

## РЕФЕРАТ

**роботи «Теоретичні основи і технології обробки тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів», що висувається на здобуття Державної премії України 2014 р. в галузі науки і техніки**

Стрімкий розвиток технологій аерокосмічної галузі, застосування процесів електронно-променевого плавлення, електронно-променевого випаровування і створення композиційних матеріалів електронно-променевими методами при виробництві сучасних авіаційних, транспортних, стаціонарних газотурбінних двигунів і установок, а також застосування сучасних плазмових технологій у машинобудуванні та суднобудуванні потребують розробки нових високоефективних технологій виробництва виробів із тугоплавких металів нового покоління – прецизійних стрічок із тугоплавких металів, вольфрамів катодів електронно-променевих гармат, композиційних дротиків і дроту на основі цирконію і гафнію, електродів плазмотронів. На сьогодні актуальні питання вдосконалення конструкційних матеріалів і високоефективних методів їх оброблення при створенні нових зразків техніки і технічних систем. Прогрес у цій галузі стримується не лише відсутністю необхідних матеріалів з потрібним комплексом фізико-механічних властивостей, але й ефективних методів їх обробки.

Запропоновані комплексні дослідження, присвячені підвищенню експлуатаційних характеристик виробів із тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів, що отримані методами обробки металів тиском, в Україні проводили такі організації: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Державне підприємство «Міжнародний центр електронно-променевих технологій» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (м. Київ), ВАТ «Техтрансмаш» (м. Кременчук), Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної Академії наук України (м. Київ), ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин» (м. Кременчук), АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), Державне підприємство «Інженерний центр твердих сплавів «Світкермет» (м. Світловодськ), УКрНДІХІММАШ (м. Харків), ТОВ НВП «Тангстен» (м. Світловодськ), ТОВ НВП «Карма» (м. Світловодськ), ТОВ «АВМ Ампер» (м. Кременчук), ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук), ПАТ «Кременчуцький колісний завод» (м. Кременчук), Харківський завод тракторних самохідних шасі, Магнітогорський металургійний комбінат, трест «Електроцентрмонтаж» (м. Магнітогорськ), ВО «Металомашпром» (м. Магнітогорськ), УкрНДІМеталів (м. Харків), ЗАТ ЛСП ППА і ОС «Спецавтоматика» (м. Луганськ), Національна академія наук України Науково-виробничий центр «Титан» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона (м. Київ), ВАТ «Полтавський гірничозбагачувальний комбінат» (м. Комсомольськ). Результати наукових досліджень, отриманих у цих організаціях в період 1981 – 2014 рр., покладені в основу даної роботи.

Метою роботи є розв'язання науково-технічної проблеми розвитку теоретичних основ і наукових положень розробки оптимізаційних моделей і механізмів ефективного керування параметрами, що удосконалюють технологічні процеси формоутворення, калібрування, зміцнення та термічної обробки заготовок та виробів із тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів із забезпечення їх розмірної точності, формостійкості, електростійкості й 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 та композиційних матеріалів із заданням 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 та розрахунку оптимальних технологічних параметрів процесів формозміни, зміцнення, плакування, калібрування, ущільнення та термічного впливу з підвищенням ступеня їх уніфікації відносно різних типів заготовок (дискретна, щільна, композиційна, зварна), матеріалів, деформувальних зусиль, інтенсифікуючого фактора, а також розв'язання комплексу задач вибору раціональних схем деформування.

1.3 Для побудови загальної теорії обробки тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів розроблені та визначені:

– функціонали стану заготовки:

$$\begin{aligned}\Phi_{\varepsilon} &= \int_{(F)} [\varepsilon_p(y_i) - \varepsilon_a(y_i)]^2 dF, \\ \Phi_{\kappa} &= \int_{(F)} [(L/d)_o - (L/d)_a]^2 dF,\end{aligned}\tag{1}$$

де  $\varepsilon_p, \varepsilon_a$  – рівномірне та те, що реалізується у конкретному технологічному процесі, значення інтенсивності деформацій;

$(L/d)_o, (L/d)_a$  – оптимальне та те, що реалізується у конкретному технологічному процесі, значення монокристалльності.

– цільова функція у вигляді квадратного функціонала Гаусса:

$$\Gamma(F_{klmn}, T_{klmn}) = \sum_1^k \sum_1^L \lambda_e \left[ \frac{\varepsilon_{\ell k}}{\varepsilon_p} \right]^2 + \lambda_{\kappa} \left[ \frac{\overline{(L/d)}}{(L/d)_o} \right]^2\tag{2}$$

де  $\varepsilon_{\ell k}$  – інтенсивність деформацій у  $\ell k$ -вузлі розрахункової сітки заготовки;

$\overline{(L/d)}$  – середнє значення монокристалльності;

$F_{klmn}$  – поле координат керування;

$\lambda_e, \lambda_{\kappa}$  – вагові коефіцієнти,  $\lambda_e + \lambda_{\kappa} = 1$ ;

– метод розрахунку оптимальної швидкості точки та динамічного кута повороту при зварюванні вибухом матеріалів, що зварюються за твердістю за Вікерсом;

– метод розрахунку оптимальної швидкості детонації та силового навантаження при вибуховому зміцненні за механічними параметрами матеріалів, що зміцнюються;

– метод розрахунку оптимальних силових та термічних навантажень при формоутворенні, калібруванні та ущільненні виробів з тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів.

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

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

– розроблено метод фізичного моделювання механічних схем деформування заготовок і їх штампування, калібрування та ущільнення, що забезпечують виробам із тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів необхідні експлуатаційні характеристики;

– визначено рівень деформацій, що забезпечує напрямок дифузії атомів – із середини об'єму частинок на поверхню, що сприяє ущільненню конгломератів частинок матеріалів, що оброблюються.

**2 Практична значущість отриманих результатів полягає у тому що:**

2.1 Розроблено і впроваджено у серійне виробництво нову технологічну схему виробництва вольфрамівних 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 Упроваджені у серійне виробництво процеси подовжнього обтискання з осадженням та штампування вибухом зварних циліндричних заготовок з впровадженням ефективних методів усунення браку, пов'язаного з розривом зварного шва.

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

2.6 Розроблено технології виробництва промислової партії біметалевих труб та серійного виробництва біметалевих шин високовольтного устаткування.

2.7 Розроблено методики розрахунку технологічних процесів зварювання та зміцнювання вибухом та програмне забезпечення розрахунку напружено-деформованого стану, кінематичних та енергетичних параметрів

процесів обробки тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів.

**3 Основні результати** опубліковані в 2 монографіях, 3 колективних монографіях, 1 навчальному посібнику, 222 статтях (36 у дальньому зарубіжжі), 38 патентах, авторських свідоцтвах та тезах 42 міжнародних науково-технічних симпозіумів і конференцій.

**4 Підготовлені та захищені** 3 кандидатські дисертації (Воронін В. М. 1988 р., Плєснецов Ю. О. 1985 р., Шаповал О. О. 2011 р.) і чотири докторські дисертації (Загірняк М. В. 1996 р., Драгобецький В. В. 2003 р., Ляшенко В. П. 2012 р., Чебенко В. М. 2009 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 та композиційних матеріалів при інтенсивності деформацій осередку деформацій, наближеного до рівномірної деформації.

5.2 Експериментально уточнено залежність значення граничної рівномірної деформації від пластичної твердості матеріалу, що обробляється.

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

5.4 Розроблено теоретичні основи і встановлено технологічні можливості деформаційного зміцнення та підвищення експлуатаційних характеристик тугоплавких, важкодеформівних матеріалів.

5.5 Розроблено метод зміцнення виробів із твердих сплавів, що отримані при вибуховому подрібненні утилізованих виробів (рис. 1), комплекс технологічного обладнання для виготовлення активних 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).

5.6 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 монокристалності (рис. 8), при якій експлуатаційний ресурс досягає 45–50 годин, новий тип листових профілів із деформаційно зміцненою поверхнею забезпечує підвищення границі міцності на 16,8 %, границю плинності на 19,7 % (табл. 2).



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

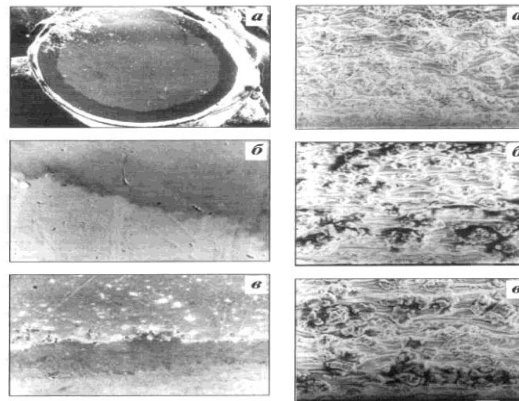


Рис. 2 – Мікроструктура композиту

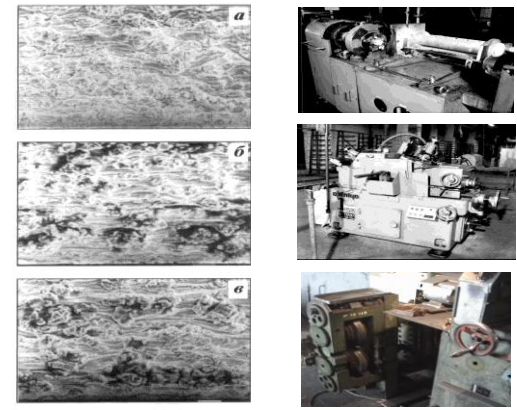


Рис. 3 – Поверхня цирконієвого осердя композиту

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

Таблиця 1

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

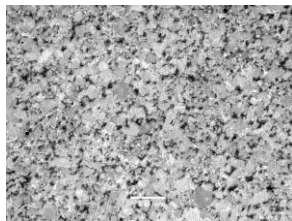


Рис. 5 – Мікроструктура зразка, що виготовлений за серійною технологією

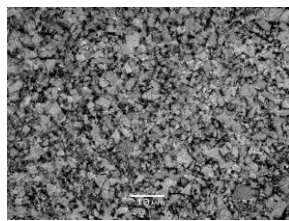


Рис. 6 – Мікроструктура зразка після обробки вибухом

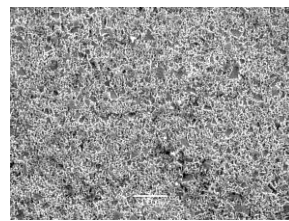


Рис. 7 – Мікроструктура зразка після детонаційного наплення

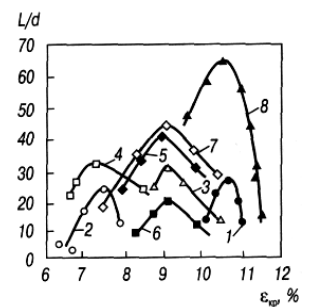


Рис. 8 – Залежність стапельності L/d від деформації для дроту різних діаметрів

## **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 сформувати 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.

Таблиця 2 – Порівняння рівня підвищення зносостійкості виробів з аустенітних марганцевистих сталей

Компанія та країна-виробник	Підвищення терміну експлуатації
«Dupont», США	30 %
«Taunbarton», США	40 %
Новосибірський стрілковий завод, Росія	40 %
Grumman Aircraft Engineering Corp., США	40 – 60 %
Кар'єри Кременчуцького регіону	128 – 135 %

6.3 Технологія двостадійного вибухового зміцнення за показниками підвищення зносостійкості перевищує кращі зарубіжні та вітчизняні аналоги (табл. 2).

6.4 Розроблена технологія виготовлення конструктивних частин магнітопроводів двигунів із поперечним потоком за фізико-механічними, електричними властивостями матеріалів магнітопроводів відповідає рівню провідних світових виробників при зниженні питомої собівартості до 11 %.

6.5 Розроблений технологічний комплекс та технологія подрібнення виробів із твердих сплавів з подальшим виробництвом штампувального та різального інструменту з вибуховим зміцненням заготовок після первинного спікання не має світових аналогів, а за показниками зносостійкості перевищує світові аналоги на 20 – 25 %.

6.6 Розроблена технологія виготовлення біметалевих обичайок для установок термоядерного синтезу та біметалевих шин високовольтного устаткування за показниками формостійкості та електротермічними властивостями перевищує кращі світові аналоги на 15 – 20 % при зниженні собівартості на 40 – 50 %.

## **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 100x3x0,6 з механічними властивостями  $H_{\mu}=3900 - 4150$  МПа;  $\sigma_{\text{в}}=1300 - 1500$  МПа;  $\delta \geq 1,2$  %.

7.4 Розроблено технологічну схему та комплекс промислового обладнання для виробництва композитного дроту на основі тугоплавких металів і впроваджено у серійне виробництво на Державному інженерному центрі твердих сплавів «Світкермет» та ТОВ НВП «Тангстен».



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



Рис. 10 – Електрод плазмоторна

7.5 Починаючи з 2004 р., виготовлено понад 10 т композиційних катодів (цирконієвий сплав 110, цирконова бронза БрЦр 0,1) на робочі струми 400 – 100А діаметром 2,5x2x1,6; 1,75x1,4x1,1; 1,25x1.

7.6 Розроблено комплекс методів зміцнення зварного шва при штампуванні вибухом та поздовжньому обтискуванню заготовок зі зварним швом і впроваджено в серійному виробництві на АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя) та ЗАТ ЛСП ППА і ОС «Спецавтоматика» (м. Луганськ).

7.7 Починаючи з 1988 р., виготовлено понад 5 тис. шт. деталей газотурбінних двигунів та кульових кранів (рис. 11, 12).



Рис. 11 – Загальний вигляд деталей, отриманих штампуванням вибухом зі зварених циліндричних заготовок

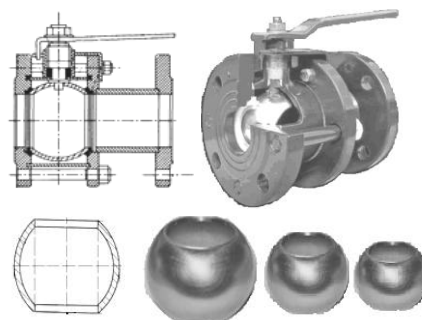


Рис. 12 – Кран кульовий сталевий

7.8 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 багат шаровому виконанні в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (м. Київ).

7.9 1991 р. виготовлено шість біметалевих труб для установки термоядерного синтезу (рис. 14) та п'ятдесят біметалевих шин, починаючи з 2012 р. (рис. 15).

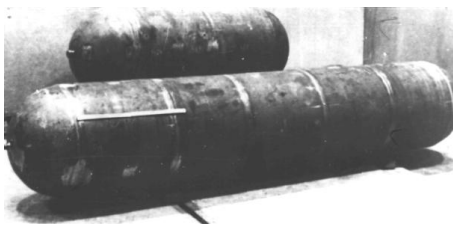


Рис. 13 – Посудини високого тиску



Рис. 14 – Біметалева обичайка для установок термоядерного синтезу



Рис. 15 – Зразки біметалевих шин

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

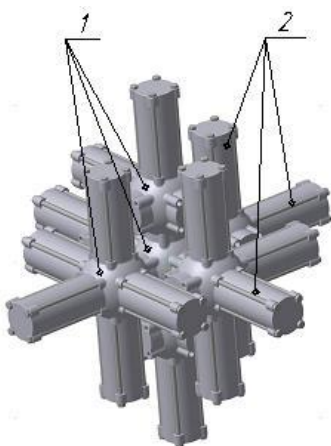


Рис. 16 – Багатокамерний вибухоударний модульний контейнер з гніздовим (радіальним) розташуванням вибухоударних модулів: 1 – вибухова камера; 2 – ударні циліндри

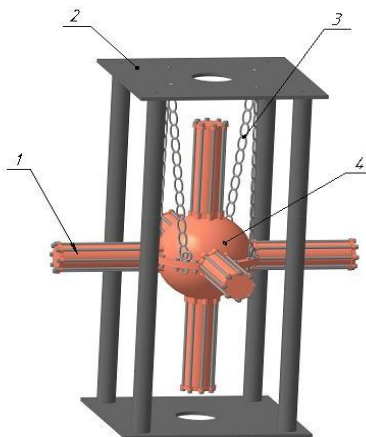


Рис. 17 – Установа вибухоударного контейнера: 1 – ударний циліндр; 2 – основні установки; 3 – ланцюг; 4 – вибухова камера

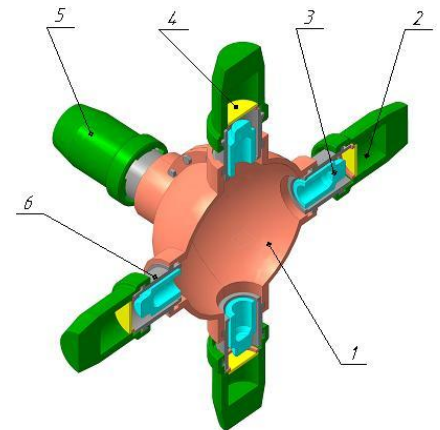


Рис. 18 – Модульна конструкція вибухоударного контейнера з байонетним замковим кріпленням ударних модулів: 1 – вибухова камера; 2 – ударна камера; 3 – поршень-ударник; 4 – шайба; 5 – капсула; 6 – ударний циліндр



7.11 Із 2001 р. у Державному інженерному центрі твердих сплавів «Світкермет» виготовлено понад 100 т виробів з твердих сплавів.

7.12 Розроблено технологічний комплекс для виготовлення нового типу листових профілів з деформаційно зміцненою поверхнею протиковзання, що включає профілі Н2-560, Н2-760, Н2-960 для настилів перехідних майданчиків.



Рис. 19 – Зовнішній вигляд виробів з регенованих твердих сплавів зі зміцненням

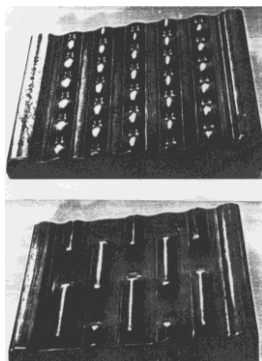


Рис. 20 – Зовнішній вигляд профілів сходів СЛ-01, СЛ-02

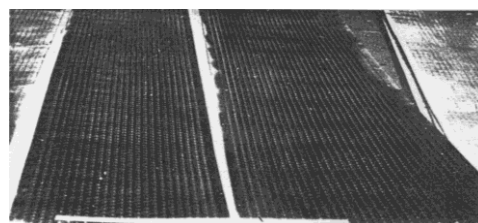


Рис. 21 – Зовнішній вигляд настилів з поверхнею протиковзання

**8 Розрахунок економічного ефекту** базується на методиках та висновках, що розроблені у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського. Економічний ефект складає 168,32 млн. грн.

**9 Кількість реферованих публікацій** дорівнює 222, 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 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.

10.2 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.

10.3 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.

10.4 На базі запропонованих моделей 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, гнутих профілів з деформаційно зміцненими елементами, формоутворення зварних заготовок із важкодеформованих матеріалів, вибухового зміцнення виробів з твердих та зносостійких матеріалів.

10.5 Уперше у світовій практиці розроблено 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.

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

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

10.8 Загальний економічний ефект від впровадження технологій обробки тугоплавких, важкодеформівних та композиційних матеріалів підтверджено у розмірі 168.32 млн. грн.

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

Претенденти:

Загірняк М. В.

Драгобецький В. В.

Шаповал О. О.

Чебенко В. М.

Плєснецов Ю. О.

Воронін В. М.

Ляшенко В. П.