

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО**

ШАПОВАЛ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 669.276

**РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ І ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕНСИВНОЇ ОБРОБКИ
ТУГОПЛАВКИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Кременчук – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор,
Драгобецький Володимир В'ячеславович,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського
Міністерства освіти і науки України
(м. Кременчук), завідувач кафедри
технології машинобудування.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Калюжний Володимир Леонідович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Міністерства освіти і науки України (м. Київ),
професор кафедри технології виробництва
літальних апаратів;

доктор технічних наук, професор
Грушко Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет
Міністерства освіти і науки України
(м. Вінниця), в.о. завідувача кафедри опору
матеріалів та прикладної механіки

доктор технічних наук, доцент,
Грибков Едуард Петрович,
Донбаська державна машинобудівна академія
Міністерства освіти і науки України
(м. Краматорськ), завідувач кафедри
автоматизованих металургійних машин та
обладнання

Захист відбудеться «14» травня 2021 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.06 у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського за адресою: вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського за адресою: вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600.

Автореферат розісланий «12» квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 45.052.06, д.т.н., проф.



В. М. Чебенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток технологій аерокосмічної галузі, застосування процесів електронно-променевого плавлення та випарювання, створення композиційних матеріалів електронно-променевими методами при виробництві сучасних авіаційних, транспортних, стаціонарних газотурбінних двигунів і установок, а також застосування сучасних плазмових технологій у машинобудуванні, суднобудуванні та військово-промислового комплексу потребують розробки нових високоефективних технологій виготовлення виробів із тугоплавких металів нового покоління – вольфрамового та молібденового дроту, композиційних дротиків і дроту на основі цирконію і гафнію, електродів плазмотронів.

Серед матеріалів зі спеціальними властивостями особлива роль належить шаруватим, у тому числі і двошаровим металевим композиціям. Використання шаруватих композицій сприяє не тільки створенню більш досконалих деталей, машин, агрегатів і т.д., а й вдосконаленню технологічних процесів обробки матеріалів. Основне призначення біметалів: запобігання корозії – корозійностійкі; управління силами контактної тертя – антифрикційні; електропровідністю – електротехнічні; процесами зносу – зносостійкі і т.д. Серед шаруватих металевих композицій, цільове призначення яких розширення технологічних можливостей процесів обробки, особливе місце належить матеріалам для глибокої витяжки. Ці матеріали поєднують в собі поряд з високою міцністю і необхідною пластичністю хорошу корозійну стійкість, теплопровідність, трибологічні властивості і т.д. Таким вимогам відповідають біметали з плакувальним шаром з мідних сплавів.

Задача керування силами тертя, зменшення зносу в умовах поверхневого пластичного деформування є однією із основних проблем сучасної техніки, з якою доводиться мати справу у повсякденній інженерній практиці. Матеріали з мікроструктурою, що широко використовуються, необхідні, але за умовами сьогодення недостатні, вони обмежені рівнем розвитку галузей техніки і технологій, що їх реалізують.

Тугоплавкі метали мають унікальне сполучення фізико-механічних властивостей, однак характеризується низьким технологічним деформуванням при обробці тиском. Це обмежують ступінь та швидкість деформації та, як наслідок, продуктивність технологічних процесів. Таким чином, розробка інтенсивних технологій обробки тиском тугоплавких металів, у першу чергу, вольфраму, молібдену та сплавів на їх основі, є актуальною. Особливе значення для формування властивостей, які задані для напівфабрикатів і готової продукції, має процес первинного деформування спечених або отриманих плавленням заготовок.

Одним із методів отримання композитів є спільна пластична деформація складових композиту, що володіють найчастіше різними властивостями. Це обмежує можливості інтенсифікації процесів обробки тиском. Ефективним прийомом може бути накладання на деформувальний інструмент вібрації. В умовах вібраційного навантаження вирішальну роль у підвищенні рівномірності деформації композитів відіграють як поверхневий чинник, так і об'ємний – зниження опору деформації компонентів композиту.

У зв'язку з вищевикладеним, подальший розвиток теоретичних основ і технологій виготовлення тугоплавких і композиційних матеріалів є актуальною науковою проблемою та має важливе науково-практичне значення для економіки України.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі «Технологія машинобудування» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського згідно з напрямками наукових шкіл Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського в рамках виконання науково-технічних програм:

а) комплексної науково-технічної програми «Створювати і застосовувати у виробництві комплекси технологічного обладнання, засоби автоматизації з використанням ресурсозберігаючих технологій» у межах розв'язання проблеми «Про впровадження системи збирання, сортування, транспортування, переробки та утилізації відходів як вторинної сировини» відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 23 грудня 2004 року № 2290-IV;

б) господарськими договорами (№ 233/11; № 251/12), «Створення ефективних технологій з оптимізацією параметрів технологічного оснащення для формоутворення виробів з шаруватих та дискретних композиційних матеріалів» (держбюджетна НДР, № держреєстрації 0113U002173, 2013–2014 рр.); «Створення ресурсозберігаючих технологій отримання заготовок тугоплавких матеріалів та їх сплавів з упорядкованою структурою для виготовлення виробів з підвищеними експлуатаційними та бронезахисними характеристиками» (держбюджетна НДР, № держреєстрації 0115U002530, 2015–2016 рр.); «Удосконалення технології зміцнення та відновлення деталей гірничого обладнання та устаткування» (№ 266 «Техмаш–ГЗК» (БЖД–Техмаш–ГЗК/1120/4610) від 01 лютого 2013 р.); «Розробка організаційно-технічних заходів з удосконалення технології, технологічного оснащення та обладнання для імпульсної обробки тонколистових заготовок» (№ 5867/15-Д // (ОКБ), 2015 р.; № 2290/16-Д (ОКБ) // 336, 2016 р.; 1887/18-Д(ОКБ) / 407, 2018 р.); «Розробка технології зміцнення коронок зубів ковшів екскаваторів та випробування нових зносостійких чавунів в експлуатаційних умовах для виготовлення деталей гірничого обладнання» (№ 373 / (17-18) – «ТМаш–ПГЗК», 2017 р.); «Управління структурно-фазовим станом деталей з наноструктурованих матеріалів на всіх етапах їх виготовлення із забезпеченням високих експлуатаційних характеристик виробів» (держбюджетна НДР, № держреєстрації 0117U002295, 2017–2019 рр.) виконаними в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського. Автор брав участь у цих роботах в якості виконавця.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – підвищення техніко-економічних показників технологічних процесів виробництва виробів з тугоплавких і композиційних матеріалів на основі розвитку теоретичних основ деформування та методів розрахунку енергосилових параметрів.

Для досягнення поставленої мети визначені і розв'язані такі завдання:

Виконати аналіз сучасних технологій виробництва тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів, виявлено проблеми в підходах до визначення основних параметрів напружено-деформованого стану під час технологічних операцій і проектування технологічних процесів.

Розробити аналітичний метод рішення плоскої задачі теорії пластичності, який урахує неоднорідність пластичної течії в осередку деформації та її вплив на параметри процесу.

Розробити та удосконалити комплекс промислового обладнання для апаратурного оформлення інтенсивних процесів обробки тиском: стани гвинтової прокатки штабиків, устаткування для вібраційного деформування дротиків і дроту машини для волочіння заготовок з електроконтактним нагрівом і волочіння з гідродинамічною подачею мастила до контактних поверхонь осередку деформацій.

Розробити оптимізаційну модель розрахунку параметрів навантаження, що забезпечують оптимальний рівень деформацій з використанням чисельного розв'язування скінченно-різницевої форми диференціальних рівнянь імпульсу руху, під час обробки дискретної, суцільної або шаруватої заготовки.

Визначити еволюцію структури та властивостей металу при його інтенсивній термомеханічній обробці на основі теоретичних положень, що базуються на феноменологічних та системних підходах з урахуванням технологічної спадщини та впливу на властивості тугоплавких матеріалів напружено-деформованого стану в осередку деформації.

Отримати наближене аналітичне рішення задачі розподілу температури в системі двох циліндричних площин – м'якої оболонки і тугоплавкого сердечника.

Отримати аналітичне рішення що до реологічної моделі паралельного з'єднання жорстко-пластичного елемента (дріт) і елемента з послідовним з'єднанням в'язкого і пластичного елементів.

Експериментально та при математичному моделюванні довести, що в умовах волочіння з нагрівом дроту у м'якій оболонці виникають надмірні напруження матеріалу у м'якій оболонці та тиск на матеріал дроту, здатні повністю роз'єднати дві поверхні волоки та дроту.

Встановити шляхом математичного моделювання, що напружений стан у м'якій оболонці має непрямий зв'язок напруженого стану з зусиллям волочіння, а залежить від товщини оболонки яка має оптимальне значення з силового навантаження на дріт.

Експериментально та під час математичному моделюванні довести, що в умовах волочіння дроту у м'якій оболонці, що обумовлює упередження руху м'якої оболонки та її витікання за межі торця дроту на виході з волоки.

Провести дослідження тривалої і короткочасної міцності, мікроструктури і характеру руйнувань напівфабрикатів і готового дроту.

Об'єкт дослідження. Технологічні процеси, обладнання та оснащення виготовлення продукції з тугоплавких, важко деформівних і композиційних матеріалів.

Предмет дослідження. Закономірності процесів виробництва тугоплавких металів, методи розрахунку напружено-деформованого стану, енергосилових параметрів і способи інтенсифікації технологій отримання тугоплавких і композиційних матеріалів.

Методи досліджень. В основу теоретичних досліджень покладено методи фізичного і математичного моделювання з урахуванням основних положень теорії малих пружно-пластичних деформацій, теорії пружності, теорії процесів обробки

металів тиском і теорії стійкості. Реалізація математичних моделей проводилася методами розділення змінних, підстановки тригонометричних рядів, методом скінчених елементів, а також інженерним методом.

Експериментальні дослідження базувалися на методах теорії моделювання та проводилися в лабораторних і виробничих умовах із залученням стандартної вимірювальної та реєструвальної апаратури і включали методи тензометрування, координатних сіток, вимірювання геометричних параметрів, а також методи планування і математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше отримано наближене аналітичне рішення задачі розподілу температури в системі двох циліндричних площин – м'якої оболонки і тугоплавкого сердечника з використанням перетворень Гудмена і Кірхгофа, застосовуючи до системи рівнянь узагальнений принцип суперпозиції щодо системи лінеаризованих задач нестационарної теплопровідності безрозмірних співвідношень початкової температури та температури середовища.

2. Вперше шляхом розв'язання рівнянь рівноваги, пластичності і контактного тертя у зоні розділу матеріалів м'якої оболонки й тугоплавкого дроту і рівнянь теплообміну отримано аналітичне рішення що до реологічної моделі паралельного з'єднання жорстко-пластичного елемента (дріт) і елемента з послідовним з'єднанням в'язкого і пластичного елементів.

3. Визначено термонапружений стан дроту при його гарячому волочінні у м'якій оболонці з визначенням умов, коли напруга волочіння оболонки може бути визначена так само, як напруга суцільного стрижня.

4. Вперше експериментально та шляхом математичного моделювання доведено, що в умовах волочіння з нагрівом дроту у м'якій оболонці виникають надмірні напруження матеріалу у м'якій оболонці та тиск на матеріал дроту, здатні повністю роз'єднати дві поверхні волюки та дроту, величина тиску суттєво залежить від кута конусності вхідної частини волюки та має максимум у вихідній частині. Це дає змогу визначити оптимальну товщину оболонки з умови, що вона не може перевищувати радіальний тиск на поверхню дроту і визначається умовою пластичності.

5. Вперше шляхом математичного моделювання встановлено, що напружений стан у м'якій оболонці має непрямий зв'язок з зусиллям волочіння, а залежить від товщини оболонки яка має оптимальне значення з силового навантаження на дріт.

6. Доведено, експериментально та при математичному моделюванні що в умовах волочіння дроту у м'якій оболонці, в умовах всебічного стискання та тангенціального руху до вихідної частини волюки швидкість руху м'якої оболонки дорівнює векторній сумі швидкостей видавлювання та тангенціального зміщення до виходу з волюки, що обумовлює упередження руху м'якої оболонки та її витікання за межі торця дроту на виході з волюки.

7. Для випадку спільної пластичної деформації біметалевого композиту з твердим тугоплавким сердечником і більш м'якою оболонкою виконаний аналіз кінематичних силових параметрів, який показав, що пластичні зрушення в шарі оболонки еквівалентні зменшенню сил контактної тертя при пресуванні і волочінні; це істотно покращує умови деформування і створює умови для

формування металургійного контакту між компонентами.

8. Дослідження тривалої і короткочасної міцності, мікроструктури і характеру руйнувань напівфабрикатів і готового дроту, отриманих за рекомендованими технологічними схемами із застосуванням процесів поперечно-гвинтової прокатки, вібраційної деформації і термоциклічного відпалу в комплексі підтвердили високу ефективність комбінованих технологій, що дозволяють отримати тугоплавкий дріт підвищеної якості.

9. За допомогою системи Ansys AUTODYN проведено моделювання процесу гарячого волочіння гафнію в м'якій – мідній оболонці, при якому розподіл деформацій виглядає таким чином: миттєва межа плинності міді досягає межі плинності гафнію і відбувається спільна деформація композиційного матеріалу з утворенням металургійного контакту між компонентами, до цього моменту м'яка оболонка виступає в ролі мастильного шару.

Практичну цінність дисертаційної роботи містять такі її основні результати:

- на базі запропонованих моделей та нового аналітичного методу рішення плоскої задачі теорії пластичності, яка ураховує неоднорідність пластичної течії в осередку деформації та її вплив на параметри процесу розроблено комплекс технологій та технологічного обладнання для виготовлення вольфрамового та композиційного дроту, технологію виробництва електродів плазмотронів;

- на основі системних досліджень інтенсивних методів обробки тиском розроблена, експериментально обґрунтована і реалізована в промисловості технологічна схема виробництва молібденового дроту, основними етапами якого є поперечно-гвинтова прокатка штабиків, вібраційне волочіння з індукційним нагрівом дротяних заготівель і холодне волочіння дроту з гідродинамічним введенням мастила і накладенням на інструмент вібрації в перехідних етапах процесу (пуск, розгін і зупинка приводу тягового органу);

- результати дослідження деформаційно-швидкісних параметрів комбінованого процесу гідродинамічного волочіння з вібрацією волочильного інструменту в перехідних періодах використані при розробці способу волочіння, промислової технології виробництва молібденового дроту, ліцензійної пропозиції, що передбачають волочіння металу через дві послідовно встановлені по ходу процесу волоки, яким передаються коливання протифаз лише в короткі відрізки часу – у періоди пуску, розгону і гальмування приводу тягового органу. Показано, що цей прийом в 1,5–1,8 рази підвищує коефіцієнти витяжки металу за перехід; у 5–6 разів збільшує термін експлуатації вібраційного приводу порівняно з безперервним вібропроцесом;

- експериментально встановлено, що волочіння молібденового дроту в холодному стані з підвищеними завдяки вібрації обтисканнями (коефіцієнти витягу 1,4–1,45 за перехід) з гідродинамічним введенням мастила забезпечує підвищення пластичних характеристик металу порівняно з традиційним гарячим волочінням;

- уперше розроблені ефективний неруйнівний метод і прилад для оцінки технологічних властивостей дротяних заготівель діаметром більше 3 мм залежно від значення модуля пружності. Запропонована класифікація заготівель за значенням модуля пружності для отримання кінцевої продукції в різних діапазонах діаметрів при мінімізації виробничих витрат. Вивчений вплив технологічних схем обробки на

формування структури вагового дроту. Отримані залежності зміни кількісного параметра оцінки структури – монокристальності L/W від загальної міри деформації волочінням. Встановлено, що застосування інтенсивних технологій пресування і волочіння, починаючи вже з коефіцієнта витягу від штабіка 17,5–23,8 дозволяє досягти значень $L/W > 10$;

– у результаті досліджень режимів термомеханічної обробки напівфабрикату вольфрамового дроту встановлені залежності між тимчасовим опором розриву напівфабрикату, температурою відпалу і мірою знеміцнення. Розроблені і впроваджені вдосконалені режими проміжного відпалу напівфабрикату в процесі волочіння, встановлені раціональні місця їх проведення залежно від призначення напівфабрикату. Впроваджена вдосконалена технологія проміжного відпалу, що дозволила стабілізувати міцнісні властивості дроту;

– на основі виконаного системного критичного аналізу технологій виробництва композиційних матеріалів для електроплазмової техніки встановлено, що їх експлуатаційно-технологічні властивості визначаються станом контакту між компонентами, що деформуються в ході спільної пластичної деформації пресуванням і волочінням.

Результати дисертаційної роботи у вигляді практичних рекомендацій і технічних рішень використані для розв'язання ряду технічних завдань в умовах промислових підприємств: ТОВ «АВМ Ампер» (м. Кременчук), АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), ПАТ «Кременчуцький колісний завод» (м. Кременчук), ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук), ТОВ НВП «Тангстен» (м. Світловодськ).

Основні положення роботи використовуються у викладанні навчальних дисциплін «Матеріалознавство субмікро- та нанокристалічних металів», «Інформаційні технології в дослідженнях матеріалів», «Технологія конструкційних матеріалів та основи машинобудування» у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У результаті науково-дослідних робіт, матеріали яких опубліковані у співавторстві, автором розроблені основні методи теоретичних і експериментальних досліджень процесів виробництва тугоплавких, важко деформівних і композиційних матеріалів, отримані і реалізовані математичні моделі, проведено комп'ютерне моделювання процесів виробництва композиційного дроту на основі тугоплавких металів з м'якою оболонкою, проведено аналіз та узагальнення аналітичних рішень, порівняння з дослідними даними, сформульовані висновки, розроблені практичні рекомендації і взято участь у впровадженні в промислове виробництво. Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві, відображено в анотації до списку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи, наукові і практичні результати доповідалися і обговорювалися на міжнародних, усеукраїнських і регіональних науково-технічних (НТК) і науково-практичних (НПК) конференціях, у тому числі: II міжнародній НТК (МНТК) «Машини та пластична деформація металів» (м. Запоріжжя, 2012); VI Міжнародному форумі «Трансфер технологій та інновацій: інноваційний розвиток та модернізація

економіки» (м. Київ, 2012); МНТК «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (м. Кременчук, 2013-2015, 2018); МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів обробки тиском у машинобудуванні і металургії» (м. Харків, 2014); International Scientific-Methodological Conference «How to teach material sciences: New approaches and experiences from the MMATENG project» (Krakow, 2015); VI МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (м. Київ, 2015); XXI «Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KONTECH» (Poznań–Mierzęcin, 2016); МНТК «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (м. Кременчук, 2016, 2018, 2020); всеукраїнській НТК «Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки» (м. Вінниця, 2017); всеукраїнській НТК «Механіка машин – основна складова прикладної механіки» (м. Дніпро, 2017); 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017; (Kremenchuk, Ukraine, 2017); XVI МНТК «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (м. Кременчук, 2017); 7th «Symposium on Applied Electromagnetics SAEM'2018» (Podčetrtek, Slovenia, 2018); МНТК «Технології та інфраструктура транспорту» (м. Харків, 2018); International scientific and practical conference «Prospects for the development of technical sciences in eucountries and Ukraine» (Wloclawek, Poland, 2018); МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019» (м. Вінниця, 2019); 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019, (Kremenchuk, Ukraine, 2019); XI МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 2019); VII МНТК «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2020); I МНТК «Авіація, промисловість, суспільство» (м. Кременчук, 2020); International Conference on Industrial Engineering, VII МНТК «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2020); 2020 International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology, RusMetalCon 2020, (Chelyabinsk, Russia, 2020); 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP 2020 (Kremenchuk, Ukraine); на вченій раді Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, 24.09.2015 р.); на науковому семінарі при спеціалізованій раді Д. 45.052.06 КрНУ (м. Кременчук, 2020 р.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 70 роботах, у тому числі 1 монографії, 21 – стаття у наукових фахових виданнях України, 11 статей – у зарубіжних наукових періодичних виданнях, 14 – статей у періодичних наукових журналах, включених до наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science Core Collection, 28 публікацій у матеріалах та працях конференцій, з яких 4 включені у наукометричну базу даних Scopus. Нові технічні рішення захищені 5 патентами України на корисну модель. Індекс Гірша (h-index) автора, згідно з наукометричною базою даних Scopus, складає 13, кількість цитувань 271 (Scopus ID: 7006289748, ORCID ID: 0000-0002-4303-7124).

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи – 368 сторінок, у тому числі основного тексту – 267 сторінок, 80 рисунків і 27 таблиць, список використаних джерел із 227 найменувань і 2 додатків на 99 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність наукової проблеми, наведено загальну характеристику роботи, сформульовано мету роботи і завдання дослідження, показано зв'язок з науковими програмами, планами, темами, подано характеристику наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів, наведено дані про апробацію і впровадження результатів, визначено особистий внесок здобувача, а також кількість публікацій і структуру дисертації.

У першому розділі проведено аналіз існуючих наукових основ і технологій інтенсивної обробки тугоплавких та композиційних матеріалів, шляхів інтенсифікації, удосконалення технології, оснащення та обладнання. Роботи, присвячені цим питанням, загалом дозволяють виявити ступінь вивченості процесу, тому представляють великий інтерес, а подальші дослідження неможливі без урахування позитивних і негативних результатів, проведених раніше досліджень. На підставі критичного аналізу встановлено напрями вдосконалення технологій виробництва тугоплавких та композиційних матеріалів.

Тугоплавкі метали володіють унікальним комплексом фізико-механічних властивостей, це характеризується низькою технологічною деформованістю при обробці тиском, що обмежує ступінь, швидкість деформації і продуктивність процесів. Отже, актуальною є задача розробки інтенсивних технологій і процесів обробки тиском тугоплавких металів, в першу чергу, таких як вольфрам, молібден, цирконій, гафній, титан і композити на їх основі.

З'ясовано, що вдосконалення технологій та обладнання для виробництва тугоплавких металів є актуальною науково-технічною проблемою, для розв'язання якої необхідно залучати весь комплекс накопичених знань у галузі обробки металів тиском. Подальші дослідження ґрунтуються на положеннях і висновках таких вітчизняних і зарубіжних учених: Алієва І. С., Березкіна В. Г., Власова В. З., Гогаєва К. О., Грибкова Е. П., Громова Н. П., Грушко О. В., Губкіна С. І., Джонсона В., Драгобецького В. В., Живова Л. І., Зибеля Е., Ільюшина А. А., Калюжного В. Л., Кудо Х., Кухаря В. В., Огородникова В. А., Охріменко Я. М., Попова Є. А., Потекушина С. П., Рея Р. І., Ренне І. П., Сатоніна О. В., Сівака І. О., Луценко В. О., Соколова Л. Н., Сторожева М. В., Тарновського І. Я., Тимошенко С. П., Титова В. А., Трішевського І. С., Трішевського О. І., Трубіна В. Н., Унксова Є. П., Шаповала В. М., Шаповала О. М., Явтушенко О. В. та ін.

Питання волочіння біметалевих заготовок у холодному стані висвітлені не достатньо ретельно. Відносно волочіння двошарових композицій, у тому числі і в м'яких оболонках, – практично не знайшли відображення в науково-технічній літературі. На даний момент встановлено, що при пластичній обробці біметалевих прутків і дроту виникає висока неоднорідність деформації при певному поєднанні технологічного процесу і геометрії інструменту та може супроводжуватися локальними руйнуваннями як оболонки, так і сердечника. Зважаючи на наявність сил тертя і деформації зсуву у волоці усунути неоднорідність деформації при видавлюванні і волочінні не є можливим, але можна зменшити величину неоднорідності шляхом підбору оптимальних геометричних параметрів осередку деформації і створення ідеальних умов тертя і нагрівання

Доведено, що визначення напружень в осередку деформації є основоположним для теоретичного аналізу процесів виробництва тугоплавких металів, оскільки за обчисленими напруженнями проводиться розрахунок зусиль волочіння і потрібних потужностей обладнання та розрахунок інструменту.

Розглянуто комп'ютерне моделювання за допомогою системи Ansys AUTODYN процесів сумісної пластичної деформації волочінням тугоплавких металів (Hf, Zr, W, Mo) в м'яких оболонках, що дає можливість визначити напруження в осерді та оболонці та обрати оптимальні термомеханічні режими.

У другому розділі обґрунтовано та виконано вибір напрямку і методів досліджень процесів виготовлення тугоплавких, важко деформівних і композиційних матеріалів.

Удосконалення математичних методів розрахунку поряд з розвитком сучасних обчислювальних засобів і програмних продуктів проектно-технологічних робіт зумовлюють розробку чисельних математичних моделей, основною характеристикою 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.

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 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.

При моделюванні процесів волочіння, вібраційного волочіння, волочіння з гідродинамічним вводом мастила, проміжних відпалів, нагріву був використаний кінцево-елементний спосіб, який широко використовується в теорії обробки тиском і поєднує простоту реалізації та точність розрахунків. Розроблені кінцево-елементні моделі з метою перевірки правомірності прийнятих при моделюванні припущень, а також в сукупності з імітаційними моделями, основаними на перетвореннях Гудмена і Кірхгофа 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.

Обробка результатів дослідних даних, їх порівняння з теоретичними здійснювалося за стандартною методикою згідно з ДСТУ 8.207–86, із залученням

теорії планування експерименту і математичної статистики. Відтворюваність експериментальних даних перевірялася за критерієм Кохрена з рівнем значущості $q = 0,05$, оцінювання ефективності різних способів профілювання проводили за t-критерієм Стьюдента та критерієм Кохрена.

Третій розділ присвячений створенню математичних і комп'ютерних моделей напружено-деформованого стану при волочінні тугоплавких металів у м'яких оболонках. Комбіновані сполуки, такі як гафній + мідь, унаслідок значної різниці в теплофізичних властивостях мають характерні особливості в поширенні тепла. Ізотерми міді випереджають ізотерми гафнію, тобто при нагріванні має місце несиметричність ізотерм у поздовжньому напрямку. З точки зору експлуатаційних показників такі комбіновані біметалічні деталі дозволяють значно поліпшити та забезпечити хороший тепловідвід, наприклад при виготовленні електродів для плазмового різання металу.

Серед тугоплавких важко деформівних металів гафній найменше піддається процесам видавлювання, пресування і волочіння. Зумовлено це тенденцією до налипання гафнію на формоутворювальну поверхню інструменту (волока, матриця, пресформа і т.п.), тобто гафній має надзвичайно високу адгезію і коефіцієнт тертя до металів і твердих сплавів. При виробництві прутків і дроту волочінням заготовки піддають піскоструминному очищенню і травленню задля підготовки до електролітичного покриття міддю. Потім їх кілька разів покривають обпаленим вапном. Мідь і вапно, фосфатні покриття, різні мастила і т.д. знаходять широке застосування під час волочіння дроту. Удосконалення методів обробки тиском йде шляхом дослідження і підбору ефективного мастила. Не менш перспективною є область досліджень, пов'язана з пошуком відповідних матеріалів як оболонок і умов деформування для волочіння заготовок із гафнію. У цьому випадку застосування оболонок сприяє створенню близьких до ідеальних умов тертя, підбору оптимальних геометричних параметрів осередку деформації і температурно-силових умов навантаження. Модель аналізу теплового стану під час волочіння включає фактори і характеристики, що враховують тепловиділення в точках контакту «м'яка оболонка–фільера», «м'яка оболонка–сердечник». Окрім того, необхідно врахувати інтенсивність теплообміну, яка характеризується коефіцієнтом тепловіддачі в м'яку оболонку, філь'єру.

Висока теплопровідність міді призводить до зниження температури сердечника. Тому доцільно застосування короткочасного, переривчастого нагріву заготовки в процесі волочіння в мідній оболонці. При волочінні заготівля переміщається до джерела тепловиділень. Вважаємо, що під час волочіння теплове джерело циліндричної форми нагріває рухливу біметалічну заготовку, температурне поле зосереджується на осередку деформації в філь'єрі на поверхні обмежених розмірів, тобто є локальним. Окрім того, заготівля під час волочіння переміщається в температурному полі.

При волочіння дроту в м'якій оболонці в осередку контакту оболонки з сердечником можлива реалізація таких варіантів деформування:

- матеріал оболонки є жорстко-пластичним;
- матеріал оболонки при досить високому нагріванні стає в'язким і є мастильним шаром для сердечника;

– матеріал оболонки є в'язко-пластичним.

Математичний вираз для граничної сили тертя приймається у вигляді:

$$T = (1 - 1,16)\tau_c,$$

де τ_c – опір пластичному зрушенню металу оболонки.

З урахуванням того, що інтервал кувальних температур гафнію лежить в інтервалі 731–927 °С, матеріал м'якої оболонки, за таких температурних умов деформується як в'язко пластичне середовище. При $\sigma_{11}^c \leq \sigma_s^c$ деформація міді подібна до лінійно-в'язкого середовища. При $\sigma_{11}^c \geq \sigma_s^c$ – деформація подібно до жорстко-пластичного середовища.

Отже, можна запропонувати узагальнену реологічну модель деформування

$$\sigma_{ij} = \tau\sigma^v + (1 - \tau)\sigma^s,$$

де σ_{ij} – узагальнений елемент;

τ – інтервал часу, відповідний в'язкій течії в оболонці;

σ^v – в'язкий елемент;

σ^s – жорсткопластичний елемент.

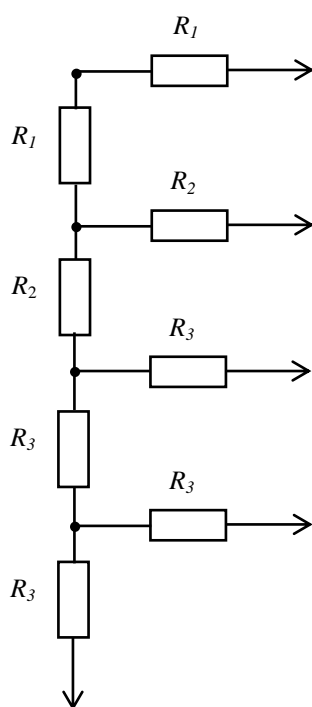


Рисунок 1 – Зображення стрижня в м'якій оболонці у вигляді електричної схеми:

R_1 – опір матеріалу м'якої оболонки; R_2 – опір поверхні контакту; R_3 – опір матеріалу сердечника

Для розрахунку теплових процесів при волочінні дроту в м'яких оболонках необхідно врахувати особливості підведення струму. В цьому випадку електроконтактний нагрів заготівель типу прутків, дроту і труб здійснюється в торцевих і бічних призматичних контактах. Струм у цьому випадку протікає в подовжньому напрямі. При нагріві дроту або труб в якості одного або декількох контактів використовують філь'ери і контактні ролики. Для визначення параметрів електроконтактного нагріву необхідно, передусім, визначити силу струму I і напругу U на заготівлі, що нагрівається. Електрична схема для визначення сили струму і напруги в стержні приведена на рис. 1.

В умовах електроконтактного нагріву опору R_1, R_2, R_3 залежать від температури тобто , де $i = 1, 2, 3$; T – температура нагріву

Враховуючи те, що процес можна здійснити тільки в умовах короткочасного нагріву, скористаємося розкладанням функції в ряд Тейлора, тобто функція $T(r, t)$ – швидкозмінна, тобто на проміжку зміни швидко убуває за часом. Її значення близько до максимального на малому проміжку часу. У результаті перетворень отримуємо

$$T(t) = T(t_0) + T'(t_0)(t - t_0) + \dots$$

$$T'(t_0) = [T(t) - T(t_0)] / (t - t_0) \approx T_{\max} / t. \quad (1)$$

Рівняння теплопровідності приводиться до вигляду:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\lambda^2} \left(q(t) + \frac{T_{\max}}{t} \right). \quad (2)$$

Розв'язок цього рівняння має вигляд за граничних умов

$$\frac{t}{r_1} = t_1; \quad \frac{t}{r_2} = t_2; \quad \frac{t}{r_0} = t_0,$$

де r_1 – радіус стрижня;

r_2 – радіус м'якої оболонки.

$$\text{Для стрижня } T_c = \frac{1}{\lambda^2} \left[q(t) + \frac{T_{\max}}{t} \right] \left(2r_1^2 - r^2 - \frac{r_1^2}{\ln \frac{r_1}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1} \right).$$

$$\text{Для оболонки } T_0 = \frac{1}{\lambda^2} \left[q(t) + \frac{T_{\max}}{t} \right] \left(2r_2^2 - r^2 + \frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_2} \right),$$

де r_1 – внутрішній радіус м'якої оболонки (радіус стрижня);

r_2 – зовнішній радіус оболонки.

Вирішуючи рівняння (2), отримаємо

$$T_r = \left\{ \frac{Q_i}{4\lambda} [(R_s + \delta_s)^2 - r^2] - \frac{T_0 + \frac{Q_i}{4\lambda} [(R_s + \delta_s)^2 - R_s^2]}{\ln \frac{R_s + \delta}{R_s}} \cdot \frac{R_s + \delta}{r} \right\} \cdot \frac{\lambda^2 t}{(1 - \lambda^2 t)}. \quad (3)$$

У цьому дослідженні необхідно визначити температуру і час нагріву системи м'яка оболонка (вона ж елемент отримуваної деталі), за яких в матеріалі заготівлі у осередку деформації підтримується задана температура.

Рішення задачі здійснюється наступним чином. Вважаємо, що м'яка оболонка є необмеженим циліндром. Процес деформації слід розрахувати так, щоб кількість теплоти, що надходить у заготівлю (гафній), відповідала б такій кількості теплоти, що переходить в м'яку оболонку (мідь). При сталому циклі волочіння для кожного одиничного майданчика осередку деформації необхідно дотримуватись умови

$$\int_0^{t_\varepsilon} q_\varepsilon dt = \int_0^{t_H} q_H dt, \quad (4)$$

де t_ε , t_H – час деформації заготівлі і час її нагріву.

Рівняння теплового балансу в даному випадку набуває вигляду

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda [T_0 - T_m], \quad (5)$$

де λ – коефіцієнт теплопередачі;

T_m – температура м'якої оболонки (міді).

Рівняння теплового балансу тіла, що пластично деформується, може бути приведенне до вигляду:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\sigma_{ik} \dot{\varepsilon}_{ik}}{I} = 0, \quad (6)$$

де ρ – щільність;
 c – питома теплоємність;
 T – температура;
 k – коефіцієнт теплопровідності;
 σ_{ik} – внутрішня напруга в одиниці об'єму;
 $\dot{\varepsilon}_{ik}$ – швидкість пластичної деформації;
 I – механічний еквівалент тепла.

Враховуючи те, що при гарячому волочінні матеріал стає в'язким, цілком допустимо добуток $\sigma_{ik} \dot{\varepsilon}_{ik}$ виразити таким чином:

$$\sigma_{ik} \dot{\varepsilon}_{ik} = \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_k} \left(\frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_k} + \frac{\dot{x}_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i} \right) + \omega \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_k} \delta_{ik} \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\eta}{2} \left(\frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \dot{x}_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i} \right)^2 + \omega \left(\frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i} \right)^2, \quad (7)$$

Специфіка термонапруженого деформованого стану процесу волочіння металів і сплавів в м'яких оболонках полягає в істотній різниці деформацій оболонки (мідь) і сердечника (гафній). При цьому м'яка оболонка не лише виключає налипання гафнію на робочу поверхню волокни, але і чинить істотний вплив на напружено-деформований стан сердечника. Це цілком відповідає сталим рекомендаціям із застосування у формозмінювальній операціях для плакувального шару використовувати метал, що має значну різницю порівняно з основним металом у коефіцієнтах зміцнення. При виробництві дроту і труб з гафнію волочіння, як правило, проводять в нагрітому стані. При цьому необхідно враховувати вплив температури і тривалості нагріву на фізико-механічні властивості композиції, відмінність у коефіцієнтах лінійного розширення і теплопровідності.

Встановлено, що при волочінні має місце осесиметрична течія. Повна система рівнянь вироджується в систему:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + (\sigma_{11} - \sigma_{22}) / x_1 + 2 \frac{\sigma_{12}}{x_1 \cdot \alpha} &= 0; \\ \sigma_{12} &= -\sigma_k; \\ \sigma_{11} - \sigma_{12} &= \beta \sigma_s(T); \\ \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} + \dot{x}_1 / x_1 + \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_3} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

у якій перше і друге рівняння – рівняння рівноваги і контактної тертя, третє – умова ідеальної пластичності, четверте рівняння – умова нестискуваності

Для опису напружено-деформованого стану спільної деформації стержня і оболонки в другому випадку використовуємо модель реології Шведова і Бінгама, тобто паралельне з'єднання в'язкого (оболонка) і пластичного (стержень) елементів.

Поведінка середовища при досить малій швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$ відповідає жорстко пластичному, інакше в'язкий елемент моделює швидкісне зміцнення.

Сумісне розв'язання рівнянь рівноваги, пластичності і контактної напругою дозволяє отримати:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\beta \sigma_s^H}{x_1} - \frac{2 \cdot 0,58 \sigma_s^s}{x_1 \cdot \lambda} = 0, \quad \sigma_\kappa = 0,58 \tau_s. \quad (9)$$

Вирішуючи це рівняння отримуємо $\sigma_{11} = \ln x_1 \left(\frac{1,16 \sigma_s^s}{\lambda} - \beta \sigma_s^H \right) + \ln C$;

де $x_1 = r - \delta$ біля входу волоки;

r – радіус волоки;

δ – товщина м'якої оболонки.

Оскільки $\sigma_2 = \sigma_s^s$, то можна знайти довільну сталу C і отримати рівняння в остаточному вигляді:

$$\sigma_{11} = \ln x_1 \left(\frac{1,16 \sigma_s^s}{\lambda} - \beta \sigma_s^H \right) + (1 + \beta) \sigma_s^s - \ln(r - \delta) = \ln \frac{x_1}{(r - \delta)} \cdot \left(1,16 \frac{\sigma_s^s}{\lambda} - \beta \sigma_s^H \right) \quad (10)$$

За допомогою системи Ansys AUTODYN проводимо моделювання процесу гарячого волочіння гафнію в м'якій – мідній оболонці.

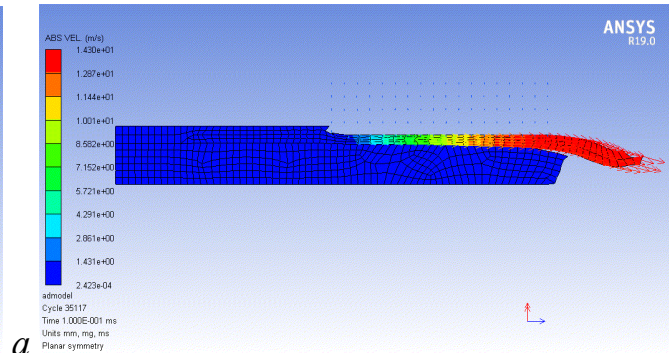
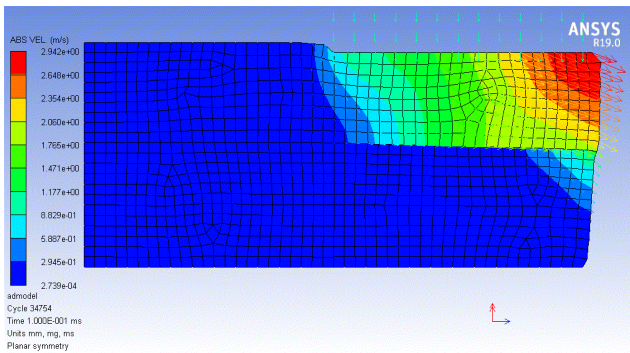


Рисунок 2 – Епюри швидкості течії матеріалу, м/с

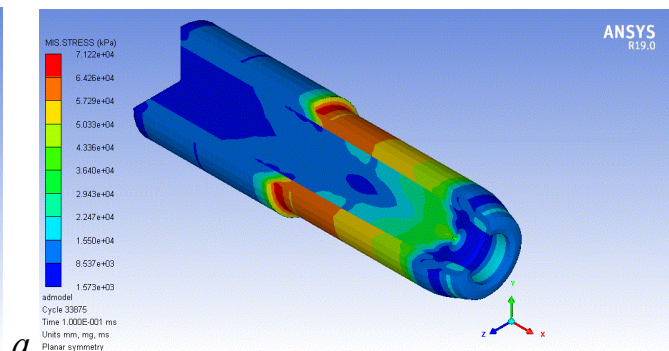
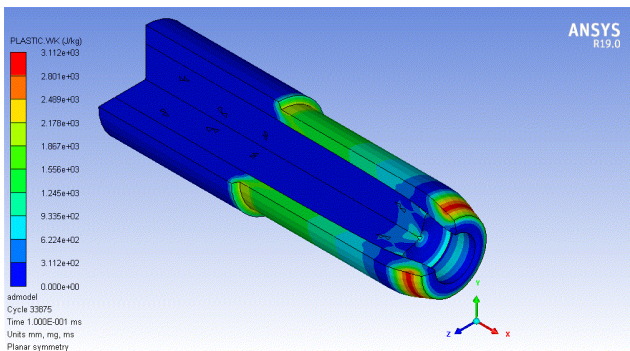


Рисунок 3 – Моделювання процесу гарячого волочіння гафнію в м'якій оболонці:
 а – еюра роботи пластичної деформації, Дж/кг; б – еюра еквівалентних напружень (за фон Мізесом), кПа

Розподіл деформацій виглядає наступним чином: миттєва межа плинності міді досягає межі плинності гафнію і відбувається спільна деформація композиційного матеріалу з утворенням металургійного контакту між компонентами, до цього моменту м'яка оболонка виступає в ролі мастильного шару.

Четвертий розділ присвячений розробці нової технологічної схеми виробництва дроту з молібдену. Молібден має вищі пластичні характеристики, ніж вольфрам, що створює можливості застосування розроблених інтенсивних технологічних процесів обробки тиском, зокрема, поперечно-гвинтової прокатки і волочіння з гідродинамічним введенням мастила. Потенційні можливості цих технологічних процесів використовуються при обробці молібдену не повною мірою. Зокрема, волочіння молібденового дроту характеризується відносно низькими швидкостями і коефіцієнтами витяжки металу за перехід.

Було проведено експериментальне дослідження процесу волочіння дроту з молібдену з гідродинамічним введенням мастила і вібрацією волочильного інструменту. Метою експериментів було встановлення можливості підвищення коефіцієнта витягу металу за прохід шляхом застосування вібрації волочильного інструменту на початковій стадії процесу волочіння дроту з гідродинамічним введенням мастила у вогнище деформації.

Для дослідження впливу низькочастотної вібрації волочильного інструменту на умови процесу волочіння молібденового дроту з гідродинамічним введенням мастила створена дослідна установка, схема якої приведені на рис. 4.

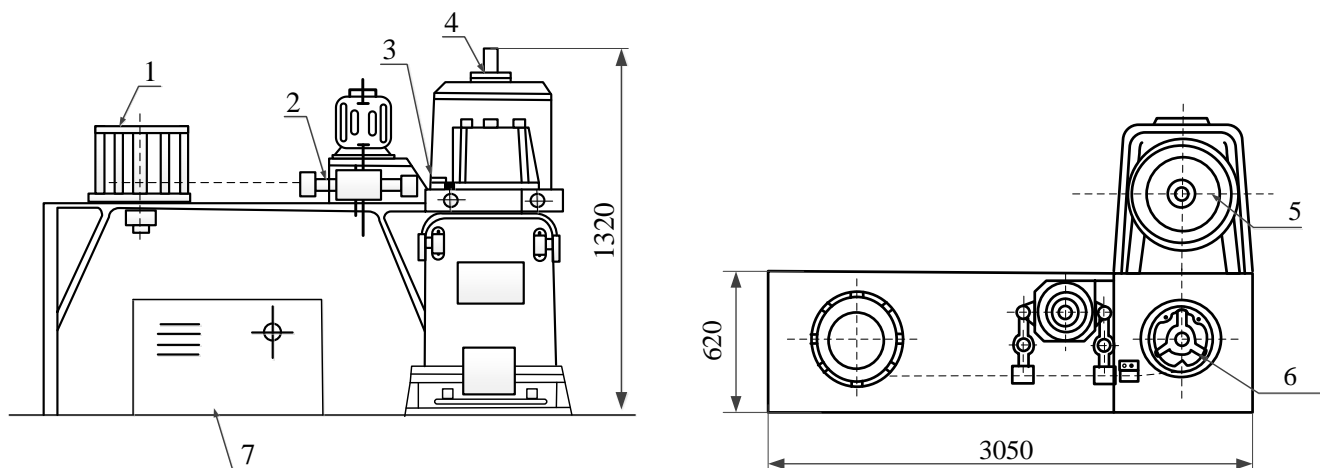


Рисунок 4 – Схема дослідної установки для дослідження волочіння з гідродинамічним введенням мастила і вібрацією волочильного інструменту

Установка (рис. 4) містить змонтований на станині блок тягового барабана 6, приводний електродвигун 5 тягового барабана з керованим перетворювачем тиристора струму, розмотувальну фігурку 1 і вібродеформувальний вузол 2.

Приводний електродвигун 5 постійного струму з перетворювачем забезпечують можливість плавної зміни швидкості волочіння в межах 0–2,5 м/с.

Швидкість волочіння дроту на установці фіксується за сигналом тахогенератора 4, вал якого сполучений з валом приводного двигуна 5. Сила волочіння вимірюється за допомогою тензометричного датчика 3, виконаного за трьохроликовою схемою.

Вібродеформувальний вузол (рис. 5) містить збірні волокни 1 і 2 з діаметром, що зменшується по ходу волочіння проволочки 3 діаметри, які встановлені у виброволокотримачах 4 і 5, закріплених на кінцях важелів 6, забезпечених опорами 7 і шарнірно приєднаних до ексцентрик 8, встановлених на загальному приводному

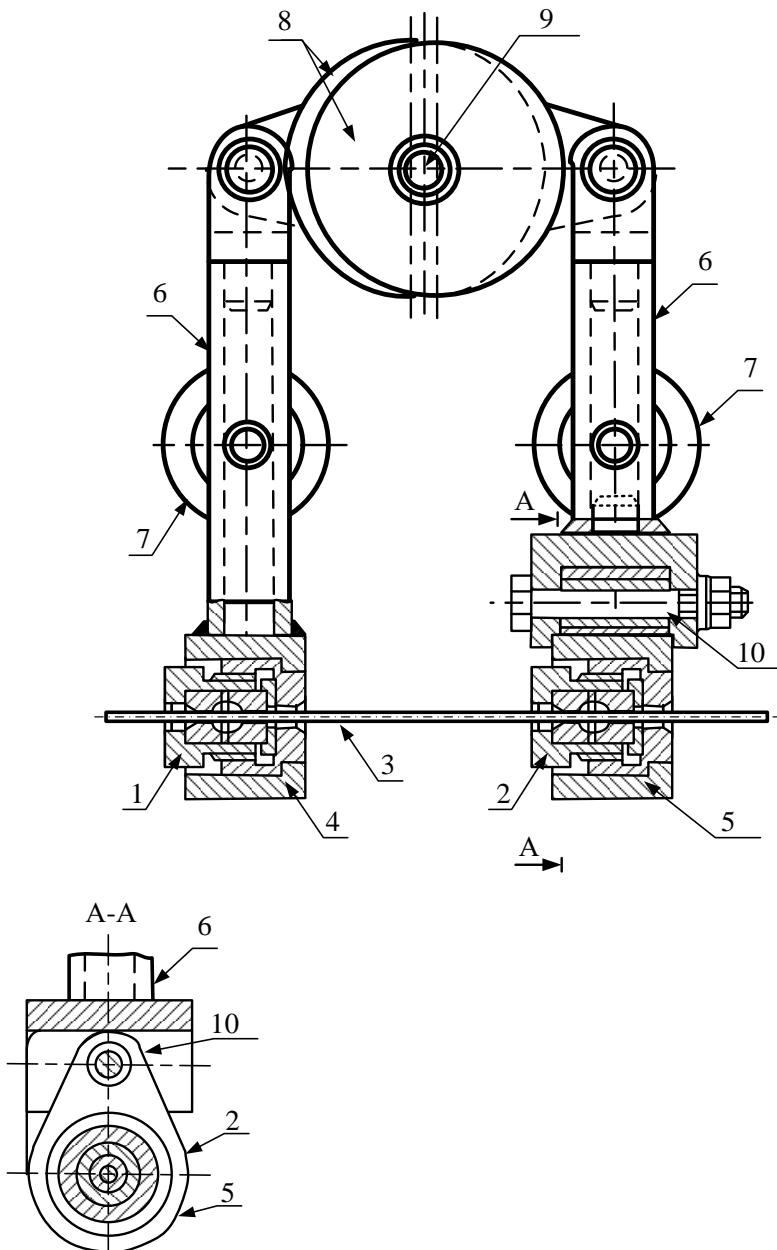


Рисунок 5 – Вібродоформувальний вузол

відношенням важелів, а частота коливань – числом обертів валу двигуна 9. Як волоочильний інструмент застосовані збірні волокнисті звичайної конструкції.

Волокотримачі з волокнами на рис. 5 показані спрощено. Детальніше конструкція волокотримача для збірної волокнисті приведена на рис. 6.

Кожен з волокотримачів включає корпус 1, в якому розміщені збірні волокнисті 2 і місткість 3 для порошкоподібного мастила, сполучена з корпусом за допомогою різьблення. Місткість забезпечена поворотною ручкою 4. У верхній частині корпусу 1 і місткості 3 є вікна 5 і 6 для заповнення місткості 3 мастилом. Вертикальні пази 7, виконані в торцевих стінках корпусу 1 і місткості 3, служать для установки у волокотримачі збірної волокнисті із заздалегідь заправленим в неї дротом.

валу 9 зі зрушенням ексцентриситетів на 180° .

При обертанні приводного валу 9 ексцентрик 8 через важелі 6 передає волокотримачам з волокнами осьові і кутові коливання протифаз. При $A_0/a \leq 0,01$ (a – плеча важеля) кутова складова коливань, зважаючи на крихту, не має практичного значення.

Для зручності заправки загостреного кінця дроту в дві збірні волокнисті вузли застосовано шарнірне з'єднання 10 між волокотримачем 5 і важелем 6 другої по ходу волоочіння волокнисті 2. Шарнірне кріплення волокотримача до важеля створює також певні зручності при дослідженні волоочіння через одну вібруючу волокнисті.

Амплітуда коливань волокотримачів 4, 5 визначається величиною ексцентриситету відповідних ексцентриків і передавальним

Кожен з волокотримачів включає корпус 1, в якому розміщені збірні волокна 2 і місткість 3 для порошкоподібного мастила, сполучена з корпусом за допомогою різьблення. Місткість забезпечена поворотною ручкою 4. У верхній частині корпусу 1 і

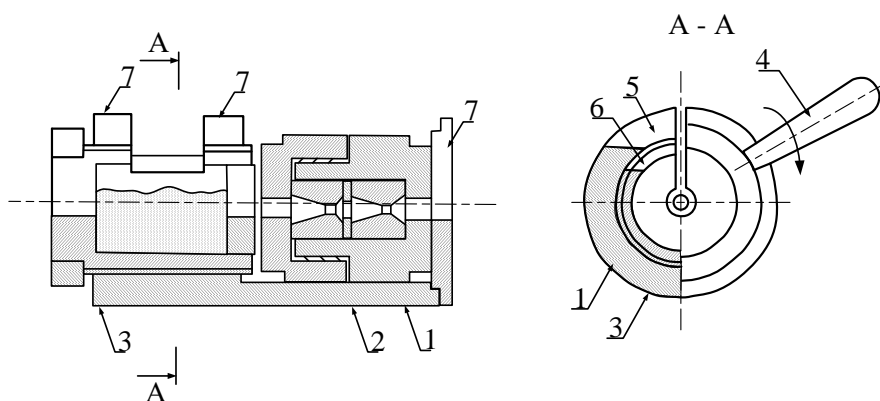


Рисунок 6 – Волокотримач

місткості 3 є вікна 5 і 6 для заповнення місткості 3 мастилом. Вертикальні пази 7, виконані в торцевих стінках корпусу 1 і місткості 3, служать для установки у волокотримачі збірної волоки із заздалегідь заправленим в неї дротом.

У табл. 1 приведені результати вимірів сили волочіння молібденового дроту через одну збірну волоку без вібрації і з вібрацією в період пуску і розгону волочильного стану до сталої швидкості (2,5 м/с).

Аналіз результатів показує, що вібрація волоки приблизно на 1/3 знижує силу волочіння в початковий період процесу. Ефект її зниження показує, що при ~2,5 м/с вібрація волоки практично не чинить впливу на рівень сили волочіння.

Таблиця 1 – Силкові параметри волочіння молібденового дроту через одну віброуючу збірну волоку в період пуску і розгону волочильного стану

Умови волочіння	Сила волочіння (Н) при швидкостях волочіння (м/с)				
	Пуск	0,05	1,15	1,85	2,5
Без вібрації	150	103	97,5	87,5	85
З вібрацією	100	95	85	85	85
Відносне зниження сили волочіння при вібрації, %	33,3	7,8	12,8	2,85	0

Зі збільшенням швидкості волочіння зростає ефект зниження сили від гідродинамічного введення мастила, яке в діапазоні 0–2,5 м/с складає 43 % (при безвібраційному процесі), тобто ефекти зниження сили волочіння від вібрації і гідродинамічного введення мастила зі зміною швидкості волочіння доповнюють один одного, що дає можливість збільшити міру деформації металу за прохід.

На рис. 7 подана графічна інтерпретація отриманих даних, що дозволяє судити про ефективність вібрації збірної волоки в початковий період процесу.

Обробка експериментальних даних за методом найменших квадратів дозволила отримати залежність сили P_e^H від швидкості волочіння v_1 . Для безвібраційного процесу:

$$P_e^H = 96,49V_1^{-0,144}. \quad (11)$$

Для процесу з вібрацією збірної волоки :

$$P_g = 97,38e^{-0,0677V_1} \quad (12)$$

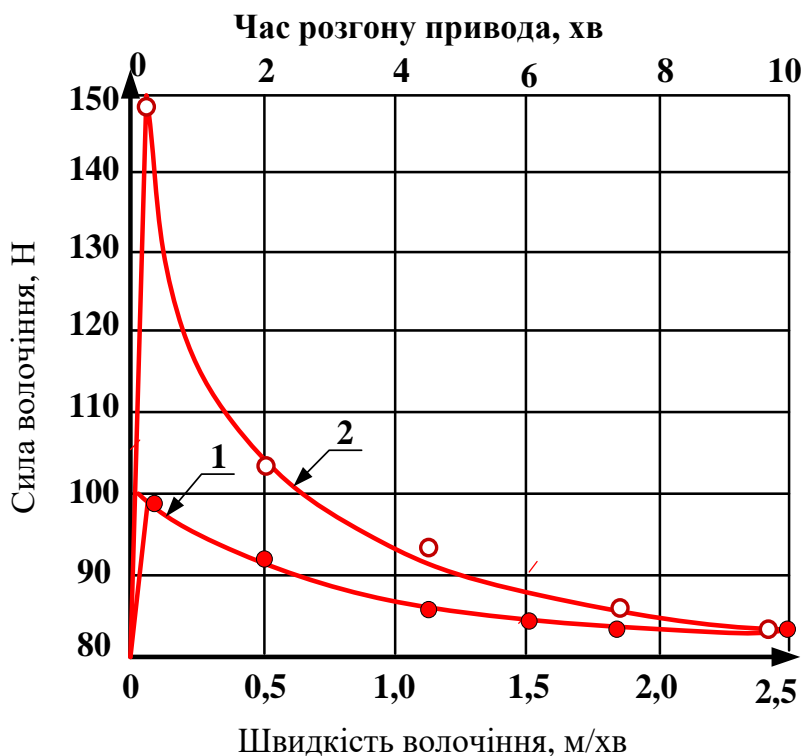


Рисунок 7 – Залежність сили волочіння мольбденового дроту від швидкості волочіння через одну збірну волоку з вібрацією (1) і без неї (2)

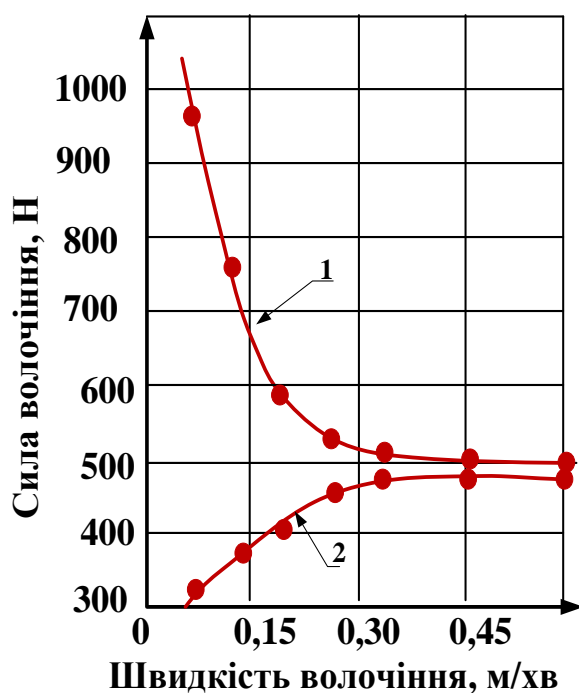


Рисунок 8 – Силові параметри волочіння мольбденового дроту : 1 – з гідродинамічним введенням мастила; 2 – з гідродинамічним введенням мастила і вібрацією збірної волоки

Графіки, побудовані за залежностями (11) і (12) приведені, на рис. 7, на якому нанесені також експериментальні точки. Отримані дані свідчать, що отримані залежності сили волочіння від швидкості досить точно відбивають дані експериментів. Це дозволило визначити раціональні деформаційно-швидкісні режими волочіння мольбденового дроту з гідродинамічним введенням мастила і застосуванням вібрації в початковий період процесу.

У ході подальших досліджень здійснювали волочіння через дві волоки; фіксували силу волочіння при різних швидкостях волочіння, що варіюються в межах 0–0,5 м/с. Волочіння дроту здійснювали за маршрутом 0,6–0, 54–0, 50 мм, виконуваному окремо по переходах без вібрації і за один прохід з вібрацією. Спроби протягнути дріт за вказаним маршрутом за один прохід без вібрації не мали успіху із-за обривів.

При швидкості волочіння близько 0,2 м/с сила волочіння через дві волоки починає перевищувати силу волочіння без вібрації в

одній (кожній) з волок, проте залишається менше суми сил волочіння в окремих волокнах. Це дозволяє зробити висновок про позитивний вплив протинатягу, що створюється першою волокою, при волочінні через дві волокна в режимі гідродинамічного тертя. Протинатяг виникає при швидкості волочіння близько 0,2 м/с, тобто є наслідком перекриття в часі моментів вантаження окремих волок.

Отже, осьова вібрація проти фази волок дозволяє істотно (більш ніж у два рази) підвищити міру деформації металу за прохід.

Результати дослідження стабільності двоступінчастого процесу вібраційного волочіння молібденового дроту приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Вплив швидкості на силу волочіння* і коефіцієнт запасу міцності переднього кінця дроту**

Умови волочіння	Швидкість сталого волочіння, м/с							
	Пуск	0,116	0,200	0,203	0,333	0,383	0,433	0,483
У сталому процесі з вібрацією	$\frac{185}{1,48}$	$\frac{170}{1,61}$	$\frac{190}{1,44}$	$\frac{210}{1,30}$	$\frac{225}{1,22}$	$\frac{225}{1,22}$	$\frac{235}{1,16}$	$\frac{225}{1,22}$
При відключенні вібрації	Обрив із шийкою	Обрив із шийкою	$\frac{265}{1,03}$	$\frac{250}{1,09}$	$\frac{235}{1,16}$	$\frac{235}{1,16}$	$\frac{225}{1,22}$	$\frac{225}{1,22}$
Відносне зниження сили волочіння, %	–	–	28,3	16,0	4,25	4,25	–	0

* Сила волочіння Н – у чисельнику; перехід (0,60–0,57→0,50 мм); коефіцієнт витягу 1,44.

** Коефіцієнт запасу міцності – в знаменнику; частота коливань волочив 47,5 Гц; амплітуда 1,0 мм.

Досліджували процес за схемою «пуск і розгін з вібрацією–сталий процес з вібрацією–відключення вібрації» при різних значеннях швидкості сталого процесу волочіння. Вимірювали силу волочіння в сталому процесі з вібрацією і без неї.

Експеримент показав, що пуск волочильної машини без вібрації при мірі деформації металу 30,5 % за перехід 0,6–0,57–0,5 мм неможливий із-за обривів. У даному випадку визначальним чинником є пусковий пік сили волочіння, що різко знижує коефіцієнт запасу міцності переднього кінця дроту. Відключення вібрації вже на швидкості 0,2 м/с після попереднього пуску з вібрацією дозволяє реалізувати процес волочіння з указаним обтисканням металу (рис. 9).

При двоступінчастому вібраційному волочінні через дві волокна, що вібрують у протилежних фазах, сила волочіння через дві волокна до швидкості 0,15 м/с менше або дорівнює силі волочіння без вібрації в будь-якій з волок. Це означає, що у вказаному діапазоні швидкостей волочіння має місце зниження сили волочіння на величину близько 50 %; застосування вібрації дозволяє здійснювати процес з почерговим вантаженням волок при мірі деформації 30,5 % замість вживаних нині мір деформації 10–12 %.

Аналіз осцилограм сили волочіння за вказаною схемою при різних швидкостях волочіння (рис. 9) показує, що відключення вібрації на низьких швидкостях волочіння (до 0,33 м/с), незважаючи на значну різницю в рівнях сил волочіння з вібрацією і без неї (тобто за явної втраті ефекту від вібрації), не

призводить до обривів дроту – процес волочіння при розгоні волочильної машини перебігає стабільно, і при швидкості волочіння близько 0,5 м/с сили волочіння в сталому процесі з вібрацією і без неї зрівнюються. Це можна пояснити тим, що перехід від умов тертя спокою до умов граничного тертя у момент пуску пов'язані із суттєвим перепадом навантаження на передній кінець дроту, ніж при відключенні вібрації «на ходу», тобто в умовах, коли система знаходиться в русі і вже починає проявлятися режим гідродинамічного тертя.

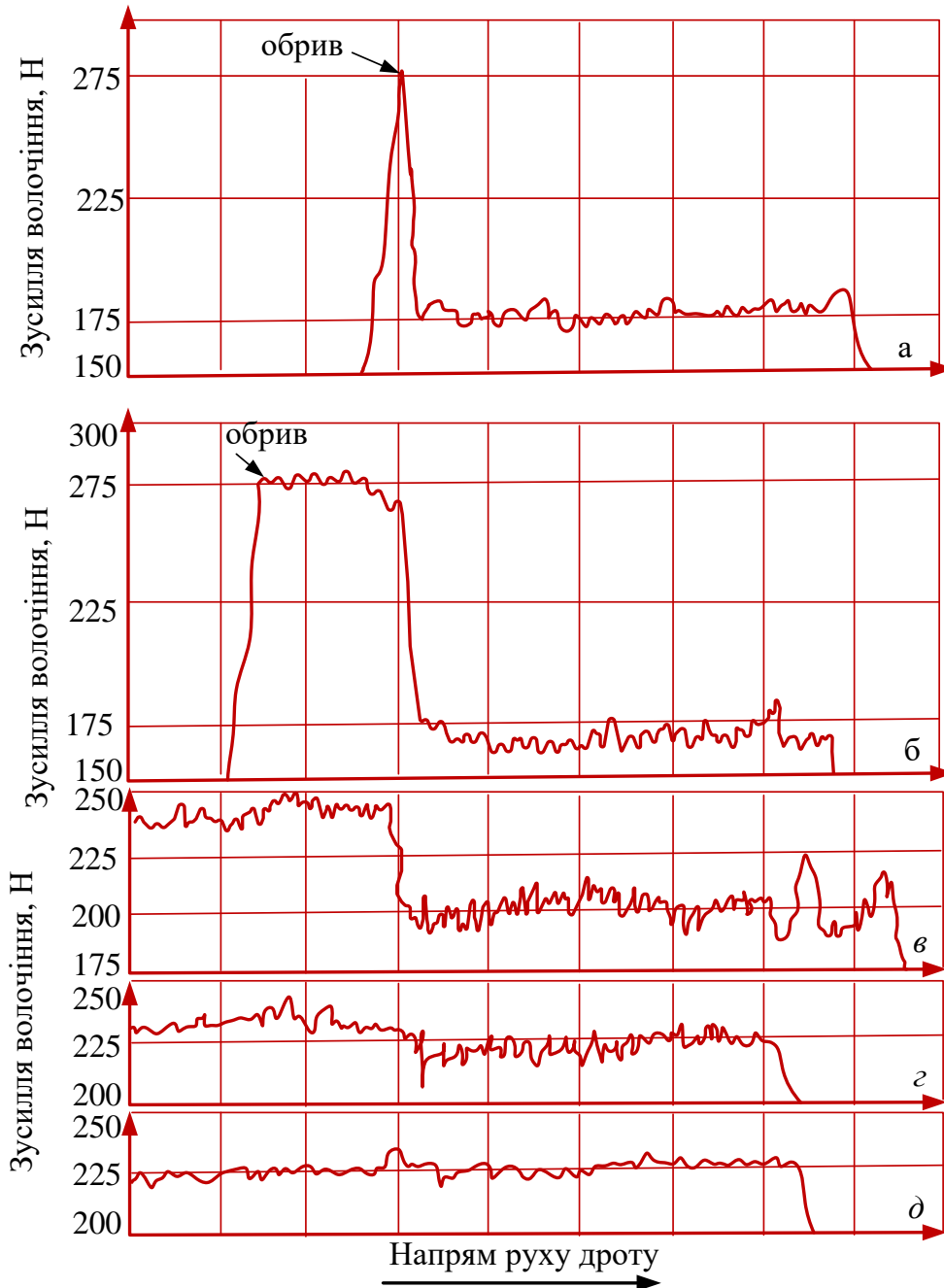


Рисунок 9 – Осцилограми запису сили волочіння при реалізації процесу за схемою «пуск і розгін волочильної установки з вібрацією–сталий процес з вібрацією–відключення вібрації»

V , м/с: а – 0,025; б – 0,116; в – 0,203; г – 0,333; д – 0,483

Отже, результати цих експериментів дозволяють зробити висновок стосовно

процесу волочіння в режимі гідродинамічного тертя про можливість і доцільність використання вібрації лише в короткий відрізок часу – у момент пуску волочильної машини, що зводить до мінімуму енергетичні витрати на збудження вібрації і значно підвищує довговічність віброприводу і деформувального вузла в цілому.

Реалізація процесу волочіння дроту з гідродинамічним введенням мастила і застосуванням вібрації волочильного інструменту в початковий період процесу волочіння здійснюється на установці (рис. 4) за допомогою блоку управління. Сигнали, що управляють, надходять на блок з датчиків швидкості волочіння (тахогенератор 6, вал якого сполучений з валом приводного двигуна 2) і сили волочіння (тензометричний датчик 7).

Величину обтискання дроту за перехід призначають виходячи з рівня сили волочіння з вібрацією (рис. 10, крива 1) у пусковий період.

Пуск установки може бути здійснений за двома варіантами. *Перший варіант:* процес починають з вібрацією (точка А), і розгін приводу тягового органу установки здійснюють з вібрацією до ти, поки гідродинамічний ефект не забезпечить рівень сили волочіння без вібрації, відповідний $P_{ном}$. У цей момент вібрацію відключають (точка В), і подальший процес розгону і стале волочіння здійснюють без вібрації (крива 2), по лінії С–Е–К.

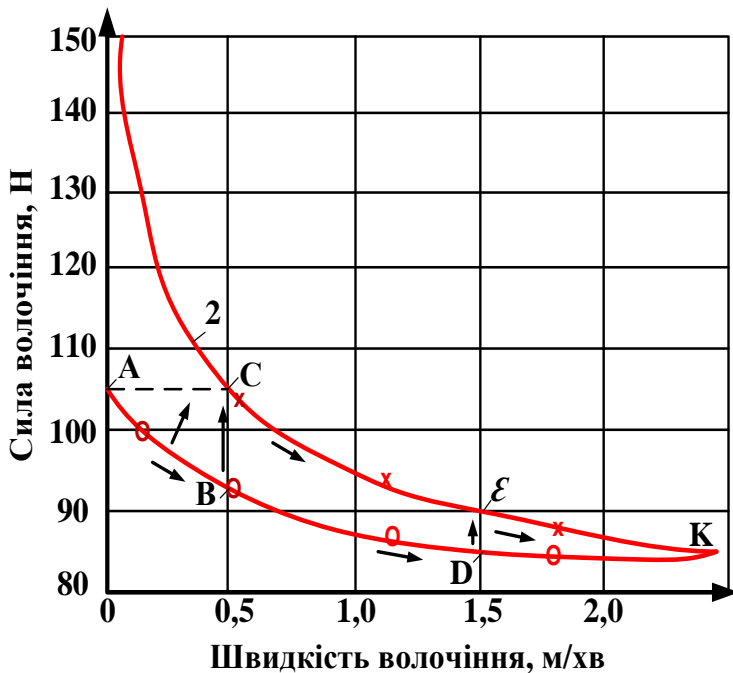


Рисунок 10 – Графік пуску установки

Пуск і розгін установки за *другим варіантом* здійснюють з вібрацією до швидкості V_n , за якої рівень сили волочіння без вібрації свідомо нижче (лінія А–В–D, швидкість волочіння $V_n = 1,5$ м/с). У цей момент вібрацію відключають (точка D), і подальший розгін і стале волочіння здійснюють без вібрації (лінія Е–К) у режимі гідродинамічного тертя

Як показали проведені випробування установки, застосування вібрації в початковий і кінцевий періоди волочіння

з гідродинамічним введенням мастила дає можливість за рахунок збільшення коефіцієнтів витягу металу за прохід у 1,8–2 рази підвищити продуктивність устаткування.

Зважаючи на короткочасність указаних періодів у загальному циклі волочіння смуги даний технологічний процес є мало критичним щодо економічності вібраційного приводу інструменту.

У **п'ятому розділі** проводиться розробка впровадження технології

виробництва вольфрамового дроту. Аналіз традиційних і нових технологічних процесів отримання вольфрамових дротяних заготовель і результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок про те, що потрібний комплексний підхід до розробки інтенсивної технології виробництва дроту з використанням і оптимізацією нових технологічних процесів обробки тиском і обліком формування необхідних властивостей готової продукції. Досліджувався вплив кількості і способів введення силіційлужних присадок у вольфрамовий ангідрид на властивості штабиків і дроту марки ВА. За оцінкою властивостей штабиків (зернистості, щільності, макроструктури, хімічному складу), а також виходу придатної продукції, мікроструктури, фізико-механічних властивостей дроту діаметром 112 мкм, виготовленого з цих штабиків, оцінювався вплив способу і кількості присадок, що вводилися, на властивості штабиків і дроту.

Дослідження комплексного впливу окремих процесів термомеханічної обробки, включаючи і нові інтенсивні, на якість напівфабрикату і готового дроту здійснювалося в процесі їх виготовлення за схемами, показаними на рис. 11.

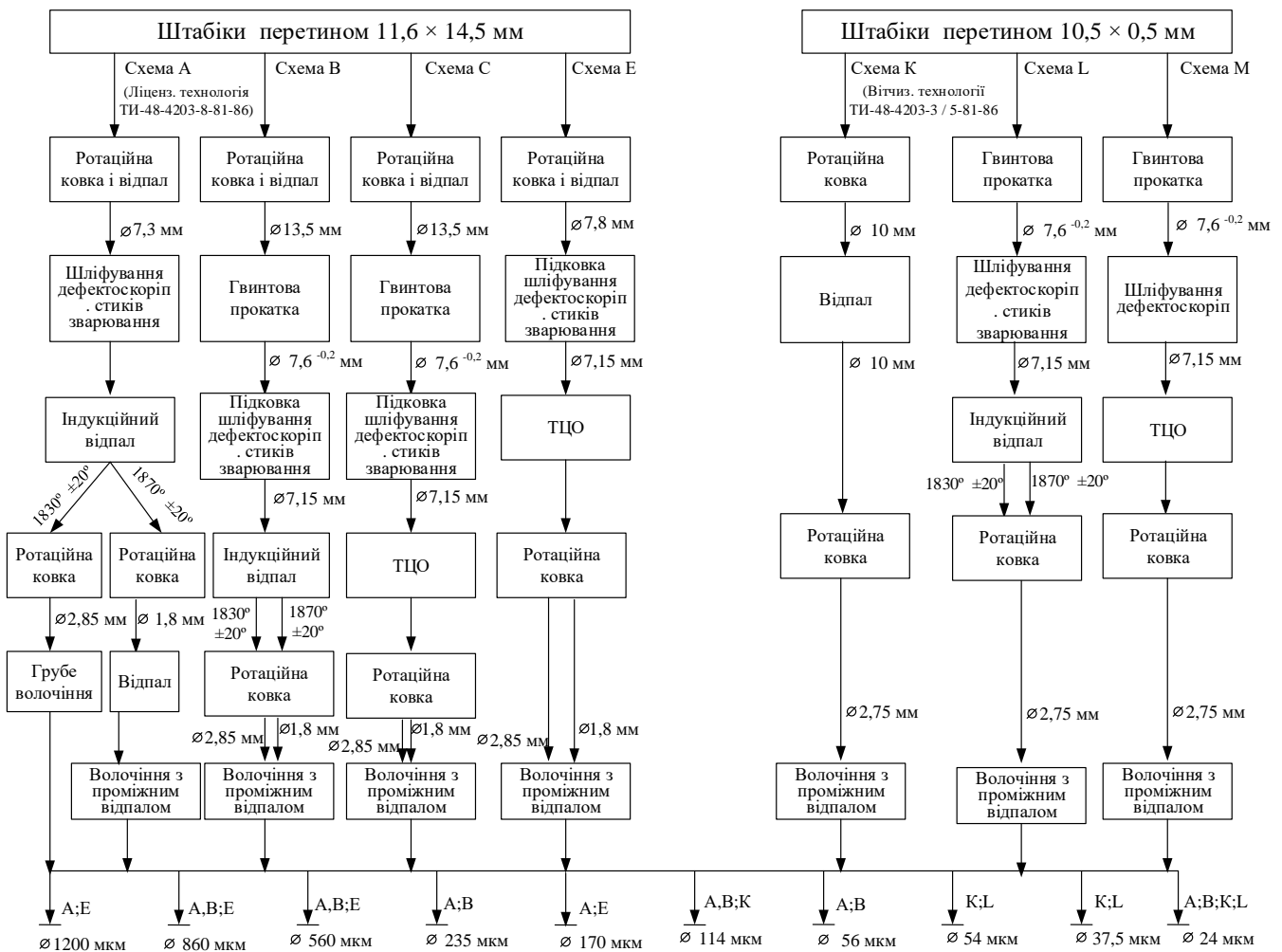


Рисунок 11 – Досліджувані схеми термомеханічної обробки напівфабрикатів і готового дроту

Схема «А» була базовою для порівняння властивостей напівфабрикату і готової продукції і реалізувалася на ліцензійній лінії.

Схема «В» передбачала включення замість шести переходів операції другого кування поперечно-гвинтового плющення за один перехід за розробленими

способами з наступними операціями за традиційною технологією.

За схемою «С» прутки діаметром 7,15 (6,85 мм виготовлялися аналогічно схемі «В», а замість індукційного відпалу стикозварених прутків здійснювався термоциклічний відпал (ТЦВ). При цьому відпрацьовувалися режими ТЦВ, що забезпечують повну рекристалізацію металу при мінімальних енерговитратах. Надалі прутки зварювалися і обробка проводилася аналогічно процесу за базовою технологією.

Схема «Е» передбачала вивчення впливу термоциклічного відпалу кованих прутков на властивості напівфабрикату і готової продукції. ТЦВ здійснювався замість індукційного відпалу на прутках діаметром 7,15 мм, отриманих за схемою «А». Потім стикозварювання відпалених прутків подальша обробка також здійснювалася за схемою «А».

Схема «К» була базовою для порівняння властивостей напівфабрикату і готової продукції. Термомеханічна обробка здійснювалася за традиційною технологією.

Схема «L» передбачала поперечно-гвинтову прокатку штабиків до прутка діаметром 7,6–0,2 мм замість тринадцяти переходів першої і другої операції кувань на ротаційно-кувальних машинах (РКМ). Після циклу операцій, що включають шліфування, дефектоскопіювання, видалення дефектів, стикозварювання і індукційний відпал, подальша обробка здійснювалася на базовій технологічній лінії (за схемою «К»).

За схемою «М» прутки, отримані аналогічно схемі «L», замість індукційного відпалу, піддавалися ТЦВ. При цьому прутки в стик не зварювалися. Подальша обробка також здійснювалася за схемою «К».

Дослідження технологічних процесів і виготовлення випробувальних партій штабиків і дроту виробляли на діючому типовому устаткуванні. Визначення хімічного складу початкової сировини і напівфабрикатів проводили в лабораторних умовах за діючими стандартизованими методиками. Дисперсність порошків оцінювали шляхом визначення середнього діаметру зерна на приладі Фішера, шляхом виміру насипної щільності, визначення гранулометричного складу порошку прямим підрахунком числа зерен різних фракцій. Гідростатичним зважуванням визначали щільність зварених штабиків, заміряли величину їх лінійної усадки. За бальною методикою оцінювали зернистість штабиків.

Дослідження механічних властивостей дроту здійснювали шляхом випробування зразків на статичне розтягування (довжина зразка – 200 мм, кількість зразків – не менше трьох). При випробуваннях визначали тимчасовий опір розриву (σ_s , кгс/мм²), відносне подовження (δ , %). Жароміцність дроту оцінювали за величиною відносного подовження зразка діаметром 0,51 мм, після проведення випробувань у вакуумі при температурі 2600 °С.

Кількість присадок (К, Si, Al), що вводяться у вольфрамовий ангідрид, за традиційною технологією значно відрізняється від кількісного складу присадок удосконаленої технології, що призводить також до зміни кількості використовуваних початкових об'ємів розчинів з присадками при приготуванні легуючого розчину. У зв'язку з нестійкістю легуючого розчину (утворюється колоїд силікатної кислоти), що утворюється, проведені дослідження з уточнення режиму

приготування його для наступного використання в процесі отримання великих дослідних партій вольфрамового ангідриду марки ВА з використанням методу душировання. При проведенні дослідних робіт використовували розчини силікату калію різної концентрації ($C_{SiO_2} = 34$ г/дм³, $C_{кон} = 30$ г/дм³; $C_{SiO_2} = 132$ г/дм³), які готували розчиненням кремнієвої кислоти в розчині гідроксиду калію, концентрація розчину нітрату алюмінію складала $C_{Al_2O_3} = 14,73$ г/дм³.

Для контролю якості вольфрамового дроту було розроблено метод неруйнівного контролю. Одним з найбільш поширених видів браку вольфрамового дроту є розшарування. Причиною є як внутрішні тріщини, що виникають в дротяній заготівлі ще на початкових етапах деформації вольфрамового штабіка, так і дефекти структури заготівлі, що розвиваються в мікротріщини на пізніших стадіях волочіння дроту. Проте технологічні схеми виробництва вольфрамового дроту часто не передбачають виявлення внутрішніх дефектів на початкових етапах обробки напівфабрикату.

Як ефективні способи скорочення браку із розшарування можна відмітити оперативне коригування технологічних режимів обробки напівфабрикату залежно від фізико-механічних властивостей і використання для виробництва дроту високоякісної сировини. Одним з методів неруйнівного контролю є оцінка якості дроту по модулю зрушення. При цьому модуль зрушення визначається за допомогою спеціального пристрою, що складається зі штатива і набору вантажів-маятників, маса яких складає 30 % розривного зусилля зразка дроту. Експериментальні дані показали, що вольфрамовий дріт з модулем зрушення $G > 1,3 \times 10^5$ МПа не схильний до розшарування і, а дріт з $G < 1,0 \times 10^5$ МПа – схильний.

Відомо, що модуль зрушення G пов'язаний з модулем пружності E співвідношенням $G = E/2(1 + \mu)$, де (μ – коефіцієнт Пуассона).

Для вирішення цього завдання розроблений метод, суть якого полягає у визначенні модуля пружності досліджуваного прутка E залежно від його діаметру d , величини прогину f і докладеного до прутку зусилля F . Для контролю прутків був сконструйований прилад (рис. 12), що включає нижню опору 1, на якій розташовується досліджуваний пруток 2, притиск 3, нажимний пристрій для створення зусилля, діючого на пруток і стійку, в якій виконано гніздо 5 для установки індикаторної голівки 6, що фіксує переміщення притиску. Згідно приведеної на рис. 12 схемі вантаження величина прогину прутка f визначається з виразу:

$$E = \frac{Fa^2(4a - 3l)}{6Jf}, \quad (13)$$

де $J = \frac{\pi d^4}{64}$. Тоді

$$E = \frac{32Fa^2(4a - 3l)}{3\pi d^4 f}. \quad (14)$$

Як матеріал для досліджень використовували прутки $\varnothing 7,2$ і $3,2$ мм, виготовлені з вольфрамових штабіків марки ВА перерізом $10,5 \times 10,5$ мм, щільністю $17,3$ – $17,5$ г/см³, зернистістю 4000 – 12000 зерен/мм, HV = 285 – 290 .

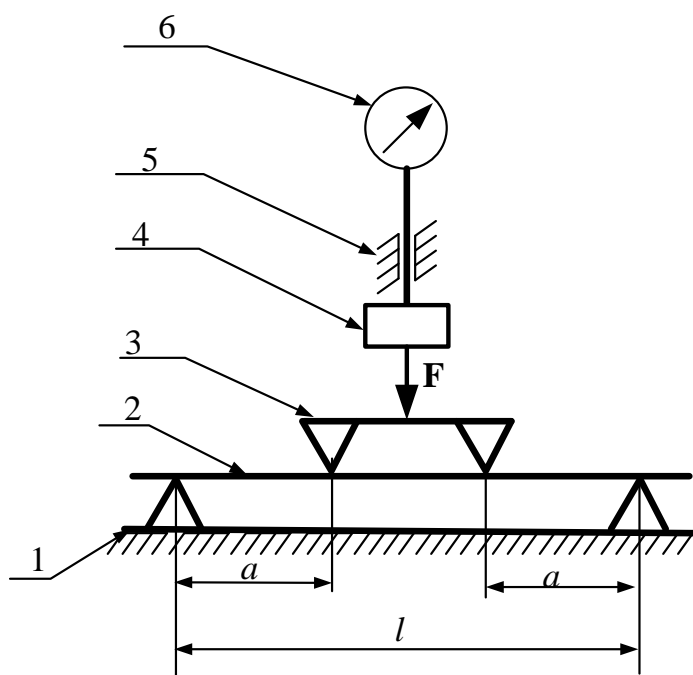


Рисунок 12 – Схема приладу для виміру модуля пружності

Випробування базувались на оцінці технологічних властивостей вольфрамових заготовель. Для цього на першому етапі роботи був вимірний модуль пружності E прутків $\varnothing 7,2$ мм, відібраних з 26 технологічних партій. Залежно від значення E досліджувані прутки були розділені на чотири умовні групи. З кожної групи прутків були відібрані зразки для металографічних досліджень і механічних випробувань, у ході яких оцінювали мікротвердість у подовжньому і поперечному перерізах, розмір зерна (середній лінійний розмір зерна в поперечному перерізі зразка) у центральній частині і на периферії,

монокристалність зерен. Результати досліджень приведені в табл. 3.

Аналіз результатів дослідження прутків $\varnothing 7,2$ мм показав, що значення E у більшій частині (до 70 %) прутків знаходиться в інтервалі $(340-510) \cdot 10^3$ МПа. Монокристалність зі зменшенням E зростає, а інші досліджувані параметри не мають чітко вираженої залежності від значення модуля E . Окрім того, на поверхні деяких прутків групи 4 були виявлені повздовжні тріщини завглибшки до 0,6 мм.

Таблиця 3 – Технологічні властивості вольфрамових прутків $\varnothing 7,2$ мм

Група	f , мм	E , МПа $\times 10^3$	Мікротвердість, МПа у перерізах		Розмір зерна, мкм		Монокристалність, L/W	Доля зразків цієї групи, % загального числа
			Поперечному	Подовжньому	У центрі	На поверхні		
1	0,07-0,08	510-580	4810	4790	55-110	180-280	2,8	12
2	0,08-0,10	410-500	4970	4820	55-110	160-280	3,1	30
3	0,10-0,12	340-400	5080	4780	55-110	180-260	3,3	40
4	0,12-0,15	280-330	4810	4440	55-110	220-340	3,5	18

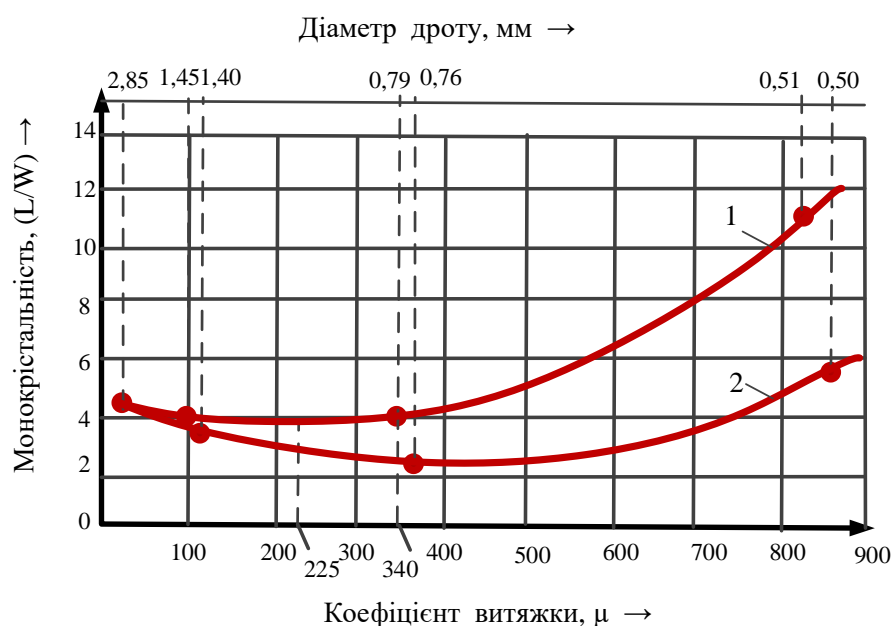


Рисунок 13 – Залежність монокрystalності структури вольфрамового дроту від коефіцієнта витяжки металу і схеми обробки : 1 – обробка волочінням з діаметру 2,85 мм; 2 – обробка волочінням з діаметру 1,8 мм.

монокристалність L/W для дроту діаметром 0,5 мм має бути не менше 10. На рис. 13 наведена залежність монокрystalності L/W вагового дроту від міри деформації і схеми обробки. Аналіз отриманих результатів показав, що ваговий дріт, отриманий волочінням з діаметру 2,85 мм, характеризується вищим показником моно кристалності. При цьому інтенсивність зростання вказаного параметра зі зростанням міри деформації цього дроту вища, ніж дроту, отриманого волочінням з діаметру 1,8 мм.

На початкових етапах обробки (куванням або волочінням) заготівлі початковим діаметром 2,85 мм також розрізняються характером зміни структури.

Отже, більш ранній початок волочіння кованої заготівлі інтенсивно знімає її спадковість. Це дозволяє рекомендувати для отримання вагового дроту діаметром 1500–1200 мкм з $L/W > 10$ застосування волочіння на діаметрі заготівлі 3,5–3,0 мм (коефіцієнт витягу від штабіка 17,5–23,8).

Дослідження впливу деформації на структуру і властивості дроту ВА, отриманого за різними технологічними схемами, найдетальніше виконано для базової схеми А і схеми Б. Зміна структури і характеру руйнування матеріалу у міру збільшення міри деформації (зменшення діаметру прутка і дроту) на різних етапах технологічного процесу показує, що існують певні відмінності для матеріалу, обробленого за схемами А і Б, які особливо помітні на ранніх стадіях деформації.

Характер зміни мікротвердості по перерізу прутків (рис. 14 д, е) вказує на дещо слабкіше опрацювання структури в центрі прутка, отриманого гвинтовою прокаткою (схема Б).

Після відпалу при 1860 °С ротаційно кувальний пруток (А) має рівноосне велике зерно (рис. 14 а). Розмір зерна в прутку після гвинтової прокатки (В) дрібніший (рис. 14 б), особливо на периферії прутка (рис. 15).

3 метою встановлення залежності міри деформації заготівлі волочінням на параметри структури вагового дроту, проведені порівняльні експериментальні дослідження структури вагового дроту, отриманого з кованих заготівель початкового діаметру 2,85 і 1,8 мм. Представлено вплив технологічних схем обробки на формування структури вагового дроту. Кількісний параметр мікроструктури –

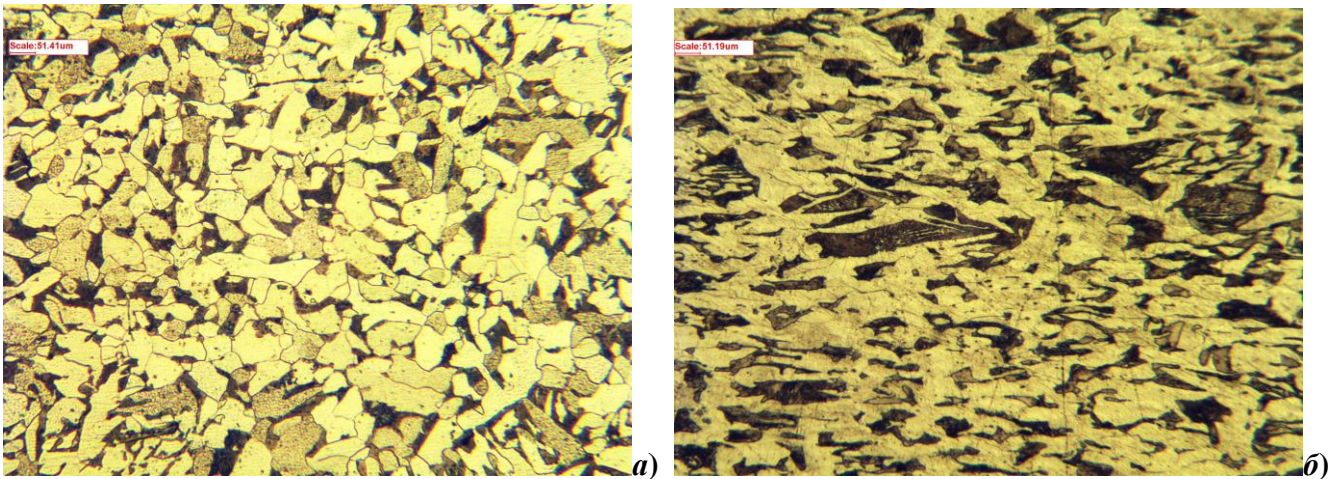


Рисунок 14 – Вплив деформації ротаційним куванням (*a* – схема А) і поперечно-гвинтовим плющенням (*б* – схема В) на мікроструктуру і розподіл твердості по перерізу прутка

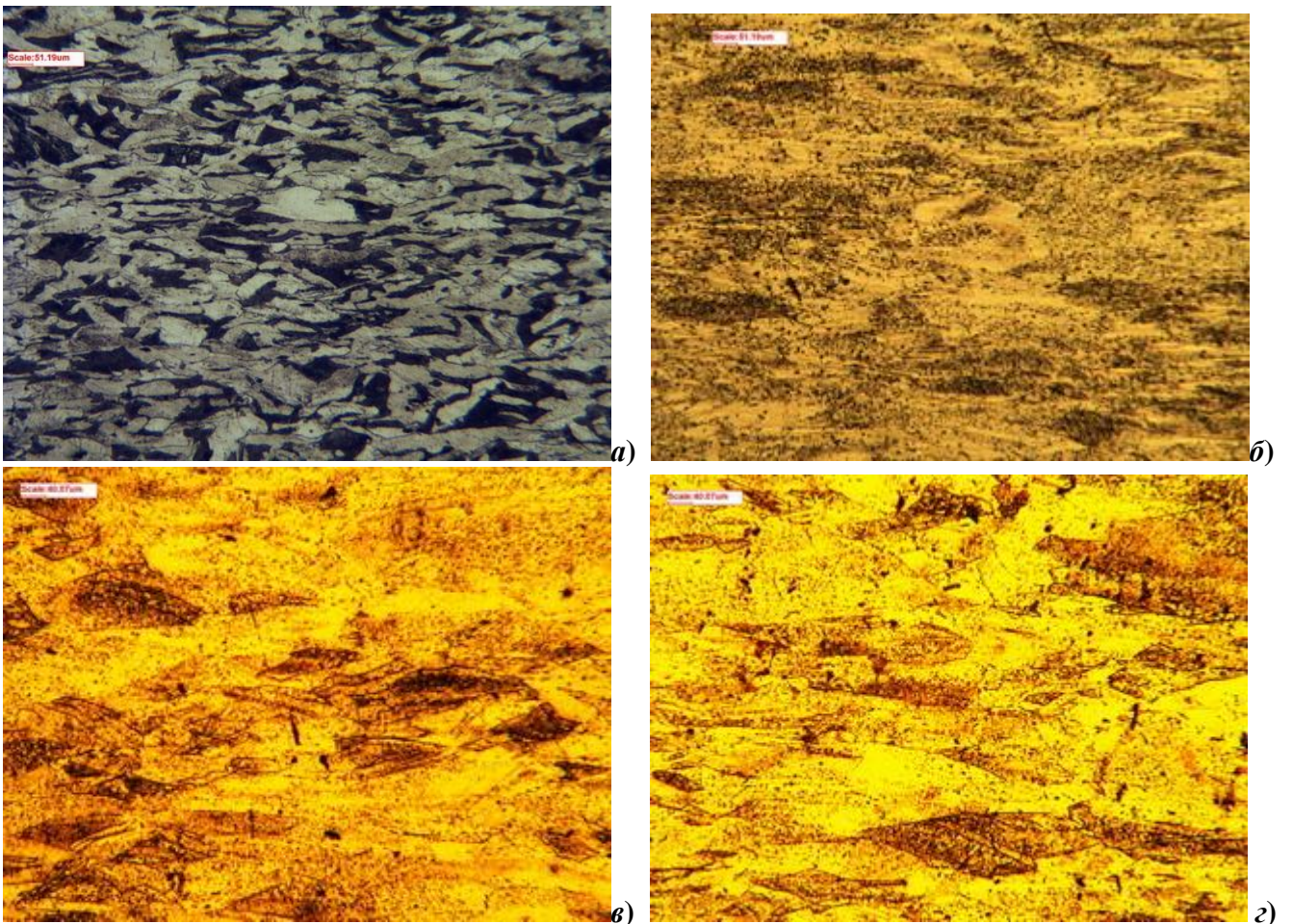


Рисунок 15 – Мікроструктури прутка діаметром 7,3–7,15 мм після деформації ротаційним куванням (схема А *a-б*) і гвинтовою прокаткою (схема В *в-г*); *a, б* – у деформованому стані; *в, г* – після відпалу при 1860 °С (x100)

Шостий розділ присвячено розробці і впровадженню технологій виготовлення композиційних прутків і дроту на основі сплавів цирконію та гафнію для потреб виробництва електродів установок плазмового різання.

Продуктивність установок плазмової обробки металу, експлуатованих у складі автоматизованих комплексів, а також якість продукції значною мірою залежать від ресурсної стійкості електродів плазмотронів (рис. 16). Головною умовою, що визначає ресурсну стійкість, є стан контакту між активним елементом і корпусом електрода, залежно від способу їх з'єднання. Для підвищення ресурсної стійкості електродів шляхом забезпечення щільного контакту між компонентами доцільно використати при їх виготовленні композити у вигляді біметалевих дротиків і дроти, які отримані спільною пластичною деформацією осердя з тугоплавкого металу (активний елемент) і пластичної оболонки. Розглянуто і доведено високу ефективність застосування для виготовлення електродів композитів, у яких як осердя використані цирконієві або гафній-цирконієві сплави, а оболонка виконана з цирконієвої бронзи або міді.



Рисунок 16 – Електроди плазмотронів

Електрод включає корпус і запресований в нього активний елемент, який одержують шляхом порізки спеціального дроту-композиту систем «цирконієвий сплав-цирконієва бронза», «гафній-мідь». Одною з важливих проблем є забезпечення надійного електричного контакту між складовими частинами композиту-тугоплавким сердечником з цирконієвого сплаву та оболонкою з цирконієвої бронзи. Цей так званий «металургійний» контакт забезпечується шляхом спільної пластичної деформації (пресування, волочіння) сердечника і оболонки.

Відомим технічним рішенням, яке забезпечує щільний контакт сердечника з оболонкою, є розміщення між ними проміжного шару з металу, що має міцність та пластичність, проміжні між відповідними характеристиками сердечника і оболонки. За розробленою технологією спосіб виробництва електродів з цирконієвих сплавів передбачає використання композиційної заготовки під пластичну деформацію без проміжного шару, однак за умови деформування композиту в умовах різкого зниження коефіцієнту зовнішнього тертя при вібрації інструменту та гідродинамічній подачі мастила на контактні поверхні осередку деформації.

Виконано аналіз кінематичних та силових умов деформування композиту з м'якою оболонкою та більш твердим сердечником для випадку, коли на контактній поверхні осередку деформації має місце ковзання. На рис. 17 показано поле

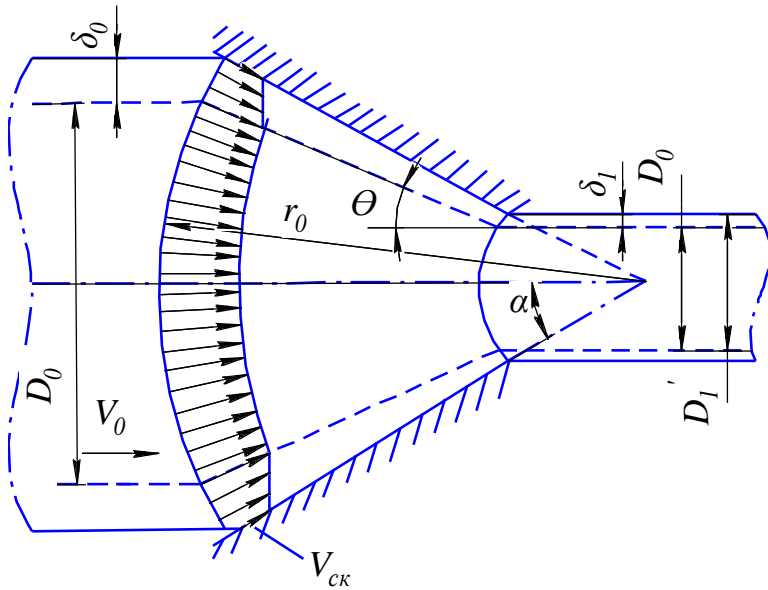


Рисунок 17 – Поле швидкостей на вході в осередок деформації

швидкостей на вході в осередок деформації при деформуванні композиту з твердим сердечником та більш м'якою оболонкою.

Компоненти швидкості в шарі оболонки:

$$v_r = -v_r(r, \theta); \quad v_\theta = -v_\theta = 0.$$

Для визначення залежності швидкості v_r від координат використаємо рівняння нерозривності у вигляді $\partial(rv_r)/\partial r = 0$.

Його загальне рішення $v_r = \varphi(\theta)/r$.

Швидкості деформації

$$\varepsilon_r = \partial v_r / \partial r = -2\varphi(\theta)/r^2;$$

$$\varepsilon_{\theta r} = \varepsilon_{\lambda\lambda} = \varphi(\theta)/r^2;$$

$$\varepsilon_{r\theta} = -\varphi_1(\theta)/r^2.$$

Інтенсивність швидкостей деформації

$$\varepsilon_i = \sqrt{3\varphi^2(\theta) + \varphi_1^2(\theta)} / \sqrt{3} r^2.$$

Дотична напруга в шарі оболонки

$$\tau = \mu_i \varepsilon_{r\theta} = \sigma'_s \varphi_1(\theta) / \sqrt{3\varphi^2(\theta) + \varphi_1^2(\theta)} \cdot \sqrt{3}, \quad (15)$$

де σ'_s – напруга текучості матеріалу оболонки, яка приймається незалежною від координати r .

При визначенні функцій $\varphi(\theta), \varphi_1(\theta)$ швидкість ковзання виразимо через швидкість подачі композиту v_0 та коефіцієнт дотичної напруги m , величина якого може бути в межах від нуля (при повній відсутності контактної тертя) до одиниці (при повному прилипанню на контактній поверхні).

Отже граничною умовою для поверхні розділу оболонки з сердечником є:

$$r = r_0; \quad \theta = \theta_0; \quad v_r = -v_0.$$

При лінійному законі зміни швидкості по товщі оболонки одержимо:

$$\varphi(\theta) = -2v_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{\alpha - \theta}{\alpha - \theta_0} \right) \right] r_0^2 / r.$$

Тоді у відповідності з (15)

$$\tau = m \sigma'_s / 12 \left[(\alpha - \theta_0)(1 - m) + (\alpha - \theta)m \right]^2 + m^2 \sqrt{3} \quad (16)$$

Ця формула враховує, разом з характеристикою міцності і відносною

товщиною оболонки $\delta/V_0 \approx \alpha - \theta_0$, також умови ковзання на контактній поверхні через коефіцієнт m .

Напругу тертя на контакті визначимо з (16), прийнявши $\theta = \alpha$:

$$\tau_k = m\sigma_s / \sqrt{12(\alpha - \theta_0)^2(1-m)^2 + m^2} \sqrt{3}$$

Дотичну напругу на межі розділу одержимо з (16), прийнявши $\theta = \theta_0$:

$$\tau_1 = m\sigma_s' / \sqrt{12(\alpha - \theta_0)^2 + m^2} \sqrt{3},$$

Отже, при $m \neq 0$ $\tau_k < \tau_1$.

Це дозволяє зробити висновок, що пластичні зсуви в шарі м'якої оболонки еквівалентні зменшенню сил контактного тертя при пресуванні та волочінні.

Оскільки $m = f' \sqrt{3}$, де $f' = \tau_k / \sigma_s'$ – коефіцієнт контактного тертя, то значення коефіцієнту контактного тертя при пресуванні повинні бути більшими, ніж при волочінні.

Виконаний аналіз призвів до висновку, що застосування в композиті більш м'якої оболонки відносно сердечника суттєво покращує умови деформування композиту пресуванням і волочінням.

Розроблена технологічна схема одержання композитів включає операції виготовлення складеної заготовки (сердечник-цирконієвий сплав 110, оболонка-цирконієва бронза БрЦр 0,1); гаряче пресування складеної заготовки на біметалевий пруток діаметром 16 мм; вібраційне волочіння прутка до діаметра 2,5 мм; гідродинамічне волочіння біметалевого дроту до діаметра 1 мм.

З метою дослідження впливу схеми деформування на якість контакту між сердечником та оболонкою, в технологічній схемі як варіант було задіяно процес ротаційного кування. Відтак в діапазоні діаметрів 2,5–1 мм деформування біметалу велось за двома схемами: за схемою «А» – ротаційне кування до діаметра 1,8 мм і гідродинамічне волочіння на кінцевий діаметр; за схемою «Б» – виключно гідродинамічне волочіння.

Матеріали вихідних компонентів складеної заготовки мали нижче приведений хімічний склад (мас. %). Цирконієва бронза оболонки: Zr-0,06-0,15; домішок – не більше 0,1; Cu – останнє. Сплав 110 сердечника: Nb – 1,1; Al – $8 \cdot 10^{-3}$; N – $6 \cdot 10^{-3}$; C – $2 \cdot 10^{-3}$; Zr – останнє.

Співвідношення між діаметрами оболонки та сердечника складеної заготовки визначають, керуючись конструкцією електродів плазмотронів. При цьому прийнятий діаметр складеної заготовки (85 мм) визначено виходячи з технологічних міркувань-можливостей пресу гарячого пресування. Діаметр d_0 сердечника складеної заготовки визначено через витяжку μ складеної заготовки при деформації її на кінцевий композит діаметром 1 мм (таблиця 4). Виходячи з заданого діаметру d_1 сердечника в кінцевому композиті знайдено $d_0 = d_1 \sqrt{\mu} \cong 66$ мм. При виготовленні складеної заготовки фактичний діаметр сердечника було прийнято рівним обчисленому.

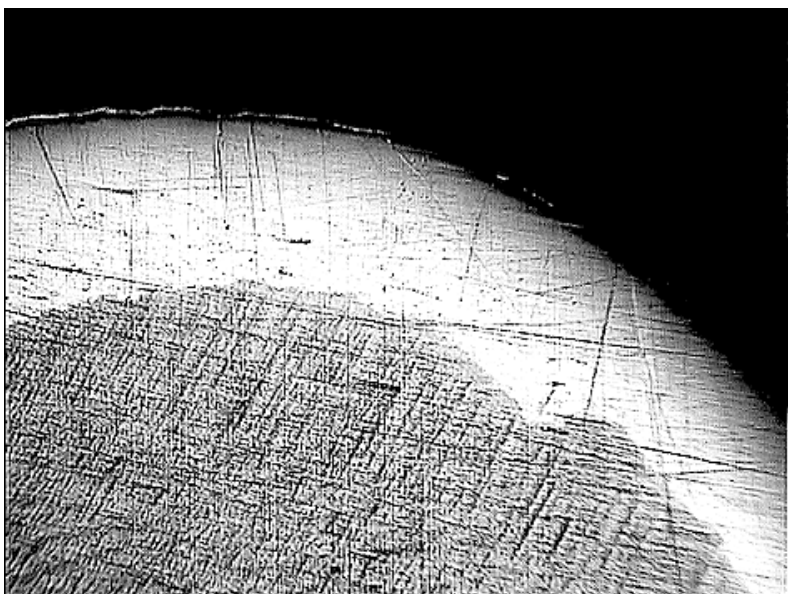


Рисунок 18 – Металографічне визначення фактичного діаметра сердечника та товщини оболонки в композиті

Згідно технологічної схеми були виготовлені складена заготовка та композити з неї фактичними діаметрами 2,5 мм; 1,02 мм (схема «А»); 1,03 мм (схема «Б»). Металографічним шляхом були визначені фактичні діаметри сердечника в композитах, рис. 18.

Дані обчислень діаметрів сердечника та вимірів їх на металографічних шліфах під мікроскопом приведені в табл. 4. Потрібну для одержання композиту з бажаним діаметром сердечника загальну деформацію

складеної заготовки можливо визначити з задовільною точністю шляхом розрахунку.

Таблиця 4 – Обчислені та фактичні значення діаметру сердечника в композитах

Складена заготовка-композит		Сердечник, Ø, мм	
Композит фактичн. Ø мм	Коефіцієнт витяжки	Обчислений	Фактичний
85	1	66,02	66,00
2,5	1158,1	1,94	1,93
1,02 «А»	6944,44	0,8	0,82
1,03 «Б»	6810,25	0,8	0,83

Для реалізації розробленої технологічної схеми підібрано комплекс промислового технологічного обладнання. В конструкцію станів для одержання композитів закладені високопродуктивні технологічні процеси вібраційного деформування та гідродинамічного волочіння. У табл. 5 приведені технічні характеристики розробленого обладнання, яке задіяне в промисловому виробництві електродних композитів.

На станах ВДУ-П і ЗК-1,6-26 реалізується процес вібраційного волочіння композиту через дві волоки, яким надаються коливання низької частоти (50 Гц) у протилежних фазах. Завдяки цьому в 1,8–2 рази збільшується витяжка композиту за перехід, відповідно зростають продуктивність процесу і вихід готової продукції.

На стані 1/550М-ГД при виробництві біметалевих композитів реалізовано комбінований процес гідродинамічного волочіння з накладенням на волочильний інструмент вібрації в початковий період розгону приводу волочильного стану. Це знімає початковий пік сили волочіння. При подальшому зростанні швидкості

волочіння і досягненні рідинного режиму тертя на контактних поверхнях осередку деформації вібрацію волочильного інструменту знімають. Це дає можливість збільшити витяжку композиту до 1,4–1,45 за перехід при забезпеченні необхідного коефіцієнту запасу міцності металу при волочінні.

У ході роботи на описаному комплексі технологічного обладнання були одержані промислові партії композитів для виготовлення з них активних елементів електродів плазмотронів. Враховуючи велику потребу в електродах для сили робочого струму від 400 до 100А, виготовлені композити діаметром 2,5; 1,46; 1,4; 1,3; 1,25; 1 мм.

Зважаючи на те, що за формування щільного контакту між сердечником та оболонкою відповідальними є кінцеві технологічні операції деформування, в діапазоні діаметрів 2,5–1 мм було виконане дослідження еволюції мікроструктури, хімічного складу та поверхні металу в перехідній зоні між сердечником та оболонкою, в ході обробки.

Для того, щоб встановити закономірності деформування «металургійного» контакту в ході деформування композиту, в цих дослідах було використано композити всього ряду діаметрів.

Таблиця 5 – Технічні характеристики технологічного обладнання

Діаметри композиту згідно схеми, мм	Назва технологічного обладнання	Тип (марка)	Характеристики				
			Робоче зусилля, кН	Витяжка металу за перехід	Швидкість деформування, м/с	Встановлена потужність, кВт	Температура нагрівання, К
85-16	Гідравлічний прес	П459	630	20-50	0,02	17	1773
16-9,5	Стан вібраційного деформування	ВДУ-П	50	1,1-1,3	0,05-0,2	14,2	1573
9,5-2,5	Ланцюговий волочільний стан	ЗК-1,6-26	16	1,1-1,3	0,12	16	1373
2,5-1,8 схема «А»	Ротаційно-кувальна машина	ІМ-116	20 (в імпульсі)	1,1-1,2	0,1	8,75	1373
2,5-1 схема «Б»	Стан гідродинамічного волочіння	1/550 М-ГД	5	1,2-1,45	1,65	7,1	Без нагрівання

На растровому електронному мікроскопі були проведені металографічні дослідження контактної зони отриманих біметалічних сполук рис. 19. В зразках композиту в діапазоні діаметрів 2,5–1,8 мм в перехідній зоні виявлені ділянки шириною до 1,5 мкм, де контакт відсутній. У процесі деформації композиту до

діаметру 1 мм ці ділянки закриваються, залишаються лише невеликі мікропори. Таким чином, існує певна загальна деформація композиту, яка забезпечує «металургійний» контакт між компонентами біметалу.

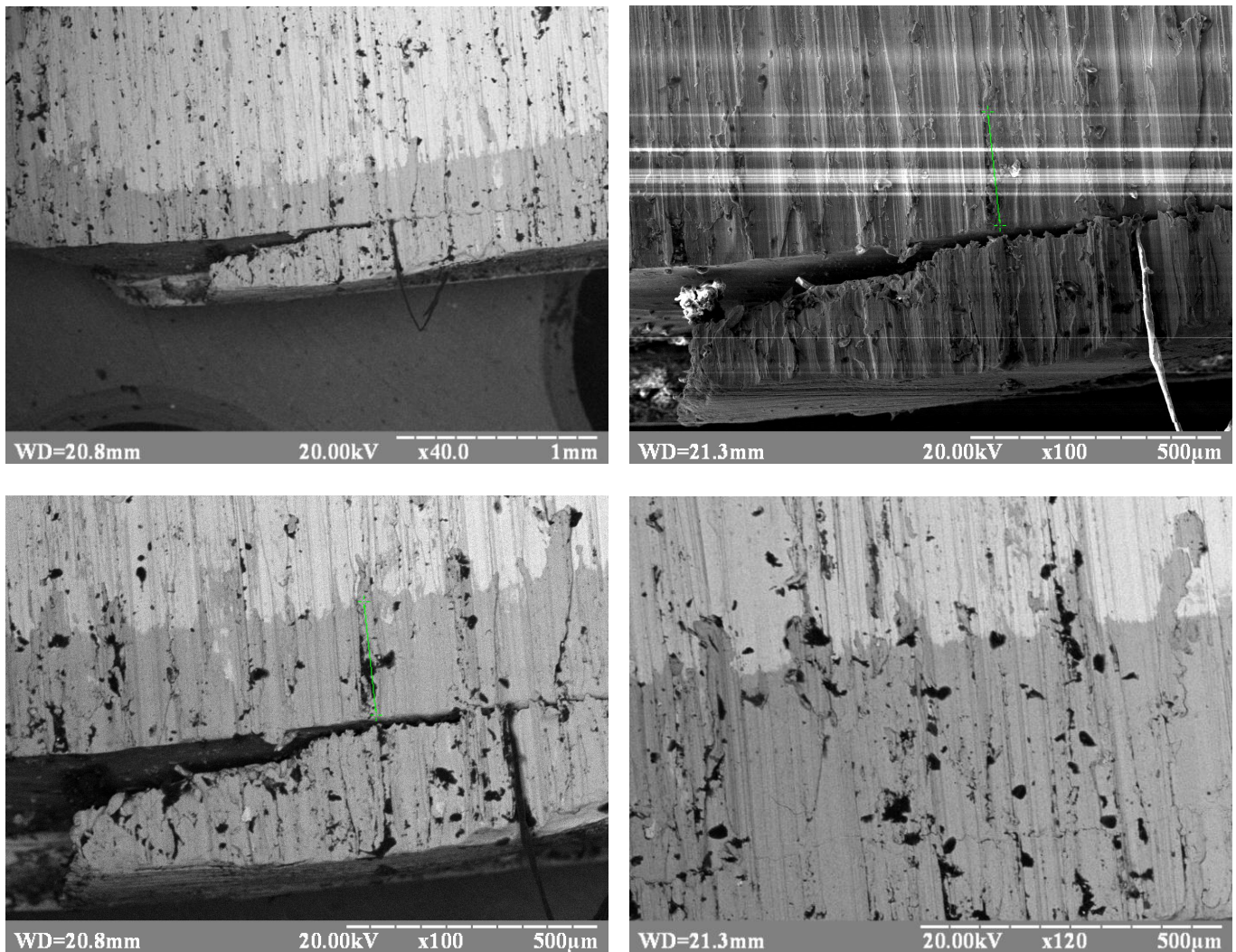


Рисунок 19 – Структура контактної зони біметалевого дроту системи Cu-Ni

Порівняння мікроструктур перехідної зони в композитах, одержаних за схемами «А» і «Б», свідчить про благотворний вплив ротаційного кування в завершальній стадії деформації композиту на формування щільного, без пустот і пор, контакту між сердечником та оболонкою. Це обумовлено більш «м'якою» схемою напружено-деформованого стану металу при ротаційному куванні в порівнянні з волочінням.

Результати металографічного дослідження перехідної зони в композитах, одержаних за схемою «А» і «Б», корелюються з даними експлуатаційних випробувань: композити за схемою «А» мали в електродах в 1,3–1,8 рази більший ресурс, чим композити, одержані за схемою «Б».

Поверхня композиту, одержаного за схемою «А», є менш фрагментованою в порівнянні зі схемою «Б», що підтверджує результати металографічних досліджень. Твердість сердечника композиту, одержаного за схемою «А», дещо більша в порівнянні зі схемою «Б», що зумовлено особливостями розвитку текстури при ротаційному куванні та відповідно волочінні.

Пропонований електрод плазмотрона (рис. 20) містить активний елемент 1, розміщений в корпусі 2, виконаному з матеріалу з високою теплопровідністю, наприклад з міді, і містить порожнину 3 для підведення охолоджуючої води.

Активний елемент (рис. 21) містить сердечник 4 з цирконієвого сплаву, на який нанесено послідовно підшарок 5 чистого цирконію, шар 6 нітриду цирконію, і зовнішній шар 7 з матеріалу корпусу електрода, в даному випадку – з міді. Активний елемент електрода з'єднаний з корпусом шляхом запресовування.

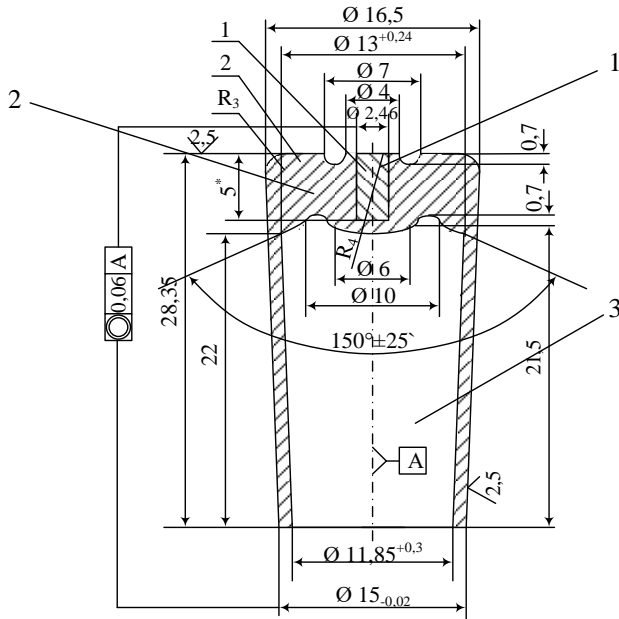


Рисунок 20 – Електрод плазмотрона

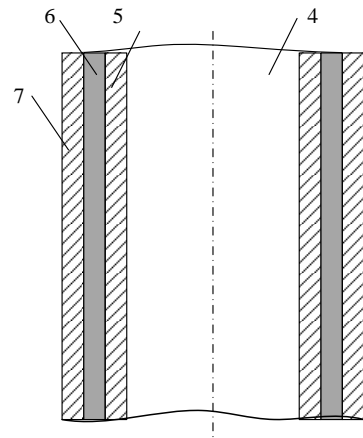


Рисунок 21 – Активний елемент електрода (повздовжній переріз)

Виготовленням за розробленою технологією сердечника 4 активного елемента зі сплаву цирконію з ніобієм досягається висока технологічність при виробництві вихідних прутків і дроту, а також відсутність в осерді розшарованих тріщин і несплошностей.

Наявність на поверхні сердечника з цирконієвого сплаву тонкого підшару 5 чистого цирконію дозволяє при горінні дуги створити позитивний (від центру до периферії) градієнт термемісійних властивостей активного елемента, що позитивно позначається на його стійкості.

Бар'єрний проміжний шар 6 з нітриду цирконію запобігає дифузії матеріалу корпусу електрода в активний елемент. Це обумовлено значною тугоплавкістю нітриду цирконію і його хімічною інертністю відносно прилеглих компонентів електрода.

Зовнішній шар 7 з міді дозволяє підвищити ступінь контакту активного елемента з корпусом електрода при запресовуванні, оскільки на поверхню шару 6 з нітриду цирконію він може бути попередньо із забезпеченням щільного контакту (наприклад, осаджуванням), а з корпусом шар 7 з'єднується щільно за рахунок хімічної спорідненості матеріалів корпусу і шару і однакових фізико-механічних властивостей.

Особливістю конструкції розробленого електрода є те, що відношення

товщини бар'єрного шару з нітриду цирконію до діаметру сердечника становить 0,002–0,01. При значеннях зазначеного відносини, менших 0,002, абсолютна товщина бар'єрного шару при вживаних діаметрах сердечника (2–2,5 мм) стає недостатньою для виконання бар'єрних функцій. При значеннях зазначеного відносини більш 0,01, дифузія матеріалу корпусу в активний елемент припиняється і подальше збільшення товщини бар'єрного шару недоцільно.

Підшарок 5 з чистого цирконію має товщину 0,5–2,5 мкм. Випробуваннями електродів встановлено, що зменшення товщини шару нижче 0,5 мкм і збільшення понад 2,5 мкм не робить істотного впливу на експлуатаційну стійкість електрода.

Товщина зовнішнього шару 7 з матеріалу корпусу електрода не регламентується. Електрод плазмотрона одержують у такий спосіб. З матеріалу з високою теплопровідністю, наприклад з міді, виточують корпус з посадковим отвором під активний елемент. Активний композиційний елемент отримують шляхом послідовного фізичного осадження на сердечник-підкладку (дріт з цирконієвого сплаву) шарів чистого цирконію, нітриду цирконію і міді.

З композитів діаметром 2,5–1 мм виробляються активні елементи для електродів плазмотронів плазмового різання та плазмово-механічної обробки металів. Електроди одержують шляхом виготовлення корпусу з міді не нижче М-2 та запресовки в нього елемента, одержаного порізкою композиту на мірні довжини. Електроди експлуатують в наступних умовах:

- рід струму-постійний;
- робочий діапазон струму, А – 100-400 при ПВ = 100 %;
- плазмостворюючий газ-кисень, повітря;
- охолодження-примусове водяне, 5 л/хв;

Можливе виготовлення електродів шляхом їх штамповки безпосередньо з відрізків композиту. В цьому випадку діаметр оболонки приймають за умови формування з об'єму оболонки корпусу електрода.

Результати дисертаційної роботи у вигляді практичних рекомендацій і технічних рішень використані під час розв'язання низки технічних завдань в умовах промислових підприємств: ТОВ «АВМ Ампер» (м. Кременчук), АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), ПАТ «Кременчуцький колісний завод» (м. Кременчук), ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук), ТОВ НВП «Тангстен» (м. Світловодськ).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-технічна проблема підвищення рівня виробничо-економічних показників виробництва тугоплавких важкодеформівних і композиційних матеріалів на основі тугоплавких металів за рахунок розвитку наукових основ методів деформування та технологічних параметрів виробництва.

1. На основі критичного літературного огляду виконано аналіз сучасних технологій виробництва тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів, виявлено проблеми в підходах до визначення основних параметрів напружено-деформованого стану під час технологічних операцій і проектування

технологічних процесів, що стримують розвиток науково обґрунтованих ресурсозберігальних технологій тугоплавкого виробництва. Тому подальший розвиток наукових основ цієї галузі знань необхідно проводити, спираючись на математичний апарат та комп'ютерне моделювання.

2. На базі запропонованих моделей та нового аналітичного методу рішення плоскої задачі теорії пластичності, яка ураховує неоднорідність пластичної течії в осередку деформації та її вплив на параметри процесу розроблено комплекс технологій та технологічного обладнання для виготовлення вольфрамового та молібденового дроту, композиційного дроту на їх основі, технологію виробництва електродів плазмотронів.

3. Розроблено та удосконалено комплекс промислового обладнання для апаратурного оформлення інтенсивних процесів обробки тиском: стани гвинтової прокатки штабиків, устаткування для вібраційного деформування дротиків і дроту машини для волочіння заготовок з електроконтактним нагрівом і волочіння з гідродинамічною подачею мастила до контактних поверхонь осередку деформацій.

4. Набула подальшого розвитку оптимізаційна модель розрахунку параметрів навантаження, що забезпечують оптимальний рівень деформацій з використанням чисельного розв'язування скінченно-різницевої форми диференціальних рівнянь імпульсу руху, під час обробки дискретної, суцільної або шаруватої заготовки.

5. На основі теоретичних положень, що базуються на феноменологічних та системних підходах з урахуванням технологічної спадщини та впливу на властивості тугоплавких матеріалів напружено-деформованого стану в осередку деформації, визначено еволюцію структури та властивостей металу при його інтенсивній термомеханічній обробці.

6. Отримано наближене аналітичне рішення задачі розподілу температури в системі двох циліндричних площин – м'якої оболонки і тугоплавкого сердечника з використанням перетворень Гудмена і Кірхгофа застосовуючи до системи рівнянь узагальнений принцип суперпозиції щодо системи лінеаризованих задач нестационарної теплопровідності безрозмірних співвідношень початкової температури та температури середовища.

7. Шляхом розв'язання рівнянь рівноваги, пластичності і контактного тертя у зоні розділу матеріалів м'якої оболонки й тугоплавкого дроту і рівнянь теплообміну отримано аналітичне рішення що до реологічної моделі паралельного з'єднання жорстко-пластичного елемента (дріт) і елемента з послідовним з'єднанням в'язкого і пластичного елементів.

8. Експериментально та при математичному моделюванні доведено, що в умовах волочіння з нагрівом дроту у м'якій оболонці виникають надмірні напруження матеріалу у м'якій оболонці та тиск на матеріал дроту, здатні повністю роз'єднати дві поверхні волоки та дроту, величина тиску суттєво залежить від кута конусності вхідної частини волоки та має максимум у вихідній частині. Це дає змогу визначити оптимальну товщину оболонки з умови, що вона не може перевищувати радіальний тиск на поверхню дроту і визначається умовою пластичності.

9. Шляхом математичного моделювання встановлено, що напружений стан у м'якій оболонці має непрямої зв'язок з зусиллям волочіння, а залежить від товщини оболонки яка має оптимальне значення з силового навантаження на дріт. Доведено,

експериментально та при математичному моделюванні що в умовах волочіння дроту у м'якій оболонці, в умовах всебічного стискання та тангенціального руху до вихідної частини волоки швидкість руху м'якої оболонки дорівнює векторній сумі швидкостей видавлювання та тангенціального зміщення до виходу з волоки, що обумовлює упередження руху м'якої оболонки та її витікання за межі торця дроту на виході з волоки.

10. Дослідження тривалої і короткочасної міцності, мікроструктури і характеру руйнувань напівфабрикатів і готового дроту, отриманих за рекомендованими технологічними схемами із застосуванням процесів поперечно-гвинтової прокатки, вібраційної деформації і термоциклічного відпалу в комплексі підтвердили високу ефективність комбінованих технологій, що дозволяють отримати тугоплавкий дріт підвищеної якості.

11. Проведено моделювання процесу гарячого волочіння гафнію в м'якій – мідній оболонці в системі Ansys AUTODYN, при якому розподіл деформацій виглядає наступним чином: миттєва межа плинності міді досягає межі плинності гафнію і відбувається спільна деформація композиційного матеріалу з утворенням металургійного контакту між компонентами, до цього моменту м'яка оболонка виступає в ролі мастильного шару.

12. Експериментально встановлено, що волочіння молібденового дроту в холодному стані з підвищеними завдяки вібрації обтисканнями (коефіцієнти витягу 1,4–1,45 за перехід) з гідродинамічним введенням мастила забезпечує підвищення пластичних характеристик металу порівняно з традиційним гарячим волочінням. Розроблені ефективний неруйнівний метод і прилад для оцінки технологічних властивостей дротяних заготівель діаметром більше 3 мм залежно від значення модуля пружності. Запропонована класифікація заготівель за значенням модуля пружності для отримання кінцевої продукції в різних діапазонах діаметрів при мінімізації виробничих витрат. Вивчений вплив технологічних схем обробки на формування структури вагового дроту. Отримані залежності зміни кількісного параметра оцінки структури – монокристальності L/W від загальної міри деформації волочінням. Встановлено, що застосування інтенсивних технологій пресування і волочіння, починаючи вже з коефіцієнта витягу від штабіка 17,5–23,8 дозволяє досягти значень $L/W > 10$

Результати дисертаційної роботи у вигляді практичних рекомендацій і технічних рішень використані для розв'язання ряду технічних завдань в умовах промислових підприємств: ТОВ «АВМ Ампер» (м. Кременчук), АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), ПАТ «Кременчуцький колісний завод» (м. Кременчук), ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук), ТОВ НВП «Тангстен» (м. Світловодськ).

Основні положення роботи використовуються у викладанні навчальних дисциплін «Матеріалознавство субмікро- та нанокристалічних металів», «Інформаційні технології в дослідженнях матеріалів», «Технологія конструкційних матеріалів та основи машинобудування» у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Драгобецький В. В., Шаповал О. О., Щепетов В. В. та ін. Керовані ефекти пластичного деформування заготовок виробів для металургії та транспорту. Харків : «Друкарня Мадрид», 2017. 244 с.

Публікації у періодичних фахових наукових виданнях, зареєстрованих, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science

Core Collection та/або Scopus:

2. Dragobetskii V. V., Shapoval A. A., Zagoryanskii V. G. Development of elements of personal protection equipment of new generation on the basis of layered metal composition. *Izvestiya Visshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya (Izvestiya. Ferrous Metallurgy)*. 2015. Vol. 58(1). P. 44-48. DOI: 10.17073/0368-0797-2015-1-44-48 (*Web of Science*)

Dragobetskii V. V., Shapoval A. A., Zagoryanskii V. G. Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions. *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45, iss. 1. P. 33–37. DOI: 10.3103/S0967091215010064 (*Scopus / Q3 SCImago Journal and Country Rank*)

3. Dragobetskii V. V., Shapoval A. A., Mospan D. V., Trotsko O. V., Lotous V. V. Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No 4. P. 363–368. (*Scopus / Q3 SCImago Journal and Country Rank*)

4. Shapoval A. A., Mos'pan D. V., Dragobetskii V. V. Ensuring High Performance Characteristics For Explosion-Welded Bimetals. *Metallurgist*. July 2016. Vol. 60, iss. 3. P. 313–317. DOI: 10.1007/S11015-016-0292-9 (*Web of Science / Scopus / Q3 SCImago Journal and Country Rank*)

5. Gorbatyuk S. M., Shapoval A. A., Mos'pan D. V., Dragobetskii V. V. Physical Principles of Manufacturing of Periodic Profile Bars By Vibratory Drawing. *Izvestiya Visshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya (Izvestiya. Ferrous Metallurgy)*. 2016. Vol. 59, no. 7. P. 479–484. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-479-484 (*Web of Science*)

Gorbatyuk S. M., Shapoval A. A., Mos'pan D. V., Dragobetskii V. V. Production of Periodic Bars by Vibrational Drawing. *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46, no. 7. P. 474–478. DOI: 10.3103/S096709121607007X (*Scopus / Q3 SCImago Journal and Country Rank*)

6. Sikulskiy V., Kashcheyeva V., Romanenkov Yu, Shapoval A. Study of the process of shape-formation of ribbed double-curvature panels by local deforming. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4, iss. 1, no. 88. P. 43–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108190 (*Scopus / фахове видання України, категорія «А» / Q2 SCImago Journal and Country Rank*)

7. Dragobetskii V., Zagirnyak M., Naumova O., Shlyk S., Shapoval A. Method of Determination of Technological Durability of Plastically Deformed Sheet Parts of Vehicles. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. 2018. Vol. 7,

is. 4.3. P. 92–99. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19558 (*Scopus / Q4 SCImago Journal and Country Rank*)

8. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *Eureka : Physics and Engineering*. 2019. No. 2. P. 52–60. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00877 (*Scopus / Q2 SCImago Journal and Country Rank*)

9. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A., Kosilov M. Development of a new process for expanding stepped tapered rings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2/1, no. 98. P. 39–46. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.1604/19 (*Scopus / фахове видання України, категорія «А» / Q2 SCImago Journal and Country Rank*)

10. Dragobetskii V., Zagirnyak V., Shlyk S., Shapoval A., Naumova O. Application of explosion treatment methods for production Items of powder materials. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. Vol. 05/2019. P 39–42. DOI:10.15199/48.2019.05.10 (*Web of Science Core Collection / Scopus / Q3 SCImago Journal and Country Rank*)

11. Markov O., Gerasimenko O., Shapoval A., Abdulov O., Zhytnikov R. Computerized simulation of shortened ingots with a controlled crystallization for manufacturing of high-quality forgings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 103 (5-8), pp. 3057-3065. DOI: 10.1007/s00170-019-03749-4 (*Web of Science Core Collection / Scopus / Q1 SCImago Journal and Country Rank*)

12. Zagirnyak M., Zagirnyak V., Moloshtan D., Drahobetskyi V., Shapoval A. A search for technologies implementing a high fighting efficiency of the multilayered elements of military equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6/1, no. 102. P. 33–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.183269 (*Scopus / фахове видання України, категорія «А» / Q2 SCImago Journal and Country Rank*)

13. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Marchenko I., Shapoval A., Abhari P., Kordenko M. Predicting the shape formation of hollow parts with a flange in the process of combined radial-reverse extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4/1, no. 106. P. 55-62. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.203988 (*Scopus / фахове видання України, категорія «А» / Q2 SCImago Journal and Country Rank*)

14. Shapoval A., Drahobetskyi V., Savchenko I., Gurenko A., Markov O. Profitability of Production of Stainless Steel + Zirconium Metals Combination Adapters. *Key Engineering Materials*, Vol. 864, pp. 285-291, 2020, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.864.285 (*Scopus / Q3 SCImago Journal and Country Rank*)

15. Markov O. E., Kukhar V. V., Zlygoriev V. N., Shapoval A. A., Khvashchynskyi A. S., Zhytnikov R. U. Improvement of Upsetting Process of Four-Beam Workpieces Based on Computerized and Physical Modeling. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48, no. 4. P. 946-953. DOI: 10.5937/fme2004946M (*Web of Science Core Collection / Scopus / Q3 SCImago Journal and Country Rank*)

Статті у періодичних наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

16. Пузир Р. Г., Левченко Р. В., Шаповал А. А. Автоматизация розрахунку розмірів листової заготовки для ободів коліс транспортних засобів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КрНУ, 2011. Вип. 4/2011 (69), част. 1. С. 53–56.

17. Драгобецький В. В., Шаповал А. А., Савелов Д. В., Маркевич А. Г. Опытнo-промышленный стан для бесконтейнерного вибрационного прессования вольфрамовых и молибденовых прутков. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. трудов. Краматорск : ДГМА, 2012. Вып. 4 (33). С. 257–261.

18. Шаповал А. А. Исследование технологи производства активных элементов электродов плазмотронов из композитов на основе циркония. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. трудов. Краматорск : ДГМА, 2013. № 2(35). С. 236–240.

19. Загирняк М. В., Шаповал А. А., Наумова Е. А. и др. Применение морфологического анализа при разработке оптимальной технологии получения лент из тугоплавких материалов. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2013. Вип. 6/2013 (83). С. 64–69.

20. Шаповал А. А., Маркевич А. Г., Мосьпан Д. В. Комбинированные процессы бесконтейнерного прессования и вибрационного волочения при обработке малопластичных труднодеформируемых металлов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : збір. наук. праць. 2013. № 42 (1015). С. 210–217.

21. Загирняк М. В., Шаповал А. А., Наумова Е. А. и др. Повышение стабильности процесса гибки биметаллических дуг пассажирских вагонов. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 1/2014 (84). С. 83–89.

22. Загорянский В. Г., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В. Анализ напряженного состояния при пластическом изгибе двухслойных листов плакирующим слоем внутрь. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка*. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво. 2014. Вип. 2(41). С. 32–38.

23. Загорянский В. Г., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В. Анализ напряженного состояния при пластическом изгибе двухслойных листов плакирующим слоем наружу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : збірник наукових праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків : НТУ«ХПІ», 2014. № 5 (1048). С. 170–177.

24. Загорянский В. Г., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В. Особенности технологических расчетов вытяжки цилиндрических деталей без фланца из биметалла «алюминиевый сплав + нержавеющая сталь». *Пластическая деформация металлов* : сб. научн. трудов : в 2-х томах. Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. Т. 2. С. 178–182.

25. Загорянский В. Г., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В. К вопросу о минимизации деформаций при термической обработке износостойкого плакированного проката. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : зб. наук. праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків : НТУ «ХПІ», 2014. № 44 (1087). С. 46–55.

26. Драгобецкий В. В., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В., Лотоус В. В. Упрочнение зубьев ковшей экскаваторов с использованием пластической деформации взрывом. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 2. С. 38–42.

27. Драгобецкий В. В., Чигиринский В. В., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В. Управляемые эффекты при пластическом деформировании. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. трудов. Краматорск : ДГМА, 2015. № 3 (42). С 108–114.

28. Драгобецкий В. В., Фролов В. К., Наумова М. И., Шаповал А. А. Методы поиска новых технологических решений при обработке глубоких отверстий. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. трудов. Краматорск : ДГМА, 2016. № 1 (42). С. 119–124.

29. Драгобецький В. В., Шаповал О. О., Дука О. А. Використання технології імпульсної металообробки при виробництві елементів легкого бронезахисту. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. трудов. Краматорск : ДГМА, 2016. № 2 (43). С. 88–92.

30. Шаповал О. О. Розробка технології виробництва заготовок періодичного профілю вібраційним волочінням. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : зб. наук. праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 35 (1257). С. 84–89.

31. Шаповал А. А., Драгобецкий В. В., Савченко Ю. В. Анализ процессов ударно-волновой регенерации твердых сплавов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : зб. наук. праць. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. № 31 (1306). С. 100–105.

32. Косілов М. С., Герасименко О. В., Марков О. Є., Хващинський А. С., Шаповал О. О. Дефектоутворення на обичайках з одностороннім уступом під час розкочування профільованим східчастим інструментом. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Вип. 2/2018 (109). Ч. 1 С. 41-47. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2.p1.41-47

33. Шаповал О. О., Шлик С. В., Сніщенко Т. Р., Рудич М. Л. Удосконалення технології виробництва композиційних матеріалів на основі тугоплавких металів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Вип. 6/2019 (119). С 106–111. DOI: 10.30929/1995-0519.2019.6.106-111

Статті у періодичних закордонних виданнях

34. Драгобецкий В. В., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В. Использование эвристических методов при разработке технологий изготовления лент из тугоплавких металлов. *Механическое оборудование металлургических заводов*. 2015. № 1. С. 29–34.

35. Zagirnyak M. V., Dragobetskii V. V., Shapoval A. A. New explosive deformation and cating techniques and applications. *Metal Forming*. 2016. Vol. XXVII, no. 4. P. 329–340.

36. Zagirnyak M., Dragobetskii V., Shapoval O., Mospan D. The limiting deformation degree of the welded cylindrical blanks during shaping operations of sheet-metal stamping. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. №. 5. P. 14–21. (Q4 SCImago Journal and Country Rank)

37. Shapoval O., Mospan D., Dragobetskii V., Kotsyuba V., Pakholka S. Production of billets of die-rolled section when vibratory drawing. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. Iss. 3. P. 48–53. (Q4 SCImago Journal and Country Rank)

Апробація результатів досліджень

38. Dragobetskii V., Shapoval A., Naumova E., Shlyk S., Mospan D., Sikulskiy V. The Technology of Production of a Copper – Aluminum – Copper Composite to Produce Current Lead Buses of the High–Voltage Plants. *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017*, 2018-January, pp. 400-403. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248944 (*Web of Science Core Collection / Scopus*)

39. Dragobetskii V., Naumova E., Shapoval A., Shlyk S., Moloshtan D. Improving the Operational Reliability of Stamped Parts of Electrical Engineering. *Machines and Electrical Products. Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019*, P. 506–509. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896532 (*Scopus*)

40. Shapoval A., Kantemyrova R., Markov O., Chernysh A., Vakulenko R. Savchenko I. Technology of Production of Refractory Composites for Plasma Technologies. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240830 (*Scopus*)

41. Savchenko I., Shapoval A., Gurenko A. Modeling Dynamic Parameters of Hard Alloys during Shock Wave Regeneration. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 969, International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon 2020) 22-24 September 2020, Chelyabinsk, Russian Federation, 012079, DOI: 10.1088/1757-899x/969/1/012079 (*Web of Science Core Collection / Scopus*)

42. Драгобецький В. В., Шаповал А. А., Савелов Д. В., Маркевич А. Г. Опытно-промышленный стан для бесконтейнерного вибрационного прессования вольфрамовых и молибденовых прутков. *Машины та пластична деформація металів* : тези доп. II Міжнар. наук.-техн. конф., 19–22 листоп. 2012 р. Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. 94 с.

43. Драгобецький В. В., Шаповал О. О. Розробка і виробництво наноструктурованих анкерних болтів та арматури із нержавіючої сталі низької вартості. *Трансфер технологій та інновацій: інноваційний розвиток та модернізація економіки* : матеріали VI Міжнар. форуму, 20–21 грудня 2012 р., С. 311–313.

44. Чугреев А. С., Стахиева А. А., Горбатюк С. М., Шаповал А. А. Моделирование процесса винтовой прокатки. *Актуальні проблеми*

життєдіяльності суспільства : матеріали XX між нар. наук.-практ. конференції студентів, аспірантів та молодих учених. Кременчук : КрНУ, 2013. С. 109.

45. Букин В. Е., Горбатюк С. М., Баженова Н. С., Шаповал А. А. Влияние присадок и активных добавок на структуру и свойства смазочного состава. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства* : матеріали XX міжнар. наук.-практ. конференції студентів, аспірантів та молодих учених. Кременчук : КрНУ, 2014. С. 72.

46. Загорянский В. Г., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В. Расчет толщин четырехслойного пакета и его обжаты при горячей прокатке по коэффициентам высотной деформации. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів обробки тиском у машинобудуванні і металургії* : матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф. 20–22 листопада 2014 р. Харків : НТУ «ХП», 2014. С. 32–33 .

47. Баженова Н. С., Букин В. Е., Горбатюк С. М., Шаповал А. А. Новые эффективные смазочные материалы. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства* : матеріали XX міжнарод. наук.-практ. конференції студентів, аспірантів та молодих учених. Кременчук : КрНУ, 2015. С. 73.

48. Загирняк М. В. Драгобецкий В. В. Наумова Е. А. Шаповал А. А. Прикладные аспекты получения материалов и структур легкой бронезащиты. How to teach material sciences : *New approaches and experiences from the MMATENG project* : International Scientific-Methodological Conf., Krakow–Mariupol, 23 July 2015. Krakow, 2015. P. 189–191.

49. Драгобецький В. В., Наумова Е. О., Тихонова К. Г., Наумова М. І., Шаповал А. А. Застосування методів імпульсної обробки при виробництві елементів легкого бронезахисту. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти* : тези доп. VI міжнар. наук.-техн. конференції. Київ : НТУУ «КПІ», ММІ, 2015. С. 22–24.

50. Zagirnyak M. V., Dragobetskii V. V., Shapoval A. A. Nowe techniki i zastosowania wybuchowego odkształcania i nakładania powłok. *XXI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KONTECH*. Poznań–Mierzęcin, 21–23.09.2016. P. 29.

51. Шаповал А. А., Дикая Л. Э., Беззубченкова М. В., Петриков А. В. Производство биметаллической проволоки на основе композита «гафний-медь». *Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту* : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. Кременчук : КрНУ, 2016. С. 48–50.

52. Драгобецький В. В., Шаповал О. О., Дука О. А. Використання технології імпульсної металообробки при виробництві елементів легкого бронезахисту. *Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту* : матеріали Всеукр. наук.-техн. конференції. Кременчук : КрНУ, 2016. С. 5–6.

53. Черняк Р. Е., Драгобецкий В. В., Дунь С. В., Наумова Е. А., Шаповал А. А., Шлык С. В. Применение импульсных технологий при производстве вооружения и военной техники. *Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки* : матеріали Всеукр. наук.-техн. конференції, 17–19 травня 2017 р. Вінниця : ВНТУ, 2017. С. 327–330.

54. Мосьпан Д. В., Шлык С. В., Наумова Е. А., Федорак И. И., Шаповал А. А., Драгобецкий В. В. Стратегия интеллектуальной оптимизации в процессах обработки

давненим. *Механіка машин – основна складова прикладної механіки* : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. Част. 2. Дніпро : НМетАУ, 2017. С. 205–206.

55. Мосьпан Д. В., Наумова Е. А., Шаповал А. А., Шлык С. В., Драгобецкий В. В. Предпосылки разработки процессов и машин обработки давлением с адаптивным управлением. *Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів* : матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. 03–05 листоп. 2017 р. Кременчук : КрНУ, 2017. – С. 29–31.

56. Шаповал О. О., Кулинич В. Д., Дика Л. Е., Земляной А. А. Виробництво біметалічного дроту на основі цирконієвих композитів. *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства* : матеріали XXV Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених. Кременчук: КрНУ, 2018. С. 59–60.

57. Dragobetskiy V., Zagirnyak V., Symonova A., Shapoval A., Naumova E. Application Of Explosion Methods For Super Alloys. *Book of digests the 7th Symposium on Applied Electromagnetics SAEM'2018*. P. 79-81, DOI: 10.18690/978-961-286-171-1

58. Загирняк М. В., Драгобецкий В. В., Наумова Е. А., Шлык С. В., Шаповал А. А. Метод определения эксплуатационной долговечности пластически деформируемых листовых деталей. *Технології та інфраструктура транспорту : тези доповідей Міжнар. наук.-техн. конференції, 14–16 травня 2018 р. Харків : УкрДУЗТ, 2018. С. 39–31.*

59. Мосьпан Д. В., Мосьпан В. О., Драгобецкий В. В., Шаповал А. А., Молоштан Д. В. Производство и эксплуатация изделий с механическими и радиоэлектронными подсистемами в условиях совместного использования. *Prospects for the development of technical sciences in eucountries and Ukraine* : International scientific and practical conference, December 21–22, 2018. Wloclawek : Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2018. P. 46–49.

60. Лещинський В. М., Драгобецький В. В., Шаповал О. О., Савченко Ю. В. Розробка і виробництво нано-структурованої арматури із нержавіючої сталі низької вартості. *Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту* : VI Міжнародна науково-технічна конференція, 14–16 листоп. 2018. Кременчук : КрНУ, 2018. С. 179–183.

61. Драгобецкий В. В., Загорянский В. Г., Шлык С. В., Молоштан Д. В., Шаповал А. А. Напряженное состояние заготовки при двойном перегибе импульсной нагрузкой. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019* : зб. тез Міжнар. наук.-техн. конференції. Вінниця : ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. С. 84–86.

62. Петріков А. В., Шаповал О. О., Дика Л. Е. Аналіз вдосконалених способів холодного видавлювання порожнистих довговісних циліндрів : *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства* : матеріали XXIV Міжнар. наук.-практ. конфер. студентів, аспірантів та молодих учених. Кременчук : КрНУ, 2017. С. 87–88.

63. Коцюба В. Ю., Драгобецкий В. В., Шаповал А. А., Шлык С. В., Наумова Е. А. Детали, наиболее эффективно штампуемые с использованием бризантных взрывчатых веществ. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії* : матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конференції, присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском, 20–22 листопада 2019 р. С. 80–81.

64. Шаповал А. А., Драгобецкий В. В., Савченко Ю. В., Гуренко А. Ю., Марков О. Е. Рентабельность изготовления переходников из сочетания металлов нержавеющей сталь + цирконий. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : тези доповідей VII Міжнародної конференції, Одеса, 12-15 травня 2020 р. С. 369–372.

65. Шаповал О. О., Шлик С. В., Сніщенко Т. Р., Рудич М. Л. Удосконалення технології виробництва та хімічного складу виробів з наноструктурованих нержавіючих сталей. *Авіація, промисловість, суспільство* : матеріали I Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 60-річчю КЛК ХНУВС (м. Кременчук, 14 трав. 2020 р.) : у 2 ч. / МВС України, Харків. нац. ун-т внутр. справ, Кременчуц. льотний коледж. – Харків : ХНУВС, 2020. – Ч. 1. – С. 187-189

Патенти

66. Спосіб вибухової обробки металів : пат. 64207 Україна : МПК В21D 26/08 (2006.01). № у 2011 07470; заявл. 14.06.2011; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.

67. Спосіб виготовлення біметалевих струмопідвідних шин : пат. 97637 Україна : МПК В23Р 15/00 (2015.01). № у 2014 10998; заявл. 08.10.2014 ; опубл. 25.03.2015, Бюл. № 6.

68. Спосіб отримання шаруватих композиційних матеріалів з криволінійною поверхнею шляхом зварювання вибухом : пат. 106479 Україна : МПК В23К 20/08 (2006.01). № у 2015 10895; заявл. 09.11.2015 ; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.

69. Спосіб штампування днищ, послаблених розсортованим отвором, з набором матеріалу у зоні отвору : пат. 131206 Україна : МПК В26F 1/00 (2018.01). № у 2018 07023; заявл. 22.06.2018; опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1.

70. Спосіб ударно-фрикційного зміцнення : пат. 135689 Україна : МПК В24В 39/00 (2019.01). № у 2019 01436; заявл. 13.02.2019; опубл. 10.07.2019, Бюл. № 13.

Особистий внесок автора у роботах, опублікованих разом з співавторами:

[1] – вступ, розділ 4, розділ 5; [2, 3, 6, 22, 50] – проведено аналіз літературних джерел, обґрунтовано результати та підготовлено статтю; [2, 5, 7, 39] – брав участь в плануванні і проведенні експерименту; [8–11, 16, 21, 26, 30, 38, 40, 41, 48, 56, 65] – аналіз методів деформування заготовок для реалізації найсприятливіших схем в технологіях; [12, 14, 31, 62] – проведено аналіз літературних джерел, підготовлено та подано публікацію до редакції, розроблено математичну модель, проведено експериментальні дослідження; [13] – проведено аналіз літературних джерел, підготовлено та подано публікацію до редакції, розроблено комп'ютерну модель; [15, 20, 25, 34, 36, 37, 49] – проведено аналіз літературних джерел, обґрунтовано результати та підготовлено статтю; [17, 18, 59, 60, 61, 63, 64] – аналіз деформування обода колеса з додатковим впливом на осередок деформації, розрахунок необхідних зусиль, які прикладаються до бічної поверхні заготовки та до її торців, визначення зон ефективного додаткового впливу для зменшення різношаруватості профілю; [28, 57] – брав участь в аналізі літературних джерел, плануванні і проведенні експерименту, обґрунтуванні результатів та підготовці статті; [29, 43, 71] – теоретичні дослідження напруженого стану заготовки для подальшого процесу

профілювання, що отримується методом роздавання циліндра, граничні умови отримання наближеного до першого переходу радіально-ротаційного профілювання напівфабрикату; [32, 35] – проведено аналіз літературних джерел, обґрунтовано результати та підготовлено статтю; [42, 44, 70] – розроблено математичну модель процесу деформування заготовки обода колеса на радіусі закруглення профілю й запропоновано метод реалізації цієї моделі, отримано замкнуті аналітичні рішення; [45, 73] – проведено аналіз літературних джерел, обґрунтовано результати та підготовлено статтю; [46, 52, 53, 67, 75–77] – поставлено, проведено й отримано результати експериментальних досліджень напружено-деформованого стану заготовки під час радіально-ротаційного профілювання заготовок для ободів коліс; [69] – проведено аналіз літературних джерел, обґрунтовано результати та підготовлено публікацію.

АНОТАЦІЯ

Шаповал О. О. Розробка наукових основ і технологій інтенсивної обробки тугоплавких та композиційних матеріалів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05. – процеси та машини обробки тиском. – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, 2021.

Дисертація спрямована на розв’язання важливої науково-технічної проблеми розвитку наукових основ і технологій виробництва тугоплавких та композиційних матеріалів.

У роботі отримано аналітичне рішення що до реологічної моделі паралельного з’єднання жорстко-пластичного елемента (дріт) і елемента з послідовним з’єднанням в’язкого і пластичного елементів шляхом розв’язання рівнянь рівноваги, пластичності і контактної тертя у зоні розділу матеріалів м’якої оболонки й тугоплавкого дроту і рівнянь теплообміну.

Експериментально та при математичному моделюванні доведено, що в умовах волочіння з нагрівом дроту у м’якій оболонці виникають надмірні напруження матеріалу у м’якій оболонці та тиск на матеріал дроту, здатні повністю роз’єднати дві поверхні волоки та дроту, величина тиску суттєво залежить від кута конусності вхідної частини волоки та має максимум у вихідній частині.

Методом скінчених елементів в системі Ansys AUTODYN проведено моделювання процесу гарячого волочіння гафнію в м’якій – мідній оболонці, при якому розподіл деформацій виглядає наступним чином: миттєва межа плинності міді досягає межі плинності гафнію і відбувається спільна деформація композиційного матеріалу з утворенням металургійного контакту між компонентами, до цього моменту м’яка оболонка виступає в ролі мастильного шару

Розроблено комплекс технологій та технологічного обладнання для виготовлення вольфрамового та композиційного дроту, технологію виробництва електродів плазмотронів.

Розроблена, експериментально обґрунтована і реалізована в промисловості технологічна схема виробництва молібденового дроту, основними етапами якої є поперечно-гвинтова прокатка штабиків, вібраційне волочіння з індукційним

нагрівом дротяних заготовівель і холодне волочіння дроту з гідродинамічним введенням мастила і накладенням на інструмент вібрації в перехідних етапах процесу.

Розроблені ефективний неруйнівний метод і прилад для оцінки технологічних властивостей дротяних заготовівель діаметром більше 3 мм залежно від значення модуля пружності. Запропонована класифікація заготовівель за значенням модуля пружності для отримання кінцевої продукції в різних діапазонах діаметрів при мінімізації виробничих витрат. Вивчений вплив технологічних схем обробки на формування структури вагового дроту. Отримані залежності зміни кількісного параметра оцінки структури – монокристальності L/W від загальної міри деформації волочінням. Встановлено, що застосування інтенсивних технологій пресування і волочіння, починаючи вже з коефіцієнта витягу від штабіка 17,5–23,8 дозволяє досягти значень $L/W > 10$.

Ключові слова: тугоплавкі метали, осередок пластичної деформації, обтиск, композиційні матеріали, дріт, пруток, волока, стапельність.

ABSTRACT

Shapoval O.O. Scientific foundations and technologies development for intensive processing of refractory and composite materials. – On the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.03.05 – Processes and Machines for Pressure Processing. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, 2021.

The thesis is aimed at solving an important scientific and technical problem of scientific bases and technologies development for production of refractory and composite materials.

An analytical solution to the parallel connection rheological model of a rigid-plastic element (wire) and an element with a series connection from viscous and plastic elements by solving the equations of equilibrium, plasticity and contact friction in the materials separation zone between soft shell and refractory wire and heat exchange equations.

Experiments and mathematical modeling have shown that under conditions of drawing with heated wire in a soft shell there are excessive stresses of the material in the soft shell and pressure on the wire material, which can completely separate the two surfaces of the die and wire. The pressure value significantly depends on the taper angle of the inlet part of the drag and has a maximum in the outlet part.

Finite element method in the Ansys AUTODYN system simulates the hafnium hot drawing process of in a soft - copper shell, in which the deformations distribution is as follows: the instantaneous copper yield strength reaches the yield hafnium strength and co-deformation of the composite material with metallurgical contact between components by this time the soft shell acts as a lubricating layer

A set of technologies and technological equipment for the tungsten and composite wire production, technology for the production the plasmatron electrodes has been developed.

The molybdenum wire production technological scheme was developed, experimentally substantiated and realized in the industry. Its main stages are billets cross-screw rolling, vibration drawing with wire blanks induction heating and wire cold drawing with oil hydrodynamic introduction and vibration application to the tool during the process transitional stages.

An effective non-destructive method and a device for evaluating the wire billets technological properties with a diameter more than 3 mm depending on the value of the elasticity modulus have been developed. The blanks classification according to the elasticity modulus value to obtain the final product in different diameters ranges while minimizing production costs. The processing technological schemes influence on structure formation the weight wire is studied. The change dependences in the quantitative parameter of the structure estimation – L/W single crystal on the total deformation degree by drawing are obtained. It is established that the use of intensive technologies for pressing and drawing, starting from the coefficient of extraction from the billet 17,5–23,8 allows to achieve $L/W > 10$.

Key words: refractory metals, plastic deformation center, crimping, composite materials, wire, bar, die, stacking.

ШАПОВАЛ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

**РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ І ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕНСИВНОЇ ОБРОБКИ
ТУГОПЛАВКИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

(Автореферат)

Підписано до друку 12.04.2021. Формат 60x84/16.
Папір Polspeed. Друк цифровий. Ум. друк. арк. 1,9.
Обл.-вид. арк. 1,9. Наклад 100 прим. Зам. № 20427

Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського
39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева 20.