

УДК 629.5.017.1

Коваленко І. В.

## ЕТАПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ЗАСТОСУВАННЯМ РІЗНОРІДНИХ СТАЛЕЙ

*На сучасному етапі розвитку кораблебудування у світі та Україні, приділяється увага до використання економічно легованих конструкційних матеріалів, які мають стабільні експлуатаційні властивості. При розробці нових технологій застосовуваних при виготовленні суднових допоміжних механізмів дуже важливо виконати дослідження властивостей з'єднань різнорідних сталей і утворену ними виражену хімічну, структурну і механічну неоднорідність. При проведенні аналізу даних факторів повинні враховуватися як властивості і призначення матеріалів конструкції, так і вибір технології її виготовлення.*

*Застосовувані при розробці даної технології методи зварювання повинні забезпечувати мінімізацію витрат і оптимізацію геометрії зварного шва. Також важливим фактором являються оцінка ступеня легування марок зварювальних сталей та рівень сумарної собівартості виготовлення виробу. Дослідження властивостей перехідних шарів шва і основного металу і їх вплив на кількість циклів навантаження при випробуваннях також являються ключовими. Тому мінімізація числа дифузійних прошарків в зоні сплаву знижують циклічну втому металу шва є основним фактором.*

*Важливим є порівняння зварних з'єднань різного ступеня і класу легування. Наприклад порівняння термічно-зміцненої і дисперсно-твердих аустенітних сталей. Для сталей даного класу термічна обробка після зварювання є обов'язковою для відновлення властивостей околошовної зони. Також важливим є підсумкова структура шва, яка безпосередньо визначає число циклів до початку першого етапу руйнування. В даному випадку, найкращі властивості з точки зору експлуатації у дрібнодисперсної аустенітної і перлитної структур. Особлива роль приділяється вибору режимів термічної обробки зварного з'єднання, вона залежить від рівня легування Ni, Mg, Cr як основного металу, так і зварного з'єднання. Також необхідно розглянути і величини експлуатаційних навантажень на суднові енергетичні установки.*

**Ключові слова:** *легуючі елементи, аустеніт, основний метал, наплавлений метал, перехідний шар, структура металу.*

**Постановка проблеми.** Різнорідні сталі являються універсальним матеріалом, який застосовується в багатьох секторах світової економіки: металургії, машинобудуванні, енергетиці, будівництві, оборонному комплексі, кораблебудуванні.

Також різнорідні сталі являються високотехнологічним матеріалом, який сприяє підвищенню ефективності виробництва, енергоефективності, матеріалоефективності, періоду і циклу експлуатації, та рівня якості виготовляється обладнання.

У світовій практиці, при використанні різнорідних сталей для виготовлення конструкцій, найбільшого поширення набули поєднання основного шару з конструкційної сталі, а робочого шару з низьколегованої матеріалу у якого підвищені експлуатаційні властивості.

Найбільш раціональним є використання різнорідних сталей в якості основного матеріалу при виготовленні вузлів суднових агрегатів. Даний вид конструкційного матеріалу

найбільш стійкий до впливу, як циклічних деформацій, так і агресивних середовищ. У багатьох джерелах представлений досвід застосування різнорідних сталей в якості основного матеріалу суднових металоконструкцій. При цьому вибір різнорідної сталі, що складається з шару конструкційного матеріалу і легованого шару мало висвітлений у науково-технічних джерелах. Не в повній мірі розкрито методи підбору класу сталі, ступеня легування і типу термічної обробки. Недостатньо описані процеси взаємодії легуючих елементів з перехідним шаром.

Тому питання отримання якісних зварних з'єднань в суднових металоконструкціях з двошарових сталей здатних тривалий час сприймати статичні навантаження і працювати в умовах підвищених температур і агресивних середовищ є досить актуальним.

Актуальність досліджень в цьому напрямку є важливим для багатьох компаній і підприємств які спеціалізуються на ремонті і виготовленні елементів суднового енергетичного устаткування. Результати досліджень наведені в даній статті допоможуть зменшити змінну частину собівартості виготовлення і ремонту суднового устаткування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При розгляді технології виготовлення вузлів суднових конструкцій з різнорідних сталей різними методами зварювання, основною вимогою вибору зварювального режиму є забезпечення заданого співвідношення проплавлення кожної зі зварювальних кромки. Але важливим залишається пошук технологічного підходу до зварювання плавленням з вимогою відомості до мінімуму частки основного металу в шві. Цей результат досягається процесом на режимах з мінімальною силою струму при помірних швидкостях.

Широко відомо, що способи зварювання плавленням, формування шва в яких йде тільки за рахунок проплавлення основного металу, впливають на властивості шва [1]. Причиною цього можуть бути грубозернисті структури схильні до охрупчення. Вирішення цього питання полягає в використанні автоматичного зварювання під флюсом при зварюванні шипів зі сталі типу сіхромаль до труб з маловуглецевої сталі до поверхні нагрівання котлів [2]. Даний підхід дозволяє стверджувати, що в швах за рахунок проплавлення матеріалу дроту утворюється однофазна феритна структура і вони стають крихкими після експлуатації в інтервалі температур 400-500 °С. Стійкість швів проти охрупчення не була помітно підвищена, коли ввели перед зварюванням операцію нікелювання зварної ванни [3]. Тому важливий пошук конструкційних матеріалів в яких нікель переходив в шов, тому додатково легують його що призводить до усунення однофазної великої феритної структури.

Актуальним залишається питання вибору зварювальних матеріалів. Від легування наплавленого металу істотно залежить можливість утворення в перехідних шарах шва тендітних структур і тріщин, а також інтенсивність розвитку в зоні сплаву кристалізаційних і дифузних шарів. У комбінованих суднових конструкціях метал шва по своїй міцності може задовольняти вимогам менш міцною зі сталей. Зазвичай зварні шви за механічними властивостями в жароміцних сталях близькі або навіть перевершують властивості основного металу [4]. Тому використання зварювальних матеріалів близького складу але менших по міцності, і з менш легованими складами задовольняє вимогам, що пред'являються до міцності суднових конструкцій. При цьому помітно спрощується технологія зварювання таких виробів і підвищується їх експлуатаційна міцність [5].

Тому необхідно виконати і сформулювати обґрунтування вибору в якості основного металу так і зварювальних матеріалів, для виготовлення суднових конструкцій. Найбільш

необхідне обґрунтування вибору матеріалів в з'єднаннях різнорідних перлитових і високохромистих сталей. Однак при зварюванні перлитових сталей з аустенітними існує небезпека утворення загартованих структур і тріщин в ділянках шва, що примикають до аустенітної сталі [6]. Тому в даному випадку необхідно застосувати високолеговані зварювальні матеріали які мають різну структуру після кристалізації.

Все це дає підстави стверджувати, що проведення аналізу та дослідження в цьому напрямку є актуальними.

**Метою дослідження.** У даній роботі основною метою є аналіз та обґрунтування забезпечення правильного підбору основного металу і зварювальних матеріалів при виготовленні суднових енергетичних установок вузлів з різнорідних сталей. Також необхідно виконати обґрунтування супутніх режимів термічної обробки.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- обґрунтувати вибір матеріалу і режиму термічної обробки з урахуванням основних і додаткових вимог вибору зварювального режиму, щодо забезпечення заданого співвідношення проплавлення кожної з зварювальних кромок, без виникнення мартенситних структур;

- структурувати вимоги до аустенітного матеріалу, суднових конструкцій з різними геометричними параметрами при стиковому зварюванні при переході від м'яких до жорстких режимів;

- визначити вплив легуючих елементів при різних методах зварювання плавленням на частку основного металу в шві за рахунок ведення процесу на режимах з мінімальною силою струму при помірних швидкостях.

**Основний матеріал дослідження.** При дослідженні процесу обґрунтування вибору матеріалів для зварювання перлитових сталей доцільно використовувати зварювальні матеріали, близькі за складом до менш легованої сталі [7]. Так як технологічна міцність перлитових швів знижується з підвищенням ступеня їх легування, то необхідно забезпечити відсутність в швах тріщин за рахунок пропорції елементів. У зварних з'єднаннях високохромистих мартенситних, феритних і ферито-аустенітних сталей, вибір електродних матеріалів для зварних з'єднань різнорідних високохромистих сталей визначаються рядом вимог. Найголовніша з них отримання швів без тріщин і відсутності в них тендітних складових [8]. При зварюванні цих сталей внаслідок високого вмісту в основному металі енергійного карбідотворюючого елемента - хрому - помітного розвитку дифузних шарів в зоні сплаву очікувати не слід. Дослідження зварювання 12-відсоткових хромистих мартенситних або мартенситно-феритних сталей різного легування, показало що для даного виду зварювання можуть застосовуватися електродні матеріали з легуванням хромом не менше 10 % для будь-якої зі зварювальних сталей. При автоматичному зварюванні під флюсом сталей даного класу або в вуглекислому газі, необхідно використовувати зварювальний дріт типу 08X14ГТ. Даний зварювальний дріт забезпечує високу циклічну стійкість до тріщин металу шва.

Режим підігріву для сталей вищевказаних класів слід вибирати за вимогами стали яка має найбільшу схильність до загартовування і має, як правило, підвищений вміст вуглецю. Його температура в залежності від жорсткості конструкції і вмісту в сталі вуглецю може коливатися в межах 200-400 °С [9]. Після зварювання обов'язковим є термічний відпустку при температурі 700-750 °С. Якщо товщина зварювальних елементів перевищує

30 мм, то експериментально доведено що до охолодження конструкції не нижче температури 100-150 °С необхідно поміщати її в термічну піч для нагрівання під відпустку.

Дослідження зварювання 12-відсоткових хромистих мартенситних сталей з високохромистого феритними і ферито-аустенітними сталями, показали що найбільш доцільно використовувати зварювальні матеріали ферито-аустенітного класу. Перевагою цих матеріалів в порівнянні з феритної (типу ЕФХ17) є мала схильність металу шва до зростання зерна і висока його пластичність в початковому стані після зварювання рис. 1.

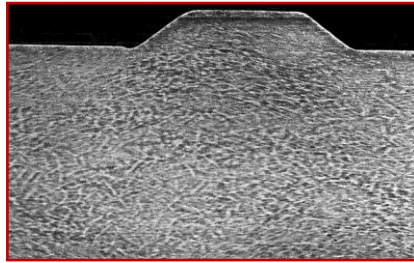


Рисунок 1 – Вид зварного з'єднання сталі з феритною структурою

Температура підігріву таких з'єднань при зварюванні повинна вибиратися з термічного режиму з розрахунку для 12 - відсоткової хромової сталі. Після зварювання необхідно виконати відпустку при в інтервалі 700-750 °С.

В ході термічної обробки слід вживати заходів до прискореного охолодження конструкції щоб уникнути прояву ефекту крихкості при температурі 475 °С [10]. Проведення відпустки помітно підвищує корозійну стійкість зварного з'єднання, перш за все в районі околшовної зони сталей ферито-аустенітного класу, що підтверджено результатами експерименту.

При зварюванні з'єднання 08X13 + 10XСНД застосовуються також аустенітні, електродні та присадочні матеріали. Температура підігріву може бути знижена при цьому на 100-150 °С, на відміну від необхідного режиму для високохромистих сталей [12] .

При проведенні дослідження визначено що температура підігріву при зварюванні перебувала в межах 130-180 °С. При необхідності викликані умовами забезпечення необхідного рівня властивостей і стійкості проти міжкристалітної корозії температура термічної відпустки виробу може бути підвищена до 800-850 °С.

Для попередньої оцінки придатності зварювальних матеріалів доцільно використовувати поділ аустенітних сталей по зварюваності на дві групи [13]. До першої з них відносяться найбільш поширені аустенітні сталі, в яких вміст основного легуючого елемента - хрому, перевищує або близько до змісту нікелю > 1 %. Ці сталі можуть зварюватися найбільш технологічними електродними матеріалами аустенітно-феритного класу. Друга група охоплює сталі з підвищеним запасом аустеніту, в яких вміст нікелю перевершує вміст хрому <1 % і які аустенітно-феритними електродними матеріалами зварюватись не можуть [14].

Вищевказані доводи були ключовими при розробці технології зварювання суднового вузла - елемента відцентрового насоса.

Особливий акцент необхідно зробити на те, що при виготовленні суднових конструкцій найбільш поширені хромо-молібденованадієві сталі марок 12X1МФ і 15X1М1Ф. Їх властивості більш стабільні через наявність в них вільних карбідотворюючих елементів

(Cr, Mo і V). У той же час, ці сталі при тривалих витримках на температурах вище 500 °С також схильні до утворення дифузійних шарів в зоні сплаву з аустенітним швом. Тому температура їх експлуатації повинна обмежуватися 500 °С.

Дослідження показали що найбільш стабільними перлітний сталлями є 5-процентні хромисті сталі марок X5, X5M і X5MФ, а також високолеговані сталі марок 15X2M2ФБС і 25X3BMФ (EN 415). При їх експлуатації для роботи в зоні температур до 550 – 580 °С можна не побоюватися помітного розвитку дифузійних шарів [15].

Також на підставі даних проведених досліджень можна відзначити, що гранична температура застосування в різномірних зварних з'єднаннях частки перлітної складової може бути підвищена:

а) при введенні перехідників з перлітної сталі з більш високим вмістом в них активних карбідоутворюючих елементів;

б) використання захисних облицювальних перлітових наплавлень на кромки перлітної сталі, при цьому облицювальний шар повинен мати більший вміст активних карбідоутворюючих елементів, ніж перлітний основний метал.

Вставки - перехідники з стабільних перлітових сталей найбільш доцільно застосовувати в стиках трубопроводів (рис. 2). З'ясовано що важливими для підготовки під зварювання є геометричні розміри (рис. 2) стиків:  $\alpha$ ,  $\beta$ - кути розділу основного металу, b, c - зазор і притуплення металу. Слід звернути увагу на те, що облицювання кромки зварювальних в з'єднаннях різномірних сталей (рис. 2) крім зменшення інтенсивності дифузійних шарів може використовуватися також для усунення підігріву при зварюванні. А також і зменшення небезпеки утворення тріщин при зварюванні конструкцій підвищеної жорсткості зі сталлями схильними до гартування [16].

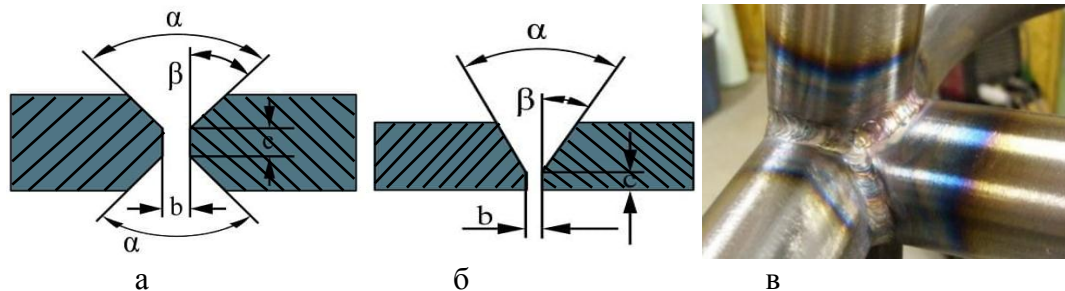


Рисунок 2 – Схеми розділок під зварювання з обробленими перлітними крайками:

- а – Х-подібна оброблення ; б – V - образна оброблення ;
- в – зварне з'єднання труб з розширеним кордоном сплаву

Результати вимірів визначили товщину облицювального шару при зварюванні незагартованих сталей в межах 5-6 мм. У випадках застосування сталей схильних до гартування товщина облицювального шару повинна бути збільшена до 9 мм. Метал облицювання при цьому не може бути піддано загартуванню при зварюванні. Схема обробки крайок зварного шва після нанесення облицювання, може бути обрана по аналогу стикового зварного з'єднання.

В результаті дослідження і розрахунків визначено вплив легуючих елементів при зварюванні плавленням на частку основного металу в шві. Відсоток основного наплавленого металу склав інтервал близько 56 - 60 %, а залишок обсягу 40 - 43 % - структура легуючих елементів і перехідні структури металу шва.



## ВИСНОВКИ

1. В ході дослідження та аналізу експлуатаційних властивостей матеріалів застосовуваних у суднових умовах, визначено максимально Рекомендований значення робочої температури для вуглецевих і хромомолібденових сталей з вмістом Cr 1 % і Mo 1 % на рівні 500 °С.

2. Визначено що при температурі експлуатації суднових конструкцій в інтервалі 450-500 °С не виникає розвитку дифузійних шарів в зоні сплаву хромомолібденової стали зі швом, обґрунтовано що ці умови експлуатації є оптимальними для сталей даного класу.

3. Визначено співвідношення пропорцій зварного шва і легуючих елементів при зварюванні плавленням на частку основного металу. Відсоток основного металу 60 %, а залишок обсягу 40 % - структура легуючих елементів і перехідні структури шва.

4. Сформульовано основні напрямки впровадженнь проведеного аналізу і досліджень. Розроблено технологію виготовлення і ремонту вузлів суднових енергетичних установок із застосуванням низьколегованих сталей і обґрунтованих видів термічної обробки.

### Список використаних джерел:

1. *Chigarev, V. V. Flux-cored strips for surfacing / V. V. Chigarev, A. G. Belik // Welding International. – 2012. – Vol. 26. – P. 975–979.*
2. *Фока, А. А. Судовой механик. Т. 1 / А. А. Фока. – Одесса : Феникс, 2010. – 1030 с.*
3. *Коваленко, И. В. Оценка эксплуатационной надежности судовых энергетических трубопроводов с применением методов математического моделирования и ультразвуковой дефектоскопии = Operation reliability evolution of the ship power pipelines with application of mathematical modeling and ultrasonic testing methods / И. В.Коваленко, В. В. Спиридонов // The scientific heritage. – 2016. – Vol. 6, N 6. – P. 88–91.*
4. *Chigarev, V. Optimization of the fractional composition and performance melting powder tapes with exothermic mixture in the filler / V. Chigarev, A. Belik, D. Zarechenskii // Welding International. – 2016. – Vol. 30, N 7. – P. 557–559.*
5. *Чигарев, В. В. Способ увеличения срока службы металлургического оборудования / В. В. Чигарев, И. В. Коваленко // Вісник Приаз. держ. техн. ун-ту : зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2010. – Вип. 20. – С. 231–235. – (Серія : Технічні науки).*
6. *Чигарев, В. В. Исследование эксплуатационных свойств биметаллических сварных соединений / В. В. Чигарев, И. В. Коваленко // Вісник Приаз. держ. техн. ун-ту : зб. наукових праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 161–165. – (Серія : Технічні науки).*
7. *Готальский, Ю. Н. Сварные соединения разнородных сталей / Ю. Н. Готальский. – М. : Техника, 1981. – 185 с.*
8. *Перспективы производства толстостенных биметаллических корпусов высокого давления / Б. Е. Патон [и др.] // Автоматическая сварка. – 2004. – № 1. – С. 30–39.*
9. *Закс, И. А. Сварка разнородных сталей / И. А. Закс. – М. : Статус-Эко, 1973. – 208 с.*
10. *Махненко, В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – Киев : Наукова думка, 2006. – 618 с.*
11. *Патон, Б. Е. Новые возможности автоматической сварки в машиностроении / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Е. Саенко // Металлургия машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 2–5.*
12. *Медовар, Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей / Б. И. Медовар. – М. :*

Машгиз, 1958. – 258 с.

13. *Mohammad Essa Ahmad* Application of flux-cored strips for ruggedization and reconditioning of machine parts / *Mohammad Essa Ahmad, V. V. Chigarev, A. G. Belik* // Modern Developments in Renewable Energy and Sustainability. – Kuala Lumpur, 2008. – P. 110–118.

14. *Стафаков, Ю. П.* Рост трещин вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия / *Ю.П. Стафаков, И. Л. Побаль, А. Г. Князева* // Физ. мезомеханика. – 2002. – № 1. – С. 81–88.

15. *Харин, В. М.* Судовые машинные установки устройства и системы / *В. М. Харин*. – 2010. – Одесса : Феникс. 2010. – 648 с.

16. *Muller, E.* Geschweisste Turbinenlaufer / *E. Muller* // BBC-Nachrichten. – 1965. – Vol. 47, N 6. – P. 277–288.

**Коваленко И. В.**

## ЭТАПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

*На современном этапе развития кораблестроения в мире и Украине, уделяется внимание к использованию экономно легированных конструкционных материалов, которые имеют стабильные эксплуатационные свойства. При разработке новых технологий применяемых при изготовлении судовых вспомогательных механизмов очень важно выполнить исследования свойств соединений разнородных сталей и образовавшуюся ими выраженную химическую, структурную и механическую неоднородность. При проведении анализа данных факторов должны учитываться как свойства и назначения материалов конструкции, так и выбор технологии ее изготовления.*

*Применяемые при разработке данной технологии методы сварки должны обеспечивать минимизацию затрат и оптимизацию геометрии сварного шва. Также важным фактором являются оценка степени легирования марок сварочных сталей и уровень суммарной себестоимости изготовления изделия. Исследование свойств переходных слоев шва и основного металла и их влияние на количество циклов нагрузки при испытаниях также являются ключевыми. Поэтому минимизация числа диффузных слоев в зоне сплава снижают циклическую усталость металла шва является основным фактором.*

*Важным является сравнение сварных соединений разной степени и класса легирования. Например сравнения термически-укрепленной и дисперсно-твердых аустенитных сталей. Для сталей данного класса термическая обработка после сварки является обязательным для восстановления свойств околошовной зоны. Также важно итоговая структура шва, непосредственно определяет число циклов до начала первого этапа разрушения. В данном случае, лучшие свойства с точки зрения эксплуатации в мелкодисперсной аустенитной и перлитной структуры. Особая роль отводится выбора режимов термической обработки сварного соединения, она зависит от уровня легирования Ni, Mg, Cr как основного металла, так и сварного соединения. Также необходимо рассмотреть и величины эксплуатационных нагрузок на судовые энергетические установки.*

**Ключевые слова:** *легирующие элементы, аустенит, основной металл, наплавленный металл, переходный слой, структура металла.*

## STAGES OF ENSURING RELIABILITY IN THE OPERATION OF SHIP POWER PLANTS WITH THE USE OF DISSIMILAR STEELS

*At the present stage of development of shipbuilding in the world and in Ukraine, attention is paid to the use of economically alloyed structural materials that have stable performance properties. When developing new technologies used in the manufacture of ship auxiliary mechanisms, it is very important to study the properties of joints of dissimilar steels and the pronounced chemical, structural and mechanical inhomogeneity formed by them. When conducting the analysis of these factors, both the properties and purpose of the construction materials and the choice of its manufacturing technology must be taken into account.*

*The welding methods used in the development of this technology should minimize costs and optimize the geometry of the weld. Another important factor is the assessment of the degree of alloying of welding steel grades and the level of the total cost of manufacturing the product. Studies of the properties of the transition layers of the weld and the base metal and their effect on the number of load cycles in the tests are also key. Therefore, minimizing the number of diffusion layers in the alloy zone reduces the cyclic fatigue of the weld metal is a major factor.*

*It is important to compare welded joints of different degrees and classes of alloying. For example, the comparison of thermally strengthened and dispersed hard austenitic steels. For steels of this class, heat treatment after welding is mandatory to restore the properties of the seam area. Also important is the final structure of the seam, which directly determines the number of cycles before the first stage of destruction. In this case, the best properties in terms of operation in fine austenitic and pearlitic structures. A special role is given to the choice of heat treatment modes of the welded joint, it depends on the level of doping of Ni, Mg, Cr as the base metal and the welded joint. It is also necessary to consider the magnitude of operating loads on ship power plants.*

**Keywords:** *alloying elements, austenite, base metal, weld metal, transition layer, metal structure.*

Рецензент: д-р техн. наук, проф. ДВНЗ «ПДТУ» Самоутугін С. С.  
Стаття надійшла 11.11.2019 р.