

## РЕФЕРАТ

### **роботи «Керовані ефекти пластичного деформування заготовок виробів для металургії та транспорту», що висувається на здобуття Державної премії України 2015 р. в галузі науки і техніки**

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 – прецизійних стрічок, вольфрамівих катодів електронно-променевих гармат, композиційних дротиків і дроту на основі цирконію і гафнію, електродів плазмотронів, керамічних броне матеріалів. На сьогодні актуальними є питання вдосконалення конструкційних матеріалів і високоефективних методів їх оброблення при створенні нових зразків техніки і технічних систем. Прогрес у цій галузі та в наукомістких сферах виробництва стримується не лише відсутністю необхідних матеріалів з потрібним комплексом фізико-механічних властивостей, але й ефективних керованих методів їх обробки. Найбільш перспективними є деформаційні способи обробки матеріалів, що дозволяють, на основі відомих ефектів формозміни, створювати нові механізми.

Запропоновані комплексні дослідження, присвячені підвищенню експлуатаційних характеристик виробів, що отримані методами обробки металів тиском, в Україні проводили такі організації: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя); Запорізький національний технічний університет (м. Запоріжжя); ПАТ «Кременчуцький колісний завод» (м. Кременчук); Державне підприємство «Міжнародний центр електронно-променевих технологій» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (м. Київ); ВАТ «Техтрансаш» (м. Кременчук); Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (м. Київ); ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин» (м. Кременчук); ТОВ НВП «Тангстен» (м. Світловодськ); Державне підприємство «Інженерний центр твердих сплавів «Світкермет» (м. Світловодськ); ТОВ «АВМ Ампер» (м. Кременчук); ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук), ЗАТ ЛСП ППА і ОС «Спецавтоматика» (м. Луганськ), Науково-виробничий центр «Титан» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (м. Київ); ВАТ «Полтавський гірничозбагачувальний комбінат» (м. Комсомольськ); ТОВ НВФ «Карма» (м. Світловодськ).

Результати наукових досліджень, отриманих у цих організаціях за період з 1981 року покладені в основу даної роботи.

Метою роботи є вирішення науково-технічної проблеми розвитку теоретичних основ і наукових положень розробки оптимізаційних моделей і механізмів ефективного керування процесами пластичної формозміни, що вдосконалюють технологію обробки, калібрування, зміцнення, підвищення пластичності та термічної обробки заготовок та виробів, які регулюють структурно-фазові перетворення тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів із забезпеченням їх розмірної точності, формо-, електро- та тріщиностійкості в умовах високих температур, інтенсивного абразивного зносу та ударних навантажень.

### **1 Наукова новизна проведених досліджень полягає у тому що:**

1.1 Розроблено нову концепцію та принципи побудови технологічних процесів обробки тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів, складних тонкостінних виробів із завданням оптимальних параметрів термічного та силового навантаження, що забезпечують найбільш високі експлуатаційні показники міцності та надійності.

1.2 Запропоновано принципи побудови математичної моделі напружено-деформованого стану з урахуванням нових теоретичних рішень, оптимальних технологічних параметрів процесів формозміни, зміцнення, плакування, калібрування, ущільнення та термічного впливу з підвищенням ступеня їх уніфікації стосовно різних типів заготовок (дискретна, щільна, композиційна, зварна), матеріалів, деформувальних зусиль, чинника інтенсифікації, а також розв'язання комплексу задач вибору раціональних схем деформування.

1.3 Для побудови загальної теорії обробки складних тонкостінних виробів тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів розроблені та визначені:

– функціонали стану заготовки та цільова функція у вигляді квадратного функціонала Гаусса;

– рішення прикладних задач обробки металів тиском з урахуванням особливостей пластичної течії та ефектів пластичної формозміни;

– метод розрахунку оптимальних силових та термічних навантажень при формоутворенні складних тонкостінних профілів, калібруванні та ущільненні виробів з тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів;

– аналітичний метод рішення плоскої задачі теорії пластичності в замкнутій формі з використанням гармонійних функцій.

1.4 Для подальшого розвитку принципів визначення технологічних параметрів і шляхів інтенсифікації процесів обробки тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів та складних тонкостінних виробів:

– досліджено механізм течії металу в умовах неоднорідного пластичного деформування, виявлено ефекти додаткового, та кінематичного впливу на процес формозміни тонкостінних виробів, теоретично та

експериментально показана можливість керування процесами пластичного навантаження;

– досліджено механізм течії металу в умовах періодичного прокатування тонкостінних виробів, показано вплив на силові, кінематичні, пластичні характеристики зсувної деформації, можливість впливу на параметри процесу;

– досліджено механізми процесів деформаційного зміцнення, ущільнення, калібрування та визначено оптимальний деформований стан з оптимальною структурою, що забезпечують найбільш високі експлуатаційні показники;

– на базі методу гармонійних функцій та експериментальних даних розроблено математичну модель визначення напруженого та деформованого стану матеріалу при прокатування періодичних тонкостінних виробів, яка дає змогу визначити вплив ефектів пластичної деформації на силові параметри процесу.

## **2 Практична значимість отриманих результатів полягає в наступному:**

2.1 Розроблено і впроваджено у серійне виробництво нову технологічну схему виготовлення вольфрамових стрічок і катодів підвищеної якості з високим рівнем експлуатаційних характеристик.

2.2 Розроблено і погоджено із замовником (Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ) технічні умови на катоди електронних гармат вольфрамові (ТУ 48.0820.403/2–11).

2.3 Розроблено технологічний комплекс для серійного виробництва композиційних активних елементів електродів плазмотронів.

2.4 Розроблено комплексну технологію та обладнання для серійного виробництва деталей з твердих сплавів на основі вольфраму з подальшим виготовленням твердосплавних пластин та штампувального інструменту з додатковим зміцненням заготовок перед остаточним спіканням.

2.5 Розроблено технологію виробництва промислових партій біметалевих труб та серійного виробництва біметалевих шин високовольтного устаткування.

2.6 Розроблено методики розрахунку технологічних процесів зварювання та зміцнювання вибухом і програмне забезпечення розрахунку напружено-деформованого стану, кінематичних та енергетичних параметрів процесів обробки тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів.

2.7 Розроблено технологію виробництва та основи технологічного проектування тонкостінного прокату для коліс автомобілебудування та технологічні схеми для виробництва коліс з 15° посадочними полками автотранспортних засобів різного призначення.

2.8 Розроблено та впроваджено у серійне виробництво технологію періодичної прокатки в умовах інтенсивної зсувної деформації заготовок для компресорних лопаток авіадвигунів AI-25, AI-20, Д-36, ТВ 3-117 та інші.

**3 Основні результати** опубліковані в 9 монографіях, 3 колективних монографіях, навчальному посібнику, 418 статтях (46 у дальньому зарубіжжі), 153 патентах, авторських свідоцтвах, 53 тезах міжнародних науково-технічних симпозіумів і конференцій, з яких у найбільш відомі міжнародні наукометричні бази даних входить відповідно публікацій: Scopus – 12, Ulrich's Periodicals Directory – 20, Index Copernicus – 17, Inspec – 9, ISI Web of Knowledge – 4.

**4 Підготовлені та захищені** дві кандидатські дисертації (Кресанов Ю.С. 1979 р., Шаповал О.О. 2011 р.) і чотири докторські дисертації (Загірняк М.В. 1996 р., Драгобецький В.В. 2003 р., Саленко О.Ф. 2002 р., Чигиринський В.В. 1999 р.).

### **5 Основні наукові та науково-технічні результати:**

5.1 Експериментально підтверджено відповідність максимальної ефективності зміцнення при пластичному деформуванні, щільності та зносостійкості заготовок із тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів при інтенсивності деформацій осередку деформацій, наближеного до рівномірної деформації.

5.2 Моделювання процесу пружно-пластичного деформування за допомогою чисельного розв'язання комплексу задач, пов'язаних з обробкою тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів, дозволило визначити оптимальні термомеханічні навантаження, вплив інтенсифікуючих факторів і розробити практичні рекомендації щодо проектування технологій зміцнення, калібрування, ущільнення та формозміни.

5.3 Розроблено метод зміцнення виробів із твердих сплавів, що отримані при вибуховому подрібненні утилізованих виробів (рис. 1), комплекс технологічного обладнання для виготовлення активних елементів електродів плазмотронів з визначенням найбільш сприятливої схеми пружно-деформованого стану, що дозволило отримати щільний «металургійний» контакт між осердям та оболонкою з відповідною мікроструктурою (рис. 2, 3), технологічну схему виготовлення стрічок із тугоплавких металів (рис. 4).



Рис. 1 – Трикамерний вибухоударний контейнер - у розібраному вигляді при сортуванні кришива на розмірні фракції

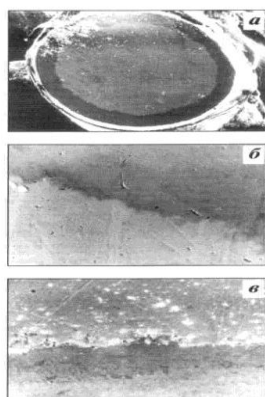


Рис. 2 – Мікроструктура композиту

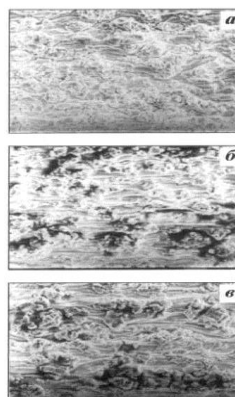


Рис. 3 – Поверхня цирконієвого осердя композиту

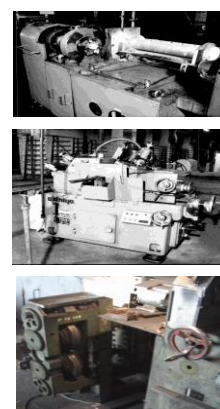


Рис. 4 – Складові технологічного обладнання виготовлення стрічок із тугоплавких металів

5.4 Показано, що запропоновані методи зміцнення твердих сплавів забезпечують більш високі показники пластичності на 24 % та щільності (табл. 1, рис. 5, 6, 7), технологічна схема виготовлення стрічок і катодів забезпечує оптимальне значення монокристальності (рис. 8), за якої експлуатаційний ресурс досягає 45–50 годин.

Таблиця 1

Номер зразка	Границя міцності за згинанням ( $\sigma_{згин}$ ), кг/мм <sup>2</sup>	Твердість, НРА	Пористість, %	Знеуглецювання	Примітка
1	220,2	90	0,02	Не відповідає	Зразки № 1; 2; 3 – серійна технологія
2	156,8	90	0,02	Не відповідає	
3	169,1	90,5	0,02	Не відповідає	
4	248,4	89,5	0,02	Відповідає	Зразки №4-5 – імпульсна обробка
5	204,3	89,5	0,02	Відповідає	
6	—	89,5	0,02	Відповідає	Пластили № 6-8 – оброблені детонаційним напиленням
7	—	91,0	0,02	Відповідає	
8	—	91,0	0,02	Відповідає	
Вимоги ГОСТ 3882-74	170	88	—	—	—

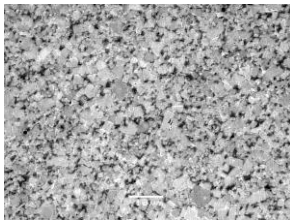


Рис. 5 – Мікроструктура зразка, що виготовлений за серійною технологією

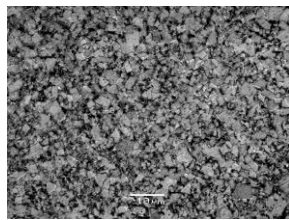


Рис. 6 – Мікроструктура зразка після обробки вибухом

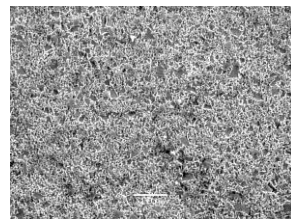


Рис. 7 – Мікроструктура зразка після детонаційного напилення

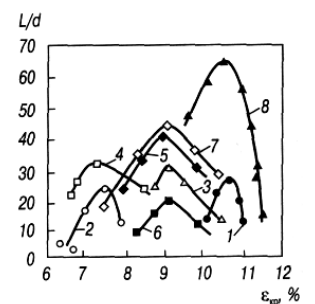


Рис. 8 – Залежність стапельності L/d від деформації для дроту різних діаметрів

5.5 Експериментальні лабораторні та промислові дослідження виявили ефекти додаткового і кінематичного впливу на осередок деформації при виробництві тонкостінного прокату.

5.6 При періодичній прокатці тонкостінних виробів, заготовки компресорних лопаток, показано вплив інтенсивної зсувної деформації на силові, кінематичні та пластичні характеристики матеріалу.

5.7 Отримано нове рішення плоскої задачі теорії пластичності з використанням гармонійних функцій. Проведені теоретичні дослідження впливу ефектів пластичного деформування на параметри технологічного процесу.

5.8 З урахуванням ефектів пластичної течії розроблені нові конструкції профілів прокату зниженої металомісткості для автомобілебудування та компресорних лопаток авіадвигунів.

### **6 Порівняння з аналогами дозволяє зробити такі висновки:**

6.1 Розроблена технологічна схема виготовлення вольфрамових катодів дозволяє керувати технологічними властивостями вольфраму на проміжних стадіях обробки та сформуванню комплекс фізико-механічних властивостей стрічок та катодів. Експлуатаційний ресурс катодів, отриманих за розробленою технологією, досягає 45–50 годин, що перевищує параметри зарубіжних та вітчизняних аналогів у 1,2–1,5 рази.

6.2 Розроблений технологічний комплекс обладнання дозволяє отримувати промислові партії композиційних активних елементів електродів плазмотронів. Електроди з активними елементами з композитів мають у 1,3 – 1,8 рази більший ресурс зарубіжних та українських аналогів.

6.3 Розроблена технологія виготовлення біметалевих обичайок для установок термоядерного синтезу, біметалевих шин високовольтного устаткування та пластин для комбінованої багатошарової броні за показниками формостійкості, електротермічними властивостями балістичної стійкості перевищує кращі світові аналоги на 15 – 20 % при зниженні собівартості на 40 – 50 %.

6.4 З використанням направленої нерівномірної пластичної деформації, при формуванні тонкостінної частини виробу, розроблено деформаційні режими прокатування профілів з крутими посадочними полками зниженої металомісткості в умовах великосортного стану металургійного підприємства.

6.5 Розроблено технологію виробництва тонкостінних заготовок для компресорних лопаток авіадвигунів з використанням періодичної прокатки в умовах інтенсивної зсувної деформації. Лопатки виготовлені за новою технологією, мають більш високий опір втомленості (на 18 – 25 %) ніж серійні.

### **7 Результати наукових досліджень упроваджені в серійне виробництво:**

7.1 Установлення механізмів фазових переходів та формування гомогенної структури при імпульсному навантаженні високомарганцевих сталей дозволило розробити та впровадити у серійне виробництво технологію двостадійного зміцнення зубів ковшів екскаваторів на ВАТ «Полтавський гірничозбагачувальний комбінат».

7.2 Розроблена комплексна високопродуктивна технологія виготовлення вольфрамових катодів, що формує оптимальну структуру та механічні властивості вольфраму при урахуванні технологічної спадщини металу на кожній стадії обробки. Технологія впроваджена у серійне виробництво та випускається Державним підприємством «Інженерний центр твердих сплавів «Світкермет» та ТОВ НВП «Тангстен».

7.3 Починаючи з 2005 р., виготовлено понад 500 тис. шт. вольфрамових катодів КЕПВ, розмірами  $100 \times 3 \times 0,6$  з механічними властивостями  $H_u=3900 - 4150$  МПа;  $\sigma_b=1300 - 1500$  МПа;  $\delta \geq 1,2$  % (рис. 9).

7.4 Розроблено технологічну схему та комплекс промислового обладнання для виробництва композитного дроту на основі тугоплавких металів і впроваджено у серійне виробництво на ДП «Інженерний центр твердих сплавів «Світкермет» та ТОВ НВП «Тангстен» (рис. 10).



Рис. 9 – Зразки вольфрамових стрічок, що отримані при прокатці дроту



Рис. 10 – Електрод плазмотрона

7.5 Починаючи з 2004 р., виготовлено понад 10 т композиційних електродів (цирконієвий сплав 110, цирконова бронза БрЦр 0,1) на робочі струми 400 – 100А діаметром  $2,5 \times 2 \times 1,6$ ;  $1,75 \times 1,4 \times 1,1$ ;  $1,25 \times 1$ .

7.6 За розробленими технологіями зварювання вибухом, розкочуванням та калібруванням виготовлені на ВАТ «Техтрансмаш» (м. Кременчук) та ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин» і запущені в експлуатацію на установках термоядерного синтезу біметалеві труби (нержавіюча сталь – мідь)  $\varnothing 400$  мм, довжиною 1400 мм, відхилення розмірів за діаметром не перевищує  $+0,5$  мм, біметалеві шини для високовольтного устаткування на ТОВ «АВМ Ампер» та технологія ущільнення стінки виробів у багатошаровому виконанні в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (м. Київ), комбінованих багатошарових броне захисних пластин (рис. 11).

7.7 1991 р. виготовлено шість біметалевих труб для установки термоядерного синтезу (рис. 12) та п'ятдесят біметалевих шин, починаючи з 2012 р. (рис. 13).



Рис. 11 – Комбінована багатошарова бронезахисна пластина після прострілу пулями калібру 7.62 та 5.56

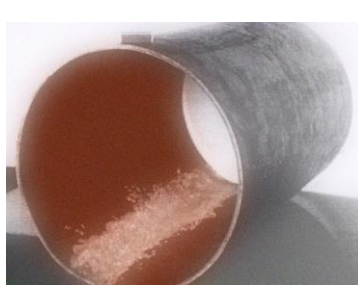


Рис. 12 – Біметалева обичайка для установок термоядерного синтезу



Рис. 13 – Зразки біметалевих шин

7.8 Розроблено комплексну технологію та обладнання для багатостадійного подрібнення утилізованих виробів з твердих сплавів на основі вольфраму з подальшим виготовленням твердосплавних пластин та штампувального інструменту. При цьому здійснюється додаткове вибухове зміцнення заготовок перед остаточним спіканням.

7.9 Із 2001 р. у ДП «Інженерний центр твердих сплавів «Світкермет» виготовлено понад 100 т виробів з твердих сплавів (рис. 14).



Рис. 14 – Зовнішній вигляд виробів з регенованих твердих сплавів зі зміцненням



Рис. 15 – Зовнішній вигляд високоекономічних профілів для автомобілебудування



Рис. 16 – Зовнішній вигляд тонкостінної продукції для авіадвигунобудування

7.10 Показані ефекти пластичної формозміни за рахунок нерівномірної деформації тонкостінних виробів, які дозволяють в умовах зниженої температури, та інтенсивного деформування, зменшити силу прокатування, пружну деформацію системи і отримати необхідну товщину виробу.

7.11 Розроблено, на базі оптимальних режимів деформування, технології прокатування тонкостінних високоекономічних профілів для автомобілебудування (рис. 15). Нова технологія впроваджена при виробництві понад 300 модифікацій ободів коліс.

7.12 Розроблено та впроваджено серійні технології виробництва тонкостінної продукції для авіабудування способами періодичної прокатки, компресорних лопаток авіадвигунів АІ-25, АІ-20, Д-36, ТВ 3-117 та інші (рис. 16).

**8 Розрахунок економічного ефекту** базується на методиках та висновках, що розроблені у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського, АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя); Запорізький національний технічний університет (м. Запоріжжя); ПАТ «Кременчуцький колісний завод» (м. Кременчук). Економічний ефект складає 288,32 млн. грн.

**9 Кількість реферованих публікацій** дорівнює 418, у тому числі в міжнародних наукометричних базах даних SCOPUS 12, ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY 20, INDEX COPERNICUS 17, INSPEC 9

## 10 Основні висновки роботи:

10.1 На основі теоретичних та експериментальних досліджень встановлені ефекти і механізми пластичної деформації, які оказують вплив на напружено-деформований стан обробляючого середовища, структурно-



фазові перетворення, що дозволяють керувати процесами формозміни та утворення необхідних фізичних і механічних властивостей.

10.2 Розроблені принципи побудови та створено багатофункціональну оптимізаційну модель напружено-деформованого стану для розрахунку технологічних параметрів процесів формозміни, ущільнення, калібрування та плакування з підвищеним ступенем уніфікації відносно різних типів заготовок, деформувальних зусиль і оптимальних деформацій, а також комплексу задач вибору раціональних схем силової та термічної інтенсифікації.

10.3 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 з урахуванням технологічної спадщини у вигляді сіткової моделі з пружно-пластичними відрізками, що деформуються, які з'єднують вузли з концентрованою масою.

10.4 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.

10.5 На базі запропонованих моделей та нового аналітичного методу рішення плоскої задачі теорії пластичності, яка урахує неоднорідність пластичної течії в осередку деформації та її вплив на параметри процесу розроблено комплекс технологій та технологічного обладнання для виготовлення стрічок з тугоплавких металів та композиційного дроту на їх основі, струмопровідних шин високовольтного обладнання та біметалевих труб із шаруватих композиційних матеріалів, складних тонкостінних виробів.

10.6 Уперше у світовій практиці розроблено комплекс промислового обладнання для апаратного 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.

10.7 Виготовлено технічну документацію, затверджено технічні умови на вольфрамові катоди електронних гармат (ТУ 48.0820.403/2-11), біметалеві шини високовольтного обладнання, зміцнення деталей гірничого обладнання, подрібнення утилізованих виробів з твердих сплавів.

10.8 Розроблено методики визначення оптимальних параметрів зварювання та зміцнення вибухом, розв'язання прикладних задач розрахунку деформаційних, енергосилових та кінематичних параметрів нових технологій обробки тиском.

10.9 Загальний економічний ефект від впровадження технологій виробництва тонкостінного прокату та тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів підтверджено у розмірі 288,32 млн. грн.

10.10 На базі ефектів пластичної формозміни впроваджені в виробництво:

– кілька серій високоефективного тонкостінного прокату для коліс вантажних автомобілів;

– технології виготовлення профілів та коліс з підвищеними якісними характеристиками, які включають зменшення металомісткості виробів;

– технологію періодичної прокатки заготовок для компресорних лопаток авіадвигунів різного призначення в умовах інтенсивної зсувної деформації.

10.11 Згідно зі світовими технічними характеристиками виробу, виготовлені за запропонованими технологіями, відповідають і перевищують зарубіжні аналоги.

Претенденти:

Драгобецький В.В.

Шаповал О. О.

Саленко О. Ф.

Леготкін Г. І.

Слєпинін О. Г.

Чигиринський В. В.

Кресанов Ю.С.

Габелко В. О.

Пахолка С. М.