

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор Фізико-механічного інституту
ім. Г.В. Карпенка НАН України



З.Т. Назарчук

АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок

«Фізико-механічні макро, мікро та нано механізми взаємодії водню із низьколегованими сталями як фундаментальний чинник міцності та працездатності систем зберігання і транспортування водню»
(назва Проєкту)

Назва конкурсу: «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»

Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0049 (Дмитрах Ігор Миколайович)

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0049 «Фізико-механічні макро, мікро та нано механізми взаємодії водню із низьколегованими сталями як фундаментальний чинник міцності та працездатності систем зберігання і транспортування водню».

Рішення Наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» протокол від «16–17» вересня 2020 року № 21.

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання Проєкту 2020 рік – 2022 рік

Тривалість виконання Проєкту у 2021 році

Початок 22.04.2021 року;

Закінчення 15.12.2021 року.

Загальна вартість Проєкту, грн. 8 062 200 грн. (вісім мільйонів шістдесят дві тисячі двісті гривень)

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 575 000 грн. (п'ятсот сімдесят п'ять тисяч гривень)

2-й рік 4 697 200 грн. (чотири мільйони шістсот дев'яносто сім тисяч двісті гривень)

3-й рік 2 790 000 грн. (два мільйони сімсот дев'яносто тисяч гривень)

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту було залучено 6 (шість) виконавців, з них:

доктори наук 3 (три);

кандидати наук – (немає);

інші працівники 3 (три).

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(І) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Грантоотримувач: *Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України.*

Організація субвиконавець: *немає.*

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Встановлення особливостей механізмів взаємодії водню із дефектами, що наявні у деформованих низьколегованих сталях та розроблення нових підходів до оцінювання працездатності систем зберігання і транспортування водню.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

Експериментально встановити особливості фізико-механічних механізмів взаємодії водню з дефектами різного масштабу: скупчення дислокацій, нанопори, мікро та макро пори/тріщини.

Розробити математичні моделі прогнозування фізико-механічного стану в околі дефектів у деформованому матеріалі залежно концентрації водню.

Розробити критерії оцінювання працездатності низьколегованих сталей з урахуванням чинників їх мікроструктури і концентрації водню.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

▪ Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Процеси взаємодії водню з металевими конструкційними матеріалами досі не вивчені повністю. Стосовно низьколегованих сталей, то у літературі також існують суперечливі думки щодо основних механізмів дії на них водню та відсутні відповідні експериментальні докази, що підтверджують ці теорії. Тому подальші дослідження повинні спрямовуватися на більш глибоке розуміння впливу водню на механічні властивості макро, мікро та нано об'ємів матеріалів.

▪ Новизна Проєкту (до 400 знаків)

Новизна проєкту полягає у твердженні, що вплив водню на міцність і працездатність низьколегованих сталей реалізується через фізико-механічні макро, мікро та нано механізми взаємодії водню із дефектами різного масштабу, що наявні у деформованому матеріалі. При цьому об'ємна концентрація водню в металі, як і його локальна концентрація у зонах підвищеної механічної напруженості матеріалу є визначальними параметрами для реалізації того чи іншого механізму.

▪ Методологія дослідження (до 400 знаків)

Проєкт має мультидисциплінарну природу і ґрунтується на підходах механіки деформівного твердого тіла, механіки руйнування матеріалів, матеріалознавства, фізичної хімії, фізики твердого тіла, математичного моделювання та інженерної механіки цілісності конструкцій.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в рамках реалізації Проєкту у 2021 році, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

Вперше зроблена диференційована оцінка процесу наводнювання низьколегованих сталей і розрахована кількість водню адсорбованого на поверхні металу, кількість водню абсорбованого об'ємом металу та його загальна кількість у зразку від її часу наводнювання. Запропоновані аналітичні залежності для прогнозних оцінок концентрації водню у низьколегованих сталях від часу наводнювання та рівня прикладених статичних напружень, які є застосовними при розробленні критеріїв міцності та працездатності трубопроводів для транспортування воденьвмісних середовищ.

Результати дослідження та порівняльна оцінка процесів наводнювання низьколегованих сталей з різною мікроструктурою показали, що здатність сталей поглинати водень зменшується за переходу від перліто-феритної структури до структури полігонального фериту, а відтак – до ферито-бейнітної. Встановлені характеристичні значення концентрації водню для кожної мікроструктури, які є базовими для оцінювання впливу водневого чинника на міцність низьколегованих сталей.

Вперше на підставі спеціальних експериментальних досліджень побудовані діаграми «характеристики міцності та пластичності – концентрація водню в металі», що визначають три основні діапазони концентрації водню у металі, яким притаманні свої характерні механізми впливу водню на низьколеговані сталі. Встановлено, що за малих концентрацій водню 0,01...0,2 ppm пластичне деформування металу полегшується, а при концентраціях 0,8...10 ppm повністю домінує механізм водневого окрихчення матеріалу. Діапазон значень концентрації водню в металі 0,2...0,8 ppm є перехідною зоною, де можливе одночасне співіснування цих двох механізмів.

Вперше побудовані базові діаграми «опір локальному руйнуванню – концентрація водню» для низьколегованих сталей у випадку наявності у матеріалі концентратора механічних напружень та тріщиноподібного дефекту, які мають три характерні зони, що відповідають різним особливостям протікання механізмів впливу водню на опір руйнуванню низьколегованої сталі: зону підвищеної деформативності матеріалу, перехідну зону із змішаним механізмом впливу водню та зону водневого окрихчення. Встановлено значення критичної концентрації водню (0,6...0,7 ppm) за досягнення якої суттєво зменшується локальний опір матеріалу до руйнування.

Встановлено особливості механізму пониження воднем межі пластичності низьколегованих сталей, який полягає у генеруванні на нано, мікро та макро рівні пороподібних дефектів, які полегшують деформування матеріалу та понижують його опір руйнуванню. Реалізація такого механізму призводить до формального зменшення значення межі пластичності як макроскопічної характеристики матеріалу.

Показано, що первинне формування дефектності низьколегованих сталей відбувається внаслідок дії додаткових внутрішніх напружень індукованих дифузійно рухомим воднем, що призводить до порушення суцільності матеріалу по границях зерен на межі феритної та перлітної структур та прилеглих до них ділянок.

Вперше побудовані спеціальні діаграми зміни механізмів впливу водню на характеристики міцності та опору руйнуванню низьколегованих сталей залежно від концентрації водню у матеріалі.

Вищенаведені нові наукові результати фундаментального плану складають підґрунтя для реалізації наступних етапів виконання Проєкту.

За результатами виконання Проєкту у 2021 році підготовлені наступні наукові статті:

1. Dmytrakh I., Syrotyuk A., Leshchak R. Specific mechanism of hydrogen influence on deformability and fracture of low-alloyed pipeline steel. *Procedia Structural Integrity*. 2022. – [Accepted for publication](https://www.journals.elsevier.com/procedia-structural-integrity) (Elsevier: <https://www.journals.elsevier.com/procedia-structural-integrity>).
2. Dmytrakh I.M., Syrotyuk A.M. and Leshchak R.L. Features of electrochemical hydrogen charging of low-alloyed steel of pipeline in model solution of soil water. *Materials Science*. 2021. Vol. 57. Is. 2. – [In press](https://www.springer.com/journal/11003) (Springer: <https://www.springer.com/journal/11003>).
3. Dmytrakh I.M., Syrotyuk A.M., and Leshchak R.L. Effect of preliminary hydrogen charging–discharging of low-alloyed steel on its further ability to absorb electrochemical hydrogen. *Materials Science*. 2021. Vol. 57. Is 3. – [In press](https://www.springer.com/journal/11003) (Springer: <https://www.springer.com/journal/11003>).
4. Hembara O.V. and Chepil O.Ya. Modelling of the structural elements deformation under conditions of creep, stress corrosion cracking and hydrogenation. *Materials Science*. 2021. Vol. 57. Is 4. – [In press](https://www.springer.com/journal/11003) (Springer: <https://www.springer.com/journal/11003>).

Одержані результати досліджень за Проєктом були представлені:

- на міжнародній конференції: Virtual International Conference «In-service Damage of Materials, its Diagnostics and Prediction», October 11–13, 2021 (<https://dmdp.tntu.edu.ua/>). Mini-Symposia «Hydrogen Degradation» (Dmytrakh I., Syrotyuk A., Leshchak R. Specific mechanism of hydrogen influence on deformability and fracture of low-alloyed pipeline steel).
- на засіданні Технічного комітету Європейського товариства з цілісності конструкцій – ESIS (<https://www.structuralintegrity.eu/>) TC 10 «Environmentally Assisted Cracking and Hydrogen Embrittlement» (online), 12 October, 2021 (<https://dmdp.tntu.edu.ua/tc-esis-meetings/tc-10.html>)

Молоді вчені, які є виконавцями Проєкту, виступили з одноосібними доповідями на англomовній міжнародній конференції молодих вчених з проблем матеріалознавства та інженерії поверхні: International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering, September 23–24, Lviv, Ukraine (<https://www.ipm.lviv.ua/msse2021/index.php>) та опублікували свої статті у працях конференції (ISBN 978-966-02-9670-1 (серія) ISBN 978-966-02-9671-8 © Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 2021):

- Hembara N. Possibilities of using the plasticizing effect of hydrogen // *Proceedings of International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering (MSSE2021)*, September 23–24, 2021: Lviv, 2021. P. 120–123.
- Hrynenko M. Effect of hydrogen on the fracture energy of mild steel // *Proceedings of International Young Scientists Conference on Materials Science and Surface Engineering (MSSE2021)*, September 23–24, 2021: Lviv, 2021. P. 116–119.

Окрім вищезазначеного, у відповідності до Технічного завдання до Проєкту на 2021 рік, на звітному етапі було придбано за рахунок гранту аналізатор дифузійно-рухомого і залишкового водню DH603 виробництва компанії «LECO» (США), який інстальовано та запущено у роботу у відділі міцності матеріалів і конструкцій у водневовмісних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України. Придбаний комплект устаткування інтенсивно використовувався при виконанні запланованих досліджень у 2021 році і буде використовуватись наділі при виконанні наступних етапів Проєкту.

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

На даному етапі виконання проєкту науково-технічна продукція відсутня.

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

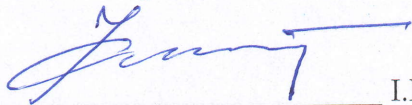
Не стосується даного проєкту, оскільки предметом проєкту є фундаментальні дослідження.

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Результати виконання проєкту у 2021 році одержані в умовах, що є максимально близькими до реальних експлуатаційних, і мають безпосереднє використання при розробленні інженерних критеріїв міцності та працездатності трубопроводів для транспортування водневмісних середовищ.

Примітка: Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування.

Науковий керівник Проєкту,
завідувач відділу міцності матеріалів
і конструкцій у водневовмісних середовищах
Фізико-механічного інституту
ім. Г.В. Карпенка НАН України



І.М. Дмитрах

підпис