

**Larysa Kryvoblotska**, Assoc. Prof., PhD in Physics and Mathematics  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Stress State of Flexible Plates with a Hole**

The article is dedicated to solving of problems of nonlinear mechanics of plates and shells – problems about stress-deformed state of flexible plates with hole under action of moment loading on “infinity”.

Solve of problems is offered to find with method of expansion of parameter of the external loading. During the solving was determined, that the value of bending and power descriptions unlimitedly increase at breaking from the edge of hole. For elaboration of regularization methods was conducted the survey and analysis of problems from different fields of mechanics. On the basis of this survey was formed the new approach to the solving of problem of regularization: it is offered to change the usual notions about particular sum of series and methods of their summing. It is created such methods of linear and nonlinear summing, when in summable functions the arbitrary parameters and functions enter. On basis of this method was solved the new geometrical-nonlinear problems of plates and shells mechanics in nonaxes-symmetrical axes-symmetrical arrangement about bending on “infinity” with moment loading of plates with hole. It is established, that the finding numeral data, diagrams do not conflict with the usual notions about stress-deformed conditions of plates with hole; definite mechanical effects are got. The methods of regularization are approved on test problems.

It is grounded mathematically, that the got solutions to equilibrium equations with some asymptotical exactness and exactly to the linear limit conditions, if the operators of initial problem will be polylinear.

**dimensionless parameter, geometric nonlinearity, flexible plate with a hole, deflections, stress function**

*Одержано (Received) 16.03.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 24.03.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022*

**УДК 629.113.5.62-592**

**DOI:** [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.154-160](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.154-160)

**В.О. Дубовик**, доц., канд. техн. наук, **О.Л. Пузирьов**, доц., канд. техн. наук,  
**Ю.А. Невдаха**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mai: zenesperanto@gmail.com*

## **Експериментальні дослідження двоструменевого способу захисту розплавленого металу при наплавленні в середовищі CO<sub>2</sub>**

Зварювання і наплавлення в середовищі захисних газів займає перше місце за об'ємом наплавленого металу і виготовленої продукції серед інших механізованих способів дугового зварювання. В роботі розглядаються різні способи захисту зони плавлення металу шляхом витиснення повітря із зони горіння дуги. Наводяться результати порівняльних досліджень захисних властивостей газового струменя пальників різних конструкцій. Розглядаються технологічні схеми захисту двошвидкісним струменем CO<sub>2</sub> пальниками конічного і циліндричного перерізу. Наводяться рекомендації по швидкісним параметрам захисного газу, який витікає з центрального і периферійного перерізу пальника. Дослідження спрямовані на забезпечення ефективного захисту розплавленого металу від азоту повітря, а також зменшення витрати захисного газу при цьому.

**зварювання, наплавлення, шов, покриття, захисний газ, газовий захист, електрична дуга, зона термічного впливу, потенційне ядро**

**Постановка проблеми.** Технології зварювання та наплавлення в середовищі захисних газів отримали широке розповсюдження в промисловості при виготовленні конструкцій та відновленні працездатності деталей машин. Основними їх перевагами

© В.О. Дубовик, О.Л. Пузирьов, Ю.А. Невдаха, В.В. Пукалов, 2022

поряд з іншими способами механізованого зварювання є відносно низька вартість матеріалів для наплавлення, високі експлуатаційні властивості отриманих покриттів, можливість спостерігати за процесами наплавлення та вносити певні корективи безпосередньо при наплавленні. До недоліків слід віднести: підвищене розбризування металу, важкість збільшення продуктивності процесу, обмеженість в керуванні фізико-хімічними властивостями металу покриття зокрема його розкислення і легування. Ці недоліки частково усуваються застосуванням порошкових дротів і порошкоподібних флюсів, які вводяться в зону горіння дуги. Сучасні технології зварювання і наплавлення дуговим способом засновані на створенні ефективного газового захисту матеріалу шва від проникнення повітря в зону розплавленого металу. Фізичний захист полягає у витісненні повітря із зони горіння дуги – зони плавлення металу шляхом подачі під тиском із сопла пальника захисного газу. Поряд з цим залишаються розкритими питання швидкісних параметрів захисного струменя та витрати газу з точки зору економії матеріалів, а також вибір конструкції пальників, що можуть відповідати цим вимогам.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд літературних джерел по питанню забезпечення захисту зони плавлення металу виявив певні проблеми зварювання в умовах рухомих повітряних потоків тобто при наявності вітру. Особливо це актуально при виготовленні металоконструкцій за межами виробничих приміщень.

Дослідження таких вчених як: Б.Є. Патон, М.М Новожилов, В.І. Нечаєв, Г.М. Абрамович, С.Ю. Крашенинников, А.М. Секундов, І.К. Походня та ін. вказують на те, що при витратах захисного газу 25 – 30 л/хв. і діаметру вихідного сопла пальника від 15 до 20 мм. та такій же відстані від поверхні деталі, руйнування захисної зони здійснюється повітряним потоком, який рухається із швидкістю приблизно 2,5 м/с. На практиці ж критичними є швидкості руху повітря близько 1,0 м/с при діаметрах сопел пальників 15...20 мм. та витратах захисних газів від 15 до 25 л/хв.

Одним із шляхів вирішення проблеми забезпечення захисту зони розплавленого металу в зоні горіння дуги, при зварюванні в умовах рухомих повітряних потоків, було збільшення жорсткості захисного струменя за рахунок підвищення швидкості витоку захисного газу. Це в свою чергу приводило до зниження економічних показників процесу за рахунок отримання великих витрат газового середовища. При цьому дослідження інших вчених вказували на погіршення захисту розплавленого металу при великих витратах захисних газів.

Аналіз досліджень [1-7] показує, що найбільший вплив на захист зони реакції розплавленого активного металу з азотом повітря має тільки потенційне ядро струменя.

При наплавленні неактивних металів у середовищі вуглекислого газу в області основної і прикордонної ділянок, що отримували регулюванням відстані сопла від деталі і швидкістю наплавлення, забезпечується вміст повітря 4...6%.

Застосовуючи ці технологічні прийоми при зварюванні низьковуглецевих і низьколегованих сталей в середовищі CO<sub>2</sub> при наявності вітру за рахунок збільшення витрат вуглекислого газу підвищували жорсткість струменя, але при зварюванні активних металів в аргоні досягти таких результатів не вдалося.

В деяких роботах пропонували покращити захист реакційної зони за рахунок застосування захисних ковпаків і насадок для місць наплавлення, а також зменшувати відстань між соплом пальника і поверхнею наплавлення. В умовах виробництва ці заходи виявилися недоцільними так-як вони забезпечували перегрівання і забризкування захисних елементів та сопел розплавленим металом, а також заважали візуальному спостереженню за технологічним процесом.

Ці дослідження показують, що є певна межа можливостей струменя захисного газу при наявності рухомих повітряних потоків незважаючи на підвищення витрат захисного газу надійний захист реакційної зони не може бути забезпечений.

Пояснення цього явища наведено в дослідженнях Г.М. Абрамович, С.Ю. Крашенинніков, А.М. Секундов [3] де вказано, що втрата захисних властивостей струменя відбувається за рахунок скорочення довжини потенційного ядра внаслідок чого спостерігається виникнення турбулентності і утворення нерівномірного профілю швидкості газового середовища, що викликано збільшенням витрат останнього.

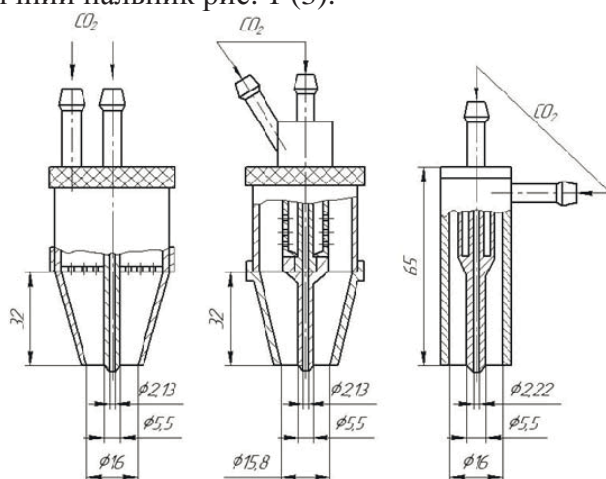
Проведений аналіз літератури показав, що захисні можливості одношвидкісного струменя обмежені як по швидкості так і по витраті газового середовища, а перспективним є застосування двох і більше струменів з різними швидкостями руху захисного газу.

**Постановка завдання.** Дослідження захисних властивостей двошвидкісного струменя вуглекислого газу та обґрунтування його параметрів при наплавленні в умовах рухомих повітряних потоків.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно досліджень вчених [1 - 7] якість наплавленого металу і його фізико-механічні властивості залежать від вмісту азоту у самому шві. Підвищений вміст азоту у металі покриття приведе до утворення тріщин і як наслідок зниження його міцності від втоми та експлуатаційних властивостей, а тому необхідно запобігти проникненню повітря в реакційну зону при горінні електричної дуги.

При проведенні досліджень надійності захисту реакційної зони експерименти проводили в два етапи: перший – без горіння дуги (ізотермічні умови); другий – в умовах горіння дуги. Перший етап досліджень дозволив виконати порівняльні дослідження впливу конструкцій пальників на можливості захисту реакційної зони від рухомих повітряних потоків і раціональної витрати газу. Другий етап дозволив дослідити вміст азоту у наплавленому металі в умовах руху повітряних потоків,

Для експериментів брали пальники з конічними соплами рис. 1 (1 і 2), в них була різна схема подачі вуглекислого газу, а також був взяти найбільш поширений у виробництві циліндричний пальник рис. 1 (3).



1, 2 – пальники з конічними соплами; 3 – пальник з циліндричним соплом

Рисунок 1 – Конструкції пальників для дослідження процесу наплавлення у двошвидкісному газопорошковому струмені CO<sub>2</sub>

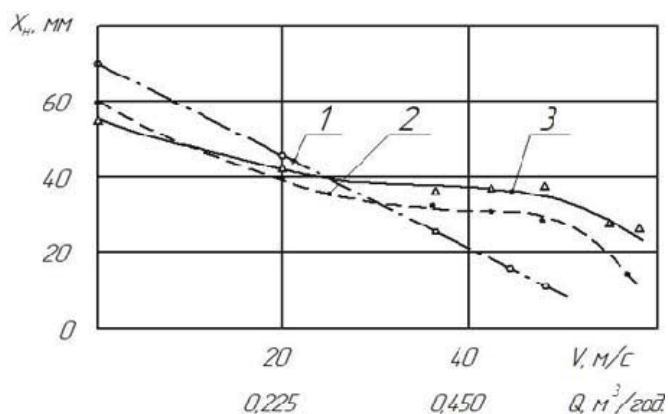
Джерело: розроблено авторами з використанням [1-8]

Діаметри сопел приймали згідно рекомендацій виробництва - 16 мм. Це забезпечувало допустимі для реального виробництва витрати вуглекислого газу при якомого найбільших його швидкостях.

Для проведення експериментів керувалися наступними технологічними нормами і рекомендаціями:

- витрати вуглекислого газу згідно технологічних норм не повинні бути більшими ніж 1,2 – 2,0 м<sup>3</sup>/год. (в сумі центральної і периферійної частини);
- з метою забезпечення легування шва порошкоподібними присадними матеріалами швидкість витоку вуглекислого газу повинна знаходитись в межах від 20 до 50 м/с;
- діаметр центрального сопла повинен не забризкуватись краплями розплавленого металу і забезпечувати необхідну швидкість і прийнятну (згідно технологічних норм) витрату захисного газу, а отже знаходитись в межах від 2,0 до 2,5 мм.

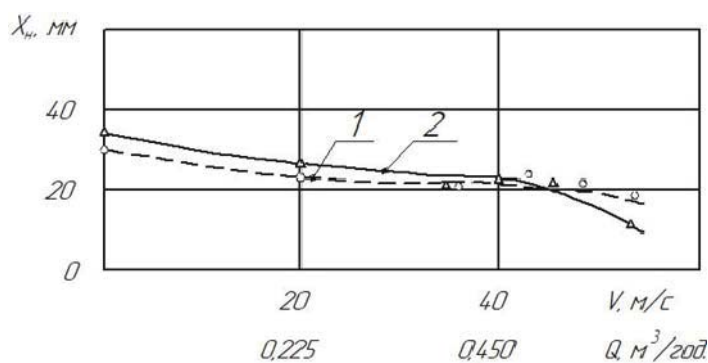
Дослідження залежності довжини потенційного ядра кожного з вибраних пальників від швидкості центрального струменя захисного газу виконували при наступних швидкостях руху CO<sub>2</sub> із зовнішнього сопла: 1,0; 1,35; 1,95 м/с (рис. 2).



1 – V=1,0 м/с; 2 – V=1,35 м/с; 3 – V=1,95 м/с.

Рисунок 2 – Вплив швидкості витікання вуглекислого газу по центральному соплу на довжину потенційного ядра для пальника 1

Джерело: розроблено авторами



1 – пальник 2; 2 – пальник 3.

Рисунок 3 – Вплив швидкості витікання вуглекислого газу по центральному соплу на довжину потенційного ядра при V=1,95 м/с.

Джерело: розроблено авторами

При виборі швидкості витоку захисного газу керувалися виробничими нормами і досвідом підприємств (до 2,0 м<sup>3</sup>/год.).

За мінімальні швидкості витікання вуглекислого газу були прийняті результати попередніх досліджень [1, 3, 4, 6, 7]. В цих дослідженнях наведено результати по визначенню залежностей витрат вуглекислого газу, діаметру сопел та відстаней від їх поверхонь до реакційної зони на вміст азоту у наплавленому металі.

В результаті отримані дані показують, що при швидкості витікання вуглекислого газу 0,64 м/с і витраті 0,45 м<sup>3</sup>/год. мали високий вміст азоту - 0,02%, який зменшувався до 0,008 - 0,01% при збільшенні швидкості витікання вуглекислого газу від 1,0 м/с (0,8 м<sup>3</sup>/год.) до 1,5 м/с (1,3 м<sup>3</sup>/год.).

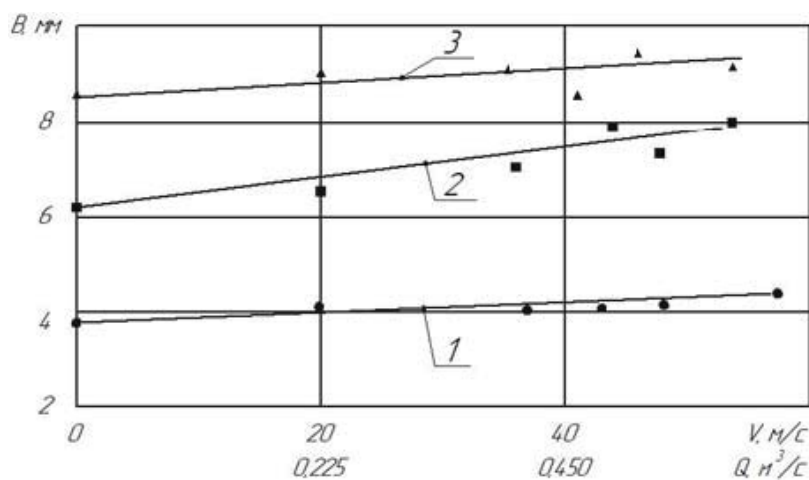
Результати дослідження залежності довжини потенційного ядра від швидкості витікання вуглекислого газу по центральному соплу наведені на рис. 2 і 3.

Аналіз наведених даних показує, що скорочення довжини ядра відбувається при малих швидкостях витікання газу із зовнішнього сопла і носить лінійний характер. При збільшенні швидкості захисного струменя спочатку спостерігається певне зменшення ядра струменя, а потім ядро стає стабільним і при швидкості більше 50...55 м/с воно знову знижується. Незабруднена повітрям зона спостерігається у діапазоні швидкостей витікання вуглекислого газу по центральному соплу від 20 до 50 м/с згідно рис. 2. (криві 2, 3).

Згідно даних (рис. 2) бачимо, що найкращий захист реакційної зони при наплавленні в середовищі вуглекислого газу забезпечує пальник 1.

Порівняльні дослідження потенційних ядер струмені розглянутих пальників (при периферійній швидкості 1,95 м/с та швидкостях вуглекислого газу по центральному соплу від 20 до 50 м/с) дають змогу зробити висновок що найбільшу незабруднену повітрям зону створював пальник 1 (рис. 2, 3).

Додаткова турбулентність периферійного потоку (внаслідок контактування струменів із стінками пальника при радіальному введенні газу [1, 3, 4, 6, 7]) обумовлює меншу довжини потенційного ядра пальників 1, 2 та сприяє більш нерівномірному профілю швидкості газу. В роботі [3] підтверджено, що додаткова турбулентність, яка виникає за рахунок різниці швидкостей між периферійною та центральною областями потоку захисного газу, при введенні додаткового високошвидкісного струменя, призведе до скорочення потенційного ядра. Це явище добре ілюструє вимірювання ширини зони змішування (рис. 4), яка вказує на інтенсивність зростання турбулентності потоку газового середовища. Ширина зони змішування показує стійкість струменя захисного газу при взаємодії з конвективними і вітровими потоками.



1 – пальник 2; 2 – пальник 2; 3 – пальник 3.

Рисунок 4 – Залежність ширини зони змішування з повітрям від швидкості витікання вуглекислого газу по центральному соплу при  $V=1,95$  м/с

Джерело: розроблено авторами з використанням [3, 4, 7]



Струмені захисного газу з пальника 1 мають незначний темп наростання зони змішування у порівнянні з пальниками 2, 3.

**Висновки.** Порівняльні дослідження параметрів струменів захисних газів пальників 1 - 3 (при  $V = 1,95$  м/с і  $V = 20 - 50$  м/с) показують, що кращий захист реакційної зони забезпечує пальник 1. Довжина потенційного ядра струменя пальника 1 не менша, ніж у промислового пальника 3 при  $V_{нов} = 0$ , що підтверджує можливість забезпечення більш надійного захисту металу шва при наплавленні в двошвидкісному струмені вуглекислого газу.

## Список літератури

1. Новожилов Н. М. Основы металлургии дуговой сварки в газах. М. : Машиностроение, 1979. 232 с.
2. Походня И. К. Газы в сварных швах. М. : Машиностроение, 1972. 256 с.
3. Турбулентное смешение газовых струй / Абрамович Г. Н. и др.). М.: Наука, 1974. 272 с.
4. Влияние формы сопла и характера истечения газового потока на качество защиты сварного шва / Степанов В. В. и др. *Сварочное производство*. 1976. № 6. С. 34-36.
5. Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. К. : Высшая школа, 1976. 423 с.
6. Ардентов В. В., Федоренко Г.А. О струйной защите при газо электрической сварке. *Сварочное производство*. 1973. № I. С. 3-5.
7. Безбах Д. К. Сварка на открытых площадках в судостроении и судоремонте. Л. : Судостроение, 1974. 135 с.
8. А.с. 856710 (СССР). Способ дуговой сварки /Баженов В. В., Трусов А. Г., Овчинников В. А. и др. Оpubл. в Б.И., 1981. № 31.

## References

1. Novozhilov, N.M. (1979). *Osnovy` metallurgii dugovoj svarki v gazakh [Fundamentals of Metallurgy of Arc Welding in Gases]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
2. Pokhodnya, I.K. (1972). *Gazy v svarnykh shvakh [Gases in welds]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Abramovich, G.N., Krashennnikov, S.Yu., Sekundov, A.N. et al. (1974). *Turbulentnoe smeshenie gazovy`kh struj [Turbulent mixing of gas jets]*. Moscow: Nauka [in Russian].
4. Stepanov, V.V., Nechaev, V.I., Fofanov, A.A. et al. (1976). Vliyanie formy` sopla i kharaktera istecheniya gazovogo potoka na kachestvo zashhity` svrnogo shva [Influence of the shape of the nozzle and the nature of the outflow of the gas flow on the quality of the protection of the weld]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 6, 34-36 [in Russian].
5. Bagryanskij, K.V., Dobrotina, Z.A. & Khrenov, K.K. (1976). *Teoriya svarochny`kh proccessov [Theory of welding processes]*. Kiev: Vy`sshaya shkola [in Russian].
6. Ardentov, V.V. & Fedorenko, G.A. (1973). O strujnoj zashhite pri gazo e`lektricheskoy svarke [On jet protection in gas-electric welding]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, I, 3-5 [in Russian].
7. Bezbakh, D.K. (1974). *Svarka na otkry`ty`kh ploshhadkakh v sudostroenii i sudoremonte [Welding in open areas in shipbuilding and ship repair.]*. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
8. A.s. 856710 (USSR). Bazhenov V.V., Trusov A.G., Ovchinnikov V.A, et al. (1981). Sposob dugovoj svarki [Arc welding method]. Opubl. v B.I., № 31.

**Viktor Dubovyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandr Puzyrov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yuriy Nevdakha**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

## Experimental Studies of a Two-jet Method of Protection of Molten Metal During Surfacing in CO<sub>2</sub>

In the industry of restoration of details and production of designs from low-carbon and low-alloy steels the technology of welding by an electrode of continuous section which melts in the environment of carbon dioxide has become widespread. Welding and surfacing in shielding gases ranks first in terms of the amount of weld metal and manufactured products among other mechanized arc welding methods.

Today, the need for wires for welding in shielding gases is about 200 thousand tons. Today's requirements indicate that welding technologies in shielding gases will occupy a leading position for the next 15

to 20 years. This is due to the relatively low cost of materials for surfacing, high performance properties of the obtained coatings, the ability to monitor the surfacing processes and make certain adjustments directly during surfacing. Along with the advantages of surfacing in a protective gas, there are also disadvantages: increased spraying of the metal, the difficulty of increasing the productivity of the process, limited control over the physicochemical properties of the coating metal in particular its deoxidation and alloying. These shortcomings are partially eliminated by the use of flux-cored wires and powdered fluxes, which are introduced into the combustion zone of the arc.

The main problem is the ingress of air into the combustion zone of the arc and the interaction of air nitrogen with molten metal, which negatively affects the quality of the latter. Modern technologies of arc welding and surfacing are based on the creation of effective gas protection of the weld material from the penetration of air into the area of molten metal. Physical protection is the expulsion of air from the combustion zone of the arc - the zone of melting of the metal by supplying under pressure from the nozzle of the shielding gas burner.

Therefore, the paper considers various ways to protect the melting zone of the metal by expelling air from the combustion zone of the arc. The results of comparative studies of the protective properties of the gas jet of burners of different designs are presented. The technological scheme of protection with two-speed CO<sub>2</sub> jet by burners of conical and cylindrical section is considered. Recommendations for the velocity parameters of the shielding gas flowing from the central and peripheral cross-section of the burner are given. Research is aimed at ensuring effective protection of molten metal from air nitrogen, as well as reducing the consumption of shielding gas.

**welding, surfacing, seam, coating, shielding gas, gas shielding, electric arc, thermal zone, potential core**

*Одержано (Received) 19.03.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 25.03.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022*