

Відгук офіційного опонента

доктора технічних наук, доцента, доцента кафедри комп'ютеризованого
машинобудування Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу

Присяжнюка Павла Миколайовича

на дисертаційну роботу Трембача Іллі Олександровича

«Розробка самозахисного порошкового дроту для наплавлення деталей з
високоманганової сталі», подану на здобуття наукового ступеня доктора
філософії з галузі знань 13 "Механічна інженерія" за спеціальністю 132
"Матеріалознавство".

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Дисертація Трембача Іллі Олександровича присвячена вирішенню
актуальної науково-технічної проблеми розробки складу наповнювача
самозахисного порошкового дроту (далі СПД) та технології механізованого
електродугового наплавлення деталей з високоманганової сталі, які
експлуатуються за умов ударно-абразивного зношування. Забезпечення
зносотривкості робочих поверхонь деталей, які зазнають ударно-абразивного
зносу, є вкрай важливим для ряду галузей таких як машинобудівна, гірнична,
переробна та ін., оскільки це дозволяє підвищити довговічність та
ефективність обладнання. Особливо це стосується високоманганових
аустенітних сталей, таких як 110Г13Л, які широко використовуються у
машинобудуванні для деталей, що працюють в умовах інтенсивного ударно-
абразивного зносу.

Проблема підвищення якості, надійності та довговічності обладнання
для видобутку корисних копалин є пріоритетною задачею матеріалознавства.
Розробка нових матеріалів для наплавлення, які підвищують експлуатаційну
стійкість та ефективність зміцнення, є важливою задачею матеріалознавства.
Використання СПД є поширеним методом для відновлення геометрії та
зміцнення деталей. Однак, разом із цим, існують технологічні труднощі,
зокрема різниця у часі плавлення шихти та металевої оболонки. Це призводить
до потрапляння нерозплавленої частини шихти до зварювальної ванни і, як
наслідок, збільшення кількості неметалевих включень, хімічної
неоднорідності та погіршення механічних та експлуатаційних властивостей
наплавленого шару. Застосування екзотермічних добавок та
рідкісноземельних металів (далі РЗМ) у складі СПД є перспективним
напрямком для вирішення цих проблем, оскільки вони покращують як
технологічні характеристики процесу наплавлення так і фізико-механічні
властивості наплавленого шару.

Отже, розроблення СПД для підвищення зносотривкості та відновлення
поверхневих шарів деталей, виготовлених із високоманганових сталей, що

зазнають ударно-абразивного зношування, має важливе науково-практичне значення, тому представлена робота є, без сумніву, актуальною.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами.

Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідної роботи кафедри «Обладнання та технологій зварювального виробництва» Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) в рамках держбюджетної теми Дк-04-2019 «Підвищення ефективності застосування екзотермічних сумішей при електродуговому зварюванні та електрошлакових процесах» (№ держреєстрації 0119U103451 2019-2024 рр.). Тема дисертаційної роботи відповідає науковій тематиці кафедри «Обладнання та технологій зварювального виробництва» ДДМА в частині розроблення нових електродних матеріалів для наплавлення.

3. Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі, полягає в наступному:

Вперше розроблено склад наповнювача самозахисного порошкового дроту (СПД) з додаванням екзотермічного додатка ($\text{MnO}_2 + \text{Al}$), та її кількісні межі (30%), що забезпечують перебіг екзотермічної реакції з тепловим ефектом 4,85 кДж/г, достатнім для утворення мікроструктури наплавленого металу, яка являє собою аустенітну матрицю з дисперсними карбідами (Cr, Ti, Mn) та відновлення РЗМ з їх оксидів.

Доведено доцільність використання в складі наповнювача СПД манганової руди, найпоширенішим мінералом якої є MnO_2 в якості окислювача екзотермічної суміші, що дозволяє за рахунок утворенням екзотермічного ефекту забезпечити: зниження хімічної неоднорідності наплавленого металу, покращення морфології неметалевих включень, зменшення розміру зерна, а також забезпечує додаткове легування наплавленого металу манганом за рахунок відновлення його з оксиду. Дослідженням результатів термодинамічних розрахунків теплового ефекту екзотермічних реакцій при алюмотермічному відновленні, встановлено, що максимальний тепловий ефект 4,85 кДж/г має екзотермічна система ($\text{MnO}_2 + \text{Al}$) та в порівнянні з $\text{CuO} + \text{Al}$ та $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ має збільшення теплового ефекту на 10-20%.

Показано, що висока зносостійкість наплавленого металу в умовах ударно-абразивного зношування досягається за наявності в наплавленому металі аустенітної матриці, карбонітриду титану та евтектики ($\text{Cr}_7\text{C}_3 + \alpha\text{-Fe}$) яка складає основу при наявності не більше 30% метастабільного аустеніту і залежить від його характеристик та параметрів деформування.

Вперше встановлено, що максимальне збільшення мікротвердості в деформованому абразивом поверхневому шарі спостерігається в сплавах, що вміщують 5...6% Mn. Зниження абразивної зносостійкості і мікротвердості

поверхневого шару при збільшенні вмісту Mn понад 6% пов'язано з підвищенням стабільності аустеніту і його впливу на $\gamma \leftrightarrow \alpha$ перетворення при деформуванні.

Досліджено, що легування наплавленого металу хромом підвищує вміст в матриці $\text{Cr}(\text{Mn})_7\text{C}_3$ замість первинних карбідів Fe_3C . Додаткове легування РЗМ в кількості 0,1% не впливають на розміри і морфологію НМВ, але має вплив на основні технологічні властивості розробленого наплавленого металу, що сприяє зростанню в 1,6 рази зносостійкості високоманганової сталі при комплексному використанні Cr, Ti, Mn.

Доведено, що працездатність наплавленого металу системи Fe-Mn-Cr-C-Ti в умовах ударно-абразивного зношування залежить від релаксаційних властивостей металу, контролюється мікромеханізмами перетворення структури в умовах деформування і залежить від легування та модифікування металу, що, в свою чергу, забезпечує управління метастабільним аустенітом та формування мартенситу деформації і визначає кількість, тип і розмір карбідної фази.

За результатами аналізу діаграм розподілу легуючих елементів в наплавленому металі 140Г6ХЗТ встановлено, що вуглець і азот концентруються в області скупчення титану, хром в карбідах, манган розподіляється між матрицею і зміцнюючими фазами. Такий розподіл легуючих сприяє зростанню твердості інdentування до 7,64 ГПа, модуля пружності до 213,76 ГПа, що перевищує показники сталі 110Г13Л і 90Г13Н4, а глибина подряпин, при скретч випробуваннях, зменшується до 0,252 мкм.

4. Наукове та практичне значення.

Наукове значення дисертаційної роботи полягає в розширенні наукових знань у галузі розробки нових складів самозахисного порошкового дроту з екзотермічними добавками для наплавлення високоманганових сталей, а також у встановленні взаємозв'язків між режимами наплавлення, хімічним складом, мікроструктурою, механічними та експлуатаційними властивостями наплавленого металу. Розроблені математичні моделі та отримані поверхневі відгуки впливу режимів наплавлення на властивості наплавленого металу мають значну наукову цінність.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується розробкою нового високовуглецевого середньоманганового сплаву типу 140Г6ХЗТ, рекомендованого для відновлення деталей, які працюють в умовах ударно-абразивного зносу. Цей сплав значно підвищує зносостійкість у порівнянні з існуючими аналогами (ПП-АН105 та 110Г13Л), а саме у 3,1 рази вище в порівнянні з прототипом ПП-АН105 (ПП-Нп-90Г13Н4) та в 1,6 рази вище порівняно зі сталлю 110Г13Л. Розроблена технологія виготовлення та наплавлення СПД з ЕД у наповнювачі забезпечує отримання задовільної

якості наплавленого металу на робочих поверхнях хрестовин стрілочних переводів та черпаків живильника. Технологія зміцнення цих виробів з використанням зносостійкого сплаву 140Г6Х3Т прийнята у виробництво на ПрАТ «ПОБЕРЕЗЬКИЙ ЗАВОД ПРЕСОВИХ АГРЕГАТИВ», що підтверджено актом випробування та виробничого впровадження. Економічний ефект від впровадження становить 175 760 грн. Результати роботи впроваджені в навчальний процес на кафедрі «Матеріалознавства» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» та кафедрі «Обладнання і технології зварювального виробництва» Донбаської державної машинобудівної академії.

5. Повнота викладення матеріалу дисертації у наукових публікаціях.

Основні наукові результати дисертації опубліковано у 18 наукових працях, з яких: 9 статей із яких 4 – у виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus та/або WoS, 9 тез конференцій. Також отримано 1 патент України на корисну модель.

6. Ступінь обґрунтованості наукових положень.

Наукові положення, висновки та рекомендації, представлені в дисертації, є достатньо обґрунтованими та достовірними. Це підтверджується комплексним підходом до досліджень, що включав теоретичний аналіз, термодинамічні розрахунки, лабораторні експерименти, металографічний аналіз, вимірювання механічних властивостей, зокрема твердості, модуля пружності) та скретч-тестів. Застосування методів математичного планування експерименту та кореляційно-регресійного аналізу забезпечило об'єктивність обробки та інтерпретації отриманих даних. Результати досліджень узгоджуються з сучасними науковими уявленнями про процеси наплавлення, формування структури та властивостей високоманганових сталей.

7. Структура та зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам щодо оформлення.

Дисертаційна робота відрізняється чіткою та логічною структурою, що дозволяє повною мірою розкрити зміст проведених досліджень. Вона складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 12 додатків. Загальний обсяг роботи становить 219 сторінок.

Вступ є першим структурним елементом дисертації, що обґрунтовує актуальність обраної теми дослідження, її зв'язок з науковими програмами та темами. У вступі сформульовані мета та задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження. Окрему увагу приділено опису використаних методик експериментальних та теоретичних методів дослідження, обґрунтовано наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення. Також надано інформацію про особистий внесок здобувача,

апробацію результатів дисертації на наукових конференціях та перелік публікацій за темою дисертації із визначеним вкладом здобувача.

Розділ 1. "Стан дослідження довговічності деталей, що зазнають ударно-абразивного зносу та матеріалів для їх зміцнення". Цей розділ є ґрунтовним аналітичним оглядом літературних джерел, що стосуються проблеми підвищення зносостійкості деталей. Він починається з аналізу умов експлуатації та причин зносу і руйнування поверхонь деталей з високоманганової сталі. Детально розглядаються методи підвищення стійкості деталей до ударно-абразивного зносу, зокрема поверхневе зміцнення, поверхнева пластична деформація, детонаційне зміцнення електродугове наплавлення. Проаналізовано вплив мультифазової структури на зносотривкість високоманганової сталі, зокрема роль метастабільного аустеніту, мартенситу, карбідів тугоплавких металів (та евтектик на їх основі). Систематизовано можливі механізми структуроутворення високоманганової сталі легованої тугоплавкими карбідами у процесі наплавлення. Проведено порівняльний аналіз сучасних сплавів для наплавлення провідних виробників та перспективних систем легування за участю тугоплавких металів (Ti, V, Cr, Nb та ін.). Також, зокрема, на основі аналізу ізотермічних перетинів обґрунтовано вибір газоплакових систем самозахисних порошкових дротів. З позиції забезпечення одночасно технологічності та високого рівня механічних властивостей, показано доцільність використання екзотермічних добавок до шихти (СПД), а також рідкісноземельних металів (та їх оксидів). Крім цього, показано зв'язок між механічними властивостями високоманганових сталей та їх зносотривкістю, а також виокремлено способи цілеспрямованого регулювання механічних властивостей шляхом легування. Висновки до розділу створюють передумови для постановки задач дослідження.

У розділі 2 обґрунтовано вибір взаємодоповнюючих методик для проведення експериментальних та теоретичних досліджень. Проведено термодинамічний розрахунок теплового ефекту у процесах алюмотермічного відновлення мангану із оксидів різного стехіометричного складу, а також рідкісноземельних металів з їх оксидів. У результаті, як компонент шихти СПД було вибрано оксид MnO_2 . Обґрунтовано вибір методик трибологічних досліджень наплавлених шарів, які охоплювали оцінку абразивної зносотривкості за умов тертя по закріпленому та вільному абразиву, а також ударно-абразивного зношування. Представлено методи оцінки механічних характеристик сталі методом індентування та склерометричними випробуваннями. Детально викладено методику дослідження динамічного зміцнення ультразвуковою ударною обробкою (УЗУО). Описано методики дослідження технологічних характеристик самозахисного порошкового дроту, зокрема визначення коефіцієнту заповнення, стану поверхні, температури

початку протікання екзотермічної реакції у наповнювачі та рівномірності плавлення. Наведено методи дослідження мікроструктури та фазового складу наплавленого металу шляхом металографії, електронної мікроскопії та рентгенівської дифракції. Описано методи визначення фізико-механічних характеристик наплавленого металу, зокрема мікромеханічних досліджень шляхом індентування.

У третьому розділі наведено детальний опис технологічного маршруту отримання СПД та відповідного обладнання. Запропоновано склади п'яти СПД, які відрізняються специфікою комбінованого легування ЕД та оксидами РЗМ, а також легуванням титаном та хромом. При цьому як базову легувальну систему було вибрано склад, який відповідає марці 120Г11. Разом із цим, було запропоновано склади п'яти електродних дротів, які відрізняються наявністю комбінованого легування як екзотермічними добавками системи $\text{MnO}_2 + \text{Al}$ так і впливом оксиду ітрію, а також наявністю у шихті Ti та Cr . Проведений у даному розділі аналіз результатів металографічних досліджень дозволив встановити взаємозв'язок між компонентним складом шихти та особливостями структуроутворення у наплавленому шарі. Це дозволило, поряд із аналізом літературних даних, запропонувати найбільш раціональну систему легування наплавленого металу, що містить як екзотермічну добавку так і оксид ітрію. Для оптимізації режимів наплавлення СПД розробленого складу було проведено всебічний аналіз методом планування експерименту, яке дозволило запропонувати відповідні регресійні рівняння, які дозволяють із високою точністю прогнозувати конкретні режими (струм, напруга та ін.), а також геометричні параметри наплавлених валиків.

Розділ 4 дисертаційної роботи є логічним продовженням розділу 3, оскільки досліджено вплив співвідношення Mn/C за усіх інших рівних параметрах, які представлено дев'ятьма різними складами СПД. Проведений порівняльний аналіз їх мікроструктури дозволив виявити найбільш характерні тенденції впливу компонентного складу на мікроструктуру, зокрема на перехід від дендритної до рівновісної форми зерен у поверхневому шарі. Використані математичні моделі дозволили встановити взаємозв'язок між розміром зерна, морфологічними характеристиками неметалевих включень, макротвердістю та технологічними параметрами процесу наплавлення. Шляхом елементного аналізу наплавлених шарів було встановлено повноту проходження екзотермічної реакції: $\text{MnO}_2 + \text{Al}$, та відповідно ступінь переходу мангану у наплавлений метал.

У п'ятому розділі увагу автора сфокусовано, головним чином, на порівняльному аналізі розробленого сплаву 140Г6ХЗТ із серійним прототипом Нп-90Г13Н4 з позиції оцінки характеру формування структури та рівня механічних та трибологічних властивостей.

Особливу увагу привертає підрозділ 5.2, де описано та проаналізовано результати наноіндентування сплавів 110Г13Л, Нп-90Г13Н4 та 140Г6Х3Т. Тут, особливо слід зазначити, що для манганового аустеніту (110Г13Л) та прототипу (Нп-90Г13Н4) значення нанотвердості та модуля пружності є нижчими ніж розробленого автором сплаву (140Г6Х3Т). При цьому розроблений сплав зберігає співмірний рівень пластичності, а його розрахований індекс стійкості до зносу передбачає вищий рівень зносотривкості. Результати наноіндентування логічно доповнено скретч-тестами зразків у деформованому та вихідному станах. Із яких видно, що розроблений сплав дозволяє забезпечити фактично удвічі вищу протидію мікрорізанню та, відповідно, абразивному зношуванню ніж сталь 110Г13Л та сплав Нп-90Г13Н4. Схожі результати було отримано для зразків у деформованому стані (таблиця 5.10), де видно, що хоча інтенсивність наклепу (яка проявляється у зростанні мікротвердості) для зразків 110Г13Л та сплаву Нп-90Г13Н4 є вищою, загальний рівень твердості для сплаву 140Г6Х3Т є вищим як у вихідному так і у деформованому стані. Даний розділ завершується описом шляхів практичного застосування розробленого дисертантом сплаву, а також наведено дані щодо його апробації (підкріплені відповідним актом) для відновлення та підвищення зносотривкості деталей, що експлуатуються за умов ударного та ударно-абразивного видів зношування.

Загалом дисертація є логічно побудованою, матеріал викладено послідовно та всебічно, що забезпечує цілісне сприйняття представлених результатів. Робота має усі необхідні елементи оформлення.

8. Дискусійні положення та зауваження до дисертації.

Незважаючи на високий рівень дисертаційної роботи, є кілька зауважень та дискусійних моментів, які не знижують загальної позитивної оцінки:

1. В першому розділі механізм динамічного деформаційного мартенситного перетворення для сталі 110Г13Л розглядається як безальтернативний, хоча для високоманганових сталей, залежно від співвідношення вуглецю та мангану зміцнення може відбуватись шляхом мікродвійникування, разом цим на стор. 66, розглядається залежність механізму зміцнення від енергії дефектів пакування (SFE), однак не вказано як ця величина залежить від складу сталі.
2. Твердження на стор. 66, щодо того що карбідотвірні елементи такі як хром, молібден, титан і ванадій, сприяють підвищенню стабільності аустенітної фази є сумнівним та не підтвержено посиланням на літературні джерела, а також суперечить твердженню на стор. 67, де як основні стабілізатори аустеніту це манган та нікель.
3. У п.5 висновків до першого розділу вказано, що для розроблення СПД варто використовувати Si в межах 0.3-0.6 мас. %, однак чим зумовлено

- його використання не вказано.
4. Розділ 2, де описана методика досліджень варто було б доповнити даними, щодо характеристик вихідних матеріалів, таких як морфологія, дисперсність, виробник, хімічний склад і т.д.
 5. Коефіцієнти перенесення компонентів шихти варто було б обґрунтувати відповідними посиланнями таблиця 3.2.
 6. У таблицях 3.4 та 3.5 варто було б навести вміст Y, або ж вміст оксидів на його основі.
 7. Для забезпечення інформативності у додатку A1 та A2 варто було б використовувати масштабні мітки, а не величину збільшення. Також, враховуючи те, аналіз структур є важливою частиною дисертаційної роботи, їх знімки доцільно розмістити безпосередньо у тесті дисертації, а не в додатку, тобто як це було зроблено на рис.4.1.
 8. На рисунку 3.18 для знімків зразків 2, 3, 6 та 8 спостерігається незначна пористість наплавленого шару, слід було б пролізувати причини їх виникнення та надати пояснення, чому в інших зразках даної серії вона не спостерігається.
 9. У розділі 4, у частині, де йдеться про розміри зерен необхідно було б навести уточнення щодо методики їх виявлення : аналіз знімків, метод випадкових січних і т. п.. До того ж не зрозуміло за яким параметром було визначено розмір зерна: діаметр Фере, середній розмір від центра маси та ін.
 10. Список цитованих джерел у четвертому розділі потрібно було б доповнити даними із іноземної періодики, у тому числі і такими де розглядається математичний апарат планування експерименту.
 11. На дифрактограмі рисунок 5.1 яскраво виражені такі піки $\sim 40^\circ$ та 50° , які відповідають Cr, хоча тут, з огляду на склад СПД, слід було б очікувати піки α -Fe.
 12. У таблиці 5.2 як прогнозовані фази зазначено (Fe,Mn)C та (Fe,Cr,Mn)C-такі фази не є рівноважними, можливо йдеться про цементит $(Fe,Cr,Mn)_3C$ та карбід $(Fe,Cr,Mn)_7C_3$.
 13. У підрозділі 5.3, де йдеться про трибологічні характеристики не наведено дані щодо абразивної зносотривкості за методиками описаними у другому розділі, зокрема таких як тертя по закріпленому та вільному абразиву.
 14. Назва підрозділу 5.4 не відображає його змісту.
 15. Для зразків у деформованому стані доцільно було б провести рентгенівський фазовий аналіз із тим щоб встановити фази, які забезпечують зносотривкість.
 16. На стор. 178 зазначено, що при вимірюваннях індентор частково

потрапляє у фазу Fe_2B , проте бор у системах легування сплавів для наплавлення не зазначено.

17. У тексті дисертації трапляються граматичні помилки наприклад: крупноігольчата ст. 43, охрупчіванню ст. 43, напруги ст. 44, кристалічних решіток ст. 44, кордонах розділу ст. 45, газової середі ст. 54, міжфазне натягіння ст. 55, утворення трещин ст. 64, подальшого здвигу ст. 66., енергії дефекту упаковки ст. 66., дослідження службових характеристик стор. 92 та ін.

9. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Трембача Іллі Олександровича «Розробка самозахисного порошкового дроту для наплавлення деталей з високоманганової сталі», яка подана до захисту у спеціалізовану вчену раду на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 "Механічна інженерія" за спеціальністю 132 "Матеріалознавство", за своєю актуальністю, науково-теоретичним рівнем, обґрунтованістю основних положень, отриманими результатами та їх практичним значенням повністю відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та Постанові Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 341 від 21.03.2022.

Дисертаційна робота заслуговує на позитивну оцінку, а її автор – на присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 132 «Матеріалознавство».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,
доцент, доцент кафедри
комп'ютеризованого машинобудування
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу
Присяжнюк Павло Миколайович

Присяж

Підпис(и)	Присяжнюка Павла Миколайовича
посвідчую	В. Холма
Учений секретар ІФНТУНГ	
« »	20 р.

