

В.Б. Захарчук, асп., В.В. Кудінов, асп., І.В. Кудінов, асп., В.В. Бірючинський асп.
Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

Вплив експлуатаційних факторів на залишковий ресурс металоконструкцій колісних транспортних засобів

Стаття присвячена проблемі дослідження впливу експлуатаційних факторів на залишковий ресурс металоконструкцій колісних транспортних засобів.

Класичні методи розрахунку та експериментальної оцінки тривалості служби на етапі появи втомних тріщин у конструкційних системах базуються на припущенні про цілісність матеріалів і неприпустимість виникнення втомних пошкоджень у найбільш критичних перетинах конструкції. Ці підходи не забезпечують адекватного прогнозування ресурсу машини, тому необхідно використовувати принципи механіки руйнування

корозія, агресивне середовище, корозійне руйнування, навантаження, місцева корозія, тріщини

Постановка проблеми. Корозія металевих компонентів автомобілів має значний вплив на її надійність та тривалість служби. Руйнування, спричинене поєднанням корозії та експлуатаційного навантаження, є результатом складних факторів, які можна поділити на внутрішні та зовнішні. Внутрішні фактори традиційно розглядають як залежні від хімічного складу матеріалів. Зовнішні фактори включають корозійне пошкодження, спричинене зовнішнім середовищем, таким як атмосферні впливи, методи експлуатації та зберігання. Волога, мінеральні добрива та їх поєднання значно скорочують ресурс конструкційних елементів сільськогосподарської техніки, особливо при пошкодженні захисних покриттів. Корозійні пошкодження та корозійно-втомні тріщини формуються на поверхнях несучих вузлів металевих конструкцій, і вони можуть рости до критичних розмірів, що призводить до виникнення аварійних ситуацій. Варто зазначити, що швидкість росту корозійно-втомних тріщин набагато вища, ніж швидкість росту звичайних втомних тріщин у тих же металевих матеріалах. Це зменшує ресурс (залишковий ресурс) металевих компонентів колісних транспортних засобів, що потрібно враховувати при їх проектуванні. Важливо дослідити вплив корозійно-агресивних середовищ (мінеральні і органічні добрива, корозійно-активні ґрунти та інші) на втомне руйнування [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливе значення має вирішення проблеми протикорозійного захисту колісних транспортних засобів у автотранспортному секторі. Існує насущна потреба в проведенні всебічних досліджень щодо корозійного пошкодження, корозійної втоми і корозійно-механічного зносу, чому присвятили свої наукові праці низка вітчизняних учених, таких як Севернєва М. М., Северного А. З., Меламеда М. Н., Поповича П.В. та ін. В даних наукових працях науковців були визначені загальні принципи для системи збереження машинно-тракторного парку колісних транспортних засобів. Були запропоновані процедури та практичні підходи, що дозволяють здійснювати заходи щодо захисту несучих конструкцій автотранспортної техніки від корозії. [3, 5]. Проте, щодо розрахунків металоконструкцій при впливі агресивних дорожніх середовищ, існує недостатньо вивчених даних і розробок.

Постановка завдання. При використанні органічних та мінеральних добрив, застосуванні отрутохімікатів для боротьби зі шкідниками та обробці полів, на поверхні конструкцій утворюється пил, що містить хімічні речовини. При взаємодії цього пилу з вологою, створюється агресивне середовище, що спричиняє інтенсивну корозію. Швидкість виникнення корозійних процесів залежить від агресивності навколишнього середовища, тривалості його впливу, температури повітря, стану металевої поверхні, хімічного складу металу, наявності механічного напруження та особливостей конструкції. Корозія деталей сільськогосподарської техніки в атмосферних умовах може значно посилюватись, якщо є залишки мінеральних і органічних добрив, отрутохімікатів або контакт з ґрунтом. Найглибші пітінги виникають при корозії деталей у нітрофосці та мідному купоросі. З органічних добрив, торфові компости є найбільш корозійно активними, тоді як екскременти корів і гній на їх основі є менш корозійно активними, а також низовинний і верховий торф. Наявність бруду, який залишається після очищення машин, в умовах вологості стає хімічно активним і прискорює процеси корозії. Бруд на деталях сприяє збільшенню корозії, оскільки разом з вологою створюється активне електрохімічне середовище, що сприяє більш інтенсивній корозії. Корозія особливо небезпечна для деталей, що піддаються динамічним навантаженням, таким як пружини, пружинні лапки культиваторів, осі, вали тощо. Термін служби цих деталей часто скорочується на 40-60% через втомні руйнування. При аналізі поломок деталей, наприклад, лапок культиватора, валів тощо, виявлено, що багато з них починаються з ознак корозії і пітінгу. Особливо небезпечні руйнування внутрішніх поверхонь ємностей для отрутохімікатів з тонколистової сталі.

У нормативних документах, що стосуються експлуатації металевих конструкцій, не встановлені належні норми для припустимого рівня корозійних пошкоджень та зменшення несучої здатності конструкційних елементів. Це ускладнює визначення нормативних термінів експлуатації, оцінку межового стану металевих конструкцій та планування витрат на виробництво та ремонтні роботи.

При розробці методів визначення залишкового ресурсу та залишкової міцності елементів конструкцій, які піддаються корозійному та втомному руйнуванню, необхідно проводити дослідження стійкості конструкційних сталей до корозійних тріщин та зон зварних з'єднань металевих конструкцій.

Виклад основного матеріалу. Основним показником стійкості матеріалу до корозійного пошкодження є діаграма корозійного розтріскування. Дана діаграма описує взаємозв'язок між швидкістю зростання тріщини та коефіцієнтом інтенсивності напружень і вказує на стійкість металів до тріщиностійкості у корозійному середовищі, незалежно від того, чи це статичне навантаження, чи циклічне навантаження.

Вивчення закономірностей росту корозійно-втомних тріщин залежить від впливу факторів, таких як метал-середовище, коефіцієнт асиметрії циклу R , частота навантаження f , форма циклу навантаження, температура випробувань, рівень здатності до зовнішньої поляризації E_p і т.д. Для системи "низькоміцна сталь - водневе середовище" зменшення частоти навантажень сприяє розвитку тріщин у діапазоні високих значень коефіцієнта інтенсивності напружень, але в припороговій області спостерігається зменшення швидкості росту тріщин. Частотний ефект зазвичай не має впливу на швидкість процесу руйнування високоміцних сталей у відкритому повітрі, але має значний вплив у корозійних середовищах. Зниження частоти навантаження призводить до прискорення росту корозійно-втомних тріщин у низькоміцних сталях, особливо при середніх рівнях коефіцієнта інтенсивності напружень. Однак, залежність між частотою і пороговими значеннями коефіцієнта інтенсивності напружень в корозійному середовищі має складний характер, досягаючи максимальної значимості при певній проміжній частоті.

Катодна поляризація є значним фактором, який впливає на кінетичні діаграми корозійно-втомного руйнування і сприяє формуванню областей, що характеризуються діаграмами корозійного розтріскування. При вивченні кінетичної кривої втомного руйнування сталевих труб за умов катодної поляризації спостерігається стабільне плато, де швидкість росту тріщини V залишається постійною. Зниження частоти навантаження призводить до збільшення висоти плато і тривалості його існування. Одна з особливостей визначення корозійно-циклічної тріщиностійкості матеріалів полягає в унікальній електрохімічній ситуації на вершині тріщини, яка відрізняється від умов на поверхні зразка. Ступінь цієї відмінності залежить від довжини тріщини, напружено-деформованого стану в вершині, часу впливу середовища, потенціалу зовнішньої поляризації та інших факторів. Тому, вплив середовища на утворення передруйнування в області вершини тріщини і, відповідно, його вплив на процес корозійно-втомного руйнування металу може бути різним.

З метою встановлення високої точності визначення необхідних характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалу в певному корозійному середовищі, у літературі широко використовується модель [6]. Згідно з цією моделлю, Три параметри характеризують зону передруйнування матеріалу, що піддався деформації в вологому корозійному середовищі: найвище значенням КІН циклу K_{max} ; значеннями показника вологості середовища pH ; показник електродного потенціалу металу φ_B у вершині тріщини. При таких умовах рост тріщини в металі під впливом водного корозійного середовища визначається відомою із досліджень А. Панасюка., О. Андрейківа, І. Дмитраха, та інших функцією (1):

$$V = f(C_i, K_{max}, pH, \varphi_B), \quad (1)$$

де C_i – коефіцієнт, що визначає стійкість матеріалу до циклічної тріщиностійкості;

i – кількість невідомих для опису системи "матеріал-середовище" ..

В процесі поширення корозійно-втомної тріщини, для кожної швидкості росту тріщини, яка відображається на кінетичній діаграмі втомного руйнування, відповідають певні електрохімічні умови в області вершини тріщини. Ці умови залежать від початкового електрохімічного стану, коли тріщина тільки починає формуватися, а також від тривалості впливу середовища та швидкості утворення нової поверхні [8,7]. Отже для отримання достовірних даних про швидкість росту тріщини і корозійного середовища, а також для забезпечення інваріантності кінетичних діаграм втомного руйнування, необхідно забезпечити однакові електрохімічні умови у вершині тріщини по ходу її росту. тобто $\varphi_B = const$, $pH = const$.

У реальній конструкції зміна значень pH і інших параметрів пов'язаних з експлуатацією може мати випадковий характер. Це створює проблему при розрахунках на довговічність, оскільки потрібно вибрати базову діаграму втомного руйнування для конкретної системи "метал-середовище". Цю задачу можна вирішити шляхом побудови інваріантних діаграм, які відповідають крайовим електрохімічним станам у вершині корозійно-втомної тріщини.

Також, параметри навантаження мають вплив. У більшості конструкційних сплавів, що піддаються циклічним навантаженням та діють у робочих середовищах під час експлуатації, процес корозійно-втомного руйнування може відбуватися за механізмом корозійної втоми або корозійно-втомної руйнування під впливом напружень, залежно від конкретних умов навантаження.

Вплив фізико-хімічних факторів. Під час дослідження процесу зростання корозійно-втомних тріщин у різних середовищах, таких як кислий розчин NaCl, повітря і силіконове масло, було встановлено, що поріг циклічної тріщиностійкості для трьох типів нержавіючої сталі – аустенітної, аустенітно-феритної і мартенситної, залежить від агресивності середовища. Для кожного типу сталі максимальне значення порогу досягається у присутності силіконового масла. Порівняно з повітрям, рівень порогового значення інтенсивності напружень (КІН) зростає в маслі, оскільки збільшується розмір пластичної зони і, відповідно, зростає тріщиностійкість. Для системи високоміцної сталі - дистильована вода виявлено, що відсутність кисню води прискорює ріст тріщин при середніх значеннях КІН, але не має впливу на низько- і високоамплітудні навантаження. Застосування зовнішньої катодної поляризації дає аналогічний результат, але в хлоридному розчині спостерігається прискорене зростання тріщин навіть при низьких значеннях КІН. Підвищення температури випробувань у діапазоні 25...85°C, особливо у високоамплітудній області, є важливим фактором, що збільшує інтенсивність руйнування. Ефект впливу температури на швидкість росту тріщин значно залежить від частоти навантаження і досягає піку в середньому діапазоні частот, що вивчаються ($f = 1 \text{ Гц}$) [6, 7].

Вплив корозійних факторів на тріщиностійкість матеріалів можна розглядати з трьох основних механізмів: адсорбційного зменшення міцності, водневого окрихчення та хімічного розчинення. Адсорбція активних речовин на поверхні матеріалу у зоні тріщини спричиняє зниження поверхневої енергії та полегшує процес руйнування (ефект Ребіндера). Одним із основних процесів, який сприяє докритичному росту тріщини і призводить до поломок, є окрихчення невеликої області навколо вершини тріщини. Атомарний водень, що завжди присутній в чистому вигляді або зв'язаний з молекулами, може дифундувати у всі метали. Розчинність водню при нормальних умовах складає від 10 до 100 см³ на 1 кг металу. Окрихчення вже спостерігається при концентрації 2 см³/1 кг металу, а при 10 см³/1 кг стає небезпечним. Місця з неохороненою окисною плівкою на нових поверхнях є найбільш вразливими для проникнення водню в метал [6, 7].

Аналіз ушкоджень автомобільної техніки, спричинених корозією, показав, що близько 20-25% машин зазнають втрати міцності через поєднання атмосферної корозії та механічних навантажень, які виникають під час робочих перевантажень. Незважаючи на поширені корозійні пошкодження металоконструкцій, пітингу та інших видів корозії, терміни служби компонентів і агрегатів сільськогосподарської техніки встановлюються без врахування впливу поєднаних корозійно-активних середовищ та умов експлуатації. З позиції корозійно-втомних ушкоджень, найбільш небезпечними є добрива та отрутохімікати.

Під час експлуатації розкидачів добрив і сільськогосподарських транспортних засобів на елементи несучих систем діють випадкові та складні комбінації силових впливів, що зумовлені випадковими джерелами збурень. У спектрах цих випадкових процесів навантаження виділяються три гармоніки з частотами в діапазонах 1,4-1,8 Гц, 4-5 Гц та 8-9 Гц. Приблизно 80% енергії випадкових процесів зосереджено в діапазоні частот 1-3,5 Гц [8, 10, 11].

Висновки. Ряд активності корозії мінеральних добрив відрізняється в залежності від глибини пітингів і втрати маси. Корозійні пошкодження, що виникають у середовищі мінеральних добрив, варіюються для кожного виду добрива і матеріалу. Деякі добрива піддаються рівномірній корозії, тоді як у інших переважає місцева корозія з утворенням глибоких пітингів, що часто приводить до руйнування деталей, незважаючи на загально незначну корозію. В обох випадках найбільш активними з точки зору корозії є такі мінеральні добрива як сульфат амонію та нітрофоска.

Загальноприйняті методи оцінки тривалості життя на етапі утворення втомних тріщин в конструкційних системах передбачається на основі припущення про однорідність матеріалів і неприпустимість появи втомних пошкоджень у найнебезпечніших перетинах конструкційних елементів.

Ці підходи, зокрема при використанні циклічних навантажень у вразливих середовищах, в умовах високих залишкових напружень і наявності корозійних пошкоджень, які призводять до пітингу на початкових етапах експлуатації машин, не забезпечують достатньо точного прогнозування ресурсу машини. У випадках, коли тривалість служби конструкції визначається швидкістю розвитку корозійно-втомних тріщин, потрібно використовувати принципи механіки руйнування.

Список літератури

1. Бакалець Д.В. Савуляк В.І. Підвищення надійності та відновлення металоконструкцій транспортних та сільськогосподарських машин. *Технічні науки : збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. 2012. Вип. 11(66), т. 2. С. 302 – 306.
2. Похмурский В. И., Хома М.С. Коррозійна втома металів і сплавів. Львів : Сполом, 2008. 299 с.
3. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. / О.Н. Романив та ін., К.: Наукова думка, 1990. 680 с.
4. Попович П.В. Методи оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з врахуванням впливу агресивних середовищ : дис. д-ра техн. наук: 05.05.11 / Тернопільський державний технічний ун-т ім. Івана Пулюя. Тернопіль : ТНТУ, 2015. 425 с.
5. Макаренко М. Пітинг та інші загрози міжсезоння. *Агробізнес сьогодні*. 2012. № 22. 245с.
6. Аналіз надійності несучих систем тракторних причепів [Електронний ресурс] / Т.І. Рибак та ін. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 151. С. 18-20.
7. Кузмицька А.І., Бісик С.П., Бондаренко О.В. Корозійна стійкість матеріалів протимінних екранів та внутрішнього протиосколкового захисту бойових броньованих машин. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки : Тези доповідей на VII науково-технічній конференції 09–10 жовтня 2019 року, м. Київ*. С. 178–179.
8. Захист від корозійних ушкоджень озброєння та військової техніки / О.І. Сиза, О.М. Савченко, О.О. Корольов, С.С. Гута. *Збірник наукових праць Державного науководослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2022. Вип. 2(12). С. 119–126.
9. Інгібітори корозії для захисту поверхні обладнання військової техніки / О.М. Савченко та ін. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2022): матеріали тез доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції (26–27 травня). 2022 р., м. Чернігів*. Чернігів: ЧНТУ, 2022. С. 223–224
10. Popovich P.V., Slobodyan Z.B. Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska / P.V.Popovich, *Materials Sciences*. 2014. Vol. 49, 6, P.819-826.(Scopus).
11. Barna R.A., Popovich P.V. Influence of Operating Media on the Fatigue Fracture of Steels for Elements of Agricultural Machines. *Materials Sciences*. 2014. Vol. 50, 3, P.377-380.(Scopus).

Reference

1. Bakalets', D.V. & Savulyak, V.I. (2012). Pidvyshchennya nadiynosti ta vidnovlennya metalokonstruktsiy transportnykh ta sil's'kohospodars'kykh mashyn [Increasing the reliability and restoration of metal structures of transport and agricultural machines.]. *Tekhnichni nauky : zbirnyk naukovykh prats' Vinnyts'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu – Technical sciences: a collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University, Issue 11(66), Vol. 2, 302 – 306* [in Ukrainian].
2. Pokhmursky, V.Y. & Khoma, M.S. (2008). *Koroziyna vtoma metaliv i splaviv* [Corrosion fatigue of metals and alloys]. L'viv : Spolom [in Ukrainian].
3. Romanyv, O.N., Yarema, S.Ya., Nykyforchyn, H.N., Makhutov, N.A. & Stadnyk, M.M. (1990). *Ustalost' y tsyklycheskaya treshchynostoykost' konstruksiyonnykh materyalov* [Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials.]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
4. Popovych, P.V. (2015). *Metody otsinky resursu nesuchykh system prychipnykh mashyn dlya vnesennya dobrov z vrakhuvannyam vplyvu ahresyvnykh seredovyshech* [Methods of evaluating the resource of the

- load-bearing systems of trailed machines for applying fertilizers, taking into account the influence of aggressive environments]. *Doctor's thesis*. Ternopil' TNTU [in Ukrainian].
5. Makarenko, M. (2012). Pitynh ta inshi zahrozy mizhsezonna [Piting and other off-season threats]. *Ahrobiznes s'ohodni – Agribusiness today*, 22, 245 [in Ukrainian].
 6. Rybak, T.I. Popovych, P.V., Hrytsay, Yu.V. & Rubinets', N. (2014). Analiz nadiynosti nesuchykh system traktornykh prycheviv [Analysis of the reliability of the load-bearing systems of tractor trailers]. *Visnyk Kharkivskoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka – Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Issue 151*, 18-20 [in Ukrainian].
 7. Kuzmyts'ka, A.I., Bisyk, S.P. & Bondarenko, O.V. (2019). Koroziyna stiykist' materialiv protymynnykh ekraniv ta vnutrishn'oho protyoskolkovoho zakhystu boyovykh bron'ovanykh mashyn [Corrosion resistance of anti-mine screen materials and internal anti-fragmentation protection of combat armored vehicles.]. Problems of coordination of military-technical and defense-industrial policy in Ukraine. Prospects for the development of weapons and military equipment: *VII Naukovo-tekhnichna Konferentsia (09–10 zhovtnya 2019 roku, m. Kyiv) – VII Scientific and Technical Conference* (pp. 178–179). Kyiv [in Ukrainian].
 8. Syza O.I. O.M. Savchenko, O.O. Korol'ov, S.S. Huta (2022). Zakhyst vid koroziynykh uskodzhen' ozbroyennya ta viys'kovoyi tekhniky [Protection against corrosion damage of weapons and military equipment]. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovodoslidnoho instytutu viprobuvan' i sertyfikatsiyi ozbroyennya ta viys'kovoyi tekhniky – Collection of scientific works of the State Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Issue 2(12)*, 119–126 [in Ukrainian].
 9. Savchenko, O.M., Syza, O.I., Horodys'ka, O.V., Heyko, V.V. & Huta, S.S. (2022). Inhibitory koroziyi dlya zakhystu poverkhni obladnannya viys'kovoyi tekhniky [Corrosion inhibitors for surface protection of military equipment]. *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2022): XII Mizhnarodnf naukovo-praktychna konferentsia (26–27 travnya 2022 r., Chernihiv) – XII international scientific and practical conference* (pp. 223-224). Chernihiv: CHNTU [in Ukrainian].
 10. Popovich, P.V. & Slobodyan, Z.B. (2014). Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska. *Materials Sciences. Vol. 49, 6*. P.819-826 [in English].
 11. Barna, R.A. & Popovich, P.V. (2014). Influence of Operating Media on the Fatigue Fracture of Steels for Elements of Agricultural Machines. *Materials Sciences. Vol. 50, 3*, P.377-380 [in English].

Vasyl Zakharchuk, post-graduate, **Valery Kudinov**, post-graduate, **Ihor Kudinov**, post-graduate, **Vitaly Biryuchinsky**, post-graduate

West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Influence of Operational Factors on the Remaining Resource of Metal Structures of Wheeled Vehicles

The article is devoted to the problem of researching the influence of operational factors on the residual resource of metal structures of wheeled vehicles.

Corrosion of metal structures of wheeled vehicles significantly reduces the resource and reliability of vehicles. Failure due to the combined action of corrosion and operational loads is caused by complex factors that can be divided into internal and external. Internal - traditionally considered as dependent on the chemical composition. External factors include corrosive destruction due to the external environment, which includes: atmospheric exposure, methods of operation and storage. The influence of moisture, mineral fertilizers and their combinations significantly reduces the resource of the structural elements of agricultural machines, especially when the protective coating is damaged. Corrosion damage is formed on such surfaces of load-bearing nodes of metal structures, corrosion-fatigue surface cracks are born, which grow to critical sizes, and there is a danger of machine failure.

Classical methods of calculation-experimental assessment of durability at the stage of initiation of fatigue cracks in structural systems are based on the assumption of integrity of materials and the inadmissibility of fatigue damage in the most dangerous intersections of structural elements. These approaches do not provide adequate forecasting of the machine's resource, so it is necessary to apply the provisions of the mechanics of destruction.

corrosion, aggressive environment, corrosion destruction, load, local corrosion, cracks

Одержано (Received) 05.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 18.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023