дослідження, які полягали в пресуванні порошкового матеріалу досліджуваного складу в закритій матриці (рис. 2). При цьому були отримані залежності нормальних та радіальних напружень в функції від відносної щільності порошку. На основі цих залежностей були визначені коефіцієнти  $a$ ,  $m$ ,  $n$ , які характеризують залежність зміни коефіцієнтів  $\alpha$  і  $\beta$  від зміни відносної щільності  $\gamma_x$ .

**Четвертий розділ** присвячений моделюванню напружено-деформованого стану матеріалу при прокатці порошкових стрічок.

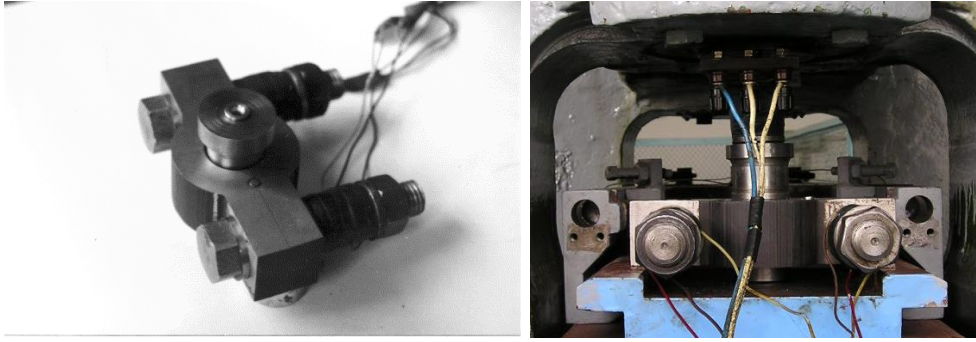


Рисунок 2 – Загальні види установки для експериментального визначення фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів (патент України № 59317)

Виготовлення порошкової стрічки може включати наступні етапи: ущільнювальна прокатка у відкритій оболонці, у випадку недостатньої щільності або її розподілу по перерізу прокатка двошарової стрічки і калібрувальна прокатка в закритій оболонці замкового типу. Прокатка двошарової стрічки використовується у випадку неможливості забезпечення рівномірності розподілу щільності по перерізу заготовки, при цьому склад порошкової композиції на обох шарах може відрізнятися. В роботі розроблені математичні моделі напружено-деформованого стану для всіх вказаних випадків виготовлення. Математичні моделі були засновані на розбитті осередку деформації на кінцеву безліч елементарних об'ємів з подальшим спільним рішенням умови статичної рівноваги елементарного об'єму й умови пластичності для пористих матеріалів в кінцево-різницевої формі.

Розрахункова схема ущільнювальної прокатки наведена на рис. 3, а. Вона включає порошковий сердечник з початковою товщиною шару  $h_0$  в металевій оболонці товщиною  $h_n$  та валки радіусами  $R_1$  і  $R_2$ . Наявність металевої оболонки в осередку деформації видозмінює його геометрію, що робить необхідним проведення додаткової ітераційної процедури. Максимальна довжина осередку деформації  $L_{nl}$  реалізується при горизонтальному задаванні оболонки в валки, тобто стрічки «нескінченної жорсткості», а мінімальна – при повному приляганні стрічки до поверхні робочого валка  $R_2$ . Чисельно їх можна визначити наступними залежностями (див. рис. 3):

$$L_{nl}^{\max} = \sqrt{2R_1\Delta h(R_2 + h_n)/(R_1 + R_2 + h_n)}; L_{nl}^{\min} = \sqrt{(R_2 + h_n)\Delta h}, \quad (8)$$

де  $\Delta h = h_0 - h_1$  – величина абсолютного обтиснення порошкової складової.

Наявність металевої оболонки вносить асиметрію в осередок деформації, а також зумовлює появу залежності довжини осередку деформації від механічних властивостей і жорсткості оболонки. Тим самим, ускладнюються й аналітичні залежності, що описують геометричні параметри осередку деформації. Так, для опису величини поточної товщини композиції використана залежність:

$$h_{x1} = h_1 + \Delta h_{x1} + \Delta h_{x2}, \quad (9)$$

де  $\Delta h_{x1}$ ,  $\Delta h_{x2}$  – поточні значення абсолютних обтиснень з боку верхнього та нижнього робочих валків.

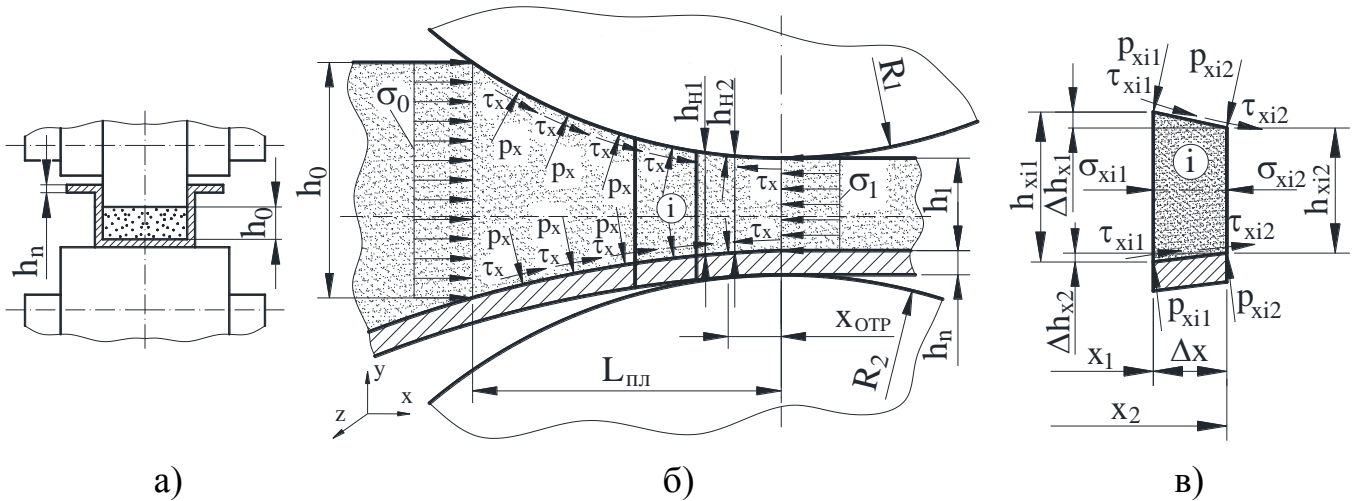


Рисунок 3 – Розрахункова схема процесу (а), осередку деформації (б) та виділеного  $i$ -го елементарного об'єму (в) при ущільнювальній прокатці порошкової стрічки у відкритій оболонці

Величина абсолютного обтиснення з боку верхнього валка описується залежністю геометричного характеру:

$$\Delta h_{x1} = R_1 - \sqrt{R_1^2 - x^2}. \quad (10)$$

Для опису величини обтиснення  $\Delta h_{x2}$  слід зазначити, що в загальному випадку з боку нижнього валка виникають дві зони – зона прилягання оболонки до поверхні робочого валка й зона її провисання, що розташована на вході в осередок деформації. При цьому координата відриву оболонки від бочки валка  $x_{omp}$  визначається жорсткістю металевої оболонки.

У зоні прилягання, тобто при  $x < x_{omp}$ , величина обтиснення визначається виходячи з геометрії схеми:

$$\Delta h_{x2} = R_2 + h_n - \sqrt{(R_2 + h_n)^2 - x^2}. \quad (11)$$

Для опису величини  $\Delta h_{x2}$  в зоні провисання ( $x > x_{omp}$ ), вимагається більш складна залежність:

$$\Delta h_{x2} = \Delta h_{x2}^I + \Delta h_{x2}^{II} + \Delta h_{x2}^{III}, \quad (12)$$

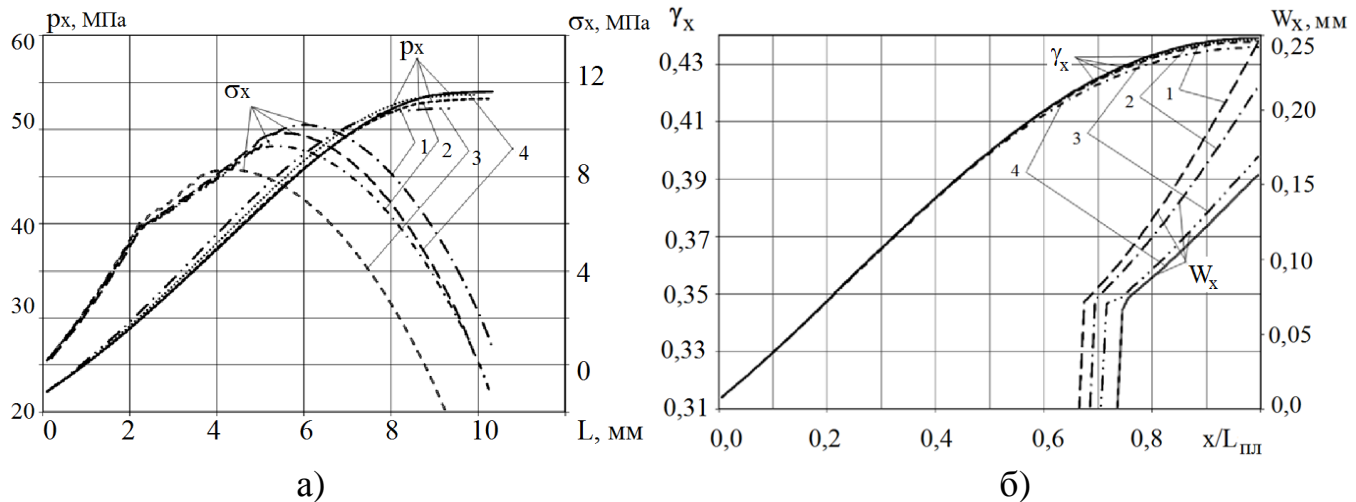
$$\text{де } \Delta h_{x2}^I = (R_2 + h_n) \left[ 1 - \cos \left( \arcsin \frac{x_{omp}}{R_2 + h_n} \right) \right]; \quad \Delta h_{x2}^{II} = (x - x_{omp}) \cdot \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{x_{omp}}{R_2 + h_n} \right);$$

$$\Delta h_{x2}^{III} = \frac{p_x b (L_{nl} - x_{omp})^5}{120 E_n I} \left[ 4 - 5 \frac{L_{nl} - x}{L_{nl} - x_{omp}} + \left( \frac{L_{nl} - x}{L_{nl} - x_{omp}} \right)^5 \right],$$

$E_n$  – модуль пружності матеріалу металевої оболонки;  $I$  – момент інерції перерізу металевої оболонки відносно осі  $x$ .

З використанням методу дихотомії визначається довжина осередку деформації у зв'язку з виникненням функціональної залежності поточної висоти осередку деформації та його загальної довжини. В середині циклу дихотомії здійснюється послідовне ітераційне визначення координати точки відриву оболонки від поверхні валка на основі відповідності пружно-деформаційного й чисто геометричного рішень.

Як приклад результату чисельної реалізації програмних засобів, розроблених на основі отриманої математичної моделі, на рис. 4 наведені розрахункові розподіли нормальних  $\sigma_x$  і нормальних контактних напружень  $p_x$  (див. рис. 4, а), а також розподіли відносної щільності порошкового сердечника  $\gamma_x$  і значень пружного прогину металевої оболонки  $W_x$  по довжині осередку деформації (див. рис. 4, б) в залежності від зміни коефіцієнта асиметрії  $k_v = V_{e1} / V_{e2}$ , котра виникає при застосуванні валків різного діаметру, що обертаються з окружними швидкостями  $V_{e1}, V_{e2}$  (див. рис. 3, б). Також було досліджено вплив форми і товщини металевих оболонок на параметри напруженого стану процесу прокатки порошкових стрічок.



1 –  $k_v = 1,0$ ; 2 –  $k_v = 1,05$ ; 3 –  $k_v = 1,1$ ; 4 –  $k_v = 1,15$

Рисунок 4 – Розрахункові розподіли нормальних  $\sigma_x$  та нормальних контактних  $p_x$  напружень (а), відносної щільності порошкового сердечника  $\gamma_x$  та значень пружного прогину оболонки  $W_x$  (б) по довжині осередку деформації в залежності від зміни коефіцієнта асиметрії  $k_v$

З аналізу отриманих розподілів встановлено наступне: величини нормальних напружень  $\sigma_x$  зменшуються при збільшенні показника асиметрії (рис. 4, а); найменші значення довжини осередку деформації будуть при  $k_v = 1,15$ ; найбільші – при  $k_v = 1$  (рис. 4, а); по мірі проходження осередку деформації відносна щільність  $\gamma_x$  монотонно зростає та відбувається стабілізація цього зростання на виході з зони деформації (рис. 4, б); пружний прогин металевої оболонки буде тим вище, чим менше жорсткість оболонки; максимальне значення пружного прогину оболонки отримано для  $k_v = 1$  і  $h=0,25$  мм, найменший пружний прогин – при  $k_v = 1,15$  і  $h=1$  мм (рис. 4, б).

Одномірне математичне моделювання напружено-деформованого стану при прокатці двохшарового порошкового сердечника в оболонці (рис. 5) було виконано за

аналогією з розглянутою вище методикою. Розрахункова схема осередку деформації наведена на рис. 5 і включає попередньо ущільнений шар (індекс  $m$ ) в оболонці та шар насипного порошкового матеріалу (індекс  $M$ ).

Повний розрахунок напружено-деформованого стану для  $i$ -го виділеного елементарного об'єму проводився на основі цілеспрямованого перебору товщин  $h_{xmi2}$ ,  $h_{xmi1}$  виходячи з умови рівноваги кінцевого граничного перерізу:

$$P_{xi2} = P_{xmi2} = P_{xmi2} \cdot \quad (13)$$

Нормальні контактні напруження  $P_{xi2}$  були визначені в результаті спільного рішення умови статичної рівноваги елементарного об'єму осередку деформації та умови пластичності для порошкових матеріалів. По мірі визначення  $P_{xmi2}$  і  $P_{xmi2}$  кінцеву товщину  $h_{xmi2}$  визначали ітераційним способом.

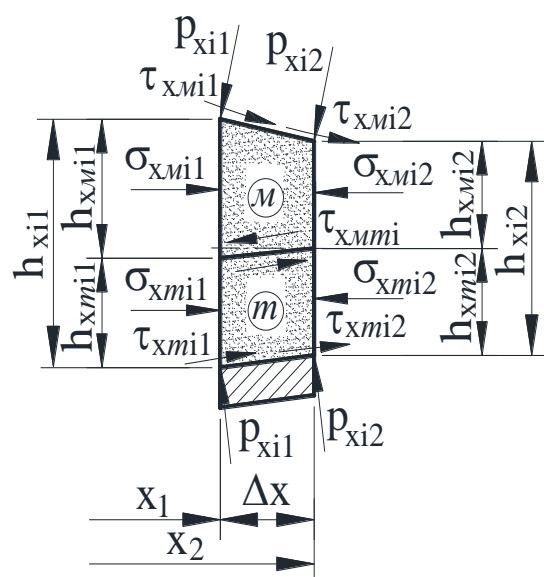


Рисунок 5 – Розрахункова схема елементарного об'єму при прокатці двошарового порошкового матеріалу в оболонці

Як приклад результату чисельної реалізації даної моделі на рис. 6 наведені розрахункові розподіли товщини та відносних щільностей шарів стрічки по довжині осередку деформації (див. рис. 6, а) та розподілу відносних щільностей шарів та сили прокатки залежно від обтиснення (див. рис. 6, б).

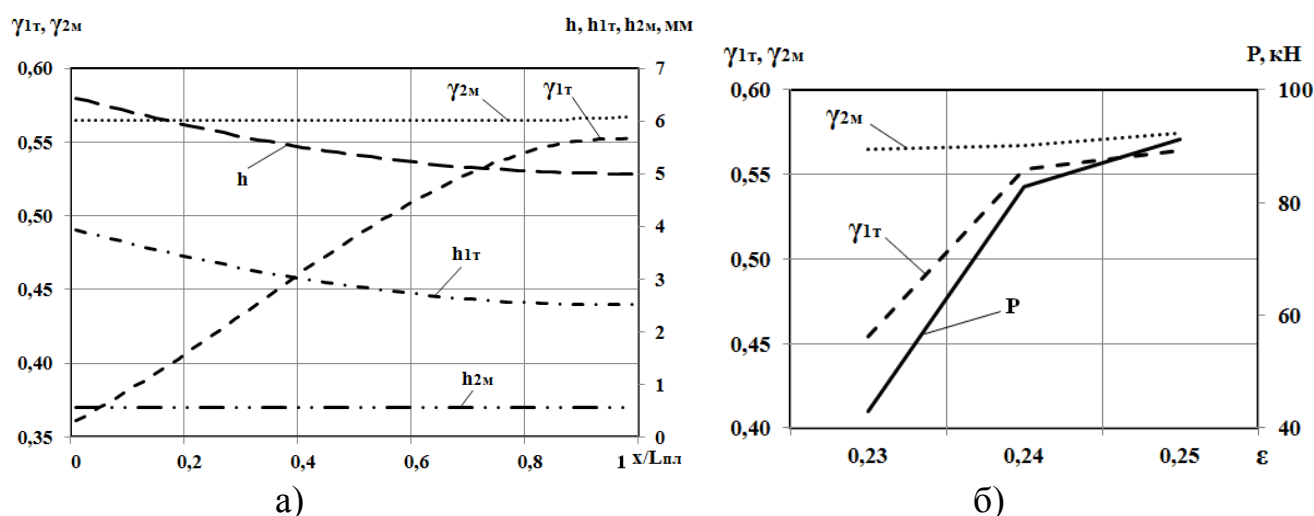


Рисунок 6 – Розрахункові розподіли товщини та відносних щільностей шарів по довжині осередку деформації (а) та розподіли кінцевих щільностей шарів та сили прокатки залежно від обтиснення (б)

З аналізу наведених розрахункових розподілів встановлено, що при прокатці двошарової порошкової стрічки відбувається значне обтиснення шару насипного порошку, проте ущільнений шар зменшується по товщині тільки в перерізах на виході з осередку деформації. Проведені додаткові розрахунки показують, що при меншому обтисненні насипний шар не досягає щільності ущільненого шару. При збільшенні обтиснення насипний шар починає деформуватися і, в підсумку, обидва шари мають однакову щільність при певному режимі прокатки. Також на розподіл деформації шарів впливають параметри оболонки. Це свідчить про доцільність рішення оптимізаційних завдань з вибору режимів обтиснення.

Прокатка порошкового матеріалу в закритій оболонці замкового типу, яку можна уявити у вигляді двох металевих оболонок, які мають певну жорсткість, призводить до видозміни кінематичних і геометричних параметрів процесу прокатки. Зокрема, має місце задній і передній підпір, невизначеність загальної довжини осередку деформації.

При прокатці порошкової стрічки з попередньо отриманою високою щільністю сердечника в закритій оболонці виникає досить міцний зв'язок між оболонкою і порошком як в поздовжньому, так і в поперечному напрямках. Це, в свою чергу, призводить до відповідних змін основних параметрів напружено-деформованого стану в осередку деформації. З фізичної точки зору, виникнення міцного зв'язку порошку і металу оболонки відповідає зверненню в нуль деформацій в поздовжньому і поперечному напрямках:  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ . Тому характер деформування стає ідентичним процесу ущільнення порошкового матеріалу в закритій матриці.

У найзагальнішому випадку, частина металевої оболонки під дією нормальних контактних напружень  $p_x$  буде щільно притиснута до твірної поверхні робочого валка, в той час як решта не контактуватиме з валком, внаслідок певної жорсткості оболонки. Приймаючи допущення про кусочно-лінійну апроксимацію характеру зміни нормальних контактних напружень  $p_x$ , було визначено величину пружного прогину металевої оболонки, що дозволило розрахувати геометрію зони пластичної деформації.

Як показує аналіз отриманих залежностей, наведених на рис. 7, зі збільшенням ступеня деформації спостерігається збільшення відносної щільності порошку. Однак при відносному обтисненні більше 60 % спостерігається пластична деформація матеріалу оболонки. Це явище підтверджує припущення про можливість пластичної деформації матеріалу оболонки, що було прийняте при розробці математичної моделі. Цим також пояснюється зниження інтенсивності росту відносної щільності порошкового матеріалу.

**П'ятий розділ присвячений** моделюванню напружено-деформованого стану матеріалу при волочінні та плющенні порошкового дроту.

Розрахункова схема інтегрального осередку деформації процесу волочіння порошкового дроту включала в себе волоку, монометалічну оболонку з зовнішніми і внутрішніми діаметрами в її вихідному  $D_0, d_0$  і результуючому  $D_1, d_1$  станах, а також власне порошкову складову.



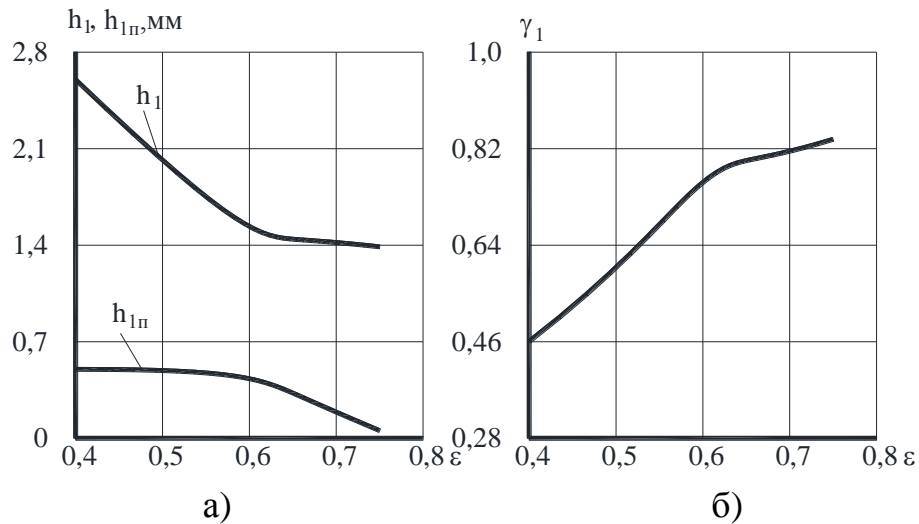


Рисунок 7 – Розрахункові розподіли товщин порошкового шару  $h_1$  та оболонки  $h_{1n}$  (а), а також відносної щільності порошку  $\gamma_x$  (б) в залежності від ступеня деформації

Для визначення напружено-деформованого стану було здійснено розбиття осередку деформації на кінцеву безліч елементарних об'ємів. Для кожного елементарного об'єму було складено рівняння статичної рівноваги всіх діючих сил уздовж осі волочіння і шляхом спільного рішення з умовою пластичності (5) були визначені напруження, деформації та показники щільності порошкового сердечника по довжині осередку деформації. Для визначення напружено-деформованого стану в оболонці дроту рішення рівняння рівноваги в елементарному об'ємі визначали спільно з умовою плинності для суцільних середовищ.

Згідно рекурентній формі рішення, виходячи з результатів розрахунку попереднього ( $i-1$ ) елементарного об'єму, повний розрахунок напружено-деформованого стану для  $i$ -го об'єму зводився до визначення нормальних контактних напружень  $p_{x2i}$  на основі цілеспрямованого перебору величин обтиснень порошкового сердечника і металеві оболонки, змінюючи при цьому поточне значення внутрішнього діаметру оболонки  $d_{x2i}$  та виходячи з умови рівності нормальних контактних напружень, необхідних для деформації сердечника  $p_{xc2i}$  і оболонки  $p_{xo2i}$ :

$$p_{x2i} = p_{xc2i} = p_{xo2i} \quad (14)$$

Як приклад результатів чисельної реалізації на рис. 8 наведені розрахункові розподіли основних показників напружено-деформованого стану, що має місце під час волочіння дроту з порошку на основі міді та оболонки з міді марки М1. З аналізу отриманих результатів встановлено, що при менших обтисненнях порошкового дроту пластична деформація матеріалу оболонки відбувається за рахунок витяжки, а порошкового сердечника – за рахунок стиску, при збільшенні обтиснення спостерігається стоншення стінки оболонки і зниження ступеню деформації порошку (див. рис. 8); при збільшенні обтиснень відбувається більш інтенсивне ущільнення порошкового сердечника, але при стоншуванні оболонки порошок практично не ущільнюється; характер зміни механічних властивостей оболонки уздовж осередку деформації носить нелінійний характер: на вході в осередок деформації зміцнення матеріалу оболонки більш інтенсивне, ніж на виході, крім випадку стоншення оболонки.

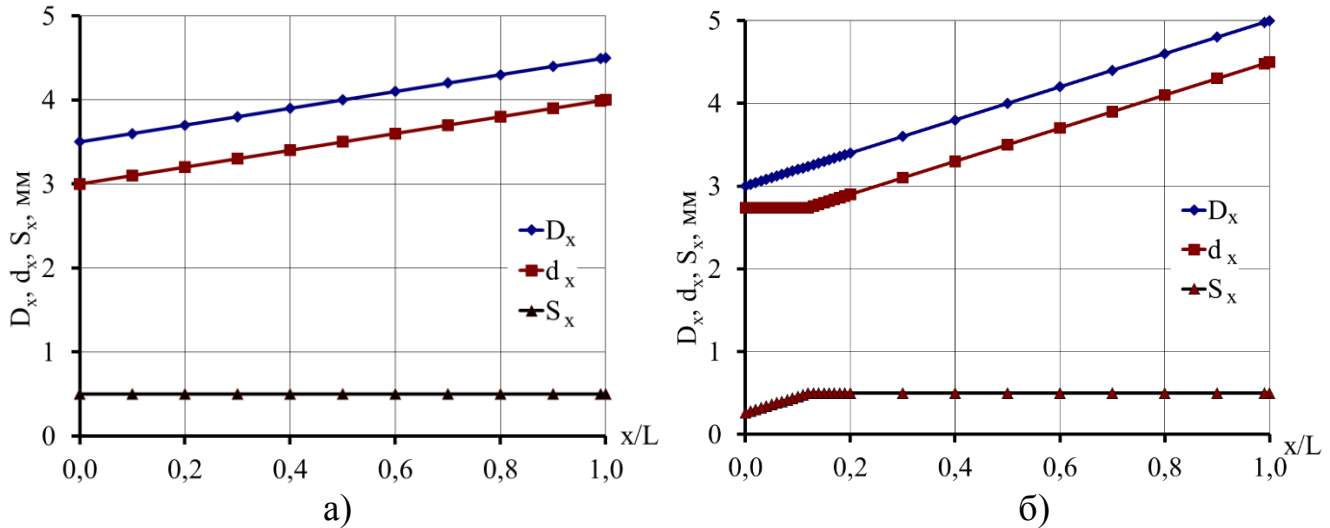


Рисунок 8 – Розрахункові розподілення поточних значень геометричних характеристик порошкового дроту при волочінні з відносним обтисненням 30 % (а) і 35 % (б)

Для перевірки прийнятих припущень при розробці аналітичної моделі волочіння порошкового дроту була розроблена кінцево-елементна модель даного процесу. При моделюванні використовувалася розрахункова схема, яка являла собою заготовку і волоку. Заготовку моделювали у вигляді металевої оболонки з властивостями суцільного середовища, заповненої порошковим сердечником. Для моделювання філь'ери були використані елементи, що не деформуються. Для моделювання як порошкового сердечника, так і металевої оболонки були використані чотирьохвузлові лінійні, тверdotільні редуковані елементи з контролем руйнування SAH4R.

На рис. 9 наведено отримані в результаті розрахунку поля розподілів еквівалентних напружень (див. рис. 9, а), деформацій в поздовжньому (див. рис. 9, б) і радіальному (див. рис. 9, в) напрямках, а також поле розподілів відносної щільності порошкового сердечника (див. рис. 9, г).

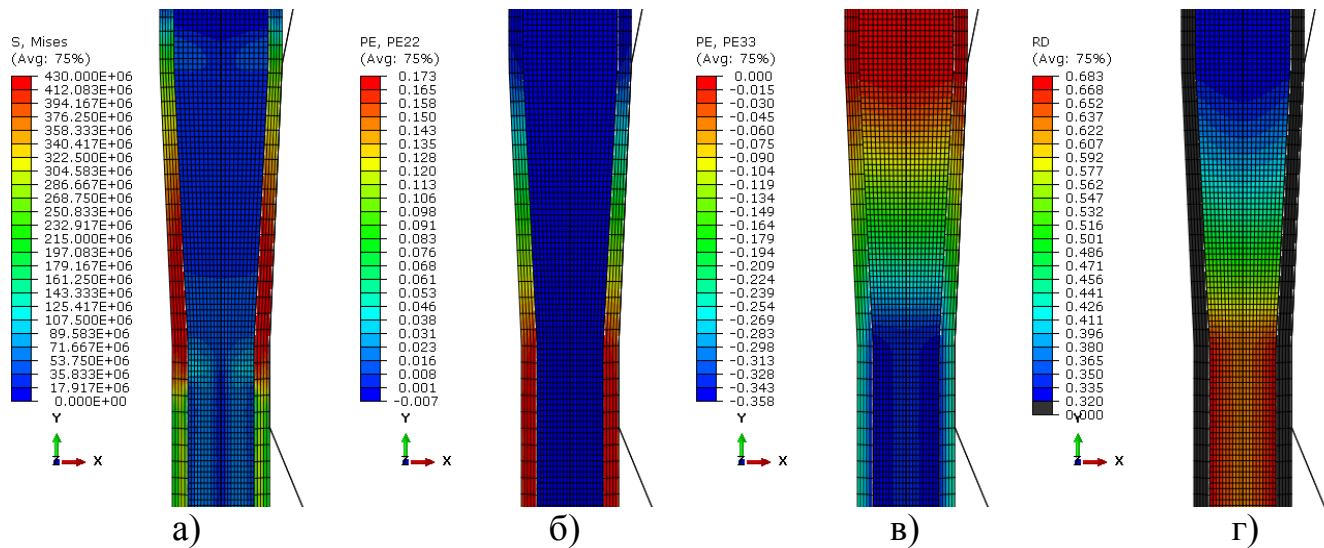


Рисунок 9 – Поля розподілів еквівалентних напружень (а), деформацій в поздовжньому (б) і радіальному (в) напрямках, відносної щільності порошкового сердечника (г)

Аналіз отриманих на основі методу кінцевих елементів результатів розрахунку підтверджує правомірність припущень про рівномірність деформацій по перерізу заготовки, прийнятих при чисельному моделюванні. Зокрема, нерівномірність розподілів деформацій не перевищила 4,0 %, а відносної щільності – 6,8 %.

Одним з широко використовуваних в зварювальному виробництві електродів є порошкова плющена стрічка, яка виготовляється шляхом прокатки круглого порошкового дроту в робочих валках з гладкою бочкою.

Математична модель напружено-деформованого стану в осередку деформації при плющенні порошкового дроту також базується на спільному аналізі умови пластичності (2) та рівняння рівноваги виділеного елементарного об'єму. Розрахункова схема осередку деформації наведена на рис. 10, а.

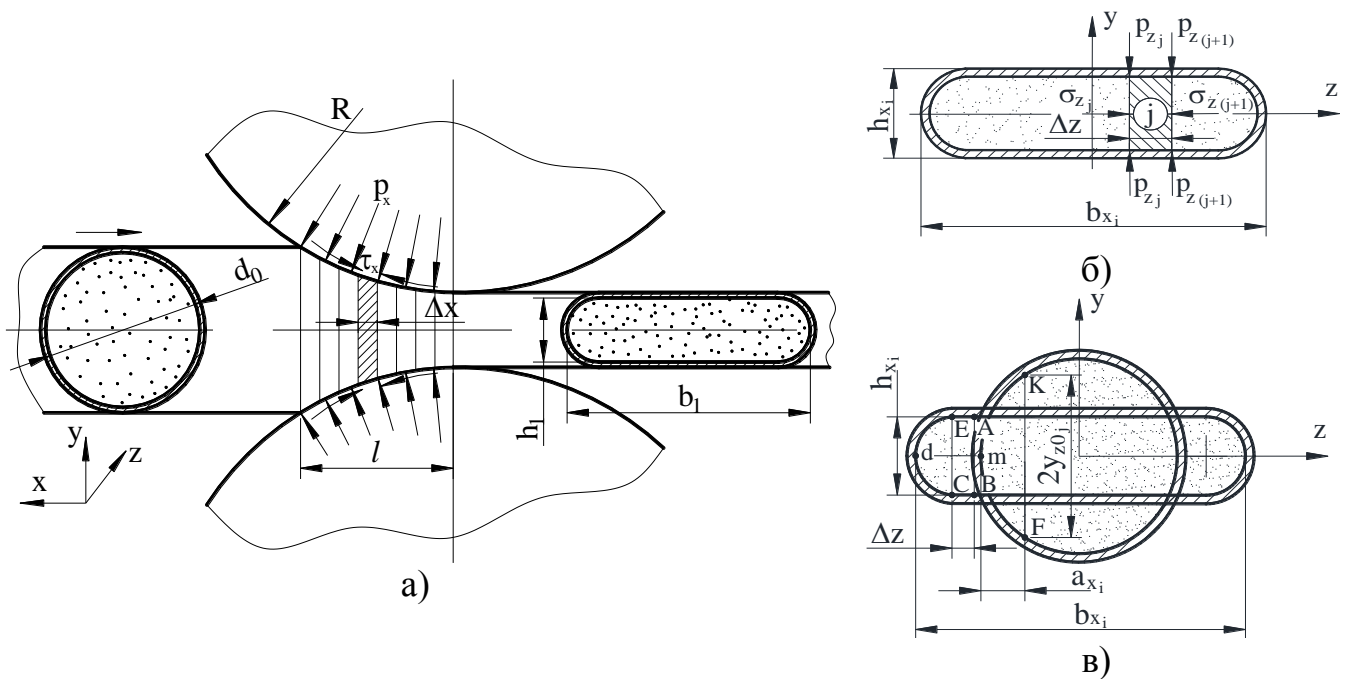


Рисунок 10 – Розрахункова схема осередку деформації при плющенні порошкового дроту: а – в поздовжньому напрямку; б – в поперечному напрямку, в – до розрахунку відносної деформації  $\varepsilon_{xji}$

З використанням вихідних даних результатів аналізу експериментальних досліджень було прийнято припущення про відсутність повздовжньої течії матеріалу. Відповідно осередок деформації розбивався в повздовжньому і поперечному напрямках на безліч елементарних об'ємів.

Для визначення ступеня деформації  $\varepsilon_{xji}$  в кожному поперечному перерізі була використана розрахункова схема, що наведена на рис. 10, в з якої випливає

$$\varepsilon_{xji} = (y_{z0} - h_{xj}) / y_{z0i}, \quad (15)$$

де  $y_{z0i}$  – висота вихідної заготовки для даного елементарного об'єму, яка знаходиться з умови рівності площі фрагменту плющеної стрічки ABCdE і сегмента вихідної заготовки FmK (див. рис. 10, б), до того ж:

$$ABCdE = \pi h_{xj}^2 / 8 + h_{xj} Z_{ji}; \quad FmK = 2a_i \cdot y_{z0i} / 3, \quad (16)$$

де  $a_i$  – висота сегмента FmK, яка виражається через  $y_{zo}$ , оскільки в рівнянні (16) два невідомих:

$$a_i = 0,5d_o - \sqrt{(0,5d_o)^2 - y_{zoi}^2} . \quad (17)$$

Значення  $a_i$  знаходимо шляхом послідовного підбору чисел від 0 до  $d_o/2$ . До того ж, умовою, що число підібране вірно, є рівність розрахункових площ ABCdE і сегмента FmK. Виразивши з урахуванням прийнятих припущень геометричні характеристики, а також напруження  $\tau_{xzji}$ ,  $\rho_{xzji}$ ,  $\sigma_{xzji}$  в кінцево-різницевому вигляді, як це показано на рис. 10, б, було розглянуто двомірну умову статичної рівноваги виділеного елементарного об'єму матеріалу в зоні пластичної формозміни.

Для визначення силових параметрів при деформації оболонки було визначено напружено-деформований стан металу при її вигині. Розрахункова схема включала в себе початковий стан заготовки, що характеризується товщиною  $S$  і вихідної кривизною  $\chi_0$ , навантажений стан з поточної кривизною  $\chi_1$ . Безпосередньо математичне моделювання полягало в розбитті поперечного перерізу оболонки на елементарні поперечні перерізи з порядковими номерами  $i=1..n_y$  і подальшому визначенні їх геометричних характеристик (рис. 11).

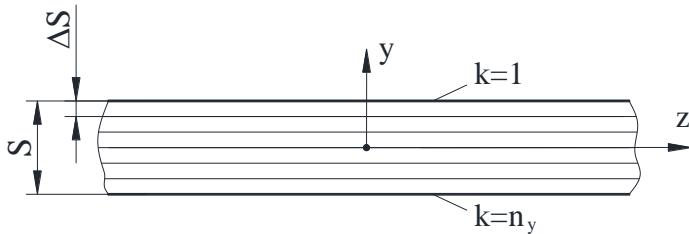


Рисунок 11 – Розрахункова схема до визначення силових характеристик при деформації оболонки

Енергосилові параметри визначали на основі інтегрування показників напруженого стану порошкового сердечника і металеві оболонки.

На рис. 12, а наведена залежність сили плющення від товщини оболонки при різних обтисненнях порошкової стрічки. З аналізу даних розподілів видно, що товщина оболонки суттєво впливає на енергосилові параметри плющення порошкового дроту. При збільшенні товщини оболонки з 0,5 до 2,0 мм сила прокатки збільшується у 3,5 рази. На рис. 12, б показані розрахункові розподіли складових сил прокатки при деформації порошкового сердечника і металеві оболонки. При використанні оболонки товщиною 0,1 мм дані складові практично рівні, а при збільшенні товщини оболонки до 1,0 мм спостерігається перевищення сили деформації оболонки над силою прокатки порошку від 3 до 11 разів залежно від величини обтиснення.

Для перевірки прийнятих припущень при розробці чисельної математичної моделі плющення порошкового дроту була розроблена кінцево-елементна модель даного процесу. При моделюванні була використана розрахункова схема, яка являла собою заготовку, що деформується, і два робочих валка з гладкою бочкою. Заготовку моделювали у вигляді металеві оболонки з властивостями суцільного середовища, заповненої порошковим сердечником. Для моделювання валків були використані тривимірні елементи, що не деформуються. Для моделювання як порошкового сердечника, так і металеві оболонки були використані восьмивузлові лінійні, твердотільні редуковані елементи з контролем руйнування C3D8R.

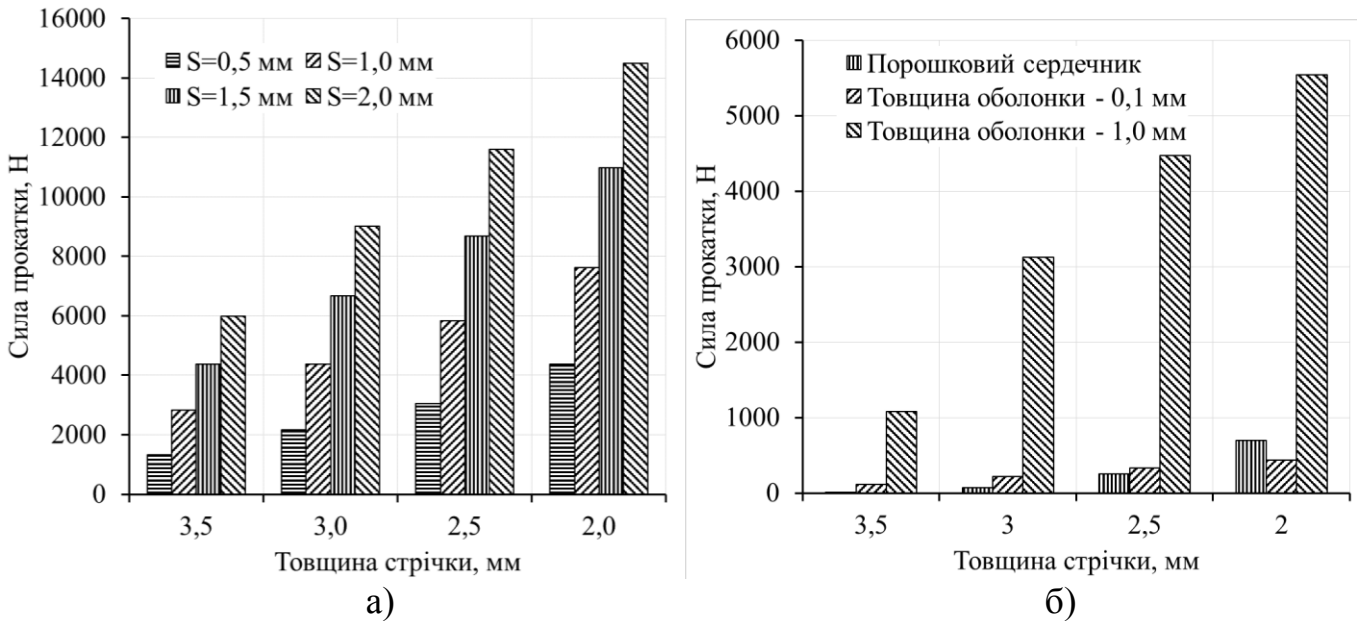


Рисунок 12 – Залежність повної сили прокатки (а) та її складових (б) від товщини оболонки  $S$  і стрічки

Теоретичні дослідження процесу плющення порошкового дроту на основі розробленої кінцево-елементної моделі підтвердили рівномірність розподілу напружень, деформацій і щільності порошку по висоті перерізу заготовки (рис. 13), при цьому нерівномірність деформацій не перевищила 8,2 % (див. рис. 13, а), а щільності – 11,0 % (див. рис. 13, б). З аналізу отриманих результатів встановлено, що найбільш рівномірна деформація порошкового сердечника спостерігається при великих обтисненнях. При малих обтисненнях недеформованими залишаються бічні кромки, що знижує експлуатаційні властивості стрічки. Адекватність моделі перевірена на основі порівняння результатів розрахунку з аналітичною моделлю, при цьому похибка розрахунку сили плющення не перевищила 10 %, що свідчить про достатню точність розрахунку і правомірність прийнятих припущень.

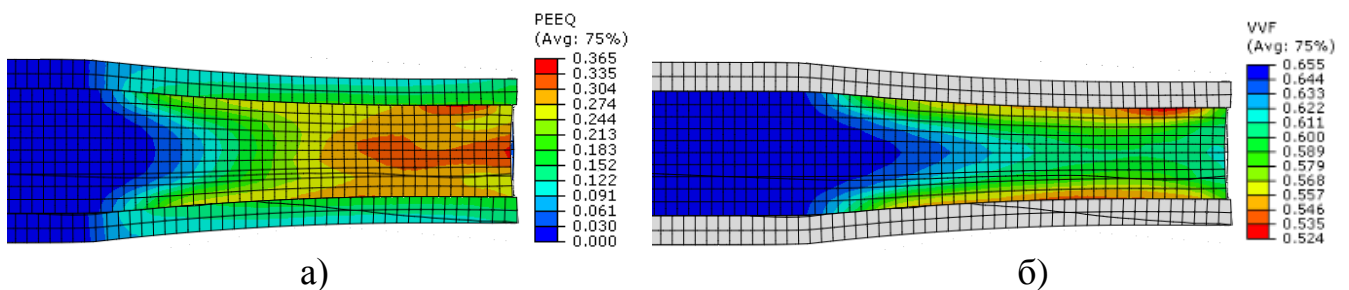


Рисунок 13 – Розподіл еквівалентних деформацій (а) і пористості (б) при плющенні порошкового дроту

**Шостий розділ** присвячений експериментальному дослідженню процесів виробництва довгомірних металопорошкових виробів в оболонці.

Експериментальні дослідження процесу прокатки порошкового сердечника в металевій оболонці були проведені для випадку прокатки порошку на основі міді та оболонки зі сталі 08кп. Загальний вигляд установки наведений на рис. 1, а, 14, а, а зразки після проведення експериментів – на рис. 14, б. У табл. 1 наведені результати досліджень.



Рисунок 14 – Загальний вигляд установки (а) і зразки заготовок (б)

Таблиця 1 – Результати теоретичних і експериментальних досліджень прокатки порошкових стрічок

№ п/п	$h_{п0}$ , мм	$h_{п1}$ , мм	$P_{експер}$ , кН	$P_{теор}$ , кН
1 (прокатка за 1 прохід)	5	3	3,181	3,254
2 (прокатка за 1 прохід)	7,25	6	1,513	1,569
3 (прокатка за 2 проходи)	4,25 → 3	3+2 → 3	14,945	15,452
4 (прокатка за 2 проходи)	4,25 → 3	3+5 → 6	10,604	10,358

За результатами досліджень встановлено, що значення сили прокатки, отримані в ході теоретичних і експериментальних досліджень, збігаються, похибка обчислень не перевищила 10 % зі середньоквадратичним відхиленням 2,76%, що свідчить про достовірність розробленого математичного апарату щодо визначення параметрів напружено-деформованого стану порошкового сердечника в осередку деформації при реалізації процесу прокатки. Також встановлено, що при прокатці за запропонованою технологією (за два проходи з послідовним засипанням компонентів в металеву оболонку), відносна щільність сердечника підвищується при однакових режимах прокатки і зберігається при цьому розмір фракції порошку, що є необхідною умовою для даної технології виробництва.

Експериментальне дослідження процесу волочіння порошкових дротів проводили на спеціальному волочильному однобарабанному стані (див. рис. 1, б). Дріт отримували шляхом формування холоднокатаної сталеві стрічки в формувальних роликах в U-подібний профіль з одночасним засипанням порошку і наступним волочінням отриманої заготовки. Надалі здійснювали волочіння дроту до необхідного діаметру.

Величина обтиснення за прохід для дроту з оболонкою з міді М1 досягала 30...35 %, зі сталі 65Г – 25...30 %. У наступних переходах деформації плавно зменшували. Встановлено, що при волочінні мідного дроту до діаметру 3,5 мм сила волочіння практично не змінюються. Загальну кількість переходів при волочінні порошкового дроту від діаметра першої філь'єри до заданого кінцевого діаметру було ви-

значено в залежності від необхідного запасу міцності, що забезпечило цілісність оболонки при деформуванні. Похибка аналітичної моделі розрахунку сили волочіння не перевищила 12 %, а щільності – 9 %.

Експериментальні дослідження плющення порошкового дроту проводилися в робочій клітці прокатного стану 100Г лабораторії кафедри АММ ДДМА (див. рис. 1, в). Порівняння результатів експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків сили прокатки (рис. 15) показало, що похибка розрахунку не перевищила 16 % зі середньоквадратичним відхиленням 5,39%, що свідчить про достатню адекватність моделі.

Експериментальні дослідження дозволили уточнити можливі діапазони технологічних режимів процесів виробництва довгомірних металопорошкових виробів в оболонці.

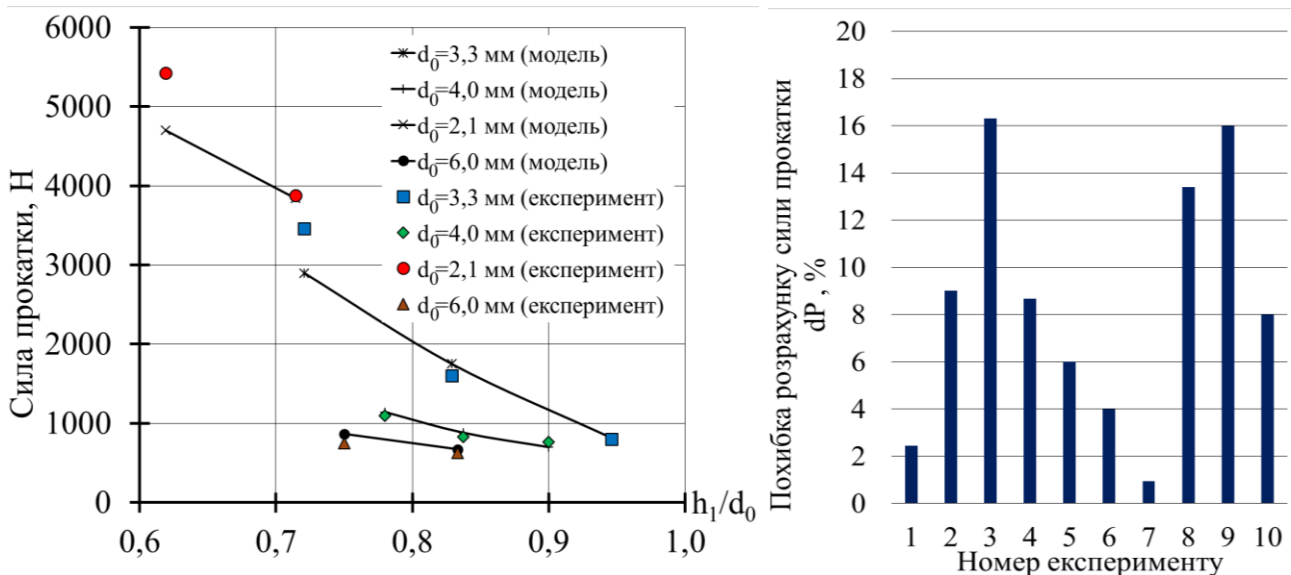


Рисунок 15 – Порівняння результатів експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків процесу плющення порошкового дроту

**Сьомий розділ** присвячений автоматизованому проектуванню технологічних режимів та практичній реалізації процесів виготовлення довгомірних металопорошкових виробів в оболонці.

Кінцевою метою процесу прокатки порошкової стрічки є отримання виробу із заданою щільністю порошкового сердечника і забезпечення необхідної товщини як сердечника, так і оболонки. Для визначення цих показників якості порошкової стрічки були розроблені методики та програмні засоби з автоматизованого проектування технологічних параметрів прокатки. Критеріями проектування були обрані необхідні значення товщини [ $h_1$ ] і відносної щільності [ $\gamma_1$ ], параметрами проектування – вихідна товщина  $h_{0\Sigma}$ , цільовими функціями – розроблені математичні моделі.

При визначенні оптимальних вихідних параметрів був використаний метод цілеспрямованого перебору варіантів. Як приклад на рис. 16 наведені розрахункові залежності, що дозволяють визначати необхідну вихідну товщину порошкового сердечника при заданих кінцевій відносній щільності порошку, товщині порошкової стрічки і товщині оболонки. Аналогічні залежності були отримані для різних матеріалів оболонки і порошкового сердечника, а також для різних вихідних значень щільності порошку.

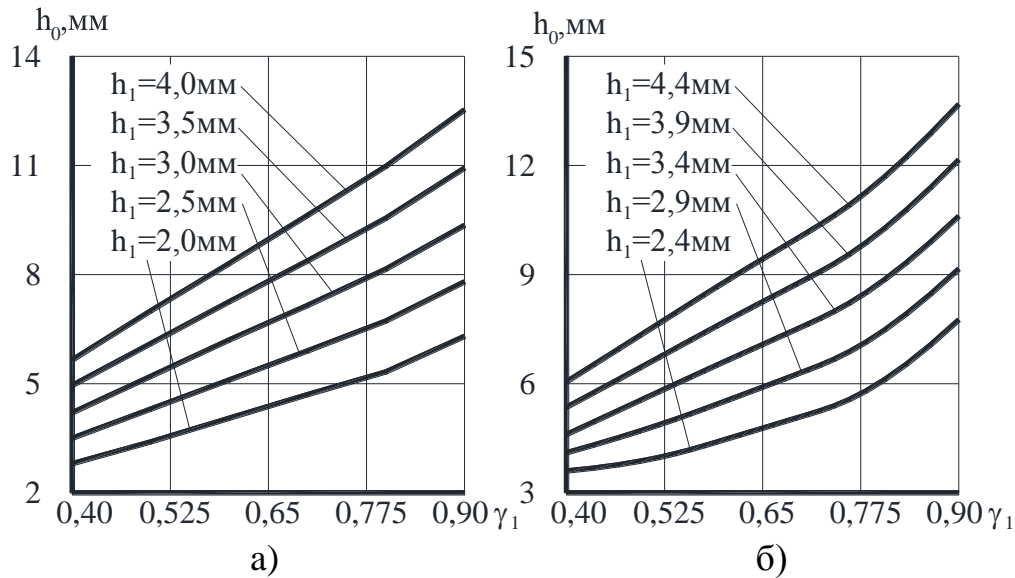


Рисунок 16 – Результати автоматизованого проектування технологічних режимів процесу прокатки порошкової стрічки з товщиною оболонки 0,1 мм (а), 0,3 мм (в)

Подібним чином було виконано автоматизоване проектування технологічних режимів для виробництва порошкового дроту. Одним з основних технологічних показників, що характеризують якісне протікання процесу волочіння, є коефіцієнт запасу міцності, який визначається як відношення межі плинності матеріалу оболонки в перерізі на виході з осередку деформації до поточного значення нормальних напружень в матеріалі оболонки на виході з осередку деформації.

Автоматизоване проектування волочіння по коефіцієнту запасу міцності матеріалу оболонки дозволяє, з одного боку, забезпечити необхідний ступінь надійності протікання технологічного процесу та, з іншого боку, домогтися максимально можливого завантаження устаткування, тобто скоротити час технологічної переробки і тим самим знизити собівартість продукції, що випускається. Крім цього, методика автоматизованого проектування технологічних режимів враховує необхідне значення відносної щільності порошкового сердечника. В основу зазначеного рішення був покладений метод цілеспрямованого перебору варіантів значень початкового діаметру дроту.

На рис. 17 наведені результати автоматизованого проектування волочіння порошкового дроту за умови забезпечення необхідного кінцевого діаметра і щільності порошкового сердечника. Дані результати раціонально використовувати при обтисненні дроту до необхідного діаметра за один прохід. У разі волочіння за кілька проходів доцільно використовувати величину обтиснення за прохід, знайдену оптимізацією за критерієм забезпечення необхідного коефіцієнта запасу міцності, а величину вихідного діаметра заготовки – з умови забезпечення необхідної щільності порошкового сердечника.

В комплексі математичні моделі процесів волочіння і плющення порошкового дроту дозволяють вирішувати ряд завдань оптимізаційного плану, а саме: визначати режими обтиснень по проходах, визначати вихідний діаметр дроту і вихідну щільність сердечника в залежності від необхідних параметрів порошкової стрічки.



Для визначення зазначених показників якості готової металопродукції було виконано автоматизоване проектування технологічних параметрів волочіння і плющення. Критеріями проектування при цьому були обрані необхідні значення товщини  $[h_1]$ , ширини  $[b_1]$ , щільності  $[\gamma_1]$ , параметрами проектування – діаметр вихідного порошкового дроту з неущільненим сердечником  $d_0$  і діаметр порошкового дроту після волочіння  $d_1$ , цільовою функцією – розроблені математичні моделі. Саме рішення включало два цикли, заснованих на ітераційному визначенні  $d_0$  і  $d_1$ .

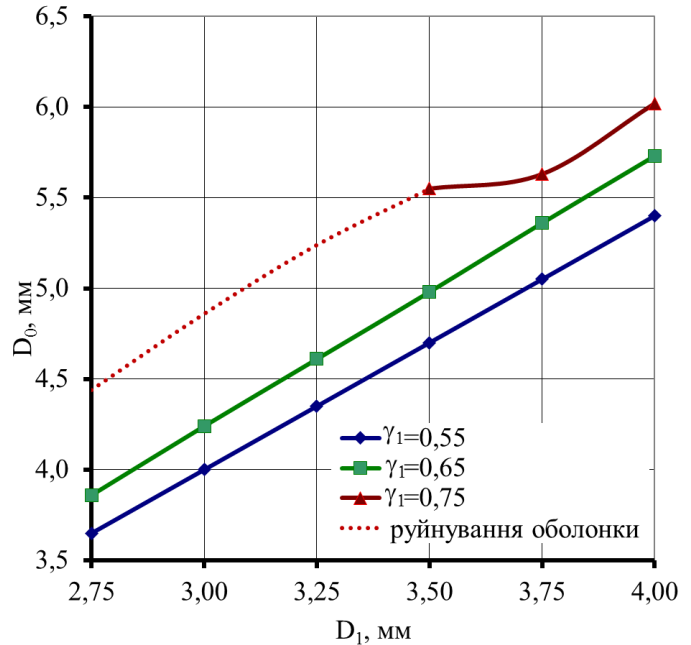


Рисунок 17 – Результати автоматизованого проектування волочіння порошкового дроту

На рис. 18 наведені розрахункові розподіли, що дозволяють визначати вихідний діаметр порошкового дроту в залежності від кінцевої відносної щільності сердечника і ширини плющеної стрічки.

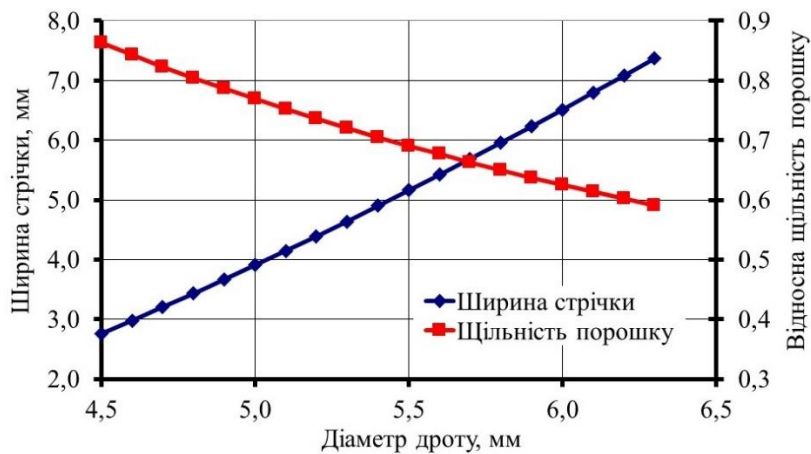
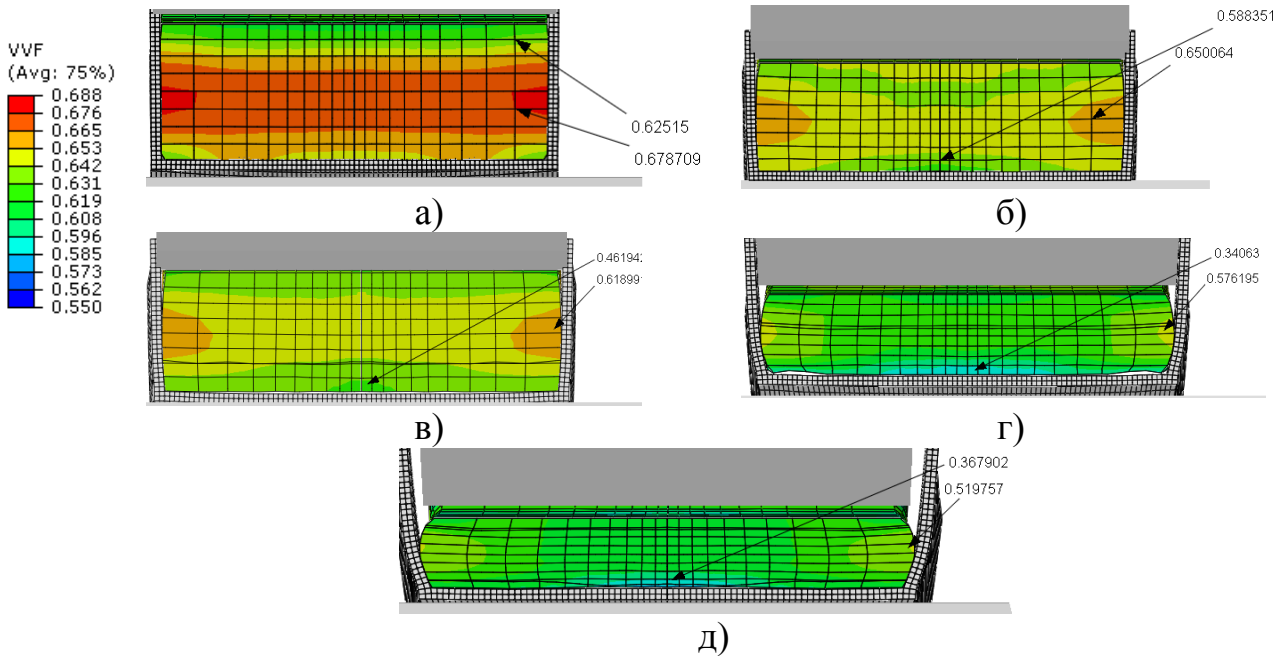


Рисунок 18 – Результати автоматизованого проектування процесів виготовлення порошкової плющеної стрічки

На стабільність зварювально-технологічних властивостей і хімічну однорідність наплавленого металу істотно впливають якісні показники порошкової стрічки, яка використовується. Це робить необхідним вивчення статистичних закономірностей механізмів її формування під час прокатки. Але визначення цих закономірностей експериментальним шляхом вельми трудомістке і вимагає додаткових капіталовкладень. У зв'язку з цим є доцільним використання методів імітаційного моделювання, а саме – на основі розроблених чисельної і кінцево-елементної математичних моделей процесу прокатки порошкової стрічки виконати аналіз розподілу щільності порошкового сердечника по перерізу та довжині заготовки.

В результаті реалізації кінцево-елементної моделі плющення порошкового дроту були отримані поля розподілу пористості порошку по перерізу заготовки на виході з осередку деформації при різних ступенях обтиснень. З аналізу отриманих результатів встановлено, що найбільш рівномірний розподіл пористості спостерігається при обтисненні на рівні 35 %. При більш низьких ступенях деформації відбувається більш інтенсивне ущільнення сердечника в приконтактних областях, при більш високих – менше ущільненими залишаються бічні кромки (рис. 19).



а – 12,5 %; б – 25 %; в – 37,5 %; г – 50 %; д – 62,5 %

Рисунок 19 – Розподіл пористості порошкового сердечника по перерізу заготовки на виході з осередку деформації при різних обтисненнях

Для визначення впливу вихідних параметрів на величину відхилення щільності порошкового сердечника по довжині заготовки був використаний метод Монте-Карло, який дозволяє при порівняно невеликих кількостях розрахунків змоделювати реальний процес. При імітаційному моделюванні були використані наступні технологічні параметри процесу, що варіюються: початкова товщина порошкового сердечника  $h_0$ ; товщина оболонки  $h_{об}$ ; вихідна відносна щільність порошкового сердечника  $\gamma_0$ . Характер зміни перерахованих вище вихідних параметрів, згідно зі статистичними дослідженнями, з достатньою точністю описується нормальним законом розподілу, при цьому коефіцієнти варіації параметрів  $h_0$ ,  $h_{об}$ ,  $\gamma_0$  складають  $v_i=0,03$ . Крім технологічних параметрів були враховані модуль жорсткості кліті  $G_{кл}$  і радіальне биття робочих валків  $\Delta R$ . Після накопичення масивів випадково заданих вихідних параметрів процесу і відповідних їм результуючих параметрів були визначені основні статистичні характеристики процесу прокатки порошкової стрічки.

Результати розрахунку відносної щільності порошкового сердечника  $\gamma_1$  по перерізу та довжині порошкової стрічки наведені на рис. 20. З наведених розподілів можна зробити наступні висновки: найбільш рівномірний розподіл щільності порошкового сердечника спостерігається при обтисненнях 25 ... 35 %, при цьому коефіцієнт варіації не

перевищує регламентованих 3,5 %; на величину коефіцієнта варіації кінцевої відносної щільності сердечника істотно впливає величина коефіцієнта варіації його вихідної товщини, також суттєво, але в меншій мірі на даний коефіцієнт впливає варіація вихідної відносної щільності.

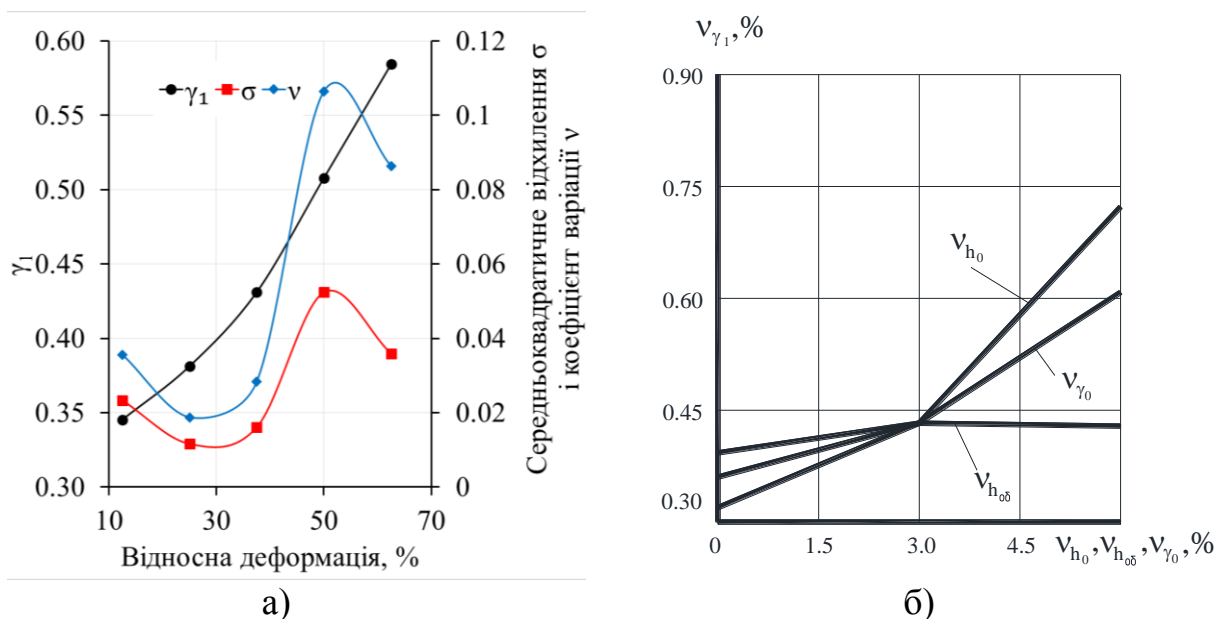


Рисунок 20 – Розрахункові розподіли відносної щільності порошкового сердечника по перерізу (а) і довжині (б) порошкової стрічки

На основі дослідження процесів виготовлення порошкових стрічок запропонована к використанню технологія, яка полягає в прокатці порошкового шару, прокатці двошарової порошкової композиції та прокатці в закритій оболонці замкового типу. Надано рекомендації з вибору насипних товщин порошкових шарів, рівня обтиснень, вибору матеріалу і товщини оболонки в залежності від необхідних щільностей шарів та геометричних розмірів перерізу стрічки. Дана технологія дозволяє отримати рівномірний розподіл щільності в перерізі, а також застосовувати різні матеріали сердечника.

На основі дослідження процесів волочіння та плющення порошкових дротів надані технологічні режими деформації, рекомендації з вибору діаметру заготовки, матеріалу і товщини оболонки. Рекомендовані технологічні переходи волочіння з умови забезпечення цілісності оболонки, а також величини обтиснень при плющенні для забезпечення необхідної ширини стрічки та щільності порошкового сердечника.

Запропоновано технологічні прийоми, склад обладнання та його конструктивне виконання, що спрямовані на розширення сортаменту і підвищення рівня споживчих властивостей металопродукції при одночасному забезпеченні економії матеріальних ресурсів на стадіях як створення, так і освоєння технологій і обладнання для виготовлення довгомірних металопорошкових виробів в металевій оболонці.

Результати дисертаційної роботи у вигляді програмних продуктів, технічних рішень і практичних рекомендацій використані на ПАТ «Науково-дослідний і проектно-технологічний інститут машинобудування» (м. Краматорськ), ПрАТ «Фінпрофіль» (м. Харків), ПрАТ «Краматорський завод металевих конструкцій», ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ) і в Донбаській державній машинобудівній академії.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна науково-технічна проблема підвищення техніко-економічних параметрів процесів виготовлення довгомірних металопорошкових виробів в металевій оболонці на основі розвитку наукових основ процесів спільної деформації порошкових і монолітних матеріалів, а також розробки рекомендацій щодо вдосконалення та автоматизованого проектування технологічних режимів роботи та конструктивних параметрів механічного обладнання прокатних і волочильних станів для виробництва порошкових стрічок і дроту.

1 Подальше підвищення ефективності промислової реалізації процесів виготовлення довгомірних металопорошкових виробів вимагає всебічного дослідження впливу металевої оболонки на напружено-деформований стан при прокатці, волочінні та плющенні, розробки комплексу математичних моделей, що дозволяють визначати енергосилові параметри процесів, прогнозувати основні показники якості готової продукції, враховувати вплив на них випадкових факторів, а також здійснювати автоматизоване проектування технологічних режимів і конструктивних параметрів обладнання для їх виробництва.

2 Уточнення умови пластичності порошкових матеріалів, а саме взаємозв'язку між напруженнями, щільністю і деформаціями для випадків напруженого стану, котрий виникає при прокатці і волочінні дозволила підвищити точність розрахунку напружено-деформованого стану при реалізації даних процесів.

3 На основі теоретичного аналізу умов прокатки порошкових матеріалів у відкритих металевих оболонках з використанням методу кінцевих різниць встановлено вплив форми, матеріалу і товщини оболонки на геометричні характеристики осередку деформації. Встановлено, що зі збільшенням жорсткості оболонки зменшується деформація порошкового сердечника, зі збільшенням коефіцієнта асиметрії процесу до 1,15 зменшується зона пластичної деформації на 10 % при одночасному підвищенні щільності порошку на 5 %, при прокатці двошарових порошкових композицій відбувається деформація тільки насипного шару порошку, зі збільшенням обтиснення в перерізах, близьких до виходу з осередку деформації, відбувається деформація також і попередньо ущільненого шару.

4 На основі теоретичного аналізу умов прокатки порошкових матеріалів в закритих металевих оболонках замкового типу з використанням методу кінцевих різниць встановлено вплив товщини і матеріалу оболонки на основі визначення зон її прогину і прилягання та, відповідно, товщини порошкового шару на вході в осередок деформації. Встановлено, що підвищення ступеня обтиснення до 60 % призводить до пластичної деформації оболонки і порушення її форми.

5 На основі теоретичного аналізу умов волочіння порошкових матеріалів в металевій оболонці з використанням методів кінцевих різниць і кінцевих елементів встановлено вплив величини обтиснення і рівня натяжін на стоншення стінки оболонки. При збільшенні ступеня деформації порошкового дроту мінімальне значення переднього натяжіння зростає, до того ж при обтисненнях вище 30 % рівень цих сил практично не змінюється, також при цьому спостерігається зниження коефіцієнта запасу міцності для матеріалу оболонки, що може призводити до її руйнування. Зміна

відносної щільності сердечника в залежності від ступеня деформації дроту носить нелінійний характер, при цьому інтенсивність збільшення щільності при обтисненнях більше 30 % різко знижується, що обумовлено зниженням деформації порошкової складової композиції.

6 На основі теоретичного аналізу умов плющення порошкових матеріалів в металевій оболонці з використанням методів кінцевих різниць і кінцевих елементів встановлено вплив товщини і матеріалу оболонки порошкової стрічки на енергосилові параметри процесу. Встановлено, що складова сили від деформації оболонки може бути порівнянна з силою деформації порошкового сердечника, а також перевищувати її в кілька разів в залежності від величини обтиснення, матеріалу та товщини оболонки, тобто параметри оболонки вагомо впливають на величину енергосилових параметрів процесу, що треба враховувати при проектуванні робочих клітей та вибору потужності приводів. Встановлено що найбільш рівномірна деформація порошкового сердечника спостерігається при великих обтисненнях, при менших за 25 % – недеформованими залишаються бічні кромки заготовки, що знижує їх експлуатаційні властивості.

7 На основі експериментальних досліджень процесів виготовлення довгомірних металопорошкових виробів в оболонці встановлено адекватність розроблених математичних моделей. За результатами експериментальних досліджень прокатки порошкових стрічок встановлено, що значення сили прокатки, отримані в ході теоретичних і експериментальних досліджень, збігаються, похибка обчислень не перевищила 10 % зі середньоквадратичним відхиленням 2,76%. Також встановлено, що при прокатці за запропонованою технологією (за два проходи з послідовним засипанням компонентів в металеву оболонку), відносна щільність сердечника підвищується при однакових режимах прокатки і зберігається при цьому розмір фракції порошку, що є необхідною умовою для даної технології виробництва. Експериментальне дослідження волочіння порошкових дротів показало, що похибка розрахунку сили волочіння не перевищила 12 %, а щільності – 9 %. Експериментальні дослідження плющення порошкового дроту показали, що похибка розрахунку сили прокатки склала 1,0 ... 16,3% зі середньоквадратичним відхиленням 5,39%, що свідчить про достатню адекватність моделі.

8 На основі аналізу результатів чисельної реалізації розроблених математичних моделей процесів виготовлення довгомірних виробів з металопорошків в оболонці досліджено вплив і сформульовані рекомендації щодо вибору вихідних технологічних і конструктивних параметрів, що забезпечують необхідну щільність порошкового сердечника і геометричних характеристик готової металопродукції. Встановлено, що при прокатці порошкових стрічок максимальне обтиснення за прохід становить 75%, при якому відносна щільність порошкового сердечника досягає одиниці; при збільшенні відношення товщини насипного шару до товщини ущільненого до 0,4 кінцева товщина ущільненого шару зменшується, причому практично лінійно.

9 На основі відповідних детермінованих рішень і методу Монте-Карло розроблено комплекс імітаційних математичних моделей процесів виготовлення довгомірних виробів з металопорошків в оболонці, що дозволяють на теоретичному рівні прогнозувати імовірнісний характер зміни всіх результуючих параметрів і, як наслідок, прогнозувати точність геометричних характеристик і ступінь стабільності щільності порошкового матеріалу в залежності від вихідних параметрів заготовки. Визначено кількісно діапазони зміни відповідних коефіцієнтів варіації геометричних розмірів

готового виробу і щільності порошкового сердечника. Встановлено, що найбільш вагомим фактором, що впливає на різнотовщинність прокату та розподіл щільності порошкового сердечника є радіальне биття валків; варіація вихідних параметрів процесу прокатки має найбільший вплив на силу прокатки (до 10%) і кінцеву товщину порошкового сердечника (до 5%), в той час як на кінцеву відносну щільність ця варіація має незначний вплив; найбільш рівномірний розподіл пористості спостерігається при обтисненні на рівні 35%. На основі аналізу реалізації кінцево-елементної моделі прокатки порошкових стрічок в металевій оболонці встановлено, що найбільш рівномірний розподіл щільності порошкового сердечника регламентований стандартами спостерігається при обтисненні на рівні 25 ... 35%, при цьому для порошкових стрічок шириною 10 ... 15 мм рекомендована величина обтиснення не повинна перевищувати 25%, для стрічок шириною 20 мм – 35% при радіусі валків більше 50 мм ( $L/h_{cp} > 1,9$ ).

10 На основі автоматизованого проектування технологічних режимів виготовлення довгомірних виробів з металопорошків в оболонці сформульовані і вирішені програмно задачі забезпечення необхідної щільності порошкового матеріалу і необхідних геометричних характеристик готового виробу в залежності від вихідної щільності порошку, величини обтиснення, матеріалу, форми і товщини оболонки, що дозволило визначити раціональні режими деформації, кількість переходів і здійснити оптимальний вибір заготовки.

11 Результати дисертаційної роботи у вигляді програмних продуктів, технічних рішень і практичних рекомендацій використані на ПАТ «Науково-дослідний і проектно-технологічний інститут машинобудування» (м. Краматорськ), ПрАТ «Фінпрофіль» (м. Харків), ПрАТ «Краматорський завод металевих конструкцій» (м. Краматорськ), ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ) і в Донбаській державній машинобудівній академії. Економічний ефект за рахунок зниження трудомісткості проектно-конструкторських і проектно-технологічних робіт склав 2653 тис. гривень.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1 Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 244 с. – ISBN 978-966-379-389-4.

2 Численное математическое моделирование процессов плакирования, прокатки и формовки композиционных листовых материалов : монография / А. В. Сатонин, В. А. Луценко, Э. П. Грибков, А. А. Сатонин. – Краматорск : ДГМА, 2012. – 228 с. – ISBN 978-966-379-584-3.

3 Численное математическое моделирование процессов прокатки порошковых лент: монография / Э. П. Грибков, В. Д. Кассов, В. А. Данилюк, Е. В. Бережная. – Краматорск : ДГМА, 2013. – 156 с. – ISBN 978-966-379-652-9.

4 Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков // Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ, 2002. – Т. 5. – С. 137–142.

5 Кассов В. Д. Математическая модель процесса прокатки порошковой ленты с учетом пластической деформации оболочки / В. Д. Кассов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков // Зб. наук. праць Українського державного морського технічного університету. – Миколаїв : УДМУ, 2002. – № 7. – С. 38–46.

6 Кассов В. Д. Имитационное математическое моделирование основных показателей качества порошковой ленты для наплавки / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // Зб. наук. праць Кіровоградського державного технічного університету. – Кіровоград : КДТУ, 2003. – Вип. 12. – С. 167–172.

7 Грибков Э. П. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества при прокатке двухслойных порошковых композиций / Э. П. Грибков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 604–609.

8 Кассов В. Д. Влияние формы частиц сердечника на качество поверхности порошковой ленты / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 610–613.

9 Чигарев В. В. Математическая модель изготовления порошковой проволоки для ремонтной сварки энергетических установок / В. В. Чигарев, И. В. Серов, Э. П. Грибков // Вісник двигунобудування. – 2004. – № 3. – С. 47–50.

10 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при прессовании осесимметричных заготовок / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков, А. Г. Чижигов, А. В. Периг // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 460–465.

11 Шевченко А. В. Изготовление порошковой плющенко для восстановительной наплавки / А. В. Шевченко, Э. П. Грибков // Вісник двигунобудування. – 2006. – № 4. – С. 13–15.

12 Гринь А. Г. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке прессованной порошковой проволоки / А. Г. Гринь, Э. П. Грибков, А. В. Свиридов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 311–316.

13 Гринь А. Г. Автоматизированное проектирование технологических режимов изготовления прессованной порошковой проволоки / А. Г. Гринь, Э. П. Грибков, А. В. Свиридов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ : СХУ ім. В. Даля, 2008. – № 8 (126). – С. 49–56.

14 Грибков Э. П. Оптимизация технологических режимов изготовления порошковой плющенко / Э. П. Грибков, И. В. Шевченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ : СХУ ім. В. Даля, 2008. – № 8 (126). – С. 123–127.

15 Кассов В. Д. Исследование процесса изготовления порошковой ленты / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков, С. В. Малыгина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2 (21). – С. 315–318.

16 Математическая модель процесса прокатки порошковой ленты с учетом пластической деформации оболочки / В. Д. Кассов, С. В. Малыгина, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2 (27). – С. 47–52.

17 Мироненко Е. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при реализации процесса прокатки двухслойных порошковых лент / Е. В. Мироненко, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 79–83.

18 Математическое моделирование напряжений и деформации при реализации процесса плющения порошковой проволоки для электроконтактной наплавки / Э. П. Грибков, Е. В. Бережная, В. А. Данилюк, К. Д. Махмудов // *Обработка материалов давлением*: сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 61–64.

19 Методика и оборудование для экспериментального определения исходных данных на проектирование процессов обработки давлением дискретных сред / Э. П. Грибков, Е. В. Бережная, В. А. Данилюк, А. С. Селедцов // *Обработка материалов давлением*. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 137–141.

20 Грибков Э. П. Исследование локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при уплотнении порошкового сердечника в металлической оболочке / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 53–59.

21 Грибков Э. П. Имитационное математическое моделирование основных показателей качества порошковой электродной ленты / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк, Е. В. Бережная // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2012. – № 13 (184). – С. 74–79.

22 Грибков Э. П. Влияние формы оболочки на геометрические и энергосиловые параметры при прокатке порошковой электродной ленты / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 226–233.

23 Грибков Э. П. Математическое моделирование процессов обработки давлением порошковых лент и проволоки / Э. П. Грибков // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 25–30.

24 Грибков Э. П. Математическое моделирование напряжений и деформаций при мундштучном формовании порошковой проволоки / Э. П. Грибков // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2013. – № 1 (14). – С. 37–44.

25 Грибков Э. П. Экспериментальное исследование влияния толщины оболочки на параметры процесса прокатки порошковых лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2013. – № 1 (14). – С. 45–51.

26 Клименко Г. П. Совершенствование технологии и методов расчета процесса прокатки двухслойных порошковых лент / Г. П. Клименко, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – № 2(31). – С. 123–128.

27 Грибков Э. П. Экспериментальные исследования технологии производства порошковых лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"* : сб. науч. тр. Темат. вып. : Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2013. – № 43 (1016). – С. 56–60.



28 Грибков Э. П. Численное математическое моделирование процессов изготовления порошковой проволоки / Э. П. Грибков // Пластическая деформация металлов : сб. научн. тр. В 2 т. Т. 1. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – С. 164–168.

29 Грибков Э. П. Автоматизированное проектирование технологических режимов прокатки композиций, включающих порошковые материалы / Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 142–147.

30 Грибков Э. П. Математическое моделирование процесса плющения порошковой проволоки / Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 96–102.

31 Грибков Э. П. Конечно-элементное моделирование плющения порошковой проволоки / Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 63–66.

32 Chigarev V. V. Investigation of the process of drawing flux-cored wire for welding copper to steel / V. V. Chigarev, P. A. Gavrish, E. P. Gribkov // Welding International, Vol. 26, Issue 9. – 2012. – 718–722 pp. – DOI:10.1080/09507116.2011.653152.

33 Chigarev V. V. Improving the technological conditions of drawing flux-cored welding wires / V. V. Chigarev, P. A. Gavrish, E. P. Gribkov // Welding International, Vol. 28, Issue 1. – 2014. – 59–61 pp. DOI: 10.1080/09507116.2013.796655.

34 Eduard P. Gribkov. Research into the process of producing powder tapes / Eduard P. Gribkov, Alexander V. Perig, Viktoriya A. Danilyuk // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 77. – 2015. – 1087–1104 pp. DOI: 10.1007/s00170-014-6496-x.

35 A mathematical model of the process of rolling flux-cored tapes / V. V. Chigarev, A. G. Belik, E. P. Gribkov, P. A. Gavrish // Welding International. – Vol. 29, Issue 1. – 2015. – 70–74 pp. DOI:10.1080/09507116.2014.888192.

36 Грибков Э. П. Исследование процесса прокатки порошковых лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – № 4. – С. 34–41.

37 Gribkov E. P. Mathematical modelling stress-strain behavior at rolling of the compositions including powder materials / E. P. Gribkov, V. A. Danilyuk // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. – № 5 (45). – 42–46 pp.

38 Грибков Э. П. Автоматизированное проектирование технологических режимов прокатки порошковой ленты / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Актуальные проблемы в машиностроении : материалы первой международной научно-практической конференции ; под ред. В. Ю. Скибы. – Новосибирск : НГТУ, 2014. – С. 56–62.

39-52 Патенти України на корисну модель: № 60574А; № 10150А; № 27572; № 28797; № 35049; № 59317; № 75465; № 76181; № 76207; № 84241; № 84906; № 85986; № 93897; № 98710.

53 Кассов В. Д. Напряженно-деформированное состояние при волочении порошковой проволоки / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков, В. А. Дарченко // Сб. тезисов докладов IX региональной научно-технической конференции. В 2 т. Т. 2. – Мариуполь : ПГТУ, 2002. – С. 69–70.

54 Кассов В. Д. Влияние режимов прокатки порошковой ленты на наплавку композиционного сплава типа «релит-мельхиор» / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // Зб. наук. праць ІХ Міжнар. наук.-техн. конф. «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів». – Запоріжжя : ЗНТУ, 2003. – С. 49–51.

55 Грибков Э. П. Моделирование процесса изготовления сварочной порошковой проволоки / Э. П. Грибков, И. В. Серов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції; під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 22.

56 Чигарев В. В. Технологические особенности наплавки порошковой лентой / В. В. Чигарев, Э. П. Грибков, Е. В. Кассова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали п'ятої Міжнародної науково-технічної конференції 4-7 червня 2007 року. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 118.

57 Грибков Э. П. Математическое моделирование процессов изготовления порошковых лент и проволоки / Э. П. Грибков // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції, Запоріжжя, 20–23 листопада 2007 р. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2007. – С. 29–30.

58 Грибков Э. П. Влияние режимов производства порошковой ленты на формирование наплавленного слоя / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк, В. Д. Кассов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. – Краматорськ, 2011. – С. 39.

59 Грибков Э. П. Производство порошковых электродных лент методами прокатки / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Машини та пластична деформація металів : тези доп. ІІ Міжнар. наук.-техн. конф., (Запоріжжя, 19–22 листоп. 2012 р.) ; відп. ред. В. В. Чигиринский. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – С. 50–52.

60 Грибков Э. П. Математическое моделирование процессов изготовления порошковых лент и проволоки / Э. П. Грибков // ІХ Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», 31 мая – 7 июня 2013 г. (г. Варна, Болгария). В 3 т. Т. 3. International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. – 2013. – С. 40–41.

61 Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния порошковых материалов при прокатке / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Научно-технический прогресс в металлургии – 2012 : матер. междунар. науч. семинара (12 декабря 2012 г.) ; отв. ред. Э. А. Гарбер, З. К. Кабаков. – Череповец : ЧГУ, 2013. – С. 97–106.

62 Грибков Э. П. Способ производства порошковых электродных лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии : матер. І Межд. научн.-техн. конференции (2–4 октября 2013 г.) ; отв. ред. А. Л. Кузьминов. – Череповец : ЧГУ, 2013. – С. 68–70.

63 Грибков Э. П. Экспериментальные исследования процесса прокатки порошковых лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // X International Conference “Strategy of Quality in Industry and Education”, June 6-13 2014, Varna, Bulgaria. International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special Number. – pp. 50–53.

64 Грибков Э. П. Математическое моделирование процессов изготовления порошковых лент и проволоки / Э. П. Грибков // Материали VI Международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии», 19-21 ноября, Харьков, 2014.– С. 30–31.

**Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:**

[1] – розділ 5 «Чисельне математичне моделювання напружено-деформованого стану при реалізації різних технологічних схем процесу повздовжньої прокатки відносно тонких листів та штаб»; [2] – розділ 4 «Математичне моделювання напружено-деформованого стану і основних показників якості при реалізації процесів прокатки листових композицій на основі порошкових матеріалів»; [3] – математичне моделювання та аналіз впливу технологічних параметрів на напружено-деформований стан (НДС) матеріалу при прокатці порошкових стрічок; [4, 61] – аналіз впливу технологічних параметрів на розподіл локальних та інтегральних характеристик НДС при прокатці порошкових стрічок; [5, 16, 54] – аналіз впливу технологічних режимів на пластичну деформацію оболонки порошкової стрічки; [6, 21, 35, 56] – розробка та чисельна реалізація імітаційної математичної моделі основних показників якості при виробництві порошкових стрічок в оболонці закритого типу; [8] – математичне моделювання поведінки твердих часток компонент порошкового сердечника при прокатці порошкових стрічок; [9] – розробка математичної моделі НДС порошкового сердечника при волочінні порошкового дроту; [10] – розробка та чисельна реалізація математичної моделі НДС при пресуванні вісесиметричних порошкових заготовок; [11, 18] – розробка та чисельна реалізація математичної моделі НДС порошкового сердечника при плющенні порошкового дроту; [12] – розробка та чисельна реалізація математичної моделі НДС порошкового сердечника при прокатці порошкового дроту; [13] – розробка алгоритму та чисельна реалізація програмних засобів з автоматизованого проектування технологічних режимів при прокатці порошкового дроту; [14] – формулювання критеріїв оптимізації, розробка алгоритмів з розрахунку режимів плющення порошкового дроту; [15] – аналіз впливу технологічних параметрів на показники порошкової стрічки; [17, 26] – розробка та чисельна реалізація математичної моделі НДС при прокатці двохшарової порошкової стрічки; [19] – постановка та планування експериментальних досліджень для визначення фізико-механічних властивостей дискретних середовищ; [20, 22] – розробка математичної моделі НДС з врахуванням впливу форми та властивостей матеріалу оболонки при прокатці порошкових стрічок; [25, 27, 63] – постановка та планування експериментальних досліджень для визначення впливу форми та властивостей матеріалу оболонки при прокатці порошкових стрічок; [32, 55] – розробка та чисельна реалізація математичної моделі НДС порошкового сердечника та металевої оболонки при волочінні порошкового дроту; [33] – розробка алгоритму та чисельна реалізація програмних засобів з автоматизованого проектування технологічних режимів при волочінні порошкового дроту; [34] – розробка та чисельна реалізація математичної моделі НДС, постановка та планування експериментальних досліджень процесу прокатки порошкової стрічки в металевій оболонці; [36, 37] – розробка математичної моделі та аналіз впливу форми та матеріалу металевої оболонки на НДС і основні показники порошкової стрічки в металевій оболонці; [38, 58, 59] – розробка та чисельна реалізація алгоритму з автоматизованого проектування технологічних режимів прокатки порошкової стрічки в металевій оболонці; [62] – аналіз впливу способу виробництва порошкової стрічки на її основні показники якості.

## АНОТАЦІЯ

Грибков Е. П. Развитие научных основ и усовершенствование оборудования та технологий деформирования длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке. – На правах рукописи.

Диссертация на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском. – Донбаська державна машинобудівна академія МОН України, Краматорськ, 2016.

Диссертация присвячена розвитку методів автоматизованого розрахунку і проектування, а також розробці практичних рекомендацій з вдосконалення технологій і обладнання процесів виготовлення довгомірних металлопорошковых виробів в металевій оболонці.

У роботі розроблені чисельні математичні моделі процесів виготовлення порошковых стрічок, волочіння і плющення порошкового дроту. Моделі були засновані на чисельному рекурентному вирішенні умови статичної рівноваги виділеного елементарного об'єму осередку деформації. Відмінною особливістю моделей є врахування наявності та ступеня впливу металевої оболонки на геометрію осередку деформації. Прийняті допущення при чисельному математичному моделюванні були підтверджені результатами кінцево-елементного моделювання. Адекватність розроблених математичних моделей була підтверджена експериментальними дослідженнями.

На основі розроблених математичних моделей було виконано автоматизоване проектування технологічних режимів процесів виготовлення довгомірних металлопорошковых виробів в металевій оболонці. Запропоновано науково-обґрунтовані технологічні та конструктивні рекомендації, спрямовані на розширення сортаменту, підвищення якості та зниження собівартості продукції.

Ключові слова: прокатка, волочіння, плющення, напружено-деформований стан, деформації, кінцево-різницева модель, кінцево-елементна модель, порошкова стрічка, порошковий дріт, робоча кліть.

## АННОТАЦИЯ

Грибков Э. П. Развитие научных основ и совершенствование оборудования и технологий деформирования длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением. – Донбасская государственная машиностроительная академия МОН Украины, Краматорск, 2016.

Диссертация посвящена развитию методов автоматизированного расчета и проектирования, а также разработке практических рекомендаций по совершенствованию технологий и оборудования процессов изготовления длинномерных металлопорошковых изделий в металлической оболочке.

В работе представлены численные математические модели процессов изготовления длинномерных металлопорошковых изделий в металлической оболочке. В частности, проведены исследования прокатки порошковых лент (однослойных, двухслойных, в закрытой оболочке), волочения и плющения порошковой проволоки.

Математические модели были основаны на численном рекуррентном решении условия статического равновесия выделенного элементарного объема очага деформации. Отличительной особенностью моделей является учет наличия и степени влияния металлической оболочки на геометрию очага деформации. Это позволило уточнить уровни энергосиловых параметров процесса и степень деформации порошкового сердечника, которая влияет на получаемую плотность. Также в моделях учтена упруго-пластическая деформация металлической оболочки, что позволило уточнить уровни энергосиловых параметров процесса и решить задачи технологического плана.

Принятые допущения при численном математическом моделировании были подтверждены результатами конечно-элементного моделирования. Адекватность разработанных математических моделей была подтверждена экспериментальными исследованиями. Погрешность расчета находится на допустимом уровне.

На основе разработанных математических моделей было выполнено автоматизированное проектирование технологических режимов процессов изготовления длинномерных металлопорошковых изделий в металлической оболочке, позволяющее решить задачи по выбору оптимальных исходных параметров и режимов обработки.

На основе исследования процессов изготовления порошковых лент предложена к использованию технология, которая заключается в прокатке предварительного порошкового слоя, прокатке двухслойной порошковой композиции и прокатке в закрытой оболочке замкового типа. Даны рекомендации по выбору насыпных толщин порошковых слоев, уровня обжатий, выбора материала и толщины оболочки в зависимости от требуемых плотностей слоев и геометрических размеров сечения ленты. Данная технология позволяет получить равномерное распределение плотности в сечении, а также применять различные материалы сердечника.

На основе исследования процессов волочения и плющения порошковых проволок предоставлены технологические режимы деформации, рекомендации по выбору диаметра заготовки, материала и толщины оболочки. Представлены рекомендованные технологические переходы волочения из условия обеспечения целостности оболочки, а также величины обжатий при плющении для обеспечения необходимой ширины ленты и плотности порошкового сердечника.

Предложены технологические приемы, состав оборудования и его конструктивное исполнение направлены на расширение сортамента и повышение уровня потребительских свойств металлопродукции при одновременном обеспечении экономии материальных ресурсов на стадиях как создания, так и освоения технологий и оборудования для изготовления длинномерных металлопорошковых изделий в металлической оболочке.

Результаты диссертационной работы в виде программных продуктов, технических решений и практических рекомендаций использованы на ПАО «Научно-исследовательский и проектно-технологический институт машиностроения» (г. Краматорск), ЧАО «Финпрофиль» (г. Харьков), ЧАО «Краматорский завод металлических конструкций» (г. Краматорск), ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (г. Краматорск) и в Донбасской государственной машиностроительной академии. Экономический эффект за счет снижения трудоемкости проектно-конструкторских и проектно-технологических работ составил 2653 тыс. гривен.

Ключевые слова: прокатка, волочение, плющение, напряженно-деформированное состояние, деформации, конечно-разностная модель, конечно-элементная модель, порошковая лента, порошковая проволока, рабочая клеть.

### ABSTRACT

Gribkov E.P. Development of scientific bases and improvement of equipment and technologies of deformation products of metal-powder core in the shell. – Manuscript.

Thesis for degree of doctor of technical sciences, specialty 05.03.05 "Processes and machines for pressure treatment." – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2016.

The thesis is devoted to developing methods for automated analysis and design, and development of practical recommendations to improve technology and equipment production processes of powder electrodes.

The work developed numerical mathematical models of processes of manufacturing powder tapes, drawing and rolling powder wire. Models are based on the numerical solution of recurrent condition selected static balance volume element deformation. A distinctive feature of the model is available and taking into account the impact the metal shell at center deformation geometry. Adopted at assumptions numerical mathematical modeling were confirmed by the results of finite-element modeling. The adequacy of the developed mathematical models was confirmed by experimental research.

Based on the developed mathematical models was performed automated designing of technological modes of powder electrodes manufacturing. A scientific and reasonable technological and constructive recommendations aimed at expanding the assortment, quality improvement and reducing the cost of powder electrodes.

Keywords: rolling, drawing, flattening, stress-strain state, finite-difference model, finite-element model, powder tape, powder wire, working stand.

Підп. до друку 24.10.2016. Формат 60 x 84/16.  
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 1,9.  
Тираж 100 прим. Зам. № 99.

Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру  
серія ДК №1633 від 24.12.2003.