УДК 629.784.036:621.454.2.046.4:620.193 **doi: 10.32620/aktt.2024.1.04**

О. М. МІНАЙ

ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ ОСНОВНОГО КОНСТРУКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ СІТОК КАПІЛЯРНИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ

Предметом *вивчення в статті є корозійні процеси, що відбуваються у паливних баках космічних літальних апаратів (КЛА) з тривалим терміном експлуатації, двигуни яких працюють на хімічно агресивних компонентах палива (КП): азотному тетроксиді (АТ) та несиметричному диметилгідразині (НДМГ).* ***Метою*** *є визначення зменшення діаметрів дротів та збільшення розмірів чарунок сіток капілярних розділювачів фаз (КРФ) в наслідок корозійного враження основного конструкційного матеріалу сітки нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т.* ***Завдання:*** *встановлення наявності, типу та швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сіток КРФ. Використаними* ***методами*** *є: для визначення наявності корозії, шляхом дослідження складу речовин, виявлених на поверхні сіток – рентгено-флуоресцентний, рентгено-структурний, атомно-абсорбційний, потенціометричний, турбодиметричний, інфрачервона спектроскопія, хромато-мас-спектрометрія; для визначення типу корозії – металографічні дослідження зразків сіток; для визначення швидкості корозії – вимірювання геометричних розмірів зразків сіток. Отримані такі* ***результати****. Виявлені на поверхні зразків сіток катіони металів відповідають елементам, що входять до складу сплаву алюмінію та сталі – основних конструкційних матеріалів паливних баків ракет-носіїв; сталь 12Х18Н10Т не піддається в АТ та НДМГ локальним видам корозії (пітінговой, міжкристалічній, крапковій, контактній, щілинній та корозійному розтріскуванню під напругою); встановлено присутність суцільного (рівномірного) корозійного враження поверхні дротів сітки; отримані залежності зміни основних геометричних параметрів сіток (діаметрів дротів і розмірів чарунок) протягом часу, відповідно до яких встановлені межі швидкостей корозії нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т в рідкій фазі АТ і НДМГ та газовій; розраховані коефіцієнти максимальної швидкості корозії.* ***Висновки****. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: вперше визначено наявність, тип та швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сіток КРФ в наслідок тривалого терміну їх експлуатації (14…31 рік) в рідкій фазі АТ і НДМГ та газовій, за допомогою перехресних методів.*

Ключові слова: *ракета-носій; мікрогравітація; капілярний розподілювач фаз; сітчастий розподілювач фаз; корозія; капілярна утримуюча здатність; паливні баки; мікроструктура; рідинний ракетний двигун; багаторазові космічні системи; неруйнівний контроль; інфрачервона спектроскопія; ракетні палива.*

Вступ

У КЛА, які перебувають у заправленому стані протягом тривалого часу (наприклад, багаторазові космічні системи) під впливом хімічно агресивних палив, АТ та НДМГ і їх парів можуть змінюватися проектні параметри сіток КРФ (діаметр дротів та розміри чарунок), які є основним конструктивним елементом засобів забезпечення суцільності (ЗЗС) палива, що визначає їх робото спроможність. Так як, у складі паливної системи КЛА ЗЗС палива забезпечують багаторазовий запуск двигуна в умовах невагомості, зміна проектних параметрів сіток КРФ може призвести до критичного зменшення капілярної утримуючої здатності (КУЗ) сіток і, як наслідок, до аварійної роботи двигну [1, 2]. КУЗ – це здатність запобігати проникненню вільних парогазових включень через чарунки сітки, в умовах зовнішніх силових впливів на КП. КУЗ залежить від типу плетіння сітки, матеріалу та чистоти його поверхні, типу та температури КП [3, 4].

До причин зміни проектних параметрів сіток КРФ можна віднести наявність корозійного враження основного конструкційного матеріалу сітки нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т.

Постановка задачі дослідження

Для досягнення основної мети дослідження – визначення зменшення діаметрів дротів та збільшення розмірів чарунок сіток КРФ в наслідок корозійного враження основного конструкційного матеріалу сітки нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т, були сформульовані наступні задачі: визначення наявності, типу та швидкості корозії сіток КРФ [5, 6].

Виконання поставлених задач було здійснено шляхом дослідження складу речовин, виявлених на

© О. М. Мінай, 2024

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

поверхні сіток за допомогою методів неруйнівного контролю: рентгено-флуоресцентний, рентгено-структурний, атомно-абсорбційний, потенціометричний, турбодиметричний, інфрачервона спектроскопія, хромато-мас-спектрометрія; для визначення типу корозії – металографічні дослідження зразків сіток; для визначення швидкості корозії – вимірювання геометричних розмірів зразків сіток КРФ [4, 6].

Конструкція та основний конструкційний матеріал КРФ

Для вирішення поставленої задачі і проведення досліджень корозійних процесів, як найбільш типові КРФ з тривалим терміном експлуатації, були обрані сітчасті розділювачі фаз (СРФ) капілярних ЗЗС палива, що забезпечують необхідну суцільність КП на вході в двигун і входять до складу розгінного блоку (РБ) РН «Дніпро».

Розташування капілярних ЗЗС палива у паливних баках РБ РН «Дніпро» та фото їх конструктивного виконання наведено на рис. 1. При цьому, слід зазначити, що паливні баки АТ та НДМГ мають ідентичне конструктивне виконання. Конструктивна схема розташування сіток СРФ в баках АТ та НДМГ РБ РН «Дніпро» наведено на рис. 2.

СРФ уявляють з себе сітки саржевого типу переплетення з квадратними чарунками у світлі, які закріплені у металевій окантовці. Схематичне зображення саржевого типу переплетення дротяної тканини з квадратними чарунками у світлі наведено на рис. 3 [4, 6].

Для забезпечення запуску двигуна в умовах невагомості (мікрогравітації) застосовують два СРФ, що обмежують зверху та знизу накопичувач капілярного ЗЗС палива – АТ / НДМГ СРФ 1 та 2 (рис. 2). СРФ 1 і 2 виготовлені з сіток №008 ТУ-14-4-507-74 (марка сталі 12Х18Н10Т), з розміром чарунки у світлі 80 х 80 мкм і номінальним діаметром дроту 55 мкм [4, 6].

Для зменшення залишків КП, що не можуть бути використані із-за порушення суцільності на вході в двигун до складу забірного пристрою капілярного ЗЗС палива входить СРФ, якій складається з пакету сіток – АТ / НДМГ СРФ 3 (рис. 2). СРФ 3 виготовлено з пакету сіток: №008 ТУ-14-4-507-74 (марка сталі 12Х18Н10Т) і №08[1)] (марка сталі 12Х18Н9Т), з розміром чарунки у світлі 800 х 800 мкм і номінальним діаметром дроту 250 мкм [4, 6].

Примітка: 1) – У АТ / НДМГ СРФ 3 (рис. 2), що входить до складу забірного пристрою капілярного ЗЗС палива, сітка №08 виконує роль підсилювача міцності сітки №008 та запобігає її проплескуванню, тому визначальною для питомого значення КУЗ є тільки сітка №008.

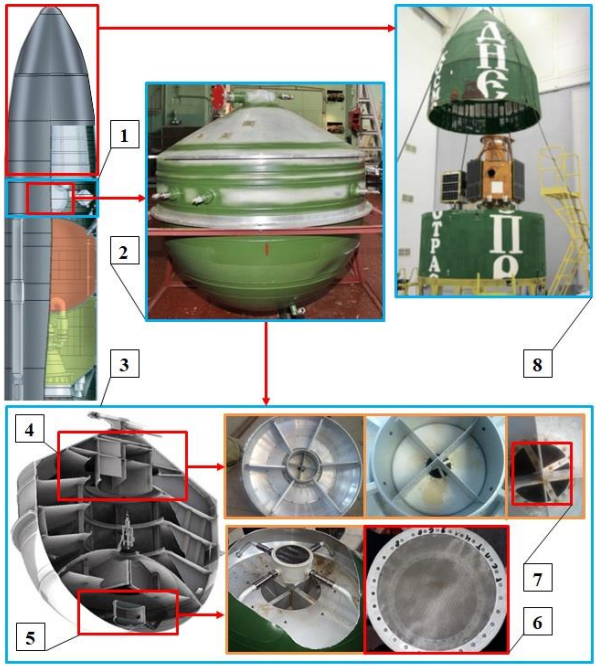


Рис. 1. Розташування СРФ капілярних ЗЗС палива у баках РБ РН «Дніпро» та їх конструктивне виконання: 1 – розгінний ступінь; 2 – паливний бак розгінного ступеню; 3 – конструктивний вигляд внутрішньобакових пристроїв розгінного ступеню; 4 – забірний пристрій капілярного ЗЗС палива; 5 – накопичувач капілярного ЗЗС палива; 6 – СРФ накопичувача; 7 – СРФ забірного пристрою; 8 – відсік з корисним навантаженням (штучними супутниками Землі)

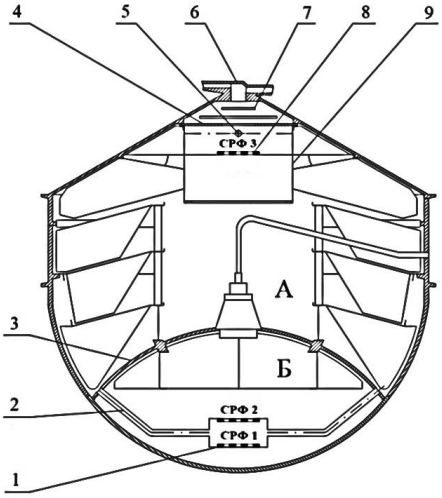


Рис. 2. Конструктивна схема капілярного ЗЗС палива баків АТ та НДМГ РБ РН «Дніпро»: 1 – накопичувач капілярного ЗЗС палива; 2 – трубопроводи; 3 – проміжне днище; 4 – пластина; 5 – отвори; 6 – витратна магістраль; 7 – тарель забірного пристрою; 8 – СРФ забірного пристрою; 9 – забірний пристрій КЗЗСП; А – основна порожнина бака; В – проміжна порожнина бака; СРФ 1, 2 – сітка №008; СРФ 3 – пакет сіток №008 і №08 [4, 6]

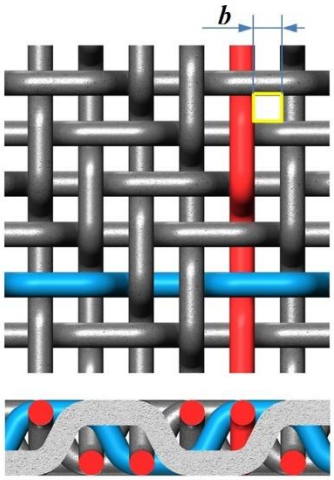


Рис. 3. Схематичне зображення саржевого типу плетіння дротяної тканини з квадратними чарунками у світлі: b – розмір чарунки у світлі [4, 6]

Сітки СРФ 1 і 2 знаходяться в КП, а СРФ 3 – в парах КП.

Об'єктом дослідження були СРФ, які уявляють з себе сітки №008 саржевого типу плетіння з квадратними чарунками у світлі [4, 6].

Для встановлення наявності, типу та швидкості корозії основного конструкційного матеріалу сіток (нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т): проведено хімічний аналіз складу речовин з поверхні конструкційного матеріалу сіток; розглянуто фактори, що можуть впливати на швидкість протікання корозійних процесів; проведено металографічні дослідження конструкційного матеріалу сіток; оптичні вимірювання діаметрів дротів та розмірів чарунок сіток було [7, 8].

Оптичні вимірювання по-перше було проведено на зразках нових (еталонних) сіток №008, які було вирізано з того самого рулону, що і досліджувані сітки, які тривалий час знаходились у КП (АТ та НДМГ) і під їх парами [4, 6].

Хімічний аналіз складу речовин

За результатами дефектації СРФ капілярних ЗЗС палива, що тривалий термін знаходились під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і їх парів було зафіксовано присутність: пластівців, нальоту та різнобарвних плям на поверхні сіток.

Для визначення складу речовин, виявлених на СРФ, було застосовано такі методи неруйнівного контролю: рентгено-флуоресцентний; рентгено-структурний; атомно-абсорбційний; потенціометричний; турбодиметричний; інфрачервона спектроскопія; хромато-мас-спектрометрія [6, 9].

Аналізу були піддані сітки з баків АТ та НДМГ, що входять до складу СРФ 1, 2 і 3 комплекту зразків (КЗ) після 14 років знаходження у КП.

Рентгено-флуоресцентний аналіз проводили на приладі «СПЕКТРОСКАН», рентгеноструктурний аналіз здійснювали за допомогою рентгенівського дифрактометру «ДРОН-3». Для рентгено-флуоресцентного та рентгеноструктурного аналізів використовували порошок, який отримували при знятті відкладень з сітки механічним шляхом.

Кількісний та елементний склад відкладень визначали атомно-абсорбційним методом, який проводили на спектрометрах «Hitachi Z9000» та «Shimadzu AA-6800» з використанням у якості об'єкту досліджень азотнокислих розчинів вище вказаного порошку. Аналіз на аніони проводили з використанням потенціометричного та турбодиметричного методів.

Для уточнення складу речовини використовувався метод інфрачервоної спектроскопії і обладнання «Shimadzu FTIR 8400» та «Shimadzu FTIR 8300».

З ціллю виявлення на СРФ, що знаходилися під впливом рідкої та парової фази НДМГ органічних сполук проведено дослідження екстрактів, що були вилучених з сіток за допомогою хлористого метилену, хромато-мас-спектрометричним методом (обладнання – хромато-мас-спектрометр GC HP5890-MSD HP 5972).

Також, було застосовано: іонометр І-120 та фотоелектроколориметр КФК-2.

СРФ з баку АТ були: темно-коричневого кольору, тьмяні, матові, механічних пошкоджень не мали. В окремих чарунках малися частки (пластівці), що не перевищували за розміром окремої чарунки; механічні пошкодження були відсутні.

Методом рентгено-структурного аналізу було встановлено, що досліджувана речовина (відкладення) не має кристалічної структури, що сформувалася – є аморфною.

Склад та кількість металевих елементів визначено рентгено-флуоресцентним та атомно-абсорбційним аналізом речовини (порошку), відібраного механічним способом безпосередньо з сітки. Встановлено наявність у досліджуваних пробах алюмінію, марганцю, заліза, нікелю, ніобію, кремнію та хрому. Інших елементів, починаючи від кальцію та закінчуючи ураном, на рівні 0,1% мас. та вище не виявлено. Результати атомно-абсорбційного аналізу СРФ з баку АТ, наведено в таблиці 1.

Потенціометричний та турбодиметричний аналізи водної витяжки після висушування, показали у відкладенні 3,1% мас. нітратів та 0,1% мас. хлоридів.

При дослідженні методом інфрачервоної спектроскопії в пробах, що аналізуються, підтверджено присутність нітратів, а також встановлено наявність оксидів і води. Отримані спектри близькі до еталонного спектру сполуки типу $Me\ (NO_3)m\ nH_2O$, тобто гідратовані нітрати металів, де Me: Al, Fe, Cr, Ni та ін.

Таблиця 1

Результати атомно-абсорбційного аналізу зразків СРФ з баку АТ

Елемент	Масова частка, %
Al	12,000
Fe	4,000
Cr	0,390
Ni	0,320
Mn	0,093
Si	< 0,030
Nb	< 1,000

Таким чином, результати досліджень показали, що відкладення, наявні на сітках бака АТ, в основному, уявляють з себе гідратовані нітрати металів, головним чином алюмінію та заліза. Крім нітратів у складі відкладень, у невеликих кількостях, були присутні оксиди та хлориди металів.

СРФ за баку НДМГ були: чисті, блискучі, сріблястого кольору, механічних пошкоджень не мали.

Результати атомно-абсорбційного аналізу водної витяжки з СРФ баків НДМГ, у яких під час огляду зазначено наявність плям, наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати атомно-абсорбційного аналізу зразків СРФ з баку НДМГ

Елемент	Вміст, мкг/см^2	
	СРФ 3	СРФ 1
Al	0,0440	0,0110
Fe	0,0052	0,0089
Mn	0,0052	0,0023
Ni	0,0028	0,0030
Cr	0,0024	0,0036

При дослідженні СРФ методом хромато-масспектрометрії органічні сполуки не були виявлені.

Таким чином, проведені дослідження показали, що склад катіонів на сітках з баків АТ та НДМГ практично аналогічний. Виявлені катіони металів відповідають елементам, що входять до складу сплаву алюмінію та сталі – основних конструкційних матеріалів паливної системи. Однак через малу кількість речовини на сітках, що контактували з НДМГ, встановити його склад перерахованими вище методами не було можливим.

Фактори, що можуть впливати на швидкість корозії

Було отримано великий масив даних щодо вивчення взаємодії сталі 12Х18Н10Т з ракетними КП АТ і НДМГ [4, 9]. Згідно яких визначено, що відносно вказаних КП сталь 12Х18Н10Т має високу корозійну стійкістю:

- максимальна швидкість суцільної (рівномірної) корозії не перевищує $\leq 1 \cdot 10^{-3}$ мм/на рік при 50 ^{0}C, що характеризує матеріали, як «цілковито стійкі»;
- відсутні локальні види корозії.

Дослідження протікання корозійних процесів сталі 12Х18Н10Т в АТ виявили, що:

- в початковий період часу формування плівки оксиду та процес утворення опадів йдуть приблизно з однаковими витратами металу;
- втрати у вазі зразків відбуваються переважно у перші терміни впливу АТ на сталь (на протязі першого місяця);
- корозія у початковий період йде, як з утворенням плівки оксиду (кольору вороніння), так і з утворенням опадів (азотно-кислих солей);
- при різних умовах досліджень плівки оксиду утворюється однакової товщини (час їх утворення, приблизно 30 тижнів, незважаючи на те, що втрати ваги зразків збільшуються на протязі трьох місяців);
- при надлишку кисню закономірність росту плівки зберігається, таким чином через місяць маємо максимум вагових втрат, які у подальшому не змінюються з протягом часу (на утворення плівки йде від 15 до 40 % металу);
- корозія в газової і рідкої фазі йде з наростанням швидкості на протязі, приблизно, 5 – 10 тижнів (це період до утворення чорної плівки). У цей період швидкість корозії в газовій фазі більше ніж в рідкій. В газовій фазі утворення плівки йде швидше і тому через 2 – 10 тижнів плівка стає достатньо досконалою, і процес корозії починає уповільнюватися сильніше, ніж у рідкій фазі;
- у рідкій фазі дифузія кисню до поверхні утруднена. Утворення плівки йде повільно, тому швидкість корозії нарощується теж повільно. Пасивація відбувається довше, що можливо пояснити меншою швидкістю дифузії до металу.

Процеси утворення плівок та солей в АТ взаємопов’язані. Утворення плівки та відмінності в значеннях швидкостей корозії в рідкій і газовій фазі пов’язані з кількістю азотної кислоти в АТ.

При використанні у якості газу наддуву інертного газу (азоту) швидкість корозії сталі 12Х18Н10Т (при зберіганні з залишками АТ, що не зливаються) значно нижче ніж при використанні повітря.

Таким чином, можливо підсумувати, що корозія сталі 12Х18Н10Т в АТ і під його парами швидкоплинно протікає тільки у початковий період, а дедалі її швидкість значно зменшується.

У випадку незначного обводнення (0,02 – 0,04 % масс.) спостерігається значне зниження швидкості корозії.

НДМГ стабілін при герметичному зберіганні під наддувом інертним газом (азотом) і не піддається ка-

талітичному розкладанню під впливом металевих матеріалів.

Результати корозійних досліджень нержавіючої сталі 12Х18Н10Т в широкому діапазоні температур при різноманітних експозиціях свідчать о високій корозійній стійкості вказаних матеріалів в НДМГ [4, 9].

Огляд зразків показує, що їх поверхня в порівнянні з еталонними практично не змінилась, зазвичай не відмічалось ні потемніння поверхні, ні наявності нальоту чи опадів.

АТ та НДМГ мають низьку корозійну активність по відношенню до основних конструкційних матеріалів паливної системи РН: алюмінію АД1, алюмінієво-магнієвому сплаву АМг6, нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, 12Х21Н5Т (ЕІ-811), 15Х18Н12С4ТЮ (ЕІ-654). Присутня у якості технологічної домішки в АТ азотна кислота збільшує швидкість корозії нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. Однак при наявності азотної кислоти в АТ у межах норми згідно стандарту, збільшення швидкості корозії сталі 12Х18Н10Т незначне.

Без врахування корозії в початковий період, швидкість суцільної (рівномірної) корозії для сталі 12Х18Н10Т при температурі 50 ^{0}С в АТ та НДМГ складатиме $\leq 1\cdot10^{-4}$ мм на рік [4, 9].

Також слід відмітити, що сталь 12Х18Н10Т не піддається в АТ та НДМГ локальним видам корозії (щілинній, міжкристалічній, крапковій, контактній, піттінгової та корозійному розтріскуванню під напругою) [4, 9].

Металографічні дослідження

Об’єктом досліджень були зразки конструкційних матеріалів сіток СРФ декількох КЗ з різним терміном перебування в рідкій фазі КП (АТ та НДМГ) і під їх парами.

Перелік сіток СРФ, з яких було вирізано зразки для металографічних досліджень та КП, з якими вони контактували у процесі тривалого терміну експлуатації наведено у таблиці 3.

Ціллю металографічних досліджень було визначення стану конструкційного матеріалу сіток СРФ КЗЗСП після їх тривалої експлуатації в хімічно агресивних КП (АТ і НДМГ) та під їх парами.

Підготовка зразків до дослідження полягала у вирізанні фрагментів конструкційного матеріалу з робочої частини сіток СРФ та їх гарячої запресовки у фенольну смолу. Запресовка здійснювалась так, щоб дроти сітки (3 – 4 прошарку) були розташовані перпендикулярно робочої поверхні шліфа.

Підготовку мікрошліфів (поліровку і травлення) та мікро оптичні дослідження проводили згідно вимог металографічного методу оцінки корозійних уражень (ГОСТ 9.908-85).

Таблиця 3

Перелік сіток СРФ з яких було вирізано зразки для металографічних досліджень та КП, з якими вони контактували у процесі тривалого терміну експлуатації

Номер СРФ	КП	Конструкційний матеріал
КЗ після 15 років знаходження у КП		
СРФ 2	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 2	НДМГ	
КЗ після 17 років і 5 місяців знаходження у КП		
СРФ 2	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 2	НДМГ	
КЗ після 20 років знаходження у КП		
СРФ 2	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 3	АТ	
СРФ 2	НДМГ	
СРФ 3	НДМГ	
КЗ після 20 років і 10 місяців знаходження у КП		
СРФ 2	АТ	12Х18Н10Т
СРФ 3	АТ	
СРФ 2	НДМГ	
СРФ 3	НДМГ	

Дослідження мікрошліфів проводилось на металографічному оптичному мікроскопі «Versamet – 2» фірми «Union», який дозволяє здійснювати безпосереднє візуальне спостереження та фотографування при збільшенні від 5 до 2000 разів.

Мікроструктуру фрагментів сіток зі сталі 12Х18Н10Т виявляли у реактиві до складу якого входило: 100мл 0,1% HCl + 5 гр. $FeHl_3 \cdot 6H_2O$.

Для вимірів діаметрів дротів сіток СРФ використовували комп’ютерну обробку знімків, які було отримано за допомогою цифрової камері – окуляру. Результати багаторазових вимірів діаметрів дротів сіток СРФ оброблялись згідно ГОСТ 8.207-76.

При візуальному огляді зразків сіток СРФ встановлено:

- затемнення поверхні сіток, що контактували з АТ – темно-сірий колір;
- поверхня сіток, що контактували з НДМГ – світла.

Дослідження поперечних перерізів дротів сіток на фотографіях мікрошліфів при збільшенні у 400, 1300 і 2000 разів виявило, що:

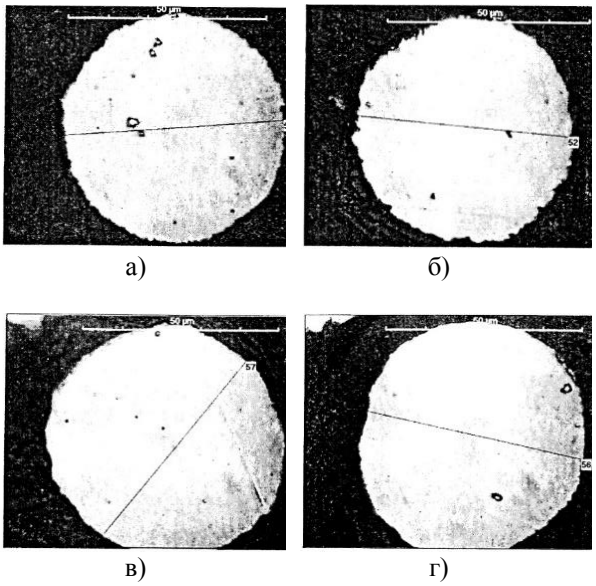
- мікроструктура сталі 12Х18Н10Т у всіх досліджених зразків є аустенітною з розміром зерна аустеніту, що відповідає 9 – 10 балу за ГОСТ 5639-82. Мікроструктура типова для даної марки сталі;
- присутність мікронерівності на поверхні дротів зразків сіток, що контактували, як з АТ, так і з НДМГ;
- на окремих дротах мікронерівності на поверхні виражені сильніше ніж на інших. На поперечних перерізах поверхня таких дротів виглядає більш шорсткою, або укритою виразкою.

Максимальна глибина мікронерівності на поверхні дротів зразків сіток, що було виявлено складає

~ 1 мкм (у КЗ після 20 років і 10 місяців знаходження у КП, рис. 4 і 5). При візуальному порівнянні сукупності отриманих зображень можливо зробити висновок, що дроти сіток, які контактували з АТ мають більшу мікронерівність поверхні і, якщо порівнювати сітки СРФ з баків АТ, то мікронерівність більше у сіток СРФ 3.

Якщо оцінювати швидкість корозії конструкційного матеріалу сіток СРФ сталі 12Х18Н10Т по максимальній глибині мікро нерівності поверхні дротів, що спостерігається (у КЗ після 20 років і 10 місяців знаходження у КП, рис. 4 і 5), то вона складає $\sim 0{,}48 \cdot 10^{-4}$ мм на рік [4]. Цей результат узгоджується зі швидкістю суцільної (рівномірної) корозії в АТ та НДМГ нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т – $\leq 10^{4}$ мм на рік, яка була встановлена гравіметричним методом і відповідає порядку величини, що було визначено більш точним резістометричним методом.

Загальний аналіз отриманих результаті металографічних досліджень мікроструктури зразків сталі 12Х18Н10Т сіток СРФ на наявність корозії підтверджує попередні висновки о наявності суцільного (рівномірного) корозійного враження поверхні дротів сітки.



а) б) в) г)

Рис. 4. Фотографії нетравлених мікрошліфів зразків сталі 12Х18Н10Т (збільшення 1300 разів):
а) – нетравлений мікрошліф сітки АТ СРФ 2;
б) – нетравлений мікрошліф сітки АТ СРФ 3;
в) – нетравлений мікрошліф сітки НДМГ СРФ 2;
г) – нетравлений мікрошліф сітки НДМГ СРФ 3

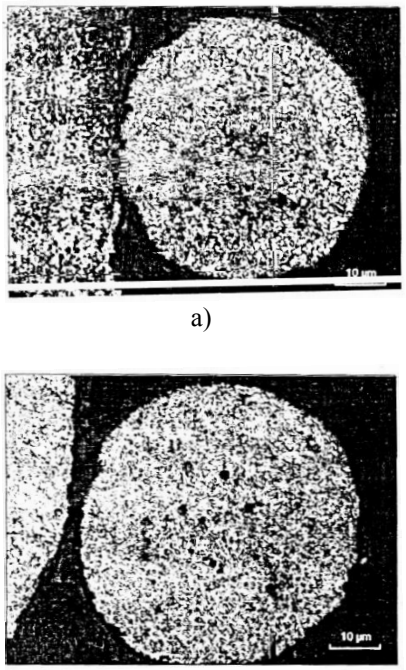
Згідно ГОСТ 9.908-85 суцільна (рівномірна) корозія визначається за:

1) показником втрати маси на одиницю площі поверхні Δm, кг/м^2, за формулою:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S}, \qquad (1)$$

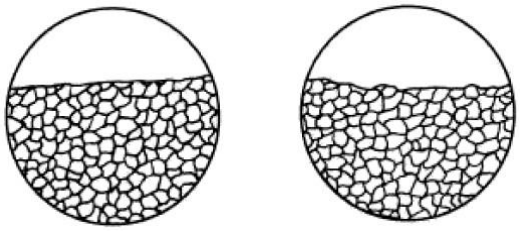
де m_0 – маса зразка до випробувань, кг; m_1 – маса зразка після випробувань та видалення продуктів корозії, кг; S – площа поверхні зразка;

2) зміною розмірів, яку визначають прямими вимірюваннями по різниці між розмірами зразків до і після випробувань та видалення продуктів корозії (рис. 6).



а) б)

Рис. 5. Фотографії мікроструктури після травлення зразків сталі 12Х18Н10Т (збільшення 2000 разів): а) – мікроструктура сітки АТ СРФ 3;
б) – мікроструктура сітки НДМГ СРФ 3



а) б)

Рис. 6. Схема типового вигляду корозійного ураження металу при суцільній (рівномірній) корозії: а) – зразка до випробувань;
б) – зразок після випробувань та видалення продуктів корозії

Оскільки оцінити швидкість суцільної (рівномірної) корозії, за показником втрати маси на одиницю площі поверхні (Δm) не можливо із-за відсутності даних о масі зразка до випробувань (m_0), було виконано вимірювання геометричних розмірів сіток СРФ опти-

чним методом, та визначено швидкість суцільної (рівномірної) корозії за допомогою другого методу – зміни розмірів.

Оптичні вимірювання

Щоб зробити висновки про наявність і величину корозії дротів сітки повинні бути відомі її початкові геометричні параметри (розміри). Для цього демонтовані СРФ та еталонні зразки сіток №008 були досліджені оптичним методом.

Вимірювання діаметрів дротів та розмірів чарунок сітки СРФ проводилися на ділянках, які мають розмір 5х5 мм за допомогою двопозиційного вимірювального приладу (ДВП-1). У кожній зоні у двох перпендикулярних напрямках виконувались поспіль виміри «дріт-чарунка-дріт» по 10 штук кожного елемента. Загалом для сіток СРФ 1 і 2 було виконано по 180 замірів для діаметрів дротів та розмірів чарунок (для кожної сітки, що досліджувалася). Для сіток СРФ 3 було виконано по 400 замірів. Допустима похибка результатів вимірювання склала ± 2 мкм [10].

Номінальні параметри сіток СРФ, що досліджувалися, наведено у ТУ 14-4-507-99 [11].

За результатами проведених вимірів отримано графікі зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП і під його парами (рис. 7 – 12), за допомогою яких були визначені рівняння апроксимаційних прямих середньо-арифметичних значень діаметрів дротів і розмірів чарунок сітки, а також найменших значень діаметрів дротів і найбільших значень розмірів чарунок. Апроксимація виконувалась за допомогою прямої лінійної обчислювальної функції, що використовує для визначення найліпшої апроксимації даних метод найменших квадратів.

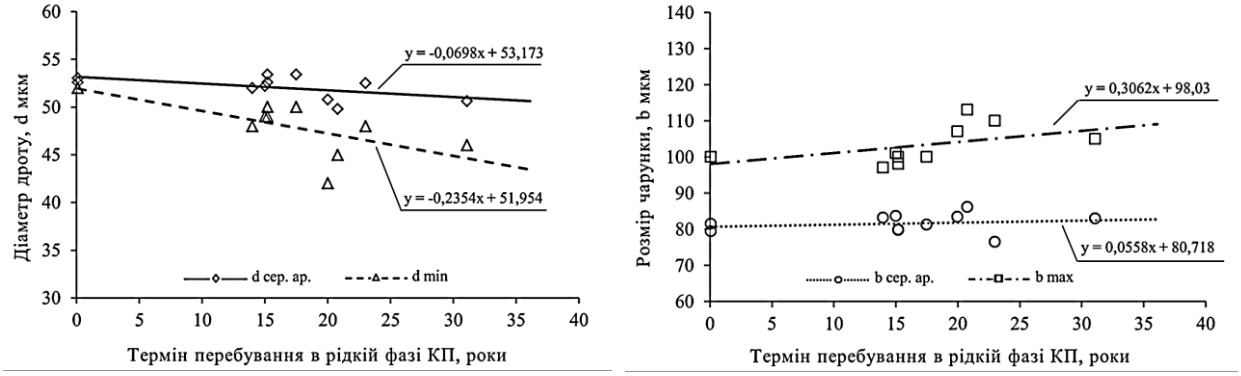
З графіків (рис. 7 – 12) видно, що з протягом часу йде поступове зменшення середньо-арифметичних значень діаметрів дротів і розмірів мінімальних діаметрів дротів, поряд зі збільшенням середньо-арифметичних значень розмірів чарунок і розмірів найбільших чарунок сітки. Що цілком ймовірно може бути обумовлене впливом суцільної (рівномірної) корозії конструкційного матеріалу сітки СРФ нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т, в наслідок її тривалого терміну перебування в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ.

Прийнявши це за гіпотезу, швидкість суцільної (рівномірної) корозії можливо розрахувати за формулою:

$$V_{\tau}^{*} = \frac{\Delta L}{2 \cdot x} = \frac{a - (mx + a)}{2 \cdot x}, \qquad (2)$$

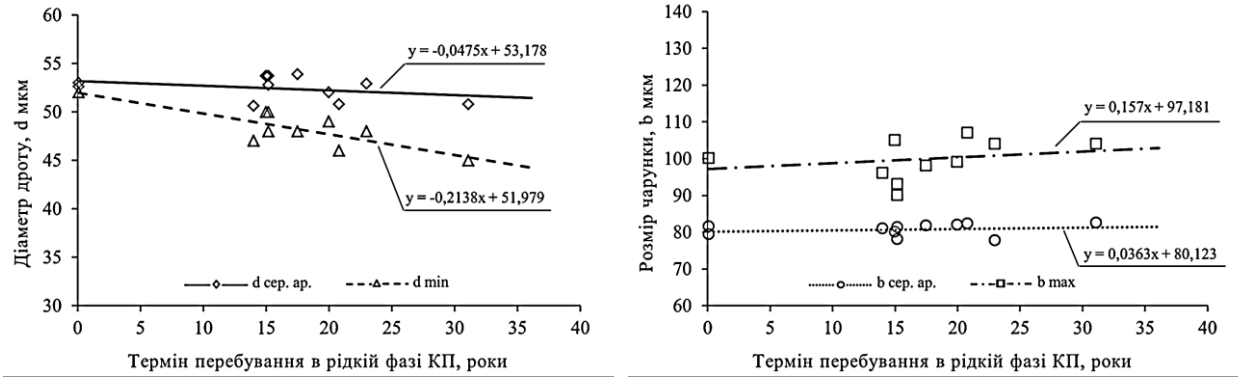
де V_{τ}^{*} – швидкість корозії в момент часу τ; ΔL – зменшення середньо-арифметичних значень діаметрів дротів (Δd), або збільшення середньо-арифметичних значень розмірів чарунок сітки (Δb); α – постійна, відповідно до значення діаметру дроту (d), або розміру чарунки сітки (b); m – коефіцієнт, що відповідає кожному значенню x; x – необов'язковий аргумент багато значень якого вже відомі (час протікання процесу τ).

Результати розрахунків зміни основних геометричних і граничних параметрів сіток СРФ та швидкості суцільної (рівномірної) корозії за 31 рік і 1 місяць перебування сталі 12Х18Н10Т в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ наведено у таблицях 4 та 5. Де: Δd – зменшення середньо-арифметичних значень діаметрів дротів за 31 рік і 1 місяць; Δb – збільшення середньо-арифметичних значень розмірів чарунок сітки за 31 рік і 1 місяць; $V_{\tau d}^{*}$ – швидкість корозії



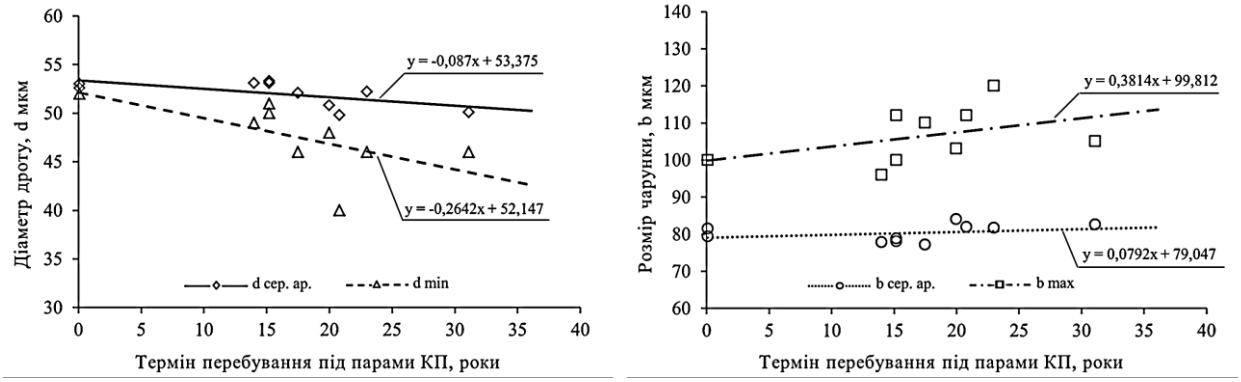
а) б)

Рис. 7. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 1 в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП АТ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; ◇ – середньо-арифметичні значення діаметрів дроту; △ – найменші значення діаметрів дроту; ○ – середньо-арифметичні значення розмірів чарунок; □ – найбільші значення розмірів чарунок



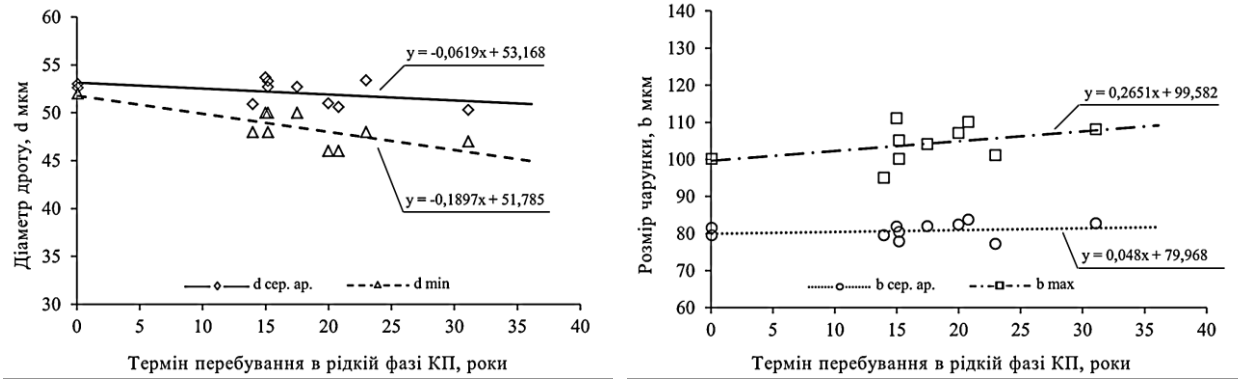
а) б)

Рис. 8. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 2 в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП АТ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; ◇– середньо-арифметичні значення діаметрів дроту; △ – найменші значення діаметрів дроту; ○ – середньо-арифметичні значення розмірів чарунок; □ – найбільші значення розмірів чарунок



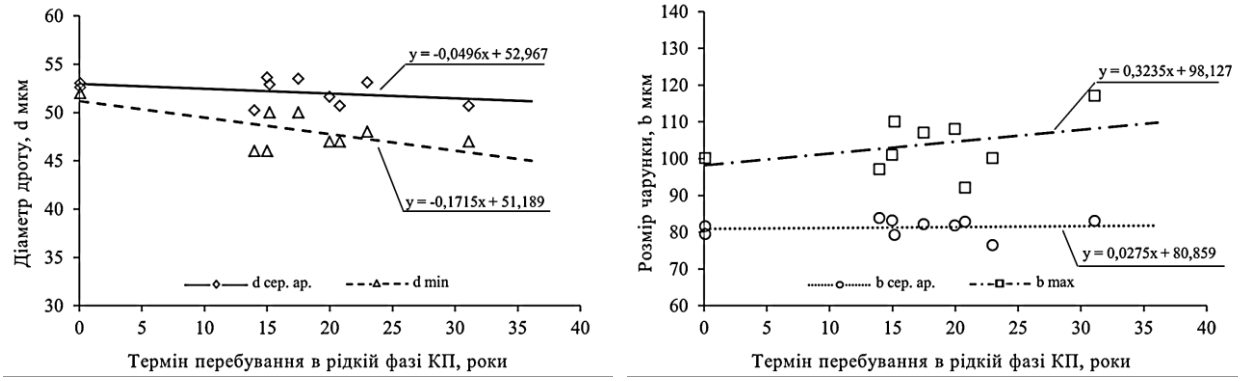
а) б)

Рис. 9. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 3 в залежності від терміну їх перебування під парами КП АТ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; ◇– середньо-арифметичні значення діаметрів дроту; △ – найменші значення діаметрів дроту; ○ – середньо-арифметичні значення розмірів чарунок; □ – найбільші значення розмірів чарунок



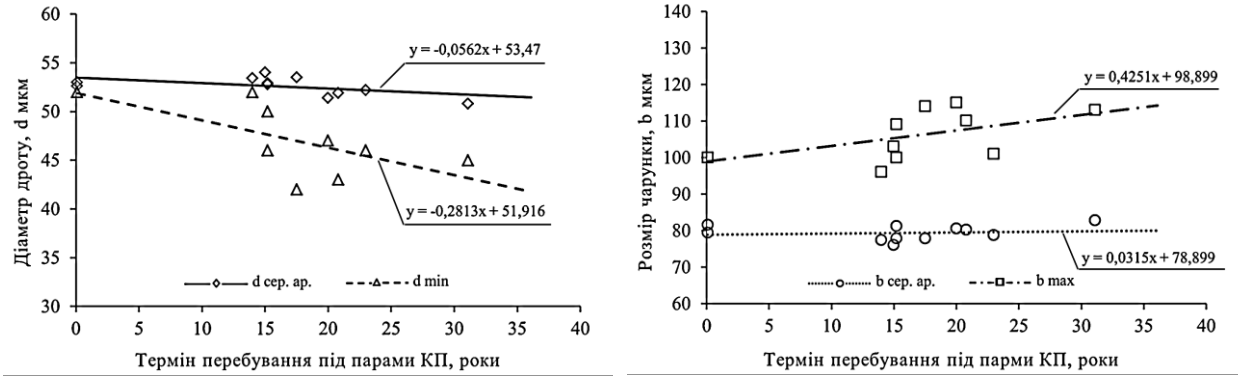
а) б)

Рис. 10. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 1 в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП НДМГ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; ◇– середньо-арифметичні значення діаметрів дроту; △ – найменші значення діаметрів дроту; ○ – середньо-арифметичні значення розмірів чарунок; □ – найбільші значення розмірів чарунок



а) б)

Рис. 11. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 2 в залежності від терміну їх перебування в рідкій фазі КП НДМГ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; ◇ – середньо-арифметичні значення діаметрів дроту; △ – найменші значення діаметрів дроту; ○ – середньо-арифметичні значення розмірів чарунок; □ – найбільші значення розмірів чарунок



а) б)

Рис. 12. Графік зміни основних геометричних параметрів сіток СРФ 3 в залежності від терміну їх перебування під парами КП НДМГ: а) – основні геометричні параметри дротів сіток СРФ; б) – основні геометричні параметри чарунок сіток СРФ; ◇ – середньо-арифметичні значення діаметрів дроту; △ – найменші значення діаметрів дроту; ○ – середньо-арифметичні значення розмірів чарунок; □ – найбільші значення розмірів чарунок

відносно зменшення діаметрів дротів; $V^*_{\tau b}$ – швидкість корозії відносно збільшення розмірів чарунок сітки; Δd_{min} – зменшення значень розмірів мінімальних діаметрів дротів за 31 рік і 1 місяць; Δb_{max} – швидкість корозії відносно зменшення розмірів мінімальних діаметрів дротів; $V^*_{\tau d\,min}$ – швидкість корозії відносно зменшення розмірів мінімальних діаметрів дротів; $V^*_{\tau b\,max}$ – швидкість корозії відносно збільшення розмірів найбільших чарунок сітки.

Аналіз результатів та обговорення

Загальний аналіз обробки результатів оптичних вимірювань зміни основних геометричних і граничних параметрів сіток СРФ та швидкості суцільної (рівномірної) корозії за 31 рік і 1 місяць перебування сталі 12Х18Н10Т в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ (таблиця 4 і 5) свідчить, що:

- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі АТ, отримане за результатами апроксимації середньо арифметичних значень зміни основних геометричних параметрів сіток дорівнює ~ $0{,}35 \cdot 10^{-4}$ мм на рік, і не перевищує номінального значення у $1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;
- максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами АТ, отримане за результатами апроксимації середньо арифметичних значень зміни основних геометричних параметрів сіток дорівнює ~ $0{,}44 \cdot 10^{-4}$ мм на рік, і не перевищує номінального значення у $1 \cdot 10^{-4}$ мм на рік;

Таблиця 4

Зміна основних геометричних параметрів сіток СРФ та швидкість суцільної (рівномірної) корозії за 31 рік і 1 місяць перебування сталі 12Х18Н10Т в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ

КП / СРФ	Δd, мкм	Δb, мкм	$V^*_{\tau d}$, мм на рік	$V^*_{\tau b}$, мм на рік
АТ СРФ 1	2,17	1,74	$0{,}35\cdot10^{-4}$	$0{,}28\cdot10^{-4}$
АТ СРФ 2	1,48	1,13	$0{,}24\cdot10^{-4}$	$0{,}18\cdot10^{-4}$
АТ СРФ 3	2,71	2,46	$0{,}44\cdot10^{-4}$	$0{,}40\cdot10^{-4}$
НДМГ СРФ 1	1,93	1,49	$0{,}31\cdot10^{-4}$	$0{,}24\cdot10^{-4}$
НДМГ СРФ 2	1,54	0,86	$0{,}25\cdot10^{-4}$	$0{,}14\cdot10^{-4}$
НДМГ СРФ 3	1,75	0,98	$0{,}28\cdot10^{-4}$	$0{,}16\cdot10^{-4}$

Таблиця 5

Зміна граничних геометричних параметрів сіток СРФ та швидкість суцільної (рівномірної) корозії за 31 рік і 1 місяць перебування сталі 12Х18Н10Т в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ

КП / СРФ	Δd_{min}, мкм	Δb_{max}, мкм	$V^*_{\tau d\,min}$, мм на рік	$V^*_{\tau b\,max}$, мм на рік
АТ СРФ 1	7,32	9,52	$1{,}18\cdot10^{-4}$	$1{,}53\cdot10^{-4}$
АТ СРФ 2	6,65	4,88	$1{,}07\cdot10^{-4}$	$0{,}76\cdot10^{-4}$
АТ СРФ 3	8,22	11,86	$1{,}32\cdot10^{-4}$	$1{,}91\cdot10^{-4}$
НДМГ СРФ 1	5,90	8,24	$0{,}95\cdot10^{-4}$	$1{,}33\cdot10^{-4}$
НДМГ СРФ 2	5,33	10,06	$0{,}86\cdot10^{-4}$	$1{,}62\cdot10^{-4}$
НДМГ СРФ 3	8,75	13,22	$1{,}41\cdot10^{-4}$	$2{,}13\cdot10^{-4}$

– максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі АТ, отримане за результатами апроксимації середньо арифметичних значень зміни граничних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 1{,}53\cdot10^{-4}$ мм на рік;

– максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами АТ, отримане за результатами апроксимації середньо арифметичних значень зміни граничних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 1{,}91\cdot10^{-4}$ мм на рік [4, 12];

– максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі НДМГ, отримане за результатами апроксимації середньо арифметичних значень зміни основних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 0{,}31\cdot10^{-4}$ мм на рік, і не перевищує номінального значення у $1\cdot10^{-4}$ мм на рік;

– максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами НДМГ, отримане за результатами апроксимації середньо арифметичних значень зміни основних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 0{,}28\cdot10^{-4}$ мм на рік, і не перевищує номінального значення у $1\cdot10^{-4}$ мм на рік;

– максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі НДМГ, отримане за результатами апроксимації середньо арифметичних значень зміни граничних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 1{,}62\cdot10^{-4}$ мм на рік, і не перевищує максимального значення у $1\cdot10^{-3}$ мм на рік;

– максимальне значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами НДМГ, отримане за результатами апроксимації середньо арифметичних значень зміни граничних геометричних параметрів сіток дорівнює $\sim 2{,}13\cdot10^{-4}$ мм на рік, і не перевищує максимального значення у $1\cdot10^{-3}$ мм на рік [4, 12];

– швидкість суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами АТ перевищує швидкість корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі АТ на ~ 26% для середньо арифметичних значень зміни основних геометричних параметрів сіток і на ~ 25%, для середньо арифметичних значень зміни граничних геометричних параметрів сіток;

– швидкість суцільної (рівномірної) корозії для сіток СРФ 3, які перебували під парами НДМГ нижче швидкість корозії для сіток СРФ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі НДМГ на ~ 10% для середньо арифметичних значень зміни основних геометричних параметрів сіток і на ~ 31,5% перевищує, для середньо арифметичних значень зміни граничних геометричних параметрів сіток.

Результати різних методів досліджень корозії сталі 12Х18Н10Т в КП АТ та НДМГ вказують на:

– відсутність локальних видів корозійних вражень (піттіноговой, міжкристалічній, крапковій, контактній, щілинній та корозійному розтріскуванню під напругою) [4, 6];

– наявність суцільної (рівномірної) корозії [4, 6];

– швидкість корозії відносно збільшення розмірів найбільших чарунок сітки ($V^*_{\tau b\,max}$) має найбільші значення, що, зокрема, може бути не тільки наслідком протікання корозійних процесів, а й пластичної деформації основного конструкційного матеріалу полотна сітки, внаслідок його тривалої експлуатації;

– збільшене середньо арифметичного значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії у газовій фазі КП АТ та НДМГ, відносно рідкої, у ~ 1,5 рази.

Для спрощення майбутніх розрахунків введемо поняття коефіцієнту максимальної швидкості корозії, який буде визначатися відносно збільшення розмірів чарунок сітки [4, 12]:

$$k_{V^*_{\tau max}} = \frac{b_0 + 2V^*_{\tau max}\cdot\tau}{b_0} = A + B\cdot\tau, \qquad (3)$$

де b_0 – номінальний розмір чарунки за ТУ; τ – час; A – постійна (дорівнює 1); B – коефіцієнт; A та B – отримані методом апроксимації, яка виконувалась за допомогою прямої лінійної обчислювальної функції, що використовує для визначення найліпшої апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів (наведено на графіках рис. 7 – 12).

При визначенні типорозміру сітки КРФ для її використання у якості СРФ капілярного ЗЗС палива, що проектується, доцільно користуватися коефіцієнтом максимальної швидкості корозії, який було отримано для АТ і НДМГ СРФ 3, як ті що відповідають найгіршому випадку процесу їх експлуатації [4, 12]. У такому разі для сітки №008 він буде дорівнювати:

- для АТ – $k_{V^*_{\tau\,max}} = 1+0{,}0048\cdot\tau$ [4, 12];
- для НДМГ – $k_{V^*_{\tau\,max}} = 1+0{,}0053\cdot\tau$ [4, 12],

де τ – час експлуатації сітки [4, 12].

Висновки

Для досягнення основної мети дослідження – визначення зменшення діаметрів дротів та збільшення розмірів чарунок сіток КРФ в наслідок корозійного враження основного конструкційного матеріалу сітки нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т, було визначено наявності тип та швидкість корозії сіток КРФ у рідкій фазі КП АТ та НДМГ і під їх парами [4, 6]. Для чого було: проведено хімічний аналіз складу речовин з поверхні конструкційного матеріалу сіток; розглянуто фактори, що можуть впливати на швидкість протікання корозійних процесів; проведено металографічні дослідження конструкційного матеріалу сіток; оптичні вимірювання діаметрів дротів та розмірів чарунок сіток було [4, 6].

Для проведення вище перерахованих робіт, було обрано об'єкт дослідження – СРФ капілярних ЗЗС палива, що були демонтовані з баків АТ та НДМГ РБ РН «Дніпро», які уявляють з себе сітки №008 саржевого типу плетіння з квадратними чарунками у світлі.

За результатами розрахунково-аналітичних та експериментальних робіт було:

- встановлено відсутність локальних видів корозійних вражень (щілинній, міжкристалічній, крапковій, контактній, піттінгової та корозійному розтріскуванню під напругою) [4, 6];
- встановлено наявність суцільної (рівномірної) корозії [4, 6];
- встановлено, що швидкість корозії відносно збільшення розмірів найбільших чарунок сітки ($V^*_{\tau\,b\,max}$) має найбільші значення, що, зокрема, може бути не тільки наслідком протікання корозійних процесів, а й пластичної деформації основного конструкційного матеріалу полотна сітки, внаслідок його тривалої експлуатації;
- встановлено, що максимальні значення швидкості корозії складають, для:
  - АТ ~ $1{,}91 \cdot 10^{-4}$ мм на рік [4, 12];
  - НДМГ ~ $2{,}13 \cdot 10^{-4}$ мм на рік [4, 12].
- встановлено збільшене середньо арифметичного значення швидкості суцільної (рівномірної) корозії у газовій фазі КП АТ та НДМГ, відносно рідкої, у ~ 1,5 рази;
- для спрощення майбутніх розрахунків введено поняття коефіцієнту максимальної швидкості корозії, який визначається відносно збільшення розмірів чарунок сітки, який буде дорівнювати для сітки №008 [4, 12]:
  - АТ – $k_{V^*_{\tau\,max}} = 1+0{,}0048\cdot\tau$ [4, 12];
  - НДМГ – $k_{V^*_{\tau\,max}} = 1+0{,}0053\cdot\tau$ [4, 12].

Майбутні дослідження повинні бути спрямовані на визначення факторів, що впливають на швидше протікання корозії в газовій фазі КП АТ та НДМГ, відносно рідкої.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Подяка

Автор висловлює подяку керівництву ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» за надану можливість проведення наукових досліджень.

Література

1. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов [Текст] / В. В. Багров, А. В. Курпатенков, В. М. Поляев и др. ; под. ред. В. М. Поляева. – М. : УНПЦ «ЭНЕРГОМАШ», 1997. – 328 с.

2. Шевченко, Б. А. Расчетный и экспериментальный метод разработки средств забора компонентов топлива из баков летательных аппаратов с жидкостным ракетным двигателем [Текст] : дис. канд. тех. наук: 05.07.02 / Шевченко Борис Алексеевич; Днепропетровск, КБ «Южное». – Днепропетровск, 1990. – 209 с.

3. Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями [Текст] / В. Н. Челомей, Д. А. Полухин, Н. Н. Миркин и др. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.

4. Мінай, О. М. Експериментальне визначення зміни капілярної утримної здатності сітчастих розділювачів фаз [Текст] / О. М. Мінай // Авіаційно-космічна техніка й технологія. – 2023. – № 6 (192). – С. 55-65. DOI: 10.32620/aktt.2023.6.07.

5. Minai, O. Influence of long-term stay elements of capillary intake devices in liquid propellant components on their parameters [Text] / O. Minai, O. Ivanov, I. Siedykh // Aerospace Research in Bulgaria. – 2020. – Vol. 32. – P. 175-192. DOI: 10.3897/arb.v32.e15.

6. *Мінай, О. М. Зміна капілярної утримної здатності засобів забезпечення суцільності палива в наслідок їх тривалого терміну експлуатації [Текст] / О. М. Мінай // Вісник ДНУ. Серія: ракетно-космічна техніка, зб. наук. пр. – Т. XXXI – Дніпро, 2023. – С. 58-73. DOI: 10.15421/452306.*

7. Minai, O. M. Prediction of performance of mesh phase separators in GEO satellite capillary intake devices [Text] / O. M. Minai // 74-st International Astronautical Congres. Baku, Azerbaijan, 02 – 06 Oktober 2023. – Technical Presentation and Conference Paper IAC – 23,A2,4,4x76632. – 10 p.

8. Мінай, О. М. Вплив на капілярну утримну здатність сітчастих роздільників фаз їх тривалого перебування у компонентах ракетного палива [Текст] / О.М. Мінай // Людина і космос: зб. тез XXV Міжнарод. молодіж. наук.-практ. конф., Дніпро, 2023. – С. 122-123.

9. Отчет об опытно-конструкторской работе «Анализ опыта заправок-сливов на высококипящих компонентах топлива (Амил, Гептил)» [Текст]: ФГУП «РНЦ «Прикладная химия». – Санкт-Петербург, 2005. – 46 с.

10. NASA Glenn Research Center Creek Road Cryogenic Complex: Testing between 2005 – 2019 [Text] / J. Hartwig, W. Johnson, H. Bamberger, M. Meyer, J. Wendell, J. Mullins, R. C. Robinson, L. Arnett // Cryogenics. – 2020. – Vol. 106. – P. 1-12.

11. Сітка тканa з квадратними осередками мікронних розмірів. Технічні умови: ТУ 14-4-507-99 [Текст]. – Утримувач оригіналу ВАТ «Сонячногірський завод металевих сіток ЛЕПСЕ», 1999. – 2 с.

12. Мінай, О. М. Швидкість корозійних процесів та їх вплив на зміну структурних і геометричних параметрів сітчастих розділювачів фаз [Текст] / О. М. Мінай // Космічні горизонти: зб. тез 3-ї наук.-практ. інтер.- конф. Випуск №2, Дніпро, 2023. – С. 36-40.

References

1. Bagrov, V. V., Kurpatenkov, A. V., Polyaev, V. M. et al. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskih letatelnyh apparatov* [Capillary liquid extraction systems from the tanks of space aircraft]. Moscow, UNPC "ENERGOMASH" Publ., 1997. 328 p. (in Russian).

2. Shevchenko, B. A. *Raschetnyj i jeksperimental'nyj metod razrabotki sredstv zabora komponentov topliva iz bakov letatel'nyh apparatov s zhidkostnym raketnym dvigatelem* [Estimated and experimental method for the development of means for collecting fuel components from tanks of aircraft with a liquid rocket engine]. dis. kand. teh. nauk. Dnepropetrovsk, KB «Juzhnoe» Publ., 1990. 209 p. (in Russian).

3. Chelomey, V. N., Polukhin, D. A., Mirkin, N. N. et al. *Pnevmogidravlicheskie sistemy dvigatelnykh ustanovok s zhidkostnymi raketnymi dvigatelyami* [Pneumohidraulic systems of propulsion systems with liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p. (in Russian).

4. Minai, O. M. *Eksperymentalne vyznachennia zminy kapiliarnoi utrymnoi zdatnosti sitchastykh rozdiliuvachiv faz* [Experimental determination of changes in capillary holding capacity of mash phase separators]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2023, no. 6 (192), pp. 55-65. DOI: 10.32620/aktt.2023.6.07. (in Ukraine).

5. Minai, O., Ivanov, O., & Siedykh, I. Influence of long-term stay elements of capillary intake devices in liquid propellant components on their parameters. *Aerospace Research in Bulgaria*, 2020, vol. 32, pp. 175-192. DOI: 10.3897/arb.v32.e15.

6. Minai, O. M. *Zmina kapiliarnoi utrymnoi zdatnisti zasobiv zabezpechennia sutsilnosti palyva v naslidok yikh tryvaloho terminu ekspluatatsii* [Change in the capillary retention capacity of means of ensuring fuel integrity as a result of their long service life]. *Visnyk DNU. Seriia: raketno-kosmichna tekhnika, zb. nauk. pry. – Herald of DNU. Series: rocket and space technology, coll of science avenue*, 2023, vol. XXXI, pp. 58-73. DOI: 10.15421/452306. (in Ukraine).

7. Minai, O. M. Prediction of performance of mesh phase separators in GEO satellite capillary intake devices. *74th International Astronautical Congress . Baku , Azerbaijan ,* 02 – 06 *October* 2023, – *Technical Presentation and Conference Paper IAC* – 23, A2, 4, 4x76632. 10 p.

8. Minai, O. M. *Vplyv na kapiliarnu utrymnu zdatnist sitchastykh rozdilnykiv faz yikh tryvaloho perebuvannia u komponentakh raketnoho palyva* [Effect on the capillary retention capacity of mesh phase separators of their long stay in rocket fuel components]. *Liudyna I kosmos: zb. tez. XXV Mizhnarod. molodizh. nauk.-prakt. konf. – Man and space: collection. theses XXV International youth science and practice conference*, Dnipro, 2023, pp. 122-123. (in Ukraine).

9. *Otchot ob opytno-rjystruktorskoj rabote «Analiz zapravok-slivov na vysokokipyshih komponentah topliva (Amil, Geptil)»* [Report on experimental design work " Analysis experience of filling stations with plums on high-boiling fuel components (Amyl, Heptyl)"]. St. Petersburg, FGUP "RNC" Prikladnaya himiya" Publ., 2005. 46 p. (in Russian).

10. Hartwig, J., Johnson, W., Bamberger, H., Meyer, M., Wendell, J., Mullins, J., Robinson, R. C., & Arnett, L. NASA Glenn Research Center Creek Road Cryogenic Complex: Testing between 2005 – 2019. *Cryogenics*, 2020, vol. 106, pp. 1-12.

11. *Sitka tkana z rvadratnymy oseredkamy mikronnykh rozmiriv. Tekhnichni umovy: 14-4-507-99* [Mesh woven with square cells of micron size. Technical conditions: TC 14-4-507-99]. *Otrymuvach oryhinalu VAT " Soniachnohirskyi zavod metalevykh sitok LEPSE" – Holder of the original of OJSC " Sonyachnohirsky Plant of Metal Meshes LEPSE"* Publ., 1999. 2 p. (in Ukraine).

12. Minai, O. M. *Shvydkist koroziinykh protsesiv ta yikh vplyv na zminu strukturnykh I heometrychnykh parametriv sitchastykh rozdiliuvachiv faz* [The rate of corrosion processes and their influence on the change of structural and geometric parameters of mesh phase separators]. *Kosmichni gorizonti: zb. tez. 3-i nauk.-prakt. inter.-konf. Vipusk №2 – Space horizons: collection. theses 3rd science and practice internet conference, Edition №2*, Dnipro, 2023, pp. 36-40. (in Ukraine).

Надійшла до редакції 15.01.2024, розглянута на редколегії 20.02.2024

DETERMINATION OF THE RATE OF CORROSION OF THE MAIN STRUCTURAL MATERIAL OF THE GRIDS OF CAPILLARY PHASE SEPARATORS

Oleksandr Minai

The subject of this study is the corrosion processes that occur in the fuel tanks of spacecraft with a long service life, the engines of which operate on chemically aggressive fuel components (FC): nitrogen tetroxide (NT) and asymmetric dimethylhydrazine (NDMH). **The goal** is to determine the reduction of wire diameters and the increase of cell sizes of capillary phase separator grids (PSG) because of the corrosion effect of the main structural material of the 12X18H10T stainless steel grid. **Task:** establishing the presence, type, and rate of corrosion of the main structural material of the PSG nets. **The methods** used are as follows: to determine the presence of corrosion by studying the composition of substances found on the surface of the grids – X- ray fluorescence, X- ray structural, atomic absorption, potentiometric, turbodimetric, infrared spectroscopy, and chromato-mass spectrometry; to determine the type of corrosion-metallographic studies of mesh samples; to determine the rate of corrosion-measuring the geometric dimensions of mesh samples. The following **results were obtained**. The metal cations detected on the surface of the mesh samples correspond to the elements that make up the alloy of aluminum and steel - the main structural materials of the fuel tanks of launch vehicles; 12X18H10T steel is not susceptible to local types of corrosion (pitting, intercrystalline, dot, contact, crevice, and stress corrosion cracking) in high-pressure and low-pressure tanks; the presence of a continuous (uniform) corrosion effect on the surface of the grid wires was established; dependences of changes in the main geometric parameters of the grids (wire diameters and cell sizes) over time were obtained, according to which the limits of the corrosion rates of stainless steel grade 12X18N10T in the liquid phase of NT and NDMG and in the gas phase were established; and coefficients of the maximum corrosion rate were calculated. **Conclusions**. The scientific novelty of the obtained results is as follows: for the first time, the presence, type, and rate of corrosion of the main structural material of the PSG grids because of their long-term operation (14...31 years) in the liquid phase of AT and NDMH and in the gas phase were determined using cross-methods.

Keywords: launch vehicle; microgravity; capillary phase separator; mesh phase separator; capillary retention capacity; fuel tanks; microstructure; corrosion; liquid rocket engine; reusable space systems; non-destructive testing; infrared spectroscopy; rocket fuels.

Мінай Олександр Миколайович – начальник сектору, ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна.

Oleksandr Minai – Sector Leader in Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine,
e-mail: minayan1976@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4180-0149.