

Воробйов В.В., Воробйова Л.Д., Пастушенко Р.М.  
*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
м. Кременчук, Україна*

## **ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВИБУХОМ**

Розвиток енергетичного та хімічного машинобудування вимагає забезпечення високої якості та надійності промислових виробів, застосування матеріалів, здатних тривалий час експлуатуватися при впливі високих механічних напруг у поєднанні з агресивними середовищами. Зварювання вибухом є унікальною технологією, яка дозволяє отримувати листи біметалу, що відрізняються не лише високими механічними характеристиками, а й підвищеною хімічною стійкістю. Але поряд з такими перевагами, даний процес має один суттєвий недолік – низький коефіцієнт корисної дії, який не перевищує 3...5 %. Існуючі методи підвищення ефективності процесу в основному направлені на удосконалення схем розташування листів, які підлягають з'єднанню (вертикальна схема, багат шарова схема та їм подібні) та умов підривання.

Однією з найпоширеніших вибухових речовин (ВР) для зварювання вибухом є суміш аммоніту з різними інертними добавками. У роботі вперше запропоновано як добавку використовувати енергоактивну речовину (тверде ракетне паливо). У полігонних умовах детально вивчено особливості детонації даних зарядів і їх ефективність. Застосування традиційної методики заміру швидкості детонації (іонізаційні датчики) дозволило встановити, що введення в заряд газоутворюючої речовини знижує його швидкість детонації майже на 30 %. Заміри поперечного перерізу воронки викиду показали, що механічний коефіцієнт корисної дії такого сумішевого заряду в порівнянні із зарядами з інертною добавкою - збільшується майже на 20 %. Все це вказує на те, що при застосуванні зарядів із газоутворюючою добавкою економія ВР при зварюванні вибухом може досягати 30...50 %.

**Ключові слова:** вибухова речовина, воронка викиду, газоутворююча речовина, зварювання вибухом, коефіцієнт корисної дії, швидкість детонації, прачездатність.

## **ВСТУП**

При створенні сучасного обладнання для атомного, нафтохімічного, суднобудівного машинобудування важлива роль належить двошаровим великогабаритним листам (біметалам), які поєднують у собі корисні властивості складових і мають нові якості, відмінні від вихідних матеріалів. Біметали характеризуються комплексом цінних властивостей: конструкційна міцність, корозійна та ерозійна стійкість, жароміцність та інші поєднання властивостей. Їх застосування дозволяє не тільки підвищити надійність і довговічність великого класу деталей та обладнання, а й значно економити дорогі кольорові метали та сплави. У металургійній промисловості використовуються різні методи створення такої металопродукції, основними з яких є: наплавлення, лиття, волочіння, пресування, зварювання тертям та прокатка [1-4]. Важливо відзначити, що з'єднання деяких матеріалів (наприклад, таких як сталь-алюміній, сталь-жаростійкий сплав, сталь-титан і деякі інші), або неможливо отримати перерахованими вище способами, або їх якість виявляється на низькому рівні внаслідок виникнення в зоні контакту крихких з'єднань, тріщин та інших дефектів. У цих випадках застосування зварювання вибухом є єдиним, економічно обґрунтованим процесом, який дозволяє вирішити проблему, що виникла.

## **АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

Зварювання вибухом (ЗВ) успішно застосовується близько півстоліття в різних галузях промисловості. При цьому обсяг продукції, виготовленої з використанням цієї технології, з кожним роком зростає. Постійно збільшується також номенклатура виробів, які виробляються з використанням ЗВ. На сьогодні у світі відомо понад 20 організацій, що працюють у галузі ЗВ та понад 40, які застосовують інші вибухові технології. Процес широко використовується у США, Японії, Німеччині, Швеції, Англії та ін. За кордоном застосовують як безпосереднє плакування, так і плакування з подальшою прокаткою. За такої умови світовий обсяг ринку оцінюється майже у 350 тис.м<sup>2</sup>, де більше половини цього обсягу виробляється з використанням ЗВ.

Зварювання вибухом - відносно новий і специфічний технологічний процес, ефективність якого значною мірою залежить від основних параметрів зварювання. Останні можна умовно поділити на кінематичні (швидкості метання пластини і руху точки контакту, кут співударення) і фізичні (тиск, тривалість зіткнення, температура в зоні зіткнення), які визначають технологічні параметри процесу: тип вибухової речовини (ВР), її швидкість детонації та масу заряду, проміжок між деталями тощо.

Як правило, за допомогою цього методу зварюванні пластини розташовують паралельно одна до іншої на певній відстані, а заряд вибухової речовини розміщується на верхній частині листової пластини. Величезна енергія, генерована вибухом, розганяє летючу пластину у напрямку до опорної плити з високою швидкістю кілька сотень метрів за секунду [5]. Потім матеріали зварюються в екстремальних умовах високого тиску, локальної високої температури та високої швидкості деформації на межі розділу навколо точки зіткнення.

Умовно енергію вибухового перетворення при зварюванні вибухом можна розбити на три основні групи: залишкова енергія продуктів детонації (1); кінетична енергія метанної пластини (2) і втрачена енергія (3) або (енергія вигину пластин, енергія нагрівання пластин, енергія ударної хвилі тощо). Серед негативних наслідків, які супроводжують процес зварювання, необхідно також відзначити, що частина енергії розсіюється у повітрі, а частина енергії йде на створення воронки та вібрацію ґрунту [5, 6]. Для підвищення ефективності процесу необхідно раціонально розпоряджатися цими складовими. Останнім часом більшість дослідників основну увагу приділяють першій і третій групам. Так, у [7] запропоновано верхній шар ВР покривати супервсмоктуючим полімером, просоченим водою, який грає роль своєрідної «набійки». За рахунок цього знижується інтенсивність повітряної хвилі та збільшується частка енергії ВР, яка переходить у кінетичну енергію метанної пластини (її швидкість зростає майже на 70 %).

Науковець Chena Z. запропонував одночасно зварювати три пари пластин, які розташовуються паралельно. У цьому випадку, порівняно із традиційним способом отримання такої ж кількості пластин, майже вдвічі знижуються витрати ВР і майже на 20% – вібрація основи [8], а науковці Shi C., Wang Y. та інші винайшли подвійне вертикальне зварювання вибухом двох пластин за один вибух шляхом вертикального розміщення пластин і герметизації заряду між ними. При цьому витрати ВР зменшилась майже на 80 % у порівнянні з традиційним способом [9].

Таким чином, проведений аналіз засвідчує, що більшість як вітчизняних, так і зарубіжних учених значну увагу приділяють вдосконаленню схем підривання, а питання щодо зниження витрат ВР залишається менш опрацьованим і дослідженим.

### **ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Метою цієї роботи є дослідження можливостей зменшення витрат ВР при зварюванні вибухом. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати, які параметри ВР забезпечують якісне з'єднання матеріалів; оцінити технологічність існуючих методів зниження витрат ВР; встановити вплив енергоактивної добавки до ВР на зміну швидкості детонації та працездатності заряду.

### **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Процес зварювання вибухом пов'язаний з величезним тиском і високою швидкістю детонації, що супроводжується інтенсивним виділенням енергії за дуже короткий час. Це є одна з головних причин низької ефективності даної технології та підвищеної витрати ВР. Питанням економії ВР при зварюванні вибухом до останнього часу приділялося мало уваги. Серед нечисленних досліджень варто відзначити роботи Yanga M. [6, 7], який запропонував формувати набійку плоского заряду у вигляді шару інертної речовини (пов'язана вода), а також використовувати стільникову конструкцію заряду. Дані методи підвищують ефективність ЗВ, проте їх використання у технологічному плані ускладнює процес.

Ефективність зварювання вибухом багато в чому залежить від типу ВР, який правильно може бути обраний лише у випадку, коли відомі його основні показники, одним із яких є швидкість детонації. Дослідження вітчизняних і зарубіжних вчених показали [1-4], що величина швидкості детонації ВР не повинна перевищувати найменшу швидкість звуку зварюваних металів.

В теперішній час використовують ВР, у яких швидкість детонації не перевищує 4000 м/с, а щільність – 1200 кг/м<sup>3</sup>. Дуже часто ці параметри досягаються за рахунок застосування суміші аммоніту 6ЖВ із різними інертними добавками, але при цьому введення останніх суттєво зменшує обсяг продуктів детонації та знижує працездатність ВР: при введенні до складу заряду 20 % NaCl обсяг газоподібних продуктів вибуху зменшується в 1,27 рази, теплота вибуху – в 1,3 рази, а швидкість детонації дорівнює 4000 м/с (при початковій – 4200 м/с); при 50 %-й добавці – ці параметри знижуються відповідно у 2,2 і 2,0 рази, а швидкість детонації становить 3000 м/с [10].

Таким чином немає єдиної думки з питання визначення енергії вибуху, більшість дослідників схиляються до того, що тільки теплота вибухового перетворення найбільш повно відображає максимальну роботу вибуху [11].

Отже, введення інертних добавок до ВР при зварюванні вибухом істотно знижує енергетичні можливості процесу та погіршує його загальну ефективність.

Проведені лабораторні та полігонні дослідження показали, що введення в заряд ВР газоутворюючих компонентів (твердих ракетних палив) дозволяє знизити піковий тиск і збільшити тривалість вибухового навантаження середовища, підвищуючи тим самим загальний коефіцієнт корисної дії (ккд) вибуху[11]. Існуючі розрахункові методи та експериментальні дослідження найчастіше розглядають інертні добавки. Дослідження сумішевих зарядів, у яких другий компонент може займатися і брати активну участь у процесі руйнування, практично відсутні.

Для оцінки впливу крупності та кількості газоутворюючої добавки на зміну швидкості детонації сумішевого заряду були проведені полігонні експерименти, в яких як вихідну ВР використовували аммоніт 6 ЖВ. При цьому вихідна маса амоніту складала 800 г і розташовувалася в паперовому циліндрі діаметром 40 мм і довжиною 900 мм. Для вимірювання швидкості застосовували загальновідомий метод вимірювання швидкості за допомогою іонізаційних датчиків та вимірювача часових інтервалів. У дослідях використовували три іонізаційних датчика, один з яких розміщувався на відстані 300 мм від капсуля-детонатора, а два інших - на відстані один від одного в 200 мм, що забезпечувало вимірювання часових інтервалів на базі 200 і 400 мм. Заміщення аммоніту газоутворюючою добавкою проводилося у відсотковому співвідношенні від вихідної ваги ВР на 10, 20, 30, 40, 50 %. Перед формуванням сумішевого заряду аммоніт 6 ЖВ і газоутворююча речовина ретельно перемішувалися і розміщувалися у паперові циліндри в ідентичних умовах. У даних експериментах використовували газоутворюючу речовину двох фракцій: дрібної (середній розмір частинки - 0,4 мм) і середньої крупності (середній розмір частинки - 1,5 мм).

Таблиця 1 - Вплив крупності та кількості газоутворюючої речовини в заряді на зміну швидкості детонації

Тип добавки	Середня крупність частинок добавки, мм	Кількість добавки, %	Швидкість детонації, м/с
Без добавки	-	-	3900
Інертна (кухонна сіль)	0,2	10	3810
		20	3500
		30	3240
		40	2800
		50	2510
Газоутворююча речовина	0,4	10	3830
		20	3790
		30	3700
		40	3500
		50	3170
Газоутворююча речовина	1,5	10	3780
		20	3560
		30	3300
		40	3070
		50	2850

Аналіз виконаних досліджень показав (табл. 1), що введення газоутворюючої речовини дозволяє знизити швидкість детонації, проте меншою мірою, ніж додавання інертної добавки (NaCl). Так, для добавки газоутворюючої речовини в кількості 50 % швидкість зменшується майже на 20 % і 27 % (відповідно для крупності частинок 0,4 і 1,5 мм), а введення кухонної солі знижує цей показник на 36 %. Але для зварювання вибухом важливим параметром є не тільки швидкість детонації, а і метална здатність заряду ВР, яка пропорційна його загальній працездатності. Тому важливо встановити, як впливає наявність добавки на ефективність вибуху.

Найбільш поширеними способами визначення ккд вибуху є бомба Трауця і метод воронкоутворення. Для дослідження було обрано метод воронкоутворення, за яким на піщаних відвалах Кременчуцького кар'єроуправління «Кварц» було проведено вибухи на викид сумішових зарядів. Середовище являло собою пісок середньозернистий, щільністю 1600 кг/м<sup>3</sup>, пористістю 0,35, вологістю 7 %, кут внутрішнього тертя 30<sup>0</sup>. Були використані подовжені заряди аммоніту 6 ЖВ (як чистого, так і в суміші з інертною або газоутворюючою добавками) з постійною погонною масою 4 кг/м, які розташовували на глибині 1,4 м. Після кожного вибуху вимірювали параметри утвореної

воронки викиду, визначали площу поперечного перерізу і середні значення по 3...5 дослідам (табл. 2).

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Обробка результатів експериментів (табл. 2) показала, що заміна частки ВР газотворюючою добавкою (заміщення) дозволяє підвищити ефективність механічної дії вибуху (метальну здатність) і зменшити витрати ВР, яка в залежності від крупності компонента становить:

- для розмірів частинок добавки 0,4 мм ккд зростає до 50 % заміщення частки ВР газотворюючою речовиною;
- для розмірів частинок добавки 1,5 мм ккд зростає до 40 % заміщення.

Таблиця 2 - Вплив крупності та кількості газотворюючої речовини в заряді ВР на ефективність вибуху

Тип добавки	Середня крупність частинок добавки, мм	Кількість добавки, %	Площа поперечного перерізу, м <sup>2</sup>
Без добавки	-	-	2,6
Інертна (кухонна сіль)	0,2	10	2,8
		20	2,65
		30	2,3
		40	2,1
Газотворююча речовина	0,4	10	2,8
		20	3,15
		30	3,0
		40	2,9
		50	2,7
Газотворююча речовина	1,5	10	2,7
		20	2,95
		30	2,9
		40	2,7

### ВИСНОВКИ

1. Проведені дослідження показали, що одним із перспективних методів формування зарядів для зварювання вибухом може бути заміна інертної добавки газотворюючою речовиною (енергоактивним компонентом). При цьому зниження витрат ВР може складати 30...50 %.

2. Введення в заряд ВР газотворюючої речовини дозволяє знизити швидкість детонації аммоніту 6 ЖВ до необхідних для зварювання вибухом параметрів (2900 - 3400 м/с).

3. Заміри поперечного перерізу воронки викиду показали, що механічний коефіцієнт корисної дії такого сумішевого заряду не змінюється до сорока відсоткового заміщення.

4. Для відпрацювання технологічних параметрів зварювання вибухом необхідно проведення подальших експериментів.

### ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бэнкер Дж.Г. Промышленное применение сварки взрывом (обзор). *Автоматическая сварка*. 2009. №11. С.49-53.
2. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. Минск : Наука и техника, 1990. 205 с.
3. Петушков В. Г. Применение взрыва в сварочной технике. Киев: Наукова думка, 2005. 754 с.
4. Резниченко В.И., Пахомов С.Н., Мостипан С.Е. Экспериментально-промышленный комплекс сварки взрывом государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля». *Авиационно-космическая техника и технология*, 2007. № 11 (47). С. 102 – 108.
5. Mousavi P. Sartangi X. Experimental investigation of explosive welding of cp titanium/AISI 304 stainless steel. *Mater. Des.*, 2009. № 30. PP. 459–468.
6. Yang M., Ma H., Shen Z. Study on self-restrained explosive welding with high energy efficiency. *Int J Adv Manuf Technol*, 2018. № 99 ( 9–12 ). PP. 3123–3132.
7. Yang M., Ma H., Shen Z. Study on the effects of explosive covering on explosive welding of stainless steel to steel. *Propellants Explos. Pyrotechnics*. 2019. № 44 (5). PP. 609–616.
8. Chena Z., Xua J. Experimental and numerical investigation on fabricating multiple plates by an energy effective explosive welding technique : *journal of Materials Research and Technology*, Volume 14, September–October 2021, PP. 3111-3122.



9. Shi C., Wang Y., Zhao L., Hou H., Ge Y. Detonation mechanism in double vertical explosive welding of stainless steel/steel. *J. Iron Steel Res*, 2015. Int. 22 (10). PP. 949–953.
10. Манжос Ю.В., Подоваленко Ю.В. Влияние содержания инертных примесей на взрывчатые характеристики взрывчатых веществ аммонитного типа. *Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів* : збірка доповідей V Міжнародної наукової конференції аспірантів та студентів. Т.2 . Донецьк: Дон НТУ, 2006. С. 46-47.
11. Комир В.В., Кузнецов В.М., Воробьев В.В., Чебенко В.Н. Повышение эффективности действия взрыва в твердых средах. М.: Недра, 1988. 232 с.

## REFERENCES

1. Benker, Dzh.H. (2009), “Industrial application of explosion fighting (review)”, *Avtomatycheskaia svarka*. №11, pp.49-53.
2. Zakharenko, Y. (1990), *Svarka metallov vzryvom* [Explosive welding of metals], Nauka y tekhnika, Mynsk. .
3. Petushkov, V. (2005), *Prymenenye vzryva v svarochnoj tekhnike* [Application of explosion in welding equipment], Naukova dumka, Kyev, Ukraine.
4. Reznichenko, V.Y. Pakhomov, S.N. and Mostypan, S.E. (2007) “Experimental-industrial complex of explosion-fighting of the state-owned enterprise "Constructor's Bureau "Yuzhnoe" named after M.K. Angel”, *Avyatsyonno-kosmicheskaya tekhnika y tekhnolohiya*, № 11 (47), pp. 102 – 108.
5. Mousavi, P. and Sartangi, Kh. (2009), “Ekhperimental investigation of ekhplosive velding of tsptitanium/AISI 304 stainless steel”. *Mater. Des*, vol. 30, pp. 459–468.
6. Yang, M. Ma, H. and Shen, Z. (2018), “Study on self-restrained ekhplosive velding vith hih energy effitsientsy”. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 99 ( 9–12 ), pp. 3123–3132.
7. Yang, M. Ma, H. and Shen, Z. (2019), “Study on the effetsts of ekhplosive tsovering on ekhplosive velding of stainless steel to steel”. *Propellants Ekhplos. Pyrotechnitss*, vol. 44 (5), pp. 609–616.
8. Chena, Z. and Khua, J. (2021), “Ekhperimental and numeritsal investigation on fabritsating multiple plates by an energy effetstive ekhplosive velding teknikue” : *journal of Materials Research and Technology*, Volume 14, September–Ostober, pp. 3111-3122.
9. Shi, Ts. Vang, Y. Zhao, L. Hou, H. and Ge, Y. (2015), “Detonation mechanism in double vertitsal ekhplosive velding of stainless steel/steel”, *J. Iron Steel Res*, vol. 22 (10), pp. 949–953.
10. Manzhos, Yu.V. and Podovalenko, Yu.V. (2006), “The influence of the content of inert impurities on the explosive characteristics of explosives of the ammonite type”, *Zbirka dopovidej V Mizhnarodnoi naukovoї konferentsii aspirantiv ta studentiv* [A collection of reports of the 5th International scientific conference of graduate students and students], *Okhorona navkolyshn'oho seredovyscha ta ratsional'ne vykorystannia pryrodnykh resursiv* [Environmental protection and rational use of natural resources], vol.2 . Donets'k: Don NTU, pp. 46-47.
11. Komyr, V. Kuznetsov, V. Vorobjov, V. and Chebenko, V. (1988), *Povyshenye efektyvnosty dejstvyia vzryva v tverdykh sredakh* [Increasing the effectiveness of the explosion in solid media], Nedra, M.

### **V.Vorobyov, L.Vorobyova, R. Pastushenko. Reduced consumption of explosives during blast welding.**

The development of power and chemical engineering requires high quality and reliability of industrial products and the use of materials that can operate for a long time under high mechanical stresses combined with aggressive environments. Explosion welding is a unique technology that allows us to produce bimetal sheets that are not only characterized by high mechanical properties but also by increased chemical resistance.

However, along with these advantages, this process has one significant drawback - low efficiency, which does not exceed 3...5%. Existing methods to improve the efficiency of the process are mainly aimed at improving the layout of the sheets to be joined (vertical layout, multilayer layout, etc.) and the conditions of detonation.

One of the most common explosives (EA) for explosive welding is a mixture of ammonite with various inert additives. In this work, it is proposed for the first time to use an energy-active substance (solid rocket fuel) as an additive. The detonation characteristics of these charges and their effectiveness were studied in detail under test site conditions. The use of the traditional method of measuring the detonation rate (ionization sensors) made it possible to establish that the introduction of a gas-forming substance into the charge reduces its detonation rate by almost 30%. Measurements of the cross-section of the ejection funnel

showed that the mechanical efficiency of such a mixed charge increases by almost 20% compared to charges with an inert additive. All of this indicates that when using charges with a gas-forming additive, the savings in explosive welding can reach (30...50)%.

**Keywords:** explosive, ejection funnel, gas-forming substance, explosive welding, efficiency, detonation rate, performance.

*ВОРОБІЙОВ Віктор Васильович* – д.т.н., професор, професор кафедри машинобудування Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. e-mail: vvv.imit@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3446-4714>;

*ВОРОБІОВА Лариса Дмитрівна* – к.т.н., доцент, доцент кафедри машинобудування Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. e-mail: larivorobiova@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5333-6091>;

*ПАСТУШЕНКО Руслан Михайлович* – аспірант кафедри машинобудування Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. e-mail: r.m.pastushenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1087-1558>.

*Viktor VOROBYOV* - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University: e-mail: vvv.imit@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3446-4714>;

*Larisa VOROBYOVA* - PhD in technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechanical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University: e-mail: larivorobiova@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5333-6091>;

*Ruslan PASTUSHENKO* - Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University: e-mail: r.m.pastushenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1087-1558>.

DOI 10.36910/automash.v1i20.1038