**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ДОВГОМІРНИХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ’ЄКТІВ ЗА ТРИВАЛОЇ ДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ**

1. **ЗОЦЕНКО МИКОЛА ЛЕОНІДОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри видобування нафти і газу та геотехніки Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка

2. **МАРУЩАК ПАВЛО ОРЕСТОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів та виробництв Тернопільського національного технічного університету Імені Івана Пулюя

3. **ПОБЕРЕЖНИЙ ЛЮБОМИР ЯРОСЛАВОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімії Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

4. **СТУХЛЯК ПЕТРО ДАНИЛОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського національного технічного університету Імені Івана Пулюя

5. **БУКЕТОВ АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії

## 6. СТУДЕНТ ОЛЕКСАНДРА ЗИНОВІЇВНА – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України

7. **ШЕВЧУК СТЕПАН ПРОКОПОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

**Тернопіль 2017**

**Вступ.** Довгомірні промислові об’єкти (нафто-, газо-, паро- та продуктопроводи) є складними технологічними комплексами. Їх використання забезпечує безперебійне транспортування рідин та газів. Підвищення надійності та роботoздатності таких систем є важливою проблемою, оскільки вони експлуатуються тривалий період за умов високих тисків та корозійного впливу середовищ. Роботоздатність довгомірних промислових об’єктів залежить від своєчасного виявлення пошкоджень в металі навіть на структурному рівні, або можливості їх прогнозування. Ці завдання вирішують вдосконаленням чинних та розробленням нових фізично обґрунтованих параметрів контролю. Разом з тим, комплексний підхід, яких забезпечував би оптимізацію роботоздатності таких об’єктів починаючи від їх монтажу, достовірного діагностування їх поточного технічного стану протягом експлуатації та розроблення заходів, спрямованих на подовження ресурсу (аж до їх планового виведення з експлуатації) наразі відсутній.

Першочергову увагу слід приділити обґрунтуванню достовірності оцінювання пошкодженості металу продуктопроводів, насамперед магістральних нафто- та газопроводів, розробленню нових методів аналізу структурно-механічної деградації, розробленню стратегії обґрунтованого подовження ресурсу шляхом застосування нових ефективних покриттів для захисту від агресивного впливу корозивних середовищ відремонтованих ділянок.

**Мета роботи** – розроблення інноваційної стратегії забезпечення роботоздатності довгомірних промислових об’єктів за тривалої дії експлуатаційних середовищ та її впровадження шляхом реалізації комплексу монтажних, діагностичних, експертних та технологічних заходів.

**Зміст та наукова новизна роботи.** Довгомірні промислові об’єкти (газо-, нафто-, паро- та продуктопроводи) є складними технологічними комплексами. Їх використання забезпечує безперебійне транспортування рідин та газів. Підвищення надійності та роботoздатності таких систем є важливою проблемою, оскільки вони експлуатуються тривалий період за умов високих тисків та корозійного впливу середовищ. Роботоздатність довгомірних промислових об’єктів залежить від своєчасного виявлення пошкоджень в металі навіть на структурному рівні, або можливості їх прогнозування. Ці завдання вирішують вдосконаленням чинних та розробленням нових фізично обґрунтованих параметрів контролю. Разом з тим, комплексний підхід, яких забезпечував би оптимізацію роботоздатності таких об’єктів починаючи від їх монтажу, достовірного діагностування їх поточного технічного стану протягом експлуатації та розроблення заходів, спрямованих на подовження ресурсу (аж до їх планового виведення з експлуатації) наразі відсутній.

В останні роки проблема забезпечення надійної і довготривалої механічної стійкості протяжних інженерних споруд все частіше розглядається в напрямку оцінки і прогнозування процесів, які проходять у земній корі. Однак, якщо ризик руйнування об’єктів потужними впливами типу великих землетрусів чи зсувів очевидний і доволі детально досліджений, то механізм втрати механічної стійкості ґрунтових порід під впливом відносно слабких градієнтів геофізичних полів до цього часу не з’ясований. Нафтогазопроводи, як лінійні системи значної протяжності, перетинають на своєму шляху зони з геологічними умовами, що значно відрізняються за властивостями, в тому числі геологічні дискрети – розломи, складки, зони розтріскування, тріщини. Відповідно нафтогазопроводи найбільш чутливі до впливу деформованого ґрунту, у порівнянні з іншими спорудами великої протяжності (автомобільні дороги), які легко відновити. Аварії на нафтогазопроводах здатні стати причиною як величезного матеріального збитку, так і великих забруднень навколишнього середовища. Величини таких втрат, які несе держава внаслідок аварій, є одним з основних показників, які мають вирішальне значення при розробці стратегій зниження ризиків під дією різноманітних природних та техногенних чинників.

Вперше обґрунтовано і впроваджено на будівництві магістральних трубопроводів технологічно нові основи та фундаменти: палі в пробитих свердловинах (НППС); ґрунтоцементні основи і палі (ГЦО і ГЦП). Це дало змогу в 1,5 – 2 рази (а інколи до 3 разів) зменшити витратні матеріали та ресурси на зведення опорних елементів магістральних трубопроводів порівняно з традиційними методами та забезпечити безпечні умови експлуатації інженерних споруд.

Для найпоширеніших в Україні лесових товщ ґрунту потужністю 6 – 12 м у природному чи намоклому стані (з модулем деформації  = 3 – 5 МПа), які підстилають непросадні ґрунти, найефективнішими виявилися розроблені й запатентовані авторами набивні палі у пробитих свердловинах (НППС). За технологічними і економічними показниками НППС перевершують будь-які відомі на сьогодні пальові фундаменти й штучні основи. Адже вони забезпечують високий ступінь використання несучої здатності основи, під час їх зведення майже виключені земляні й опалубні роботи, в 1,2 – 2 рази зменшуються витрати бетону, в 1,5 – 4 ‑ металу, у 1,5 – 2 ‑ вартість і трудомісткість, в 1,5 – 2 рази пришвидшується нульовий цикл порівняно зі зведенням фундаментів за традиційними технологіями.

*Ґрунтоцементні палі* нової конструкції виготовляються за бурозмішувальною технологією. Окрім явних економічних переваг, слід відзначити високу технологічність їх виготовлення у нестійких ґрунтах. Адже для влаштування набивних бетонних паль потрібне обсадження свердловин або їх обхід під глинистим розчином, тоді як за використання запропонованої бурозмішувальної технології ґрунтоцемент надійно утримує стінки свердловини навіть в мулах і пливунах. Такі палі можливо армувати безпосередньо після їх виготовлення шляхом занурення каркасу вібруванням, або окремими стрижнями за допомогою спеціального кондуктору. Висока водонепроникність ґрунтоцементу забезпечує корозійну стійкість арматури під час експлуатації. Запатентовані НППС впроваджені на 38 об’єктах будівництва у Полтавській, Сумській, Чернігівській областях.

*Обґрунтовано і запропоновано нову схему підсилення основи фундаменту* опор магістральних трубопроводів шляхом її армування вертикальними елементами у вигляді ґрунтоцементних циліндрів різних за діаметром і довжиною. Значення модуля деформації *Е* і розрахункового опору *R* штучної основи регулювали об’ємом ґрунтоцементу в слабкому ґрунті, адже вони залежать від відстані між елементами армування.

Запропоновано концепцію спеціальної системи моніторингу та багатопараметрової оцінки рівня геодинамічного ризику в зонах пролягання різноманітних довгомірних металоконструкцій (трубопровідних систем).

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень експлуатованого металу довгомірних об’єктів запропоновано нові підходи для діагностування технічного стану металоконструкцій, які ґрунтуються на урахуванні закономірностей деградації матеріалу, зародження і коалесценції множинних корозійних пітингів та тріщин, що дало можливість вдосконалити методи розрахунку їх довговічності та залишкового ресурсу.

Встановлено основні закономірності експлуатаційного пітинго- та тріщиноутворення на поверхні конструкційних елементів магістральних нафто- та газогонів. Оцінено вплив тривалого напрацювання сталей магістральних нафто- та газогонів на здатність металу пластично деформуватися, встановлено зв’язок твердості сталей з їх схильністю до пітинго- та тріщиноутворення та на цій основі розроблено метод оцінювання їх експлуатаційної деградації на стадії зародження тріщини.

Сформульовано основні принципи, розроблено алгоритм та програмне забезпечення ідентифікації дефектів в межах сітки множинного розтріскування та пітингоутворення як передумов для їх коалесценції з визначенням напряму поширення тріщин:

а) спосіб оцінювання пошкоджень на поверхні (Патент України № 40788), який дає змогу діагностувати технічний стан натурних елементів за розмірами окремих дефектів;

б) спосіб визначення поверхневої густини дефектів (Патент України № 40741), який дає змогу визначати відносну площу пошкоджень на інтенсивно окиснених поверхнях з ускладненою візуалізацією тріщин;

в) спосіб оцінювання напрямку розтріскування (Патент України № 39859), за яким можна визначати просторову орієнтацію елементів сітки множинного розтріскування.

Метод успішно адаптовано та використано для аналізу пошкоджень на поверхнях магістральних газогонів, пошкоджених під час експлуатації множинними корозійними пітингами, що дало змогу уточнити геометрію відокремлених корозійних виразок, гістограми їх розподілу та визначити умови їх об’єднання.

Виявлено основні закономірності впливу тривалого напрацювання сталі 17Г1С на її деформування і руйнування з використанням методу повних діаграм. Після напрацювання сталі 17Г1С збільшуються її умовна межа плинності, відношення σ*В/*σ0,2 та відносне видовження, в основному за рахунок збільшення складової рівномірної деформації. Розвинуто підхід проф. Г.М. Никифорчина, згідно з яким зниження відносного звуження експлуатованого металу вказує на його експлуатаційне окрихчення, зокрема внаслідок деформаційного зміцнення, показником якого може слугувати збільшення твердості і мікротвердості. Одержано низку результатів, які свідчать, що така поведінка матеріалу властива трубним сталям за наявності в них розпорошених пошкоджень. За відсутності значних деформацій стінки труб нафто- та газогонів, які експлуатуються за умов інтенсивного наводнювання, переважаючим є механізм накопичення структурних дефектів, зокрема дислокаційного походження. Запропоновано фізичну модель такого механізму деградації металу стінки труби протягом тривалого напрацювання.

Розроблено методи оцінювання пошкоджень на поверхні, який ґрунтується на оптико-цифровому аналізі локальних ділянок матеріалу в околі вершини втомної тріщини, та впливу пластичної деформації на локалізовані дефекти в матеріалі, що дають змогу оцінити вплив поточного пошкодження матеріалу на його здатність чинити опір циклічному деформуванню розтягом.

Вдосконалено і автоматизовано метод визначення висоти зони витягування та критичного розкриття вершини тріщини з допомогою псевдостереопари, що дало змогу використовувати його для визначення геометрії зони старту тріщини в’язкого відриву. Проаналізовані фактори, що впливають на достовірність обчислення висоти мікронерівностей поверхонь зламів запропонованим методом. Розвинуто метод аналізу мікрошвидкості втомної тріщини та її окремих параметрів (кроку і висоти втомних борозенок, їх форми), що дозволяє співставляти макро- та мікрошвидкість росту втомної тріщини та забезпечує відтворюваність результатів фрактодіагностування.

За результатами теоретико-експериментальних досліджень розроблено методологію дослідження деформації та руйнування елементів трубопровідних систем та введено нові експлуатаційно-орієнтовані критерії оцінки поточного стану експлуатованого матеріалу. Розроблено методику фізичного моделювання роботи трубопроводу в умовах тривалої дії агресивних середовищ із імітацією раптових перевантажень.

Запропоновано нові та вдосконалено існуючі алгоритми та загальні схеми оцінки і розрахунку експлуатаційних ризиків стосовно довгомірних об’єктів, імовірності відмов та позаштатних ситуацій, оцінки масштабів безпосередніх та тривалих наслідків аварійних ситуацій тощо. Розроблено об’єднану принципову схему оцінки потенційних небезпек, розрахунку та контролю експлуатаційних ризиків, яка відповідає діючим нормативним документам та містить істотні удосконалення, котрі дають змогу покращити заходи з контролю та упередження виникнення експлуатаційних ризиків.

Запропоновані нові конструкції динамічних шкребків, як рухомих об’єктів в трубопроводі, та імпульсно-хвильова технологія очищення нафтогону від асфальтосмолопарафінових відкладів (АСПВ), захищені патентами України: очисний поршень (Патент № 58905); пристрій для очищення внутрішньої поверхні трубопроводу (Патент № 405340). Вперше розроблено комплекс для моделювання, який включає програмні модулі методу скінченних різниць, оригінальну оболонку C++ Builder та інструмент COSMOSXpres оболонки Solidworks, об’єднаних в систему для визначення основних динамічних параметрів переміщення шкребків та параметрів коливання трубопроводів. Комплекс також дозволяє проводити моделювання динамічних процесів очищення трубопроводів динамічними шкребками та прогнозувати параметри міцності різних ділянок магістральних трубопроводів. Розроблено новий метод оцінювання роботоздатності системи технологічного обладнання гідроустановок з перекачування рідини через резервовані трубопроводи за критеріями надійності та економічності їх функціонування, що дало змогу створити засоби їх технічного діагностування та енергозберігаючого керування.

Досліджено вплив експлуатаційної деградації на деформаційну поведінку матеріалу магістральних газопроводів в умовах тривалої дії експлуатаційних середовищ та показано, що залежно від концентрації корозивних компонентів середовища приріст деформації може становити до 20…30 %. Встановлено, що в кислих ґрунтових електролітах деградована трубопровідна сталь має схильність до раптових деформаційних стрибків, які можуть спричинити спонтанну розгерметизацію трубопроводу. Отримано математичні залежності для прогнозування деформацій трубопроводів (сталь 19Г та 17ГС) за тривалої дії експлуатаційних середовищ (ґрунтових електролітів).

Вперше проведено математичну інтерпретацію та розроблено підходи до прогнозування живучості основного металу та зварних з’єднань трубопроводів на повітрі і в корозійних середовищах. Показано, що вона може служити важливим критерієм для оцінки експлуатаційних ризиків, залишкового ресурсу роботи елементів трубопроводів із пошкодженнями та визначення черговості виконання ремонтних робіт і заходів з відновлення їх нормального функціонування. Для спрощення інженерних розрахунків введено коефіцієнти живучості.

Встановлено основні закономірності впливу змінного та наведеного струму на корозію трубопроводів. Показано, що за густини струму 5 А/м2 приріст швидкості корозії у нейтральних та підкислених ґрунтових електролітах зростає на 5 % як для вуглецевих так і низьколегованих сталей, що доводить необхідність перегляду нормативних документів. Виявлено небезпечні співвідношення компонентів ґрунтового електроліту та рівня густини струму, які в реальних умовах експлуатації можуть спричинити утворення наскрізних корозійних уражень, особливо трубопроводів низького та середнього тиску з малою товщиною стінки труби. Виявлено, що із зменшенням рівня рН в умовах дії змінного струму інтенсифікується виділення водню та зростає небезпека водневої деградації та водневого окрихчення сталі.

Існуючі підходи оцінювання деградації матеріалів потребують використання зразків свідків (в реакторах), або вирізки металу з трубопроводів, а це не завжди можливо здійснити. Тому для дослідження кінетики деградації конструкційних сталей розроблено методику, яка дала змогу моделювати процес їх високотемпературної деградації в лабораторних умовах. Методика полягає у швидкісному термоциклуванні зразків в робочому діапазоні температур у середовищі газоподібного водню як найагресивнішого складника технологічних середовищ. Внаслідок термоциклування відбувається напомповування водню в метал і фіксація його надрівноважної концентрації в ньому за кімнатної температури. Крім того дифузійне переміщення водню внаслідок теплозмін в кожному з термоциклів сприяє дифузійному перерозподілу вуглецю і елементів легування в теплостійких сталях, необхідного для розчинення перліту і формування складно легованих карбідів вздовж меж зерен. Металографічними дослідженнями показана відповідність зміни структури теплотривких сталей за їх деградації в експлуатаційних і лабораторних умовах. Причому деградація в лабораторних умовах відбувалася набагато швидше, ніж в експлуатаційних. Однакові структурні зміни в металі зафіксували після 20 років експлуатації сталі 12Х1МФ на парогонах ТЕС і після одного місяця термоциклування зразків у водні.

Обґрунтувано граничний рівень деградації сталей парогонів. При цьому враховано, що розчинений в металі водень створює на субмікрорівні структурні напруження і тим самим передумови для розтріскування металу на субмікрорівні. Фрактографічні дослідження наводненого деградованого металу, випробуваного на циклічну тріщиностійкість, підтвердили це. Порівнявши закономірності зміни порогових рівнів циклічної тріщиностійкості до різної міри деградованого металу у наводненому та дегазованому станах від кількості термоциклів у водні виявили інверсію впливу водню, абсорбованого металом під час термоциклування, на циклічну тріщиностійкість. До певного рівня деградації водень підвищує ефективний поріг циклічної тріщиностійкості металу, а по досягненні граничного рівня його деградації починає додатково знижувати його. Стан металу, за якого починав проявлятися негативний вплив водню на його тріщиностійкість, запропоновано вважати за граничний. А кількість термоциклів у водні, яка його спричинила, дала можливість побудувати кореляційну залежність між тривалістю експлуатації і кількістю термоциклів у водні та використати її для обґрунтування граничного рівня деградації сталі. За досягнення граничного стану деградації метал стає схильним до водневого розтріскування на субмікрорівні і його крихке руйнування може відбутися за будь-якого навіть незначного відхилення від регламентованих параметрів експлуатації.

Розвинуто методи фрактодіагностування, зокрема з’ясовано причини порушення цілісності корпусу регулятора тиску газу між відсіками високого і низького тисків після 10 років експлуатації. Встановлено визначальну роль корозійних процесів в експлуатаційній деградації корпусу регулятора. Визначено причини зниження характеристик пластичності та опору крихкому руйнуванню сталі корпусу регулятора тиску.

Встановлені найімовірніші осередки зародження руйнування та механізми поширення тріщин під час тривалої експлуатації елементів нафтогону з осьовими зварними з’єднаннями. З використанням гідроопресовування труби візуалізували фрактографічні ознаки експлуатаційної деградації металу у вигляді розсіяної пошкодженості вздовж меж зерен та зниження опору крихкому руйнуванню самих зерен. Розсіяну пошкодженість у стінці труби пов’язали з наводнюванням металу від внутрішньої її поверхні під час експлуатації. Найефектніший вплив гідроопресовування отримали за випроб на ударну в’язкість. Встановлено, що внаслідок зростання кількості циклів гідроопресовування від 2235 до 2600 ударна в’язкість основного металу (сталь17Г2С після 45 років експлуатації на магістральному нафтогоні) знизилася на 25%, то металу зони термічного впливу – майже на 40%, а металу шва – на 38%. Тобто за характеристикою *KCV* метал зварного з’єднання деградує сильніше, ніж основний метал. Отже, внаслідок малоциклової втоми від гідроопресовування труб дефекти, що утворилися під час їх експлуатації, знизили опір крихкому руйнуванню металу. Висновок про інтенсивнішу деградацію металу зварного з’єднання і про вищу чутливість до деградації ударної в’язкості узгоджується з результатами досліджень зварних з’єднань на парогонах ТЕС. Отже, попри істотну відмінність температурного режиму експлуатації нафто- і парогонів встановлено ідентичність ознак деградації металу цих об’єктів: істотне зниження відносного видовження та ударної в’язкості за одночасного зростання відносного звуження.

Досліджено рівень експлуатаційної небезпеки для трубопроводів, спричинений впливом геодинамічних процесів, проаналізовано можливі причини їх виникнення під дією різноманітних факторів. Розроблено поетапний підхід до управління ризиками для убезпечення експлуатації трубопроводів за наявності геодинамічних впливів, який передбачає: обстеження і накопичення даних про стан трубопроводу і навколишнього гірського масиву; аналіз і прогнозування ризиків геодинамічних зсувів та формування карти їх розташування; встановлення зон найвищого ризику геодинамічного зсуву; проведення комплексу інженерних заходів для зменшення ризику геодинамічного зсуву в зоні пролягання трубопроводу і встановлення вздовж всієї траси постів моніторингу геодинамічної небезпеки у зонах, визначених як зони з найвищими ризиками геодинамічних зсувів. Запропоновано концепцію корозійного моніторингу газогонів, яка полягає в пошаровому накладанні карт розподілу ризиків вздовж траси трубопроводу за впливу наступних чинників: корозійної активності ґрунтів, їх сольового складу, рівня кислотності та вологості (з урахуванням сезонних коливань); електрохімічних характеристик сталей трубопроводів (рівноважного потенціалу, величини катодного та анодного струмів, коефіцієнту локалізації корозійних процесів); розподілу захисного потенціалу та стану пасивного протикорозійного захисту. Її реалізація дала змогу оптимізувати періодичність моніторингу технічного стану та черговість проведення ремонтних заходів.

Значну роль у забезпеченні роботоздатності трубопроводів відводять захисту їх зовнішньої поверхні від корозійних впливів ґрунтових вод. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень створено нові модифіковані енергетичними полями епоксидні композитні матеріали для нанесення таких захисних покриттів. Покращення властивостей нових матеріалів досягали науково-обґрунтованим керуванням процесами структуротворення в результаті модифікування зв’язника, наповнювача і епоксидних композицій зовнішніми енергетичними полями (магнітним, ультразвуковим, електроіскровим) та ультрафіолетовим опроміненням.

Експериментально обґрунтовано доцільність проведення попередньої обробки оліґомерних композицій зовнішніми енергетичними полями. Вперше встановлено, що під впливом магнітного поля та ультрафіолетового опромінення адгезивна міцність оброблених композитів зростає у 2,0-2,2 рази, а когезивна ‑ у 2,4-2,6 разів, що відбувається внаслідок підвищення міри зшивання матриці у зовнішніх поверхневих шарах за взаємодії радикалів з активними центрами на поверхні дисперсних часток. Оптимізовано тривалість обробки композицій зовнішніми енергетичними полями залежно від вмісту і фізичної природи дисперсного наповнювача.

На основі оптимізації параметрів процесів магнітної обробки і ультрафіолетового опромінення епоксиполімерних композитів вперше встановлено технологічні режими формування захисних полімерних покриттів, що дало змогу підвищити у 1,8-2,0 рази циклічну міцність системи “основа – модифіковане покриття” порівняно з системою “основа – необроблене покриття” за рахунок збільшення тривалості періоду зародження тріщин та зменшення швидкості їх поширення за високочастотних навантажень.

Вперше встановлено, що ультразвукова обробка волокнистого наповнювача у водному середовищі приводить до зростання площі вільної поверхні та активації поверхневого шару наповнювача. Це дало змогу цілеспрямовано керувати протяжністю зовнішніх поверхневих шарів на межі поділу фаз “наповнювач-матриця”, що забезпечило додаткове підвищення адгезивної і когезивної міцності епоксикомпозитів на 25-30% та зниження інтенсивності їх спрацювання за дії вільного гідроабразиву на 35-40%. Встановлено зростання адгезивної і когезивної міцності матеріалу внаслідок обробки магнітним полем композицій за рахунок зміни конформаційного набору макромолекул матриці у зовнішніх поверхневих шарах та орієнтації ланцюгів навколо дисперсних часток. Встановлено ефект підвищення фізико-механічних і теплофізичнних властивостей композитів за додавання полідисперсних феромагнітних наповнювачів. Вперше встановлено синергічний ефект комплексного впливу ультрафіолетового опромінення і наповнювачів феро- та парамагнітної природи. Доведено утворення радикалів після припинення ультрафіолетового опромінення (“пост-ефект”), що забезпечило збільшення величини гель-фракції на 3-5%. Це спричинило суттєве підвищення фізико-механічних і теплофізичних властивостей модифікованих матеріалів.

Доведено, що при формуванні композитів слід проводити модифікування дисперсних часток епоксидіановимоліґомером у тепловому полі з подальшим їх ультрафіолетовим опроміненням. Це сприяє формуванню “жорстких” поверхневих шарів і приводить до додаткового підвищення властивостей композитів. Вперше встановлено, що попередня електроіскрова обробка епоксидної смоли з наступним введенням полідисперсного наповнювача зменшує рухливість макромолекул у поверхневих шарах на межі поділу фаз за рахунок взаємодії магнітного поля феромагнітних часток і радикалів, що виникли під час обробки. Це забезпечує високий ступінь зшивання внаслідок утворення “жорстких” поверхневих шарів у матриці на межі поділу фаз.

Встановлено синергетичний ефект використання за наповнювач феромагнетика та ультразвукової обробки композицій. Встановлено, що ультразвукова обробка волокнистого наповнювача у водному середовищі приводить до збільшення питомої площі поверхні та активації наповнювача. Запропоновано технологію поетапного формування матриці з використанням електроіскрової обробки епоксидного оліґомера з наступним введенням наповнювачів. Внаслідок електроіскрової обробки оліґомера утворюються вільні радикали, які взаємодіють з активними центрами на поверхні дисперсних часток, що забезпечує збільшення ступеня зшивання матриці у поверхневих шарах і значне підвищення експлуатаційних характеристик епоксикомпозитів.

Результати впроваджено:

- в частині оцінювання впливу температур на тріщиностійкість та ударну в’язкість негомогенних матеріалів у ДКТБ Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, дов. № 175/22.

- в частині методів та програмних засобів ідентифікації сітки поверхневих експлуатаційних тріщин у ВАТ «Алчевський металургійний комбінат», дов. № 02-067/2-24.

- в частині виявлених механізмів вичерпування пластичності сталей в залежності від температурно-силових умов навантажування, дов. № 09-192 та ВАТ «МК Азовсталь», дов. 014ис/440.

Розроблено та впроваджено на підприємствах УМГ «Київтрансгаз», УМГ «Львівтрансгаз» та УМГ «Черкаситрансгаз» методику визначення ділянок трубопроводу з підвищеною небезпекою корозійно-механічної деградації та методику визначення областей з підвищеною небезпекою розвитку електрокорозії. Результати роботи впроваджено у ТОВ «Фундамент буд -3» при проектуванні фундаментів та ґрунтоцементних основ. Сумарний економічний ефект від впровадження становить **58,26** млн. грн.

Таким чином, створено та науково обґрунтовано інноваційну стратегію забезпечення роботоздатності довгомірних промислових об’єктів за тривалої дії експлуатаційних середовищ. Розроблено та впроваджено на підприємствах будівельної, нафтогазової та металургійної промисловості технологічні та конструктивні заходи подовження ресурсу довгомірних промислових об’єктів на основі використання інноваційних композитних полімерних захисних покриттів із керованими властивостями та впровадження сучасних способів діагностування пошкоджень матеріалу.

Кількість публікацій: **767**, в т.ч. **28** монографій, **12** підручників (посібників), **727** статей (**209** статей у зарубіжних виданнях цитованих науковoметричною базою Scopus). Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено **223** патентами. За даною тематикою захищено **9** докторських и **46** кандидатських дисертацій, а також **1** дисертацію PhD (Eng.) – захищено у Франції.