

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-6>

УДК 669.017:620.18 + 620.193

ГУРАЛЬ ТАРАС

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

<http://orcid.org/0009-0000-2953-3159>

e-mail: guraltaras5@gmail.com

РАЦЬКА НАДІЯ

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

<https://orcid.org/0000-0002-5960-4744>

e-mail: guraltaras5@gmail.com

ЮРКЕВИЧ РОМАН

Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

<https://orcid.org/0000-0002-6832-8470>

e-mail: jurkevych1980@gmail.com

БОЛКОТ ПЕТРО

Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

<https://orcid.org/0000-0002-1603-5828>

e-mail: pabolkot@gmail.com

РІЗНОВИДИ КОРОЗІЙНО-АКТИВНИХ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ У СТАЛЯХ

У статті представлено систематичний огляд типів корозійно-активних неметалевих включень у сталях. Показано, що за хімічним складом неметалеві включення поділяються на: сульфідні, оксидні, нітридні, карбідні, карбонітридні та складні (оксисульфідні, оксидно-нітридні). Оксидні неметалеві включення є однією з найпоширеніших груп включень у сталях, вони є результатом взаємодії розчиненого кисню з деоксидуючими елементами, такими як алюміній, кремній і марганець, і поділяються на прості оксиди (Al_2O_3 , SiO_2 , MnO), складні ($MnO \cdot SiO_2$, $CaO \cdot Al_2O_3$) і багатокомпонентні. Узагальнено сучасні методи дослідження включень, а також методи їх виявлення та оцінки. Структурні та морфологічні методи, засновані на аналізі геометричних параметрів включень (форма, розмір, орієнтація, щільність розподілу), дозволяють встановити потенційні зони концентрації напружень, але не завжди дають інформацію про реальну електрохімічну активність. Хімічні та фазові методи спрямовані на визначення складу включень і фазових співвідношень. До методів електронної мікроскопії та мікроаналізу належать: скануюча електрохімічна мікроскопія, EDX-аналіз, електронно-пробний мікроаналіз, скануюча вібраційна електрода техніка, скануюча кельвін-зондова мікроскопія, локальна електрохімічна імпедансна спектроскопія. Ці методи необхідні для ідентифікації потенційно небезпечних фаз, таких як MnS , Al_2O_3 , $CaO \cdot Al_2O_3$ тощо. Вони дають можливість комплексно оцінити вплив неметалевих включень на локальні характеристики (потенціал, струм, імпеданс), що може бути використано для прогнозування довговічності матеріалу, поєднуючи структурний аналіз з електрохімічними вимірюваннями та математичним моделюванням.

Ключові слова: неметалеві включення, пітингова корозія, щілинна корозія, корозійна втома, мікрогальванічна пара, депасивація.

GURAL TARAS, RATSKA NADIYA

Karpenko Physico-Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine

YURKEVYCH ROMAN, BOLKOT PETRO

Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy

TYPES OF CORROSION-ACTIVE NON-METALLIC INCLUSIONS AND METHODS FOR THEIR DETECTION IN STEELS (REVIEW)

The article presents a systematic review of the types of corrosion-active non-metallic inclusions in steels. It is shown that according to their chemical composition, non-metallic inclusions are divided into: sulfide, oxide, nitride, carbide, carbonitride and complex (oxysulfide, oxide-nitride). Oxide non-metallic inclusions are one of the most common groups of inclusions in steels, they are the result of the interaction of dissolved oxygen with deoxidizing elements such as aluminum, silicon and manganese, and are divided into simple oxides (Al_2O_3 , SiO_2 , MnO), complex ($MnO \cdot SiO_2$, $CaO \cdot Al_2O_3$) and multicomponent. Modern methods of studying non-metallic inclusions, as well as methods for their detection and evaluation, are summarized. Structural and morphological methods based on the analysis of geometric parameters of inclusions (shape, size, orientation, distribution density), allow establishing potential stress concentration zones, but do not always provide information about the real electrochemical activity. Chemical and phase methods are aimed at determining the composition of inclusions and phase ratios. The methods of electron microscopy and microanalysis include: scanning electrochemical microscopy, EDX analysis, electron probe microanalysis, scanning vibrating electrode technique, scanning Kelvin probe microscopy, local electrochemical impedance spectroscopy. These methods are necessary for the identification of potentially dangerous phases, such as MnS , Al_2O_3 , $CaO \cdot Al_2O_3$. They provide an opportunity to comprehensively assess the impact of non-metallic inclusions on local characteristics (potential, current, impedance), which can be used to predict the durability of the material, combining structural analysis with electrochemical measurements and mathematical modeling.

Keywords: non-metallic inclusions, pitting corrosion, crevice corrosion, corrosion fatigue, microgalvanic vapor, depassivation.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Гураль Тарас, Ратська Надія, Юркевич Роман, Болкот Петро

Постановка проблеми

У промисловості металоконструкції часто застосовують в середовищах з високою концентрацією хлорид-іонів, в агресивних кислотних і лужних розчинах за високої температури та механічних навантажень, що суттєво впливає на їх корозійну тривкість та довговічність. Суттєвий вплив на експлуатаційні властивості конструкційних сталей мають корозійно-активні неметалеві включення (КАНВ), які діють як локальні осередки корозії. Наявність таких включень, зокрема сульфідів та оксидів, створює мікроелектрохімічну гетерогенність, що призводить до пітингової корозії, водневої крихкості та передчасного втомного руйнування. Не всі неметалеві включення однаково впливають на корозійну тривкість сталі, а їхня активність залежить від умов експлуатації, хімічного складу середовища, напруженого стану матеріалу та мікроструктури металевої матриці. Тому виникає необхідність систематизації різновидів корозійно-активних неметалевих включень і критичного аналізу сучасних методик їх виявлення з метою визначення найбільш інформативних і надійних підходів. Традиційні металографічні методи аналізу, що базуються на світловій мікроскопії, не завжди забезпечують достатню роздільну здатність і точність для ідентифікації дрібнодисперсних або складних багатофазних включень. Водночас сучасні інструментальні підходи (сканувальна електронна мікроскопія, енергодисперсійний аналіз, електронна мікросonda, автоматизований аналіз зображень) потребують уніфікації методик, стандартизації критеріїв оцінювання та комплексного підходу до інтерпретації результатів.

Метою роботи є: узагальнення сучасних наукових даних щодо формування корозійно-активних неметалевих включень у сталях, їх класифікації та методів дослідження, що дозволить підвищити ефективність контролю якості конструкційних сталей і прогнозування їх експлуатаційної надійності.

Виклад основного матеріалу

Сталь промислового виробництва не можна вважати хімічно й структурно однорідною через утворення неметалевих фаз на різних етапах її виплавки та обробки. Неметалеві включення є результатом складної взаємодії термодинамічних і кінетичних процесів пов'язаних із розкисленням, десульфурацією та кристалізацією сталі [1, 2]. Навіть за низького об'ємного вмісту включень, їх локальний вплив на властивості сталі може бути визначальним. Однак не всі неметалеві включення є однаково небезпечними з точки зору корозійної тривкості сталі, саме корозійно-активні неметалеві включення (КАНВ) здатні утворювати локальні гальванічні пари з металевою матрицею, зазнавати селективного розчинення і змінювати склад корозивного середовища [3, 4–6]. Включення, орієнтовані вздовж напрямку деформації, істотно сприяють корозійно-механічному руйнуванню сталі, а рівномірний розподіл дрібнодисперсних, навіпаки, знижує ймовірність локалізації корозійного процесу [4–6].

За хімічним складом неметалеві включення поділяють на: сульфідні, оксидні, нітридні, карбідні, карбонітридні включення, комплексні (оксисульфідні, оксидно-нітридні). Найбільш досліджені – сульфідні, які термодинамічно неминучі за наявності сірки навіть у дуже малих концентраціях. Вони характеризуються нижчою корозійною тривкістю порівняно зі сталеву матрицею, особливо в нейтральних і слабкокислих середовищах, що містять хлориди [7–9].

Оксидні неметалеві включення є однією з найпоширеніших груп включень у сталях, особливо у сталях, отриманих із застосуванням інтенсивного розкислення. Вони розглядаються як результат взаємодії розчиненого кисню з елементами-розкислювачами, такими як алюміній, кремній та марганець [2, 10] і поділяються на прості оксиди (Al_2O_3 , SiO_2 , MnO), складні оксиди ($MnO \cdot SiO_2$, $CaO \cdot Al_2O_3$) та багатокомпонентні. Складні та багатокомпонентні оксидні фази становлять найбільший інтерес з точки зору корозійної поведінки, оскільки їх електрохімічні властивості суттєво відрізняються від властивостей сталеву матриці та на відміну від сульфідних вони більш інертні [11, 12]. Алюмооксидні включення є типовими для сталей і характеризуються високою термодинамічною стабільністю, твердістю та не зазнають активного електрохімічного розчинення [7, 13, 14]. Однак вони сприяють локальній деградації пасивних оксидних плівок на поверхні сталі. Крім того, потенціал Al_2O_3 є більш анодним порівняно з віддаленими ділянками матриці, що підтверджує їх непряму корозійну активність. Окрему групу становлять кальційовмісні фази, які утворюються внаслідок модифікації неметалевих включень у більш пластичні фази $CaO \cdot Al_2O_3$ і можуть розчинятися в агресивних середовищах утворюючи локальні анодні ділянки [15–18].

Оксисульфідні включення мають складну внутрішню будову, де сульфідна фаза є більш анодною, а оксидна – катодною відносно сталеву матриці, що призводить до формування локальних багатокомпонентних гальванічних пар. Глибина корозійних уражень та швидкість їх росту більша порівняно з ураженнями, пов'язаними з сульфідними або оксидними включеннями [9, 19]. Корозійна активність неметалевих включень у сталях зростає в такій послідовності: оксидні $\rightarrow$ кальційовмісні оксиди $\rightarrow$ сульфідні $\rightarrow$ оксисульфідні включення [4, 6, 9, 20].

Нітридні включення формуються внаслідок взаємодії розчиненого азоту з алюмінієм, титаном, ванадієм тощо та відіграють важливу роль у процесах зерноутворення та зміцнення сталі [21]. Зокрема, включення AlN мають тенденцію до утворення на межах зерен, що може впливати не лише на механічні властивості, але й на корозійну поведінку сталі. Нітриди можуть виступати непрямыми ініціаторами локальної корозії через порушення пасивних плівок і створення зон локального напруженого стану [14, 22]. Карбонітриди відіграють ключову роль у контролі розміру зерна, зміцненні сталі та можуть бути джерелами локальної електрохімічної неоднорідності, особливо за умов тривалої експлуатації у вологих або хлоридовмісних середовищах [21, 23]. Корозійна активність карбонітридів суттєво залежить від їх хімічного складу та співвідношення між карбідною і нітридною фазами.

Комбіновані включення створюють складні мікрогальванічні системи, у яких окремі фази виконують роль анодів або катодів, що призводить до інтенсифікації локальної корозії та прискореного росту пітингів [9, 24]. В середовищах із підвищеним вмістом хлоридів присутність комбінованих включень істотно знижує початкову фазу пітингової корозії [25].

Автори Zhang, Thomas та ін. розглядають корозійну активність неметалевих включень не як ізольовану властивість конкретної фази, а як результат усього металургійного маршруту виготовлення сталі. Встановлено, що кожен етап виробництва сталі (від виплавки до кристалізації) формує певні характеристики включень, які згодом визначають їх корозійну тривкість. Ключові фактори впливу – це процес розкислення, вміст сірки та кисню, склад шлакової фази [11, 13–29]. У працях [8, 26] показано, що розмір КАНВ залежить від швидкості кристалізації. Дослідження авторів Liu і Holappa підтверджують, що вже на стадії виплавки формується потенційна схильність сталі до локальної корозії через закладену електрохімічну неоднорідність [13, 30, 31]. Високий вміст розчиненого кисню в рідкому металі сприяє формуванню первинних оксидних включень, які згодом можуть трансформуватися в складні оксисульфідні фази. Процес розкислення є одним з найбільш критичних з точки зору формування КАНВ. Проаналізовано [29, 32–34] вплив різних схем розкислення (Al, Si–Mn, комбіноване) на морфологію та фазовий склад включень і встановлено, що розкислення алюмінієм сприяє утворенню твердих Al_2O_3 включень, комбіноване – знижує кількість кутчастих оксидів, а надлишкове – підвищує ймовірність утворення оксисульфідів.

Сталі з домінуванням твердих оксидних включень демонструють вищу схильність до ініціювання пітингів у приінклюзійних зонах, що підтверджено локальними електрохімічними вимірюваннями. Позапічна обробка сталі відіграє вирішальну роль у модифікації неметалевих включень і саме на цьому етапі можливе цілеспрямоване зниження корозійної активності включень. Зокрема, введення кальцію призводить до трансформації твердих оксидів у рідкопластичні фази та спостерігається зменшення концентрації напружень. Однак, надмірна кальцієва модифікація може сприяти утворенню кальцієвмісних сульфідів, які в деяких середовищах проявляють підвищену корозійну активність. Етапи розливання та кристалізації визначають просторовий розподіл і розміри неметалевих включень. За високої швидкості кристалізації формується дрібнодисперсний розподіл включень, який є менш небезпечним з точки зору локальної корозії. Натомість повільна кристалізація сприяє укрупненню включень і зростанню їх корозійної активності. Таким чином, значну роль у формуванні КАНВ відіграють різні етапи металургійного виробництва, що відкриває можливості для керування корозійною поведінкою сталей на технологічному рівні [33–35].

Методи досліджень КАНВ дозволяють встановити причинно-наслідкові зв'язки між мікроструктурою та корозійною поведінкою металу. Комбінування сканувальної електронної мікроскопії та електрохімічних випробувань дає змогу корелювати кристалографічну орієнтацію з електрохімічною активністю, виявляти локальні зони підвищеного ризику корозії сталі та моделювати механізми ініціювання корозійних ушкоджень сталі [23, 36–38]. Ключовими дослідженнями КАНВ є встановлення їх здатності сприяти корозійним процесам в реальних експлуатаційних умовах. Для цього застосовують комплекс експериментальних методів, які умовно можна поділити на структурно-аналітичні, електрохімічні та комбіновані. Металографічні методи традиційно є базовими у дослідженні неметалевих включень, оскільки дозволяють отримати загальне уявлення про їх форму, розміри, просторовий розподіл і взаємодію з металевою матрицею. Світлова мікроскопія у відбитому світлі широко застосовується для попередньої ідентифікації включень і оцінки ступеня забрудненості сталі. Використання стандартів ASTM E45, ISO 4967 та ДСТУ 4967 дає змогу кількісно оцінювати вміст і морфологію неметалевих включень, що важливо при порівняльному аналізі різних марок сталей. Однак обмежена роздільна здатність мікроскопів не дозволяє однозначно встановити хімічну природу включень, що зумовлює необхідність застосування більш інформативних методів.

Сканувальна електронна мікроскопія (SEM) істотно розширює можливості аналізу, забезпечуючи високу просторову роздільну здатність і глибину різкості. У поєднанні з енергодисперсійною рентгенівською спектроскопією (EDX) вона дозволяє одночасно отримувати морфологічну та елементну інформацію про включення. У працях [15, 36] наведено, що одними із найбільш ефективних методів є SEM-EDX щодо первинної ідентифікації корозійно-активних фаз у вуглецевих і низьколегованих сталях. Для детального аналізу хімічного складу КАНВ широко застосовується електронно-зондовий мікроаналіз (EPMA). Метод дозволяє з високою точністю визначати концентрацію елементів у мікрооб'ємах матеріалу, що є принципово важливим для виявлення складних багатофазних включень. EPMA забезпечує побудову карт розподілу елементів, які дають змогу візуалізувати зональну будову включень та ідентифікувати області з підвищеною корозійною активністю. Згідно з [37], саме межі між різними фазами всередині одного включення часто є зонами локальної анодної активності, де ініціюється корозія.

До спектроскопічних методів, що застосовуються у дослідженні КАНВ, також належать рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (XPS) та вторинна іонна мас-спектрометрія (SIMS). Вони дозволяють аналізувати хімічний стан елементів і виявляти тонкі поверхневі шари продуктів корозії, що особливо важливо для розуміння початкових стадій деградації матеріалу. Найбільш інформативними з точки зору оцінки корозійної активності неметалевих включень є наступні методи:

- скануюча вібруюча електродна техніка (SVET);
- скануюча електрохімічна мікроскопія (SECM);
- скануюча кельвін-зондова мікроскопія (SKPFM);

– локальна електрохімічна імпедансна спектроскопія (LEIS).

Застосування SVET дає змогу в режимі реального часу виявляти анодні та катодні ділянки на поверхні металу, що дозволяє безпосередньо спостерігати процеси локальної корозії. Метод особливо ефективний для дослідження ролі сульфідних включень, які часто виступають локальними анодами. Метод SKPFM дозволяє картувати розподіл контактної різниці потенціалів між зондом і поверхнею з нанометровою просторовою роздільною здатністю. Дослідження показують, що різниця потенціалів між включенням і матрицею є надійним індикатором схильності до пітингової корозії. Сучасний підхід до аналізу корозійно-активних включень ґрунтується на комплексному використанні різних методів дослідження, що дозволяє встановити причинно-наслідкові зв'язки між мікроструктурою та корозійною поведінкою матеріалу. Комбінування SEM/EDS, EBSD, SKPFM та електрохімічних випробувань дає змогу корелювати кристалографічну орієнтацію з електрохімічною активністю, виявляти локальні зони підвищеного ризику корозії та моделювати механізми ініціювання корозійних ушкоджень. Мультидисциплінарний підхід є найбільш перспективним напрямом у сучасній науці про корозію, оскільки він дозволяє отримати комплексне уявлення про поведінку сталі в реальних умовах експлуатації [37, 38].

Одним із ключових напрямів сучасних досліджень є кількісна оцінка електрохімічної активності включень. Для цього використовують параметри, що характеризують локальні електрохімічні процеси, зокрема: різницю потенціалів між включенням і матрицею; щільність анодного та катодного струму; швидкість локального розчинення; стабільність пасивного стану.

Значна увага приділяється розробці моделей прогнозування корозійної поведінки сталей з урахуванням ролі неметалевих включень. Такі моделі базуються на поєднанні експериментальних даних, термодинамічного моделювання та чисельних методів. Використання методів машинного навчання та статистичного аналізу дозволяє встановлювати кореляції між мікроструктурними параметрами та швидкістю корозії. Зокрема, сучасні дослідження демонструють можливість прогнозування схильності до пітингу на основі характеристик включень, отриманих за допомогою SEM/EDX і EBSD аналізу [15, 36–38]. Інтеграція експериментальних та чисельних підходів відкриває перспективи створення науково обґрунтованих критеріїв оцінки корозійної тривкості сталей ще на стадії їх проєктування.

Узагальнення результатів сучасних досліджень свідчить про те, що корозійна поведінка сталей визначається складною сукупністю фізико-хімічних чинників, серед яких ключову роль відіграють неметалеві включення. Різноманіття їх хімічного складу, морфології та просторового розташування унеможливорює використання єдиного універсального критерію оцінки корозійної небезпеки. Саме тому сформувався системний підхід, що поєднує структурні, електрохімічні та термодинамічні аспекти аналізу.

На основі аналізу літературних джерел усі підходи до оцінки КАНВ можна умовно поділити на:

1. Структурно-морфологічні методи, що базуються на аналізі геометричних параметрів включень (форма, розмір, орієнтація, густина розподілу). Вони дозволяють встановити потенційні зони концентрації напружень, але не завжди дають інформацію про реальну електрохімічну активність.

2. Хімічні та фазові методи, спрямовані на визначення складу включень і фазових співвідношень. До них належать SEM/EDX, EPMA, XRD, XPS. Ці методи є необхідними для ідентифікації потенційно небезпечних фаз, таких як MnS, Al₂O₃, CaO·Al₂O₃ тощо.

3. Електрохімічні методи, що дозволяють безпосередньо оцінити корозійну активність включень. Саме вони надають кількісні показники (потенціал, струм, імпеданс), які можуть бути використані для прогнозування довговічності матеріалу.

4. Комбіновані та інтеграційні підходи, що поєднують структурний аналіз із електрохімічними вимірюваннями та математичним моделюванням.

Такий поділ дозволяє не лише систематизувати існуючі методи, а й визначити їхні переваги та обмеження залежно від поставлених дослідницьких завдань. На сьогодні дедалі більше уваги приділяється формуванню кількісних критеріїв, які дозволяють об'єктивно оцінювати ступінь небезпеки конкретного типу включень, а саме: різниця електродних потенціалів між включенням і матрицею; швидкість локального анодного розчинення; стабільність пасивного стану поблизу включення; площа та геометрія контакту включення з матрицею; здатність включення до ініціації мікротріщин. Застосування цих критеріїв у комплексі дозволяє перейти від якісної оцінки до кількісного прогнозування корозійної тривкості сталей, що є надзвичайно важливим для інженерної практики.

У найближчій перспективі очікується зростання ролі міждисциплінарних підходів і активне впровадження, зокрема: методів машинного навчання для аналізу великих масивів мікроструктурних даних; *in situ* методів спостереження за корозійними процесами в реальному часі; багатомасштабного моделювання, що поєднує атомістичні, мезо- та макрорівні опису; інтеграції експериментальних даних з термодинамічними та кінетичними моделями. Це відкриває нові можливості для прогнозування довговічності сталей ще на етапі їх проєктування, що має особливе значення для відповідальних галузей промисловості.

Висновки

Корозійно-активні неметалеві включення є одним із ключових мікроструктурних чинників, які суттєво впливають на розвиток локальних корозійних процесів у сталях. Встановлено, що корозійна активність неметалевих включень зумовлена комплексом параметрів: хімічним складом, морфологією, розмірами та орієнтацією відносно напрямку деформації. Корозійно-активні неметалеві включення здатні формувати локальні

гальванічні пари з металевою матрицею, ініціювати локальну корозію та сприяти корозійно-механічному руйнуванню сталі. Показано, що характеристики КАНВ формуються на всіх етапах металургійного маршруту виробництва сталі. Схеми розкислення, модифікація кальцієм, вміст кисню та сірки, а також швидкість кристалізації визначають фазовий склад і дисперсність включень, а отже — потенційну схильність сталі до локальної корозії. Систематизовано сучасні методи виявлення та оцінки КАНВ, які поділяються на структурно-морфологічні, хімічні та фазові, електрохімічні та інтегровані підходи. Найбільш інформативним є комплексне застосування методів SEM/EDX, EPMA, локальних електрохімічних технік (SVET, SKPFM, SECM, LEIS) у поєднанні з математичним і термодинамічним моделюванням. Перспективним напрямом є розроблення кількісних критеріїв оцінки корозійної активності включень на основі різниці потенціалів між включенням і матрицею, щільності локальних струмів, швидкості анодного розчинення та стабільності пасивного стану. Інтеграція експериментальних результатів із термодинамічним і багатомасштабним моделюванням створює підґрунтя для прогнозування довговічності сталей ще на етапі їх проєктування.

References

1. Costa e Silva A. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8, Is. 2. – P. 2408–2422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>
2. Kiessling R., Lange N. Non-metallic inclusions in steel // *Metals Society*. – 1978. – Vol. 2. – P. 190–194.
3. Park J. S. Effect of non-metallic inclusions on the corrosion of steel / J. S. Park, B.G. Thomas, D. Edmonds // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2021. – Vol. 52. – P. 3595–3608. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06375-3>.
4. Wranglen G. An introduction to corrosion and protection of metals. London: Chapman and Hall. – 1974. – 288 p.
5. Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of metals. Houston: NACE International. – 1986. – 431 p.
6. Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice. New York: Marcel Dekker. – 2002. – 844 p.
7. Lindsog N., Bergman G. Classification of inclusions by chemical composition // *Scandinavian Journal of Metallurgy*. – 1980. – Vol. 9, № 1. – P. 23–29.
8. Sims C. E., Linder R. K. The morphology of non-metallic inclusions in steels // *Transactions of the AIME*. – 1959. – Vol. 215. – P. 777–783.
9. Baker M.A., Castle J.E. The initiation of pitting corrosion at MnS inclusions // *Corrosion Science*. – 1993. Vol. 34., No. 4. P. 667–682. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90279-P](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90279-P)
10. Fredriksson H., Åkerlind U. Solidification and crystallization processing in metals and alloys. Wiley. – 2012. – 536 p.
11. Zhang L., Thomas B. G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2006. – Vol. 37, No. 6. – P. 733–761. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-006-0057-0>
12. Turnbull A. Corrosion pitting and environmentally assisted cracking // *Corrosion Science*. – 2005. – Vol. 47, No. 2. – P. 355–378.
13. Holappa L. Secondary steelmaking // *Treatise on Process Metallurgy*. – 2014. – Vol. 3. – P. 301–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00012-2>
14. Marcus P. Localized corrosion (pitting): A model of passivity breakdown including the role of the oxide layer nanostructure / , V. Maurice, H. H. Strehblow // *Corrosion Science*. – 2008. – Vol. 50, No. 9. – P. 2698–2710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.047>
15. Senöz C. SECM and SKPFM studies of the local corrosion mechanism of Al alloys – a pathway to an integrated SKP-SECM system / C. Senöz, A. Maljusch, M. Rohwerder // *Electroanalysis*. – 2012. – Vol. 24, No. 2. – P. 239–245. DOI: <https://doi.org/10.1002/elan.201100609>
16. Verlinden B. Thermo-mechanical processing of metallic materials / B. Verlinden, J. H. Driver, I. Samajdar // Elsevier. – 2007. – 501 p.
17. Wang L. Influence of inclusions on initiation of pitting corrosion and stress corrosion cracking of X70 steel in near-neutral pH environment / L. Wang, J. Xin, L. Cheng // *Corrosion Science*. – 2019. – Vol. 147. – P. 108–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.11.007>
18. Zhao Y. Unraveling the effect of sulfide-oxide complex inclusions on the localized corrosion mechanism for carbon steel / Y. Zhao, X. Zhao, F. Xia, T. Zhang // *Corrosion Science*. – 2023. – Vol. 224. Art. no. 111555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111555>
19. Zheng S. Mechanism of (Mg, Al, Ca)-oxide inclusion-induced pitting corrosion in 316L stainless steel exposed to sulphur environments containing chloride ion / S. Zheng, C. Li, Y. Qi, L. Chen, C. Chen // *Corrosion Science*. – 2013. – Vol. 67. P. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.09.044>
20. Costa e Silva A. Thermodynamic aspects of inclusion engineering in steels // *Rare Metals*. – 2006. – Vol. 25. – P. 412–419. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-0521\(06\)60077-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0521(06)60077-6)
21. Gladman. T. The physical metallurgy of microalloyed steels. London: Maney Publishing. – 1997. – 363 p.
22. Ryan M. P. Why stainless steel corrodes / M. P. Ryan, D. E. Williams, R. J. Chater, B. M. Hutton, D. S. McPhail // *Nature*. – 2002. – 415. – P. 770–774.

23. Yanhui H. Mechanism of pitting corrosion induced by inclusions in Al-Ti-Mg deoxidized high strength pipeline steel / H. Yanhui, W. Jingru, L. Linli, L. Guangqiang, Z. Dongyu // *Micron*. – 2020. – Vol. 138. Art. no. 102898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micron.2020.102898>
24. Shi W. Effect of nonmetallic inclusions on localized corrosion of spring steel / W. Shi, S. Yang, J. Li // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. – 2021. Vol. 28. P. 390–397.
25. Liu Z. Effect of inclusions on initiation of stress corrosion cracks in X70 pipeline steel in an acidic soil environment / X. Li, C. Du, Y.F. Cheng // *Corrosion Science*. – 2009. – Vol. 51. – P. 895–900. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.01.007
26. Zhang J. Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime / J. Zhang, S.X. Li, Z.G. Yang, Y.Q. Weng // *International Journal of Fatigue*. – 2007. – Vol. 29. – P. 765–771. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2006.06.004
27. Zhang L. Deformability of oxide inclusions in tire cord steels / L. Zhang, C. Guo, W. Yang, Y. Ren, H. Ling // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2017. – Vol. 49. – P. 803–811.
28. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2006. – Vol. 37. – P. 733–761.
29. Li-feng Zhang. Inclusion and bubble in steel – a review // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2006. – Vol. 37, No. 5. – P. 1–8. DOI: 10.1016/S1006-706X(06)60051-4
30. Zhang L. Indirect methods of detecting and evaluating inclusions in steel – a review / *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2006. – Vol. 50. – P. 1–29. DOI: 10.1016/S1006-706X(06)60067-8
31. Liu P. A critical review of the recent advances in inclusion-triggered localized corrosion in steel / P. Liu, Q.-H. Zhang, Y. Watanabe, T. Shoji, Fa-He Cao // *npj materials degradation*. – 2022. – 6. – Art. number 81.
32. Ovtchinnikov S. Formation of oxide inclusions during deoxidation and solidification of high purity steels / S. Ovtchinnikov, S. V. Kazakov, D. Janke // *Ironmaking & Steelmaking*. – 2003. – Vol. 30. – P. 487–496. DOI: 10.1179/030192303225004196
33. Ren Y. Transient evolution of inclusions during calcium modification in linepipe steels *journal of materials science* / Y. Ren, L. Zhang, S. Li // *ISIJ International*. – 2014. – Vol. 54, Is. 12. – P. 2772–2779. DOI: 10.2355/isijinternational.54.2772
34. Chen X. Oxide-Inclusion Evolution in the Steelmaking Process of 304L Stainless Steel for Nuclear Power / X. Chen, G. Cheng, Y. Hou, J. Li // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, Is. 2. – Art. number 257. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9020257>.
35. Shibaeva T. V. The effect of microstructure and non-metallic inclusions on corrosion behavior of low carbon steel in chloride containing solutions / T. V. Shibaeva, V. Laurinavichyute, G. Tsirlina, K. Grigorovich // *Corrosion Science*. – 2014. – Vol. 80. – P. 299–308. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.11.038
36. Bartosiaki B.G. Assessment of inclusion analysis via manual and automated SEM and total oxygen content of steel / B.G. Bartosiaki, J.A.M.Pereira, W.V. Bielefeldt, A.C.F. Vilela // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2015. – 3. – P. 235–240.
37. Zimer A. Initial stages of corrosion pits on AISI 1040 steel in sulfide solution analyzed by temporal series micrographs coupled with electrochemical techniques / A. Zimer, M. A.S. De Carra, E. Costa Rios, E. C. Pereira, L. H. Mascaro // *Corrosion Science*. – 2013. – Vol. 76. – P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.04.054>
38. Warttinen A.-M. A tool for finding inclusion clusters in steel SEM specimens / A.-M. Warttinen, M. Harju, S. Tamminen, L. Maatta, T. Alatarvas, J. Rönning // *Open Engineering*. – 2020. – Vol. 10. – P. 642–648. DOI: 10.1515/eng-2020-0068.