

ГАЗОНАСИЧЕНІСТЬ ВИСОКОЛЕГОВАНОГО НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ПРИ МОКРОМУ ПІДВОДНОМУ ЗВАРЮВАННІ ДУПЛЕКСНИХ СТАЛЕЙ У СОЛОНІЙ ВОДІ

Г.В. Фадєєва¹, С.Ю. Максимов¹, Jia Chuanbao², Д.В. Васильєв¹, А.А. Радзівєвська¹, Nan Yanfei²

¹ІЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: maksimov@paton.kiev.ua

²Institute of Materials Joining, Shandong University. E-mail: jiachuanbao@sdu.edu.cn

Проаналізовано фактори, які найбільше впливають на газонасиченість наплавленого металу при мокрому підводному зварюванні. Показано, що вміст кисню та водню в наплавленому металі залежить від потенційного вмісту газів, які вносяться за рахунок електродних матеріалів і основного металу, та від процесу дисоціації парів води в парогазовому міхурі, а також солоності води. Порівняно зі зварюванням у прісній воді з підвищенням солоності води до 30 % вміст водню зменшується, а вміст кисню – збільшується. У подальшому зі збільшенням солоності води до 40 % вміст водню в наплавленому металі знову збільшується, а вміст кисню – зменшується як при зварюванні на зворотній, так і на прямій полярності постійного струму. Ця залежність значніша при зварюванні на зворотній полярності постійного струму. Найбільший вміст водню спостерігається при зварюванні в прісній воді та воді солоністю 40 %. За вмістом кисню, навпаки, найменше значення в наплавленому металі одержано при зварюванні в прісній воді та воді солоністю 40 %. Окислювальний потенціал водного середовища більш ніж у 2 рази перевищує його значення при зварюванні на повітрі. Вміст водню при мокрому підводному зварюванні так само у 2...2,5 рази більший, ніж при зварюванні на повітрі. Бібліогр. 18, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: дуплексні сталі, мокре підводне зварювання, високолегований наплавлений метал, газонасиченість, вміст водню та кисню, дисоціація парів води, солоність води, покритий електрод, полярність постійного струму

Вступ. Одним із основних об'єктів застосування сучасних дуплексних сталей є конструкції та споруди, що експлуатуються у водному середовищі, а саме, у морській воді при видобутку та транспортуванні нафти та газу. Ці сталі мають високі значення механічних властивостей та є стійкими до загальної та локальної, насамперед, до точкової (пітингової) корозії, а також до корозійного розтріскування під напруженням. Дуплексні нержавікі сталі, які застосовані в глибоководних спорудах, більш схильні до водневого окрихчення, ніж при використанні на поверхні при атмосферному тиску. При вищому гідростатичному тиску в дуплексних сталях збільшується концентрація водню, що пояснюється збільшенням вмісту водню в «пастках» [1]. Ефективним способом виконання ремонтних робіт на підводних спорудах у морському середовищі є технологія мокрого підводного зварювання.

У той же час, механічні властивості та корозійна стійкість металу зварних з'єднань (особливо уразливою є ЗТВ) при мокрому підводному зварюванні погіршуються. Саме водне середовище, коли зварювання відбувається при прямому контакті з водою та здійснюється безпосередньо в парогазовому міхурі, є джерелом насичення металу швів

киснем і воднем за рахунок процесу дисоціації парів води, що впливає на якість зварних з'єднань. Тому питання визначення окислювального та наводнювального потенціалу водного середовища та його вплив на газонасичення наплавленого металу є актуальним і становить інтерес для проведення досліджень.

Термінологія та визначення. Аналіз попередніх досліджень. Постановка задачі. Згідно з [2] на сьогодні в якості основних показників водню в металі приймається його загальний вміст $[H]_{\text{заг}}$ і кількість дифузійно-рухомого водню $[H]_{\text{диф}}$. При цьому під $[H]_{\text{диф}}$ розуміють ту фракцію водню, яка десорбує з металу при 20 °С. У роботі зазначається, що ці уявлення повинні бути декілька змінені, особливо стосовно перерозподілу водню в зварних з'єднаннях. Автори пропонують під дифузійно-рухомим воднем розуміти весь водень металу $[H]_{\text{заг}}$. Тоді рухома сила концентраційного вирівнювання визначається різницею $[H] = [H]_{\text{заг}} - [H]_{\text{р}}$, де $[H]_{\text{р}}$ – рівноважна розчинність водню в металі. На властивості металу впливає надлишкова кількість водню, тобто позитивна частка $[H]_{\text{над}} = [H]_{\text{заг}} - [H]_{\text{р}}$. Надлишковий водень, переміщуючись у металі, тільки частково виходить із металу (це фракція водню, яку не точно називають дифузійно-рухомою і визначають за допомогою різних методик), а частково попадає в «пастки». Зазвичай останню фракцію позначають як залишковий водень.

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Тоді вміст залишкового водню визначається як:

$$[H]_{\text{зал}} = [H]_{\text{заг}} - [H]_{\text{диф}}$$

У морських спорудах поряд із дуплексними нержавіжкими сталлями широко використовуються низьколеговані сталі підвищеної міцності, для ремонту яких застосовується технологія мокрого підводного зварювання покритими електродами або самозахисним порошковим дротом, наплавлений метал яких забезпечує ферито-перлітну або аустенітну структуру. Цим пояснюється те, що на сьогодні багато досліджень проводяться з визначення впливу різних факторів, у тому числі водного середовища, на газонасиченість наплавленого металу з феритною та ферито-перлітною, а також аустенітною структурами при мокрому підводному зварюванні.

У [3] розглядається вплив глибини води на вміст дифузійного та залишкового водню у зварних з'єднаннях, виконаних мокрим дуговим зварюванням покритими електродами. Збільшення глибини води від 5 до 60 м при зварюванні призводить до підвищення кількості залишкового водню $[H]_{\text{зал}}$ більш ніж у 4 рази (від 16 до 78 мл/100 г), а вміст дифузійного водню при цьому знижується майже в 2 рази (від 70 до 40 мл/100 г) при зварюванні відповідними покритими електродами. Слід зазначити, що при зварюванні на глибині 5 м більшу частку від загального об'єму водню складає дифузійний водень, а на глибині 60 м навпаки – більша частка від загального водню – це залишковий водень [3]. У [4] також показано зниження вмісту дифузійного водню з глибиною води при зварюванні від 0,3 до 100 м. Крім того, наведено, що вміст залишкового водню майже постійний на глибинах від 0,3 до 30 м.

Збільшення зварювального струму та напруги спричиняє підвищення вмісту дифузійного водню $[H]_{\text{диф}}$ у металі шва. Автори це пояснюють тим, що підвищення режиму зварювання сприяє збільшенню кількості дисоційованої води й тим самим призводить до збільшення дифузійного водню в металі шва. У цьому дослідженні в якості основного металу використовувалася сталь з ферито-перлітною структурою, для зварювання якої застосовувалися покриті електроди, що забезпечують відповідну структуру наплавленого металу [3].

Вплив режиму зварювання покритими електродами на вміст дифузійного водню в наплавленому металі з ферито-перлітною структурою досліджували в [5]. Показано, що при збільшенні параметрів зварювання – струму та напруги дуги, вміст дифузійного водню збільшується як при зварюванні на прямій полярності, так і на зворотній, але

зварювання на зворотній полярності струму більшою мірою впливає на вміст дифузійного водню.

Водночас у [6] отримано прямо протилежні результати. У цьому дослідженні наведено, що збільшення напруги дуги, зварювального струму та солоності води призводить до зниження вмісту дифузійного водню, тоді як збільшення швидкості зварювання та довжини вильоту порошкового дроту збільшує вміст дифузійного водню в металі шва. Найбільший вплив на вміст дифузійного водню при мокрому підводному зварюванні має довжина вильоту порошкового дроту. При цьому наплавлений метал має ферито-перлітну структуру. Результати вимірювання дифузійного водню в наплавленому металі коливались від 25,85 до 44,12 мл/100 г. Авторами розроблено рівняння, в якому показано, що вміст дифузійного водню в наплавленому металі не може бути знижений технологічними методами нижче за 21 мл/100 г при мокрому підводному зварюванні порошковим дротом [6].

Вплив режимів зварювання та солоності води досліджували в [7]. Показано, що при збільшенні солоності води та зварювального струму вміст кисню в наплавленому металі збільшується, а вміст залишкового водню – зменшується. Збільшення напруги дуги та солоності води сприяє підвищенню вмісту як кисню, так і залишкового водню. При цьому солоність води складала 15 та 30 ‰. Це стосується газонасиченості при зварюванні низьколегованої сталі.

Одним із поширених прийомів зниження вмісту водню (особливо дифузійно-рухомого) в металі швів і ЗТВ зварних з'єднань низьколегованих сталей підвищеної міцності при мокрому підводному зварюванні є застосування високолегованих присадних матеріалів із аустенітною структурою. У [8] досліджували вміст дифузійно-рухомого водню в металі швів із різною структурою при мокрому підводному зварюванні. Вміст дифузійного водню в наплавленому металі після мокрого підводного зварювання може коливатися від 26 до 100 мл/100 г, що значно перевищує показники для сухого зварювання. Показано, що застосування покритих електродів, які забезпечують метал шва з аустенітно-феритною структурою (дуплексні шари), не дозволяють отримати вміст дифузійно-рухомого водню нижче за 11,2 мл/100 г металу шва. У високолегованому металі швів, які мають аустенітну структуру, внаслідок високої швидкості охолодження вміст дифузійно-рухомого водню є дуже низьким (менш ніж 5 мл/100 г) [8].

Такий самий висновок зроблено в [9], де наведено, що найменший вміст дифузійно-рухомо-

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 2205 (сертифікатні данні)

Номер за стандартом EN	Позначення за стандартом EN	Марка сталі	Вміст елементів, мас. %								
			C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	N
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	2205	0,018	1,936	0,03	0,0008	0,303	4,931	22,146	2,557	0,1515

го водню спостерігається в швах з аустенітною структурою. При мокрому підводному зварюванні порошковим дротом на оптимальному режимі вміст дифузійно-рухомого водню дорівнює 2...5 см³/100 г (або 2...5 мл/100 г), що складає невелику частку від вмісту залишкового водню в металі швів.

Зниження вмісту дифузійного водню також можливе за рахунок корегування шлакової системи порошкового дроту, яка забезпечує кращу криючу здатність шлаку крапель розплавленого металу й тим самим сприяє поліпшенню захисту від впливу водного середовища. При цьому вміст дифузійного водню у високолегованому наплавленому металі з аустенітною структурою складає 3,26 мл/100 г, тобто знижується до рівня, досягнутого при зварюванні на повітрі 3,25 мл/100 г [10].

У результаті аналізу досліджень [3–10] щодо впливу різноманітних факторів, таких як: параметри зварювання, глибина та солоність води, на газонасиченість наплавленого металу, в основному, на вміст водню, при мокрому підводному зварюванні можна зазначити, що в цих роботах саме водне середовище розглядається недостатньо досконало як джерело газонасиченості наплавленого металу.

Тому метою цього дослідження було вивчення впливу водного середовища, а також солоності води та полярності постійного струму на газонасиченість високолегованого наплавленого металу при мокрому підводному зварюванні дуплексних сталей, а також кількісне визначення частки вмісту кисню та водню, що вносяться за рахунок процесу дисоціації парів води в парогазовому міхурі.

Матеріали та методи дослідження. Беручи до уваги те, що вміст $[H]_{\text{диф}}$ у високолегованому наплавленому металі з аустенітною структурою при мокрому підводному зварюванні має досить низькі значення, які не перевищують 5 мл/100 г, у наших дослідженнях ми визначали вміст залишкового водню $[H]_{\text{зал}}$, припускаючи, що вміст залишкового водню майже дорівнює вмісту загального водню в наплавленому металі $[H]_{\text{заг}}$. На пластини з дуплексної сталі 2205 виконували багат шарові (4-х шарові) наплавлення покритими електродами, які забезпечували високолегований наплавлений метал типу 08X19H12 на глибині 0,5 м у воді різної солоності. Хімічний склад основного металу сталі 2205 наведено в табл. 1, а хімічний склад наплавленого

Таблиця 2. Хімічний склад металу, наплавленого покритими електродами

Тип наплавленого металу	Вміст елементів, мас. %						
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
08X19H12	0,06	1,58	0,03	0,0025	0,40	12,40	19,08

металу при зварюванні покритими електродами – у табл. 2. Для зварювання застосовували покриті електроди основного типу діаметром 4 мм. Наплавлення виконували на прямій та зворотній полярностях постійного струму. Солоність води: 0; 10; 20; 30 і 40 ‰. Синтетичну морську воду різної солоності імітували розчиненням необхідної кількості морської солі в одному літрі води, а саме: 10; 20; 30 і 40 г/л. Загальний об’єм води складав 9 л. Режим наплавлення: струм $I_{\text{зв}} = 180...200$ А, зворотна та пряма полярність, напруга $U_{\text{д}} = 28...32$ В.

Для оцінки вмісту кисню та залишкового водню із верхніх шарів наплавленого металу виготовляли циліндричні зразки розміром 5×5 мм. Вміст кисню визначали на аналізаторі моделі ТС-436 Лесо (США). Принцип дії аналізатора заснований на відновлювальному плавленні зразка в печі в потоці газу-носія. Вміст залишкового водню визначали також методом відновлювального плавлення на аналізаторі Лесо RH-2.

Результати та обговорення. У табл. 3 наведено результати аналізу газонасиченості високолегованого наплавленого металу при мокрому підводному зварюванні покритими електродами у воді різної солоності та газонасиченість при зварюванні на повітрі, а також значення вмісту кисню та водню в основному металі та стрижнях електродів. Графічну інтерпретацію даних табл. 3 наведено на рис. 1, 2. Для порівняння та наочності на рис. 1, 2 також наведено, крім впливу солоності води на газонасиченість наплавленого металу при мокрому підводному зварюванні, й газонасиченість при зварюванні на повітрі та вміст кисню та водню в основному металі та стрижнях електродів.

Для пояснення впливу водного середовища на газонасиченість наплавленого металу розглянемо докладніше процес мокрого підводного зварювання, яке має деякі особливості. Необхідною умовою існування дуги є наявність парогазового міхура, що утворюється навколо дуги. Атмосфера парогазового міхура розбавляється парами металу, парами речовин і газами, що виділяються з компонентів шихти порошкового дроту або покриття електродів, та продуктами дисоціації парів води.

Таблиця 3. Газонасиченість високолегованого металу, наплавленого покритими електродами, при мокрому підводному зварюванні у солоній воді

№ з/п	Маркування зразків	Вид середовища, полярність струму	Вміст кисню, [O]		Вміст водню, [H]	
			мас. %	ppm	ppm	см ³ /100 г
1	1.1.	повітря, зворотна (+)	0,0290	290	14,2	15,90
2	1.2.	повітря, пряма (-)	0,0227	227	14,5	16,24
3	2.1.	прісна вода, зворотна (+)	0,0570	570	36,0	40,32
4	2.2.	прісна вода, пряма (-)	0,0620	620	35,3	39,54
5	3.1.	солоня вода 10 %, зворотна (+)	0,0715	715	25,6	28,67
6	3.2.	солоня вода 10 %, пряма (-)	0,0927	927	23,5	26,32
7	4.1.	солоня вода 20 %, зворотна (+)	0,0635	635	23,2	25,98
8	4.2.	солоня вода 20 %, пряма (-)	0,0598	598	24,2	27,10
9	5.1.	солоня вода 30 %, зворотна (+)	0,0648	648	22,5	25,20
10	5.2.	солоня вода 30 %, пряма (-)	0,0710	710	24,6	27,44
11	6.1.	солоня вода 40 %, зворотна (+)	0,0540	540	37,7	42,22
12	6.2.	солоня вода 40 %, пряма (-)	0,0510	510	31,8	35,62
13	ОМ	–	0,0051	51	3,82	4,28
14	стрижень електрода	–	0,0248	248	16,1	18,03

Примітка: 1 ppm = 10⁻⁴ % = 1,12 см³/100 г (мл/100 г)

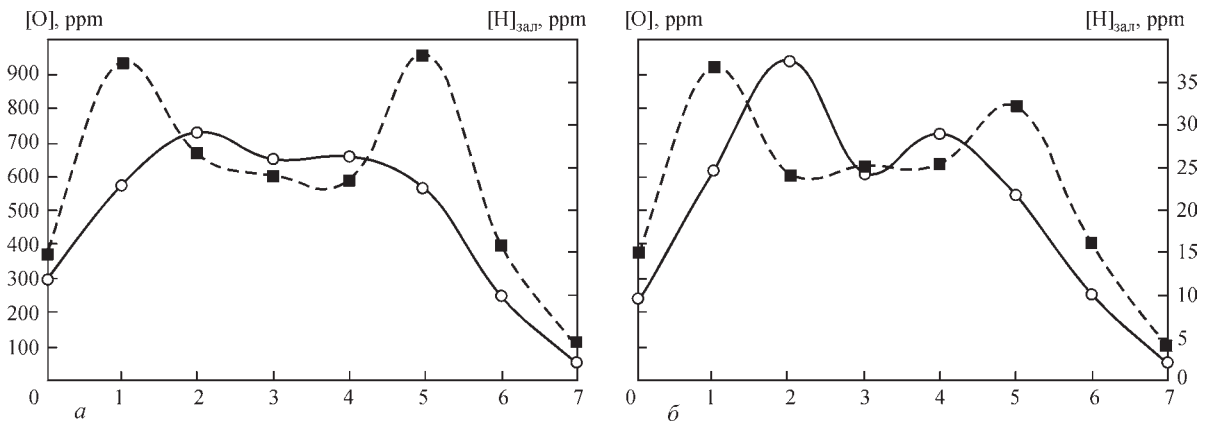


Рис. 1. Газонасиченість високолегованого наплавленого металу при мокрому підводному зварюванні в залежності від солоності води та полярності постійного струму: а – зворотна полярність (+), б – пряма полярність (-), 0 – зварювання на повітрі; 1–5 – солоність води від 0 до 40 % відповідно (1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40 %); 6 – стрижень електрода; 7 – основний метал, о – кисень, ■ – водень

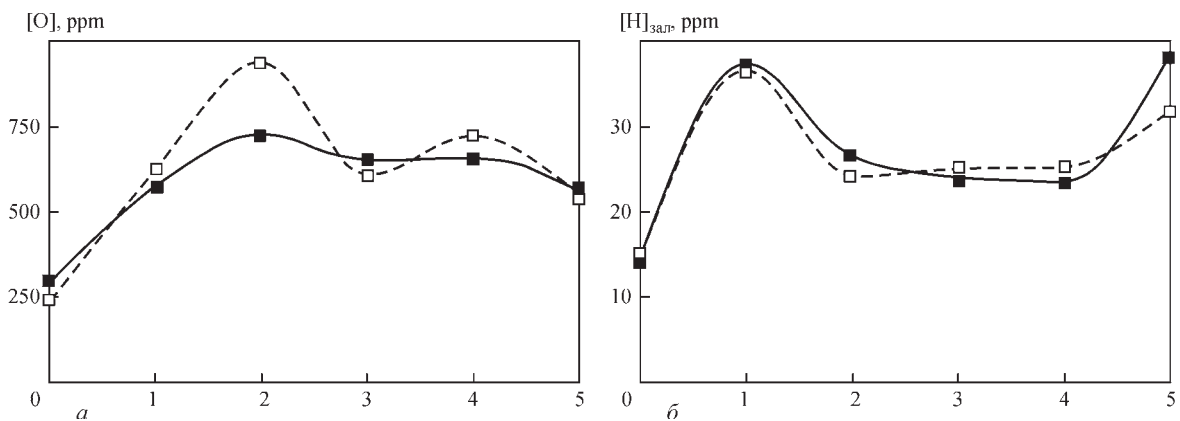


Рис. 2. Газонасиченість високолегованого наплавленого металу при мокрому підводному зварюванні в залежності від солоності води та полярності постійного струму: а – вміст кисню, б – вміст водню, 0 – зварювання на повітрі; 1–5 – солоність води від 0 до 40 % відповідно (1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40 %), □ – пряма полярність, ■ – зворотна полярність

Міхур постійно відтворюється самою дугою та обмежується від навколишнього середовища поверхнею, яка є ізотермічною границею розподілу двох фаз (вода–пара) [11–13]. Розглянемо ще один фактор впливу на теплообмін між дугою та середо-

вищем – це ступінь дисоціації води. На рис. 3 наведено розрахунковий склад продуктів дисоціації води в залежності від температури [14].

У [15] проведено уточнений розрахунок термічної дисоціації води. У продуктах дисоціації водня-

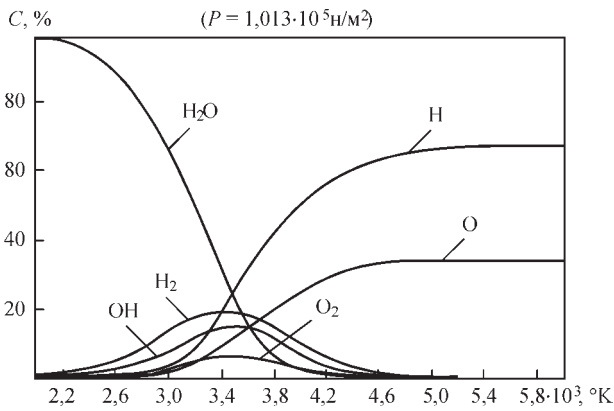


Рис. 3. Зміна концентрації H_2O , O_2 , OH , H_2 , H і O в атмосфері водяної пари в залежності від температури [14]

ної пари крім основних станів кисню та водню у вигляді молекул O_2 і H_2 можливі атоми O і H та інші молекули, наприклад, OH і HO_2 , а при вищих температурах можлива й поява іонів. Проте енергетичні затрати на створення іонів суттєво вищі, ніж на створення атомів. Тому електрони та іони в помітній кількості можуть створюватися при вищих температурах, наприклад, у плазмі дуги. У табл. 4 наведено данні результатів розрахунку дисоціації води та склад парогазової атмосфери при $\Sigma P = 1$ атм для температур 2000 і 3000 °К. Ці температури відповідають температурі зварювальної ванни й навіть температурі, що мають краплі розплавленого металу.

Ступінь дисоціації водяної пари при 2000 °К відносно невелика та складає 0,7 %, а при підвищенні температури до 3000 °К – 24,3 %. При зниженні вихідного тиску водяної пари або при її розчиненні інертними газами ступінь дисоціації може бути суттєво підвищена навіть при 2000 °К. У цьому напрямку буде впливати й додавання водню до водяної пари. Наприклад, при $P_{H_2} / P_{H_2O} = 1,0$ і $0,1$ відношення P_O / P_{O_2} при 2000 °К дорівнює 2,3 і 21,0 відповідно, тобто концентрація атомарного кисню перевищує концентрацію молекулярного кисню [15].

Аналізуючи склад парогазової суміші при 3000 °К, можна зазначити, що вона на 64,75 % складається з водяної пари H_2O , на 13,30 % з H_2 та містить 5,75 % H і 2,4 % O , ще 9,25 % OH . У той же час, при 2000 °К вміст атомарного водню дорівнює 0,012 %, а атомарного кисню – 0,003 %. Температура 2000 °К відповідає температурі зварювальної ванни, а кисень і водень поглинається

розплавленим металом саме у вигляді атомарного стану. Данні, що наведені в табл. 4 і на рис. 3, співпадають при температурах 2000 і 3000 °К майже повністю. На рис. 3 при підвищенні температури до 4200 °К склад газової суміші складається з приблизно 30 % атомарного кисню і 58 % атомарного водню. Навпаки, вміст молекулярного кисню та молекулярного водню значно менше. Тобто при цій температурі (4200 °К), яку майже мають поверхневі зони плазми дуги, або зони, що до неї прилягають, майже вся кількість водяної пари дисоціювала зі створенням атомарних водню та кисню. Наприклад, водень дисоціює на 90 % при 4700 °К. Враховуючи присутність високотемпературного джерела (зварювальної дуги) та наявності високих конвективних потоків, що мають місце в парогазовому міхурі, можна припустити, що навіть при меншій середній температурі в міхурі буде присутня значна кількість атомарного водню та кисню. При температурі 6000 °К, яка відповідає температурі плазмі дуги, будуть вже створюватися іони водню H^+ та кисню O^+ .

Теплоємність парогазової суміші, що міститься в міхурі при мокрому підводному зварюванні, буде значно більшою (враховуючи, що в складі міститься велика кількість водню), ніж теплоємність вихідного середовища, тобто води. Отже склад парогазової суміші, що міститься в парогазовому пузирі, внаслідок високих значень теплоємності ще більшою мірою забирає тепло від стовпа дуги та сприяє його стисненню (контрагуванню), ніж саме водне середовище, яке є лише тільки вихідним середовищем, що створює відповідний склад парогазового пузиря.

Таким чином, створюються умови як для процесів, що протікають із поглинанням енергії (тепла) – процеси дисоціації та іонізації, так і зворотні, що протікають з виділенням тепла – процеси рекомбінації та створення нових молекул водяної пари з окремих продуктів дисоціації її молекул, а саме, атомів, іонів (H_2 ; O_2 ; OH ; H ; O) (рис. 3, табл. 4). Таким чином, склад парогазового міхура в різних його ділянках зовсім різних. Високий вміст атомарних O і H та іонів H^+ і O^+ у реакційній зоні в діапазоні температур $T = 3000 \dots 4200$ °К, які відповідають ділянкам, що прилягають до зовнішніх зон стовпа дуги та приелектродним областям, призводить до інтенсивного розчинення цих газів у

Таблиця 4. Склад продуктів і ступінь дисоціації води [15]

T, °K	Склад, об. %						Ступінь дисоціації, %		
	H ₂ O	H ₂	O ₂	OH	H	O	H ₂ O	O ₂	H ₂
2000	98,92	0,59	0,23	0,24	0,012	0,003	0,7	0,68	1,05
3000	64,75	13,30	4,55	9,25	5,75	2,4	24,3	20,9	17,8

металі шва. Кисень взаємодіє з розплавленим металом, що сприяє практично повному вигоранню (окисненню) легуючих елементів зі шва при зварюванні низьколегованих сталей. Вміст кисню в металі шва при механізованому зварюванні низьколегованих сталей доходить до 0,22 мас. % [5].

Результати з визначення окислювального та наводнювального потенціалу водного середовища, які отримані в даному дослідженні, співпадають з нашими попередніми дослідженнями [16]. У роботі наведено, що окислювальний потенціал водного середовища майже в 2 рази перевищує його значення при зварюванні на повітрі. Зварювання виконували самозахисним порошковим дротом діаметром 1,8 мм, що забезпечує високолегований наплавлений метал. Встановлено, що при мокрому підводному зварюванні високолегованих сталей типу 18-10 самозахисним порошковим дротом вміст кисню в металі шва досягає 0,15 мас. % при недостатній кількості газотворюючих компонентів в осерді порошкового дроту. У той же час, при якісному захисті від навколишнього середовища та достатній кількості газотворюючих компонентів вміст кисню при мокрому підводному зварюванні не перевищує 0,06 мас. % і знаходиться майже в такій же кількості, як і при зварюванні на повітрі [16]. Тобто ступінь захисту від зовнішнього середовища, чи то при зварюванні на повітрі, чи то при мокрому підводному зварюванні, залежить як від кількості газотворюючих компонентів, так і від типу шлакової системи електродних присадних матеріалів. Ті ж самі данні було опубліковано в [17].

Таким чином, як при зварюванні низьколегованих сталей, так і високолегованих нержавяких сталей підтверджується окислювальний вплив водного середовища при мокрому підводному зварюванні та підтверджується високий ступінь дисоціації водяної пари в парогазовому міхурі. Кисень, який не вступив у взаємодію із залізом і легуючими елементами, з'єднується з воднем, утворюючи водяну пару. Ця реакція відбувається в зонах парогазового міхура, що найбільш віддаленні від зон стовпа дуги, тобто близько до поверхні розподілу пари води \leftrightarrow вода. Гази, що відходять із реакційної зони, майже повністю складаються з водню (88...94 %) і незначної кількості кисню (0,07...0,10 мас. %) [5].

При розведенні парогазового міхура парами металів, мінералів із осердя порошкового дроту та покриття електродів, як у випадку мокрого підводного зварювання, відбувається зниження вихідного тиску водяної пари, особливо в ділянках, які прилягають до стовпа дуги, що сприяє підвищенню ступеня її дисоціації. У результаті високого

ступеня дисоціації парів води в парогазовому міхурі створюються умови для насичення наплавленого металу киснем і воднем.

У [18] досліджували вплив солоності води на характер розподілу водню, кисню, азоту та вуглецю в низьколегованому металі шва та ЗТВ. Показано, що з підвищенням солоності води до 30 % вміст водню, азоту та вуглецю в металі шва зменшується, а концентрація кисню декілька збільшується. Ці данні збігаються з результатами, отриманими в нашому дослідженні.

Аналізуючи данні, які наведено в табл. 3 і на рис. 1, 2 та в [16, 17], можна визначити основні фактори, які найбільше впливають на газонасиченість наплавленого металу при мокрому підводному зварюванні та зробити наступні **висновки**:

1. Показано, що загальний вміст кисню та водню в наплавленому металі залежить від потенційного вмісту газів, які вносяться за рахунок електродних матеріалів і основного металу, та від процесу дисоціації парів води в парогазовому міхурі, а також солоності води.

2. Вміст кисню та водню в наплавленому металі залежить від концентрації солі у воді. Порівняно зі зварюванням у прісній воді з підвищенням солоності води до 30 % вміст водню зменшується, а вміст кисню – збільшується. У діапазоні солоності води 10...30 % вміст кисню та водню залишається майже постійним. У подальшому, зі збільшенням солоності води до 40 %, вміст водню в наплавленому металі знову збільшується, а вміст кисню – зменшується.

3. Найбільший вміст водню спостерігається при зварюванні в прісній воді та воді солоністю 40 %. Вміст кисню, навпаки, має найменше значення в наплавленому металі при зварюванні в прісній воді та у воді солоністю 40 %.

4. Полярність постійного струму при зварюванні не має дуже значного впливу на вміст кисню та залишкового водню в наплавленому металі, але залежність від концентрації солі у воді. Ця залежність значніша при зварюванні на зворотній полярності постійного струму. Полярність постійного струму необхідно обирати виходячи з необхідності забезпечення нижчих значень вмісту кисню або водню. Нижчі значення кисню забезпечуються при зварюванні на зворотній полярності постійного струму. На вміст водню полярність постійного струму майже не впливає при зварюванні в діапазоні режимів, використаних у даному дослідженні.

5. Більша частка вмісту водню в наплавленому металі при мокрому підводному зварюванні отримується за рахунок процесу дисоціації пари води і

дорівнює майже 70 % від усього залишкового вмісту водню. При зварюванні у воді солоністю 10...30 ‰ ця частка зменшується й дорівнює 50 %, тобто складає половину від загального вмісту. По вмісту кисню спостерігається така ж сама залежність.

6. Для зниження газонасиченості наплавленого металу як при зварюванні на повітрі, так і при мокрому підводному зварюванні необхідно зменшувати кількість потенціального кисню та водню, що вносяться електродними присадними матеріалами.

7. Окислювальний потенціал водного середовища майже в 2 рази перевищує його величину при зварюванні на повітрі.

8. Вміст водню при мокрому підводному зварюванні, так само, від 2 до 2,5 разів більший, ніж при зварюванні на повітрі.

9. Вміст кисню та залишкового водню в наплавленому металі залежить від ступеня захисту від навколишнього середовища, який, у свою чергу, визначається типом шлакової системи газошлакоутворюючих складових порошкового дроту та покритих електродів.

10. Шлакова система покриття електродів сприяє зменшенню вмісту залишкового водню в наплавленому металі. Зварювання на повітрі – вміст $[H]_{\text{зал}} = 14,2$ ppm (зворотна полярність струму) та 14,5 ppm (пряма полярність струму), а вміст залишкового водню в металі електродного стрижня дорівнює $[H]_{\text{зал}} = 16,1$ ppm.

11. Вміст кисню при зварюванні на повітрі значно відрізняється від вмісту кисню в металі стрижня електродів. Це свідчить про те, що шлакова система забезпечує задовільний ступінь захисту від окислювального потенціалу повітря.

Роботу виконано в рамках програми: The National Key Research and Development Program of China, grant № 2023YFE0201300

Список літератури

1. Hydrogen diffusion and concentration in 2205 duplex stainless steel under hydrostatic pressure. <http://ukdiss.com>
2. Кархин В.А., Мнушкин О.С., Петров Г.Л. (1980) Кинетика перераспределения водорода в сварных соединениях. *Автоматическая сварка*, **6**, 28–32.
3. Klett, J., Hecht-Linowitzki, V., Grünzel, O., Schmidt, E., Maier, H.J., Hassel, T. (2020) Effect of the water depth on the hydrogen content in SMAW wet welded joints. *SN Applied Sciences*, **2**, 1269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3066-8>
4. da Silva, W.C.D, Ribeiro, L.F, Bracarense, A.Q, Pessoa, E.C.P (2012) Effect of the hydrostatic pressure in the diffusible hydrogen at the underwater wet welding. In: *ASME 2012 31-st international conference on ocean, offshore and arctic engineering OMAE2012-83002 (44939)*, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE201283002>
5. Максимов С.Ю. (2006) Влияние водной среды на характер физико-металлургических процессов дуговой сварки низколегированных сталей : дис. ... докт. техн. наук: Киев.
6. Świerczyńska, A., Fydrych, D., Rogalski, G. (2017) Diffusible hydrogen management in underwater wet self-shielded flux

7. Кононенко В.Я. (1991) Влияние солиности воды и параметров режима механизированной подводной сварки на содержание водорода и кислорода в металле шва. *Автоматическая сварка*, **3**, 69–71.
8. Klett, J., Mattos, I.B.F., Maier, H.J., da Silva, R.H.G., Hasse, T. (2021) Control of the diffusible hydrogen content in different steel phases through the targeted use of different welding consumables in underwater wet welding. *Materials and Corrosion*, **72(3)**, 504–516. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.202011963>
9. Аснис А.Е., Игнатушенко А.А., Дьяченко Ю.В. (1983) Меры снижения содержания водорода в зоне термического влияния при механизированной подводной сварке. *Автоматическая сварка*, **8**, 1–4.
10. Guo, N., Zhang, X., Fu, Y., Luo, W., Chen, H., He, I.L. (2023) A novel strategy to prevent hydrogen charging via spontaneously molten-slag-covering droplet transfer mode in underwater wet FCAW. *Materials & Design*, **226**, 111636. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111636>
11. Мадатов Н.М. (1965) О свойствах парагазового пузыря вокруг дуги при сварке под водой. *Автоматическая сварка*, **12**, 25–29.
12. Авилов Т.И. (1952) Исследования процесса сварки под водой. *Сварочное производство*, **5**, 12–14.
13. Кононенко В.Я. (1996) Металлургические основы сварки в водной среде порошковыми проволоками. *Автоматическая сварка*, **9**, 22–26.
14. Фролов В.В., Винокуров В.А., Волченко В.Н., Парахин В.А., Арутюнова И.А. (1970) *Теоретические основы сварки*. Под ред. В.В. Фролова. М., Высшая школа.
15. Куликов И.С., Ростовцев С.Т., Григорьев Э.Н. (1978) *Физико-химические основы процесса восстановления окислов*. М., Наука.
16. Ющенко К.А., Каховський Ю.М., Фадеева Г.В., Максимов С.Ю. (2006) Самозахисний порошковий дріт для підводного зварювання високолегованих сталей. *Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2000–2006 рр. «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкції споруд та машин»*, Київ, 532–537.
17. Каховський М.Ю. (2015) Вплив водного середовища на газонасиченість металу зварного шва під час підводного зварювання сталі 12Х18Н10Т. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **6(51)**, 83–86.
18. Смяян О.Д., Кононенко В.Я. (1987) Влияние концентрации солей в морской воде на распределение водорода, азота, углерода и кислорода в сварном соединении, выполненном под водой. *Автоматическая сварка*, **1**, 75–76.

References

1. Hydrogen diffusion and concentration in 2205 duplex stainless steel under hydrostatic pressure. <http://ukdiss.com>
2. Karkhin, V.A., Mnushkin, O.S., Petrov, G.L. (1980) Kinetics of hydrogen redistribution in welded joints. *Automatic Welding*, **6**, 28–32 [in Russian].
3. Klett, J., Hecht-Linowitzki, V., Grünzel, O., Schmidt, E., Maier, H.J., Hassel, T. (2020) Effect of the water depth on the hydrogen content in SMAW wet welded joints. *SN Applied Sciences*, **2**, 1269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3066-8>
4. da Silva, W.C.D, Ribeiro, L.F, Bracarense, A.Q, Pessoa, E.C.P (2012) Effect of the hydrostatic pressure in the diffusible hydrogen at the underwater wet welding. In: *ASME 2012 31-st Intern. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2012-83002 (44939)*, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE201283002>
5. Maksimov, S.Yu. (2006) *The influence of the aqueous environment on the nature of physical and metallurgical processes of arc welding of low-alloy steels*: PhD Thesis: Kyiv [in Russian].
6. Świerczyńska, A., Fydrych, D., Rogalski, G. (2017) Diffusible hydrogen management in underwater wet self-shielded flux

- cored arc welding. *Int. J. Hydrog Energy*, 42(38), 24532–24540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.225>
7. Kononenko, V.Ya. (1991) The influence of water salinity and parameters of mechanized underwater welding on the content of hydrogen and oxygen in the weld metal. *Automatic Welding*, 3, 69–71 [in Russian].
 8. Klett, J., Mattos, I.B.F., Maier, H.J., da Silva, R.H.G., Hasse, T. (2021) Control of the diffusible hydrogen content in different steel phases through the targeted use of different welding consumables in underwater wet welding. *Materials and Corrosion*, 72(3), 504–516. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.202011963>
 9. Asnis, A.E., Ignatushenko, A.A., Dyachenko, Yu.V. (1983) Measures to reduce hydrogen content in the heat-affected zone during mechanized underwater welding. *Automatic Welding*, 8, 1–4 [in Russian].
 10. Guo, N., Zhang, X., Fu, Y., Luo, W., Chen, H., He, I.L. (2023) A novel strategy to prevent hydrogen charging via spontaneously molten-slag-covering droplet transfer mode in underwater wet FCAW. *Materials & Design*, 226, 111636. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111636>
 11. Madatov, N.M. (1965) On the properties of the vapor-gas bubble around the arc during underwater welding. *Automatic Welding*, 12, 25–29 [in Russian].
 12. Avilov, T.I. (1952) Research of the underwater welding process. *Svarochnoye proyzvodstvo*, 5, 12–14 [in Russian].
 13. Kononenko, V.Ya. (1996) Metallurgical principles of welding in an aqueous environment with flux-cored wires. *Automatic Welding*, 9, 22–26 [in Russian].
 14. Frolov, V.V., Vinokurov, V.A., Volchenko, V.N., Parakhin, V.A., Arutyunova, I.A. (1970) *Theoretical foundations of welding*. Ed. by V.V. Frolov. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
 15. Kulikov, I.S., Rostovtsev, S.T., Grigoriev, E.N. (1978) *Physicochemical foundations of the oxide reduction process*. Moscow, Nauka [in Russian].
 16. Yushchenko, K.A., Kakhovsky, Yu.M., Fadeeva, G.V., Maksimov, S.Yu. (2006) Self-healing powder grind for underwater welding of high-alloy steels. In: *Collection of scientific articles based on the results published in 2000–2006 on Problems of resource and operational safety of the construction of vessels and machines*, Kyiv, 532–537 [in Ukrainian].
 17. Kakhovsky, M.Yu. (2015) Influx of aqueous media on gas saturation of weld metal during underwater welding of steel 12X18H10T. *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, 6(51), 83–86 [in Ukrainian].
 18. Smiyan, O.D., Kononenko, V.Ya. (1987) The influence of salt concentration in seawater on the distribution of hydrogen, nitrogen, carbon and oxygen in a welded joint made underwater. *Automatic Welding*, 1, 75–76 [in Russian].

GAS SATURATION OF HIGH-ALLOYED WELDING METAL DURING WET UNDERWATER WELDING OF DUPLEX STEELS IN SALT WATER

G.V. Fadeeva¹, S.Yu. Maksimov¹, Jia Chuanbao², D.V. Vasiliev¹, A.A. Radziyevska¹, Han Yanfei²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: maksimov@paton.kiev.ua

²Institute of Materials Joining, Shandong University. E-mail: jjachuanbao@sdu.edu.cn

The factors that most influence the gas saturation of the deposited metal during wet underwater welding are analyzed. It is shown that the oxygen and hydrogen content in the deposited metal depends on the potential content of gases introduced by electrode materials and the base metal, and on the process of dissociation of water vapor in the vapor-gas bubble, as well as the salinity of the water. Compared to welding in fresh water, with an increase in water salinity to 30 ‰, the hydrogen content decreases and the oxygen content increases. Further, with an increase in water salinity to 40 ‰, the hydrogen content in the deposited metal increases again, and the oxygen content decreases both in reverse and direct current welding. This dependence is more significant when welding with reverse polarity of direct current. The highest hydrogen content is observed when welded in fresh water and water with a salinity of 40 ‰. In terms of oxygen content, on the contrary, the lowest value in the deposited metal was obtained when welded in fresh water and water with a salinity of 40 ‰. The oxidizing potential of the aqueous medium is more than 2 times higher than its value during welding in air. The hydrogen content during wet underwater welding is also 2...2.5 times higher than during welding in air. 18 Ref., 4 Tabl., 3 Fig.

Keywords: duplex steels, wet underwater welding, high-alloyed weld metal, gas saturation, hydrogen and oxygen content, water vapor dissociation, water salinity, coated electrode, DC polarity

ORCID

Г.В. Фадеева <https://orcid.org/0009-0003-8142-0110>, С.Ю. Максимов – <https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>,
 Jia Chuanbao – <https://orcid.org/0000-0002-6028-6528>, Д.В. Васильев <https://orcid.org/0000-0002-4629-162X>,
 А.А. Радзієвська <https://orcid.org/0009-0002-7718-9668>, Han Yanfei – <https://orcid.org/0000-0001-8598-4413>,

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

С.Ю. Максимов

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: maksimov@paton.kiev.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

Г.В. Фадеева, С.Ю. Максимов, Jia Chuanbao, Д.В. Васильев, А.А. Радзієвська, Han Yanfei (2026) Газонасиченість високолегованого наплавленого металу при мокрому підводному зварюванні дуплексних сталей у солоній воді. *Автоматичне зварювання*, 03, 03–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.02.01>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 07.11.2025

Отримано у переглянутому вигляді 23.01.2026

Підписано до друку 14.05.2026

Оприлюднено 20.05.2026