

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шльонський Павло Сергійович

УДК 621.791.76:621.7.044.2

ДИСЕРТАЦІЯ

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ
МІДНО-АЛЮМІНІЄВИХ КОАКСІАЛЬНИХ
СТРУМОПРОВІДІВ**

Спеціальність 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології
Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ П.С. Шльонський

Науковий керівник:

Пацин Микола Олександрович
доктор технічних наук,

Київ 2021

АНОТАЦІЯ

Шльонський П.С. Технологія зварювання вибухом мідно-алюмінієвих коаксіальних струмопроводів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню структури та механічних властивостей коаксіальних з'єднань міді і алюмінію, отриманих при зварюванні вибухом (ЗВ), та створенню обладнання для даного процесу.

У роботі проведено аналіз способів отримання коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм. Встановлено переваги ЗВ перед іншими способами з'єднання міді з алюмінієм. Також показано актуальність створення біметалічних струмопровідних елементів та обладнання для їх ЗВ.

Розглянуто особливості структури з'єднання міді і алюмінію, отриманого шляхом ЗВ. Показано, що на отримання коаксіальних з'єднань є обмеження за довжиною та номенклатурою матеріалів, що наносяться. Показано, що вакуумування зварювального проміжку має позитивний вплив на структуру з'єднання. Встановлено фактори, які впливають на утворення інтерметалідів у зоні з'єднання міді з алюмінієм. Зокрема, одним із таких факторів є наявність ударно-стиснутого газу у зварювальному проміжку. Відсутність до цього часу досліджень з отримання шляхом зварювання вибухом коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм, а також складність їх формування внаслідок утворення інтерметалідів, обумовлює доцільність проведення досліджень у цьому напрямку.

Досліджена можливість отримання шляхом ЗВ коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм. ЗВ проводили на режимах зі швидкістю точки контакту $V_k = 2000$ м/с та 2600 м/с. Також на даних режимах виконували зварювання із

вакуумуванням зварювального проміжку. Під час дослідження вимірювали об'ємну долю інтерметалідів та ширину інтерметалідного шару.

У результаті дослідження мікроструктури виявлено, що при ЗВ міді з алюмінієм на швидкості точки контакту $V_k = 2000$ м/с лінія з'єднання має профіль, близький до хвилеподібного, з наявністю на ньому ділянок оплавленого металу біля основи горбів деформації. Крім того, пластична течія у металах, які зварюються, є однорідною в напрямку вектору швидкості точки контакту. Інтенсифікація режимів зварювання внаслідок збільшення швидкості точки контакту до 2600 м/с призводить до формування хвильового профілю з'єднання з нестабільними параметрами хвиль і утворення суцільного прошарку з інтерметалідів як у вакуумі, так і без нього. При цьому утворюється завихрення біля впадини хвилі, всередині якої спостерігаються рихлості, частки міді і інші включення.

Також встановлено, що зростання об'ємної частки і товщини прошарку інтерметалідів в зоні з'єднання при ЗВ міді з алюмінієм за коаксіальною схемою при віддаленні від точки ініціювання, незалежно від середовища в зварювальному проміжку (повітря або вакуум), носить закономірний характер і пояснюється «канальним ефектом» при зварюванні вибухом. Тобто відбувається прогрів шаром ударно-стисненого газу і продуктами кумуляції зварювальних поверхонь, довжина якого збільшується по мірі віддалення від початку ініціювання, оскільки збільшується і час температурного впливу.

Досліджено ширину ділянки пластичної деформації зони з'єднання. Встановлено, що ширина пластичної деформації алюмінію при ЗВ у вакуумі в 1,4 – 1,6 рази перевищує величину пластичної деформації при наявності повітря у зазорі.

Дослідження мікротвердості показало, що в зоні з'єднання спостерігається типовий для зварювання вибухом характер розподілення мікротвердості зі значеннями 946 МПа – 1100 МПа, що на 10...15% перевищують значення 860 МПа – 940 МПа для біметалу, отриманого за паралельною схемою.

Досліджено мікроструктуру з'єднання міді та алюмінію, отриманого за допомогою ЗВ при плоскій та коаксіальній схемах. Встановлено, що при зварюванні на режимі з однаковою енергією вибуху у зоні з'єднання за коаксіальною схемою утворюється більше інтерметалідів, що пов'язано з відсутністю бічного витоку ударно-стиснутого газу.

Введено термін і експериментально вивчено явище «канального ефекту» при ЗВ. «Канальний ефект» – виникнення потоку кумулятивних викидів металу та стиснутого нагрітого газу, які заповнюють зварний проміжок, що рухається з наддетонаційною швидкістю.

На зразках зі сталі 20 проведено оцінювання виносу маси потоку металевих частинок з поверхонь, що з'єднуються. Встановлено, що товщина шару металу, яка віднесена з поверхні пластини, склала 30 мкм, що у 4...7 разів вище, ніж розрахункова оцінка. Таке збільшення маси кумулятивного струменя призводить до зменшення його швидкості і затягнення його вмісту у завихрення.

Досліджено хімічний склад завихрень на зразках біметалу мідь-алюміній. Встановлено, що при зварюванні у повітрі утворюються інтерметаліди типу Al_2Cu (θ -фаза, ~28,2-29% Al) та $AlCu$ (η -фаза, ~46-46,7% Al), а при зварюванні у вакуумі - типу Al_3Cu (ζ -фаза, ~24,6-25,3% Al) та легоплавка евтектика Al- Al_2Cu . Останні мають більшу електричну провідність.

Досліджено мікроструктуру і механічні властивості мідно-алюмінієвого біметалічного стрижня після протягування зі ступенем обтиснення 90% та подальшою витримкою при різних температурах. Встановлено, що при витримці за період в одну годину за температури 300 °C утворюється прошарок з інтерметалідів завтовшки 1 мкм -2 мкм, а за аналогічний період при температурі 350 °C утворюється прошарок з інтерметалідів завтовшки 4 мкм -5 мкм. При цьому під час іспитів на розтягування відносне подовження після холодного протягування зростає з 11,6% у стані до 57,5%.

Розроблено чисельну методику визначення напружено-деформованого стану силових елементів трубчастої камери під час вибуху в ній плоского

заряду вибухової речовини кінцевих розмірів. Розраховані величини напружень, які визначаються за допомогою даної методики, задовільно корелюють з експериментальними результатами.

Експериментально досліджено напружено-деформований стан в елементах трубчатої вибухової камери. Запропоновано критерій критичних напружень в металі камери.

Розроблена трубчата вибухова камера з автоматизованим процесом завантаження заготовок для ЗВ, що має збільшену продуктивність процесу.

Розроблено метод розрахункової оцінки оптимальних геометричних параметрів вихідних заготовок алюмінієвого прутка і мідної трубки. Запропоновано спеціальну форму алюмінієвої заготовки, яка має ряд практичних переваг.

Результати проведених досліджень покладені в основу розробки технології виготовлення мідно-алюмінієвих струмопроводів з тонким (300 мкм) шаром міді для систем керування авіатехніки на замовлення ДП «Антонов».

Експериментально досліджено вплив наповнювача труби при зовнішньому її плакуванні, що використовується для збереження форми заготовки. Встановлено, що для пластичних матеріалів у якості наповнювача доцільно використовувати сталевий стрижень з заливкою його сплавом Вуда.

Розроблена спеціальна конструкція корпусу контейнера для засипки ВР, яка забезпечує рівномірність засипки.

Розроблено комбіновану технологію (ЗВ + зварювання тертям) отримання біметалевих гільз для з'єднання гнучких багатожильних проводів на замовлення південно-корейської компанії.

Ключові слова: зварювання вибухом, ударно-стиснений газ, інтерметаліди, трубчаста вибухова камера, напружено-деформований стан.

ABSTRACT

Shlonsky P.S. Explosive welding technology of copper-aluminum coaxial conductors - Qualifying scientific work with the rights of the manuscript.

The dissertation for a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.06 "Welding and related processes and technologies". - E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kiev, 2021.

The dissertation is devoted to the studying of the structure and mechanical properties of copper and aluminum coaxial joints obtained by explosion welding (EW) and the creation of equipment for this process.

The analyzes of the methods of coaxial joints obtaining was fulfilled. The advantages of EW over other methods of copper with aluminum joining were established. The relevance of equipment for EW creating is also shown.

The peculiarities of the copper and aluminum joint structure obtained by EW were considered. It was shown that the production of coaxial joints is limited by the length and range of materials to be applied. It was shown that vacuuming of the welding gap have a positive effect on the joint structure. Factors which influencing on the formation of intermetallics at the junction of copper with aluminum have been identified. In particular, one of such factors is the presence of impact-compressed gas in the welding gap. The lack in researching of the production of coaxial joints of copper with aluminum by explosion welding, as well as the complexity of the formation of such joints due to the intermetallics, determines the feasibility of fulfilling researching in this direction.

The conditions of copper with aluminum coaxial joints obtaining by EW is investigated. EW was performed on the modes with the speed of the point of contact

$V_k = 2000$ m/s and 2600 m/s. Also in these modes performed welding with vacuuming of the welding gap. The volume fraction of intermetallics and the width of the intermetallic layer were measured on the boundary of joint.

As a result of the studying of the microstructure, it was found that at the speed of the point of contact $V_k = 2000$ m/s the connection line has a profile close to wavy, with the presence of areas of molten metal at the base of the deformation humps. In

addition, the plastic flow in the welded metals is homogeneous in the direction of the point of contact velocity vector. Intensification of welding modes due to the increasing of the contact point velocity to 2600 m/s leads to the formation of a wave profile of the connection with non-stable wave parameters and the formation of a continuous layer of intermetallics both in vacuum and without it. This creates a vortex near the bottom of the wave, inside which there are looseness, copper particles and other inclusions.

It is also found increasing of the volume fraction and thickness of the intermetallic layer in the zone of connection in the coaxial scheme depending of distance from the initiation point, regardless of the environment in the welding gap (air or vacuum), and it can be explained by "Channel effect" appeared during explosion welding. "Channel effect" is a common influence of heated shock-compressed gas in the gap and the products of cumulating effect, which moves with super-detonation speed, on welding surfaces. It increases with distance from the beginning of the initiation.

The width of the plastic deformation zone of the joint was investigated. It is established that the width of plastic deformation of aluminum at EW in vacuum is 1.4 - 1.6 times greater than the value of plastic deformation in the presence of air in the gap.

The study of microhardness in the joint zone showed that there is a typical for explosion welding nature of the distribution of microhardness. Pressure values of 946 MPa – 1100 MPa in coaxial scheme are 10..15% higher than the value of 860 MPa – 940 MPa for bimetal obtained in the parallel scheme.

The microstructure of the connection of copper and aluminum obtained by means of EW in flat and coaxial schemes is investigated. It has been established that welding on the same energy mode more intermetallics are formed in the coaxial joint, which is due to the absence of lateral leakage of shock-compressed gas.

The term was introduced and the phenomenon of "channel effect" in EW was experimentally studied. The mass transfer ratio of metal particles from the surfaces to be joined was evaluated during EW of the plates of steel 20. It was found that the

thickness of the metal layer, which is ripped off to the surface of the plate was 30 μm , which is 4.7 times higher than the estimating calculation. This increase in the mass of the cumulative jet leads to a decrease in its velocity and the capture of its content in a vortex.

The chemical composition of vortices on copper-aluminum bimetal samples was studied. It is established that Al_2Cu (θ -phase, ~ 28.2-29% Al) and AlCu (η -phase, ~ 46-46.7% Al) structures are formed during welding in air, and when welding in vacuum-type Al_3Cu (ζ -phase, ~ 24.6-25.3% Al) and alloy eutectic Al- Al_2Cu . Phases appeared in vacuum have more electrical conductivity.

The microstructure and mechanical properties of a copper-aluminum bimetallic rod with a degree of compression of 90% during drawing and subsequent exposure at different temperatures were studied. It was found that during exposure for a period of one hour at a temperature of 300 $^{\circ}\text{C}$ a layer of intermetallics 1-2 μm thick is formed, and during the same period at a temperature of 350 $^{\circ}\text{C}$ a layer of intermetallics 4 μm – 5 μm thick is formed. The relative elongation of tensile samples after cold drawing increases from 11.6% in the initial state to 57.5% after heat treatment.

A numerical method for determination of the stress-strain state of the tubular chamber power elements during an explosion of a flat explosive charge has been developed. The calculated values of stresses are satisfactorily correlated with the experimental results. Additionally the stress-strain state in the elements of the tubular explosive chamber was experimentally investigated and a criteria of the critical stress state in elements of the chamber was suggested.

A tubular explosive chamber with an automated process of billets loading into EW has been developed, it increases the productivity of the process.

The calculation method of optimal geometrical parameters choice for an aluminum bar and a copper tube was developed. A special form of aluminum billet is proposed, which has a number of practical advantages.

The results of the research are the basis for the development of the technology of copper-aluminum power lines manufacturing with a thin (300 μm) copper layer for control systems of aircraft company "Antonov". The influence of the filler matter

inside inner tube during external cladding was experimentally investigated to preserve the shape of the workpiece.

A special design of the container for backfilling explosives was developed, which ensured uniformity of backfilling. A combined technology (EW + friction welding) for obtaining bimetallic sleeves for connecting flexible multi-core wires at the request of a South Korean company has been developed.

Keywords: explosive welding, shock-compressed gas, intermetallics, tubular explosive chamber, stress state.

Список публікацій здобувача:

1. Пашин М.О., Шльонський П.С., Брызгалін А.Г. Кушнарџова О.С. та Тодорович Н.Л. Особливості формування структури коаксіальних з'єднань міді та алюмінію при зварюванні вибухом з вакуумуванням зварювального Авт. зварювання, 2021, №2.

2. Шлѐнский П.С., Пекарџ Е.Д., Брызгалин А.Г., Венцев С.Д. «Особенности применения вакуума при сварке взрывом коаксиального медно-алюминиевого прутка» Известия ВолгГТУ, серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений», № 6, 2017. – С. 62-67.

3. Брызгалин А.Г., Добрушин Л.Д., Шлѐнский П.С. и др. «Изготовление коаксиальных медно-алюминиевых прутков с помощью сварки взрывом и протяжки» Авт. сварка, 2015, №3-4 – С. 72-76.

4. Добрушин Л.Д., Фадеенко Ю.И., Илларионов С.Ю., Шлѐнский П.С. «Канальный эффект при сварке взрывом» Автоматическая сварка, 2009, № 11 – С. 19-21.

5. Шленский П.С., Добрушин Л.Д., Фадеенко Ю.И., Венцев С.Д. «Камеры для сварки металлов взрывом» (Обзор) Автоматическая сварка, 2011, – № 5 – С. 57 – 61.

6. Шлѐнский П.С., Сидоренко Ю.М. Численное моделирование разлета продуктов детонации и распространения воздушных ударных волн при

взрыве плоского заряда конечных размеров // Вісн. НТУУ «КПІ». Сер. Машинобудування. 2011. - №62. – С. 223 – 232.

7. Сидоренко Ю.М., Шленский П.С. «К оценке напряженно-деформированного состояния силовых элементов конструкции трубчатой взрывной камеры» Проблемы прочности, 2013, – №2 – С. 121 – 134.

8. Шльонський П.С., «Зварювання вибухом мідно-алюмінієвих труб за зворотною схемою», Автоматичне зварювання, 2020, № 8 – С. 51-53.

9. Патент №100280 «Камера для обработки металлов взрывом» Патон Б.Е., Шимановский В.А., Добрушин Л.Д., Буштедт Ю.П., Шлёнский П.С. и др.

10. L. D. Dobrushin, Yu. I. Fadeenko, S. Yu. Illarionov, P.S. Shlensky «Channel effect in parallel-scheme explosive welding of long-length parts». Int. conf. «Shock-Assisted Synthesis and Modification of Materials». – Moscow, September 11-14, 2006, P. 45.

11. L. D. Dobrushin, P.S. Shlensky, Yu. I. Fadeenko «Deformation modes in tubular explosion chambers». Int. conf. «Explosive Production of New Materials». – Bechichi, Montenegro June 7–11, 2010. P.20.

12. Шленский П.С., Добрушин Л.Д., Ярещенко В.Г., Черномыз Н.Д., Попов М.П. «Динамика напряженно-деформированного состояния трубчатой взрывной камеры» Материалы VI Международной научно-технической конференции «Строительные конструкции спортивных и пространственных сооружений» Киев 06-10. 09. 2010. С. 176 – 177.

13. A. G. Bryzgalin, P. S. Shlonskii, S. D. Ventsev, and E. D. Pekar Problems of explosion welding of long-length coaxial Cu+Al rods with a thin cladding layer. Int. conf. «Explosive Production of New Materials». – Saint-Petersburg, Russia 14-18 May 2018. P.38.

14. L.D. Dobrushin, A. G. Bryzgalin, P. S. Shlonskii, I.G. Lavrenko, I.M. Romashko, and H. D. Groeneveld Combined explosive cladding/drawing technology for production of coaxial Cu-Al electric conductors for aerospace application. Int.

conf. «Explosive Production of New Materials». – Strasbourg, France, May 2–5, 2012. P.35.

15. Сидоренко Ю.М. Шльонський П.С. Чисельне моделювання розльоту продуктів детонації і розповсюдження повітряних ударних хвиль при вибуху плоского заряду кінцевих розмірів. // Прогресивна техніка і технологія. XII міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. Київ – Севастополь, Україна, 20-24 червня, 2011 р. С. 27.

16. Сидоренко Ю.М., Шлєнський П.С. Напряжено-деформированное состояние элементов трубчатой взрывной камеры. // International Conference Shock waves in condensed matter, Kyiv, Ukraine, 16-21 September 2012 р. С 413-417.

ЗМІСТ

ВСТУП		15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИГОТОВЛЕННЯ МІДНО-АЛЮМІНІЄВИХ МАТЕРІАЛІВ І ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ. КАМЕРИ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ		22
1.1	Способи виготовлення і області застосування мідно-алюмінієвих з'єднань.....	22
1.2	Особливості та основні параметри зварювання вибухом.....	30
1.3	Обладнання для зварювання вибухом.....	37
1.4	Структура мідно-алюмінієвих з'єднань та вплив атмосфери в зварювальному проміжку на їх властивості.....	42
1.5	Мета і завдання досліджень.....	46
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ		49
2.1	Характеристики використаних матеріалів.....	49
2.2	Обладнання для комбінованих технологій.....	53
2.2.1	Обладнання для протягування.....	53
2.2.2	Обладнання для зварювання тертям.....	53
2.3	Методи дослідження механічних властивостей біметалевих з'єднань, отриманих за комплексною технологією.....	55
2.3.1	Методика випробування міцності на сплющування.....	56
2.3.2	Методика випробування біметалевих гільз на розрив.....	56
2.3.3	Методика випробувань коаксіальних струмопроводів на розрив і згин.....	57
2.4	Методика виготовлення мікрошліфів і обладнання для дослідження структури біметалевих матеріалів.....	59

		13
2.4.1	Методика вирізки та виготовлення мікрошліфів.....	59
2.4.2	Обладнання для дослідження мікроструктури.....	61
2.4.3	Растрова електронна мікроскопія.....	61
2.4.4	Вимірювання мікротвердості.....	62
2.5	Методика вакуумування.....	63
	Висновки до розділу 2.....	65
РОЗДІЛ 3	ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ЗВАРЮВАННЯМ	
	ВИБУХОМ КООКСІАЛЬНИХ МІДНО-	
	АЛЮМІНІЄВИХ З'ЄДНАНЬ.....	66
3.1	Вплив умов зварювання вибухом на структуру з'єднань міді з алюмінієм.....	66
3.2	Явище «канального ефекту» при зварюванні вибухом.....	78
3.3	Вплив температуро-часових умов на структуру і властивості мідно-алюмінієвого з'єднання після зварювання вибухом і подальшого протягування.....	83
	Висновки до розділу 3.....	89
РОЗДІЛ 4	РОЗРОБКА ТРУБЧАСТОЇ ВИБУХОВОЇ КАМЕРИ	
	ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ	
	МАЛОГАБАРИТНИХ ВИРОБІВ.....	91
4.1	Розробка методики чисельного моделювання плоского заряду для зварювання вибухом у вибуховій камері.....	91
4.2.	Моделювання впливу вибухових навантажень на напружено-деформований стан елементів трубчастої камери.....	102
4.3.	Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану в елементах трубчастої вибухової камери	115
4.4	Автоматизація та особливості роботи камери.....	125
	Висновки до розділу 4.....	128

РОЗДІЛ 5	РОЗРОБКА КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ МІДНО-АЛЮМІНІЄВИХ ВУЗЛІВ І ПЕРЕХІДНИКІВ.....	130
5.1	Розробка технології виготовлення зварюванням вибухом з подальшим протягуванням коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопроводів для систем управління авіатехніки.....	130
5.2	Розробка комплексної технології виготовлення біметалевих мідно-алюмінієвих гільз для з'єднання багатожильних кабелів.....	143
	Висновки до розділу 5.....	157
	Загальні висновки.....	158
	Перелік використаної літератури.....	160
	Додатки.....	174
	Додаток 1 Акт ДП «Антонов».....	175
	Додаток 2 ТУ на прутки алюмомідний.....	176

ВСТУП

Актуальність теми. Отримання нових високоякісних матеріалів із заданими властивостями завжди належало до головних завдань науково-технічного прогресу. Одним з напрямків його вирішення є розробка нових прогресивних технологій, в тому числі заснованих на комбінуванні різних способів зварювання або зварювання з наступним механічним впливом (наприклад, прокатка або протягування).

Біметалічні вироби циліндричної форми широко використовуються в електроенергетиці, авіабудуванні, різних галузях машинобудування, металургії і т.і. Дані вироби працюють під дією механічних навантажень, є провідниками електричного струму і схильні до електрокорозійного руйнування. Наприклад, струмопровідні елементи систем управління авіатехніки повинні мати низький електроопір, високі пластичні властивості і низьку питому вагу. Мідь задовольняє тільки першим двом з вище перерахованих властивостей. Для з'єднання різнорідних (мідних і алюмінієвих) багатожильних кабелів електричних мереж доцільно використовувати мідно-алюмінієві коаксіальні перехідники. Зварювання вибухом (ЗВ), в силу притаманних йому особливостей і переваг, є одним із ефективних методів отримання біметалічних мідно-алюмінієвих елементів.

Незважаючи на успіхи, досягнуті в дослідженні процесу ЗВ міді і алюмінію завдяки роботам українських і зарубіжних вчених Кудінова В.М., Добрушина Л.Д., Петушкова В.Г., Дерібаса А.А, Сєдих В.С., Лисака В.І., Трикова Ю.П., Кузьміна С.В., Первухіна Л.Б., Crossland В., Bahrani А. і ін., відкритим залишається питання отримання коаксіальних з'єднань з даних матеріалів. Це пов'язано з тим, що на процес утворення з'єднання при коаксіальному зварюванні вибухом міді з алюмінієм впливає середовище, яке утворюється в проміжку між поверхнями, що зварюються. Перед точкою контакту утворюється «пробка» із розігрітого ударно-стисненого повітря і продуктів кумуляції. При коаксіальному розташуванні заготовок, які зварюються, ускладнена можливість бокового витоку «пробки» із проміжку. В

результаті чого наростає її довжина, і як наслідок, час впливу температури. Враховуючи низьку міцність матеріалів, які зварюються та низьку температуру плавлення алюмінію, задача ЗВ за коаксіальною схемою для даної пари металів ускладнюється у порівнянні зі зварюванням за плоскою схемою. Це вказує на необхідність проведення досліджень, що направлені на більш глибоке розуміння процесів у зварювальному проміжку та розробку спеціальних заходів для підвищення якості зварювання.

Разом з тим, при зварюванні вибухом існує необхідність захисту обслуговуючого і виробничого персоналу від вражаючих факторів вибуху. Вибухові камери є універсальним засобом захисту від дії вибуху. До їх переваг належать: автоматизація роботи, дистанційне керування, невеликі габарити, можливість установки у межах міста.

Питанням розробки вибухових камер присвячено багато експериментальних і теоретичних робіт. Оскільки розрахунки навантажень від дії вибуху за відомими методиками дають результати, які суттєво відрізняються між собою, то при проектуванні камер проводять масштабне моделювання. Це призводить до витрат матеріалів та часу. На сьогоднішній день існують потужні математичні пакети, що дозволяють проводити чисельне моделювання процесу вибуху і його впливу на конструкційну міцність камери. У зв'язку з цим актуальним є використання математичного моделювання для визначення напруженого стану вибухової камери.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана робота виконана в рамках наступних тем НАН України: “Дослідження фізичних відмінних рис процесу зварювання металів вибухом при атмосферному тиску і в умовах глибокого розрідження (вакууму) та розробка відповідних технологічних схем реалізації процесу” (2013-2015 рр.) згідно постанови Бюро ВФТПМ НАН України від 06.11.12 № 16, № державної реєстрації 0113U000787 (08.01.13 р.), “Дослідження вибухових процесів зварювання у захисних газах та різання гнучкими кумулятивними зарядами, а також розробка відповідних технологій металообробки вибухом” (2006-2008

рр.) згідно постанови Бюро ВФТПМ НАН України від 26.09.06 № 16, № державної реєстрації 0103U012281 (20.01.06 р.). “Дослідження структури, механічних властивостей та параметрів електропровідності коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопроводів систем керування авіатехніки, що отримані шляхом обтискання вибухом – протягування” (2011 р.) за протоколом засідання директорату ІЕЗ ім. Є.О. Патона від 15.11.10 р. №5, № державної реєстрації 0111U00737 (23.02.11 р.)

Мета і завдання дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є створення із застосуванням зварювання вибухом технології отримання коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопровідних вузлів, перехідних елементів і устаткування для її реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв’язати наступні завдання:

1. Дослідити вплив довжини мідно-алюмінієвих коаксіальних заготовок на структуру і якість з’єднань, які одержані зварюванням вибухом. Вивчити вплив вакуумування зварювального проміжку на формування з’єднання міді з алюмінієм в процесі зварювання вибухом довгомірних циліндричних виробів.

2. Вивчити вплив канального ефекту на структуру мідно-алюмінієвих коаксіальних з’єднань, отриманих зварюванням вибухом.

3. Вивчити вплив термічної обробки на структуру зони коаксіального з’єднання міді з алюмінієм після зварювання вибухом і подальшого протягання. Розробити режими термічної обробки, що забезпечують задані пластичні властивості коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок за мінімальної кількості утворених інтерметалідів.

4. На базі (з використанням) комп’ютерного моделювання визначити найбільш навантажені зони трубчастій вибухової камери.

5. Експериментально дослідити вплив маси зарядів, що підриваються, на напружено-деформований стан елементів камери й оцінити точність виконання моделювання.

6. Розробити технологію виробництва на базі зварювання вибухом коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопроводів для систем управління авіатехніки та біметалевих мідно-алюмінієвих гільз для з'єднання багатожильних кабелів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше визначено проявлення «канального ефекту» при зварюванні вибухом. Визначено його спільні риси та відмінності від традиційного «детонаційного канального ефекту», які полягають у впливі на поверхні, що зварюються, потоку кумулятивних викидів металу і ударно-стиснутого газу, який рухається в зварювальному проміжку. Встановлено, що канальний ефект істотно посилюється при зварюванні вибухом за циліндричною схемою внаслідок відсутності бокового відтоку із зварювального проміжку ударно-стисненого газу і продуктів кумуляції.

2. Розвинуто уявлення про основні причини, що призводять до збільшення кількості оплавленого металу по довжині коаксіальних заготовок при зварюванні вибухом. Встановлено, що при зварюванні вибухом плоских і циліндричних виробів з міді і алюмінію на близьких режимах, об'ємна доля інтерметалідних включень на межі з'єднання циліндричних виробів суттєво збільшується завдяки посиленню «канального ефекту».

3. Вперше встановлено та досліджено механізм впливу вакуумування зварювального проміжку на структуру та якість з'єднання біметалу Al-Cu при зварюванні вибухом.

4. Розроблена оригінальна методика визначення напружено-деформованого стану в силових елементах трубчастої вибухової камери при зварюванні вибухом за допомогою чисельного моделювання методом кінцевих елементів. Встановлено, що максимальна дія ударної хвилі від підриву плоского заряду спрямована вертикально.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено промислову технологію отримання зварюванням вибухом з подальшою протяжкою мідно-алюмінієвих біметалевих коаксіальних струмопроводів для систем управління

авіатехніки. Якість біметалевих стрижнів відповідає технічним умовам і конструкторській документації ДП «Антонов». Виготовлена промислова партія стрижнів діаметрами 8,0 мм і 8,8 мм і товщиною мідного шару 0,3 мм.

На замовлення компанії «Eltech» (Республіка Корея) виготовлена партія біметалевих перехідників діаметром 29 мм для з'єднання мідних і алюмінієвих багатожильних кабелів.

Для виконання зварювання вибухом створена трубчаста вибухова камера з підвищеною продуктивністю завдяки автоматизації системи завантаження заготовок, які зварюються. Камера розрахована на підрив до 2,4 кг вибухової речовини у ТНТ еквіваленті.

Об'єкт досліджень: біметалеві коаксіальні мідно-алюмінієві електротехнічні вироби, які отримані зварюванням вибухом.

Предмет досліджень: структура, електрофізичні властивості і міцність коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм, отриманих зварюванням вибухом із застосуванням різних технологічних схем обробки після зварювання.

Методи досліджень. У роботі використані сучасні методи і методики досліджень: світлова та растрова електронна мікроскопія, статичні механічні випробування, математичне моделювання, тензометрія.

Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні загальної концепції роботи, формулюванні мети і завдань дослідження, виборі загальних і створенні спеціальних методів їх вирішення, безпосередньої участі в плануванні та проведенні експериментів, участі в розробці технологічних процесів виготовлення мідно-алюмінієвих провідників і перехідників для з'єднання мідних кабелів з алюмінієвими, участь у проектуванні і виготовленні трубчастої вибухової камери. Сформульовано загальні концептуальні підходи до розробки математичної моделі. Здобувачем також сформульовано основні положення наукової новизни і загальні висновки за дисертаційною роботою.

В роботах, виконаних у співавторстві здобувачу належить наступне: у праці [1] – досліджено та здійснено аналіз впливу довжини заготовки і вакуумування зварювального проміжку на мікроструктуру зони з'єднання, [2,

13, 14] – експериментально досліджено вплив вакуумування проміжку при зварюванні вибухом довгомірних коаксіальних заготовок, [3] – запропоновано розрахункову методику оцінювання геометричних параметрів для вибору типорозміру заготовок, [4, 10] – запропоновано схему проведення експерименту, [5] – систематизовано інформацію про наявні сучасні камери для зварювання металів вибухом, [6, 7, 15, 16] – здійснено постановку завдань для проведення чисельного моделювання розльоту продуктів детонації та поширення повітряних ударних хвиль під час вибуху плоского заряду і оцінено напружено-деформований стан елементів трубчастої вибухової камери [9] – запропоновано спосіб автоматизації трубчастої вибухової камери та герметизації візка-опори, [11, 12] – проведено аналіз результатів досліджень.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наступних наукових конференціях: VIII Межд. конф. «Shock-Assisted Synthesis and Modification of Materials». - Москва, 11-14.09.2006. X International Symposium Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations. - Bechichi, Montenegro 7-11, 2010. XI International Symposium Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations. - Strasbourg, France 2-5, May 2012. XIV International Symposium Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business and Innovations. – St. Peterbourg, Russia 14-18, May 2018. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Строительные конструкции спортивных и пространственных сооружений» Київ 06-10. 09. 2010. XII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка і технологія» Київ-Севастополь 20-24 червня, 2011. International Conference Shock waves in condensed matter, Kyiv, Ukraine, 16-21 September 2012.

Публікації. За темою даної дисертації опубліковано 16 наукових праць, в тому числі 8 статей у фахових журналах, з яких 1 в наукометричній базі Web of Science, 7 тез доповідей на міжнародних конференціях та 1 патент України.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і 1 додатка. Дисертація має загальний обсяг 176 сторінок, включаючи 79 рисунків, 24 таблиць, 19 формул та список літературних джерел зі 139 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИГОТОВЛЕННЯ МІДНО-АЛЮМІНІЄВИХ МАТЕРІАЛІВ І ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ. КАМЕРИ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ

1.1. Способи виготовлення і сфери застосування біметалевих мідно-алюмінієвих коаксіальних з'єднань

Актуальним питанням для українських і зарубіжних підприємств кольорової металургії і енергетики є завдання заощадження дорогих металів та електроенергії у силових електричних ланцюгах, а також розробка відповідних високоякісних біметалевих матеріалів електротехнічного призначення, зазвичай, у сполученні мідь з алюмінієм [1-3]. У авіаційній техніці застосування таких біметалевих матеріалів дає зниження ваги струмопроводу при збереженні параметрів електропровідності.

Залежно від типу конструкції струмопроводи бувають плоскими або коаксіальними. Плоскі струмопроводи можуть бути класифіковані на біметалеві зі суцільним шаром плакування алюмінієвої чи сталеві поверхні тонким мідним шаром або ж з частковим шаром. Причому плакування може бути нанесено з однією чи з обох сторін [1]. Коаксіальні струмопроводи можуть виготовлятися як суцільні, так і порожнисті (трубки). Суцільні коаксіальні струмопроводи виготовляють з плакуванням міді ззовні, а порожнисті можуть бути плаковані як ззовні, так і внутрішньо.

У біметалічному матеріалі поєднуються такі властивості, які не містить кожен окремо взятий метал або сплав. Можна виділити кілька основних способів виробництва біметалевих матеріалів: наплавлення, магнітно-імпульсне зварювання, зварювання тертям, зварювання вибухом, дифузійне зварювання у вакуумі й обробка тиском, що включає протягання (протяжку), прокатку або пресування (холодне зварювання).

Початок промислового виробництва біметалу сягає кінця XIX – початку XX ст. У 1860-х роках в США були виготовлені сталевомідні дроти, що застосовувалися замість мідних у слабкострумкових телефонних, телеграфних, сигнальних та інших мережах. У 1885 р. такі дроти були отримані у Франції, а в 1890 р. – у Німеччині. Спосіб отримання такого дроту полягав у попередньому очищенні сталевого сердечника, зануренні його в розплав міді для нанесення на нього тонкого шару міді й потім установки такої заготовки у виливницю і заливки сердечника рідкою міддю. Надалі біметалічну заготовку прокочували в калібрах і волочили до отримання дроту потрібного діаметра [4].

Перше спеціалізоване підприємство «Біметал» було засновано 1890 р. у Франції. На початок XX ст. біметалічні матеріали почали виготовляти в США і Німеччині. Масове виробництво біметалів у СРСР спостерігається на початку 30-х років XX ст., коли на Кольчугинському заводі було обладнано виробництво біметалічного дроту поєднанням сталі із міддю. Вихідною заготовкою були біметалічні стрижні, отримані шляхом заливання міді на обміднені й нагріті до температури 900 °С – 950 °С сталеві стрижні. Потім заготовку піддавали прокатці і протяжці [5].

У 1915 р. було засновано американську компанію «Copperweld», що базується у Фейєтвіллі, штат Теннессі. З початку її діяльності основною продукцією були дроти і багатожильні електричні кабелі, виготовлені зі сталі й покриті розплавленою міддю. З 1973 р. процес отримання біметалевих матеріалів цією компанією вийшов за межі тільки міді, сполучивши метали і сплави, такі, як алюміній, олово, латунь, золото, нікель і срібло.

Ця компанія є виробником алюмінієвих прутків у тонкій (250 мкм – 300 мкм) мідній оболонці (струмопроводів) для систем управління авіатехніки. У відкритих джерелах відсутній опис цього способу виготовлення провідників, однак відомо, що проводилася ця операція на дорогих установках, кількість яких у світі обмежена, а в Україні і країнах пострадянського простору такі установки відсутні. Ймовірно, покриття алюмінієвих прутків тонкою мідною фольгою відбувається шляхом намотування мідної фольги на алюмінієвий

стрижень при нагріванні і на попередньо протравлену поверхню. Загальний вигляд виробу, виготовленого з біметалічного дроту компанією «Copperweld» показано на рисунку 1.1.



Рис. 1.1 Струмопровід, виготовлений з біметалічного дроту компанією «Copperweld»

Тому важливим завданням для вітчизняного машинобудування є розробка технології отримання таких струмопроводів для систем управління авіатехніки.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблено спосіб з'єднання шляхом обтиску вибухом гнучких багатожильних кабелів з міді й алюмінію круглого перерізу, який полягає в тому, що сполучувані кабелі з'єднуються з перекриттям і обмотуються алюмінієвою фольгою. Потім поверх алюмінієвої фольги намотується заряд детонуючого шнура і проводиться обтиснення.

Недоліком даного способу є те що, по-перше, мідний кабель з часом буде схильний до електрохімічної корозії, а по-друге, з'єднання кабелів шляхом обтиску вибухом є вибуховою операцією, і її виконання може проходити в незручних умовах, оскільки під дію вибуху може потрапити інше обладнання, тому все більшого застосування знаходять готові біметалічні вироби (муфти), внутрішня поверхня яких частково плакована міддю, таким чином, після механічного обтиску алюмінієвий дріт знаходиться в алюмінієвій частині, а мідний – в частині, яка плакована міддю.

Проаналізуємо можливі способи отримання мідно-алюмінієвих біметалевих з'єднань.

Взаємодія зварюваних металів є основним фактором отримання якісного зварного з'єднання, яке знаходиться в прямій залежності від їхньої взаємної

розчинності як у рідкому, так і у твердому стані, а також від здатності до утворення на межі контакту хімічних сполук у вигляді крихких інтерметалідів і евтектики.

Наплавлення міді на алюміній, так само, як і зварювання плавленням, пов'язане з певними труднощами, які зумовлені властивостями металів, що сполучаються: великою різницею температур плавлення, високою міцністю оксидних плівок, типом металургійного впливу.

Відповідно до діаграми стану, наведеної на рисунку 1.2, сплави алюміній-мідь характеризуються необмеженою взаємною розчинністю у рідкому стані й обмеженою – у твердому [6].

Наплавлення міді на алюміній ускладнене, передусім, утворенням у зоні сплаву крихких інтерметалідних фаз типу Al_2Cu й евтектики $Al_2Cu + \kappa$ із температурою плавлення $548^\circ C$. Властивості інтерметалічних сполук системи Al-Cu наведено в роботі [7].

В електроніці для з'єднання міді з алюмінієм широко застосовують контактне стикове зварювання опором або з оплавленням [8], однак використання даного виду зварювання для отримання коаксіальних з'єднань є неможливим.

Дифузійне зварювання міді з алюмінієм [9, 10], виконане в оптимальних режимах (при температурі нагрівання $T=510^\circ C$, зусилля стиснення – $P = 7$ МПа, час зварювання $t = 15$ хв і розрядження $V = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па), забезпечує отримання сполук, що мають міцність на відрив $\sigma_v = 120$ МПа при відносній деформації 0,5%. Максимальний кут загину зварних зразків становить 7° , що пов'язане з наявністю інтерметалідних прошарків, які неминуче утворюються при даному способі зварювання. Через низьку продуктивність процесу і необхідність застосування дорогого устаткування дифузійне зварювання міді з алюмінієм не знайшло широкого застосування у промисловості.

Зварювання тертям дозволяє з'єднувати мідь і алюміній між собою, однак можливе тільки шляхом стикового з'єднання.

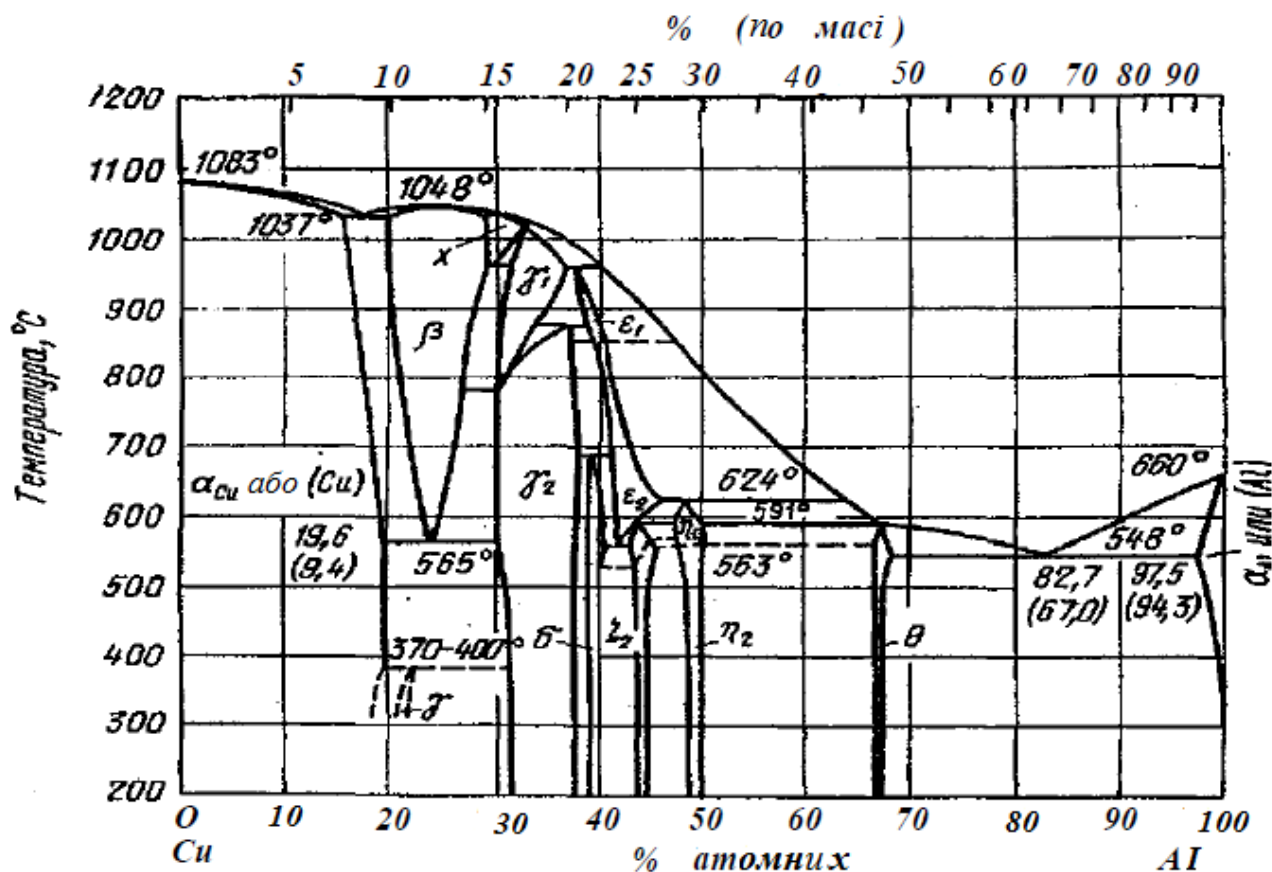


Рис. 1.2 Діаграма стану алюміній-мідь [6]

Всім описаним вище способам зварювання міді з алюмінієм притаманні процеси реактивної дифузії, які інтенсивно розвиваються у розплавлених або близьких до розплавлення металах [11], що спричиняє появу хімічної неоднорідності й утворення у зоні з'єднання проміжних фаз. Утворення ж проміжних фаз призводить до окрихчування зони з'єднання, а також збільшення перехідного електроопору і зниження корозійної стійкості контакту.

З цієї причини для з'єднання міді з алюмінієм доцільно застосовувати такі способи зварювання, при яких формування міцних зв'язків у різномірних матеріалах відбувається без розплавлення за рахунок спільної пластичної деформації.

Холодне зварювання міді з алюмінієм дозволяє отримувати біметалеві плити (листи), а також контактні елементи (наприклад, алюмінієві наконечники з нанесенням (нанесеним) методом локального вдавнення мідного (мідним)

плакуванням) [12], при цьому холодне зварювання непридатне для отримання коаксіальних з'єднань.

Виробництво біметалевих труб пресуванням досить поширене в кольоровій металургії, і воно є основним методом виготовлення труб з кольорових металів і сплавів. Цей метод ґрунтується на спільному витіканні металів, що складають багат шарову заготовку. Дія високих питомих тисків, температури і безперервне інтенсивне оновлення поверхонь контактуючих металів внаслідок великих пластичних деформацій створюють сприятливі умови для утворення металевих зв'язків [5].

Схеми технологічних процесів пресування біметалевих і монометалевих труб практично аналогічні. Для пресування труб переважно застосовують вертикальні й горизонтальні трубні преси. Однак при деформації біметалевих заготовок є деякі характерні особливості, внаслідок яких виникають специфічні проблеми і обмеження, не характерні для пресування монометалевих труб. Наприклад, на передніх кінцях труб може виникати поздовжня різнотовщинність і розшарування складових біметалічної труби, внаслідок переважного закінчення одного з компонентів біметалічної пари на початковій стадії пресування [13]. Але цей спосіб отримання біметалевих труб через потребу у нагріванні не підходить для з'єднання міді з алюмінієм і отримання коаксіальних з'єднань із суцільним перерізом.

Зварювання прокаткою в даний час є одним із найбільш поширених способів отримання мідно-алюмінієвого біметалу [14]. За допомогою цього методу можна виготовляти заготовки товщиною до 20 мм і шириною 600 мм... 800 мм з одно- чи двостороннім покриттям товщиною 0,3 мм... 0,5 мм. Плакування прокаткою здійснюють при одноразовому обтисненні заготовок на 60%... 70%, що вимагає застосування спеціальних прокатних станів.

Детальний аналіз методів отримання мідно-алюмінієвих з'єднань з використанням прокатки наведено в роботі [15], але всі вони стосуються можливості отримання листового біметалу.

Широке застосування отримала прокатка при виготовленні біметалевих труб. Прокатку на безперервному стані використовують для отримання передільних труб з вуглецевих і легованих сталей плакованих міддю, нікелем, нержавіючою сталлю тощо. Вихідними є біметалічні суцільні циліндричні заготовки, отримані пресуванням, наплавленням або литтям [5]. Але жоден з перерахованих способів непридатний для отримання мідно-алюмінієвої заготовки.

Високоякісні з'єднання міді з алюмінієм отримують магнітно-імпульсним зварюванням (МІЗ) завдяки швидкоплинності процесу й локалізації пластичної деформації. При цьому автори [16] зазначають, що необхідне точне дозування величини енергії, запасеної розрядним контуром, в іншому випадку в ділянці взаємодії з'єднуваних металів утворюється широка гама фаз зі значним перепадом концентрацій елементів в мікрооб'ємах. Відзначається також [17], що глибина розподілів зазначених неоднорідностей значною мірою визначається властивостями матеріалів, що з'єднуються.

З огляду на те, що основною сферою застосування цього способу є отримання біметалевих труб і прутків, а також з'єднання труб з іншими деталями [18], застосування МІЗ для отримання великої площі з'єднання неможливе через низьку міцність і стійкість індукторів, які піддаються такому ж тиску, що і деформована заготовка.

Внаслідок малої тривалості латентного періоду утворення інтерметалідів (до 10 с при 400°C) для з'єднання алюмінію з міддю доцільно застосовувати способи зварювання тиском, які характеризуються відсутністю нагрівання і високою швидкістю пластичної деформації.

З'єднання металів у твердій фазі практично будь-яких поєднань і розмірів, в тому числі й тих, зварювання яких іншими способами ускладнене або неможливе, дозволяє виконати зварювання вибухом (ЗВ).

Особливою відмінністю ЗВ від інших відомих способів з'єднання металів у твердій фазі є швидкоплинність процесу – час зварювання становить близько 10^{-6} с [11]. Перевагою ЗВ є те, що при з'єднанні різнорідних металів за такий

короткий проміжок часу в зоні з'єднання не встигають відбутися дифузійні процеси. Серед основних недоліків ЗВ є неможливість контролювання процесу зварювання і регулювання його режиму в реальному часі.

Аналіз розглянутих способів з'єднання металів у твердій фазі показує, що деякими способами складно і неможливо отримати коаксіальні з'єднання міді з алюмінієм, тому для виготовлення біметалевих матеріалів електротехнічного призначення коаксіальної форми доцільно застосовувати зварювання вибухом.

Зварювання металів вибухом як фізичне явище було відкрито на початку 1960-х років, а наприкінці 1970-х завершилося створення основ теорії цього процесу і визначилися пріоритетні напрями його практичного використання. Подальший розвиток ЗВ характеризувався формуванням самостійних науково-прикладних шкіл, які спеціалізуються на цих напрямках. Серед основних шкіл, які були сформовані у часи існування СРСР і які успішно розвиваються донині, можна назвати Інститут гідродинаміки СО РАН (Новосибірськ, Росія), Волгоградський державний технічний університет (Волгоград, Росія), Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Київ, Україна), Білоруське республіканське НВО порошкової металургії (Мінськ, Білорусія), ФГБУН «Інститут структурної макрокінетики і проблем матеріалознавства ім. А.Г. Мержанова» (Чорноголовка, Росія) тощо.

Незважаючи на численні успіхи, досягнуті в сфері пізнання процесу ЗВ міді й алюмінію завдяки дослідженням українських і зарубіжних вчених, зокрема: А.А. Дерибаса, В.С. Сєдих, В.М. Кудинова, Л.Д. Добрушина, В.Г. Петушкова, В.І. Лисака, Ю.П. Трикова, С.В. Кузьміна, Л.Б. Первухіна, В. Crossland, А. Bahranі та ін., більшість робіт присвячено проблемі виготовлення листового біметалу або тришарового композитного матеріалу, одержуваного за батареюною схемою [19]. Тому питання дослідження особливостей отримання коаксіального з'єднання міді з алюмінієм та розробка відповідних технологій є актуальним завданням.

1.2 Особливості та основні параметри зварювання вибухом

Зварювання вибухом – процес одержання сполук під дією енергії, яка виділяється у результаті хімічної реакції перетворення заряду вибухової речовини (ВР) у газоподібні продукти з подальшим їх розширенням [20].

При цьому для одержання плоских біметалевих листів або смуг є дві принципові (базові) технологічні схеми ЗВ – кутова (рис. 1.3, а) і паралельна (рис. 1.3, б) або їхні комбінації.

Обидві схеми передбачають рух пластини в сторону нерухомої пластини або їх взаємозустрічний рух. Нижню пластину 1 розташовують на звичайній основі (грунті) або масивній опорі, а на поверхню металеві пластини 2 розміщують шар ВР 3. Після ініціювання заряду детонатором металеві пластини, яка перебуває під дією продуктів детонації (ПД) 4, які швидко розширюються, набуває швидкості метання – V_c , яка дорівнює декілька сотень метрів за секунду. Якщо швидкість детонації заряду ВР дорівнює D , то швидкість точки (лінії) контакту $V_k \leq D$ і, як правило, вона на порядок перевищує швидкість V_c . Сполучувані пластини встановлюють в повітрі або вакуумі на деякій відстані одна від одної з проміжком h_0 і / або під кутом α . Пластини при цьому співударяються під динамічним кутом $\gamma = \alpha + \beta$ (де β – кут розвороту пластини, яка кидається (на рис. 1.3 не показаний)). При паралельному розташуванні пластин (рис. 1.3, б) з початковим проміжком h_0 , швидкість $V_k = D$ і пластини зіштовхуються під кутом $\gamma = \beta$ ($\alpha = 0$).

В даний час накопичено великий експериментальний і теоретичний матеріал з питання формування з'єднання при зварюванні вибухом, який узагальнено в роботах [21-24].

До основних параметрів, що визначають процес ЗВ, належать кінематичні (швидкість метання пластини V_c , кут зіткнення γ , швидкість точки контакту V_k) і фізичні (тиск, температура та інші) параметри.

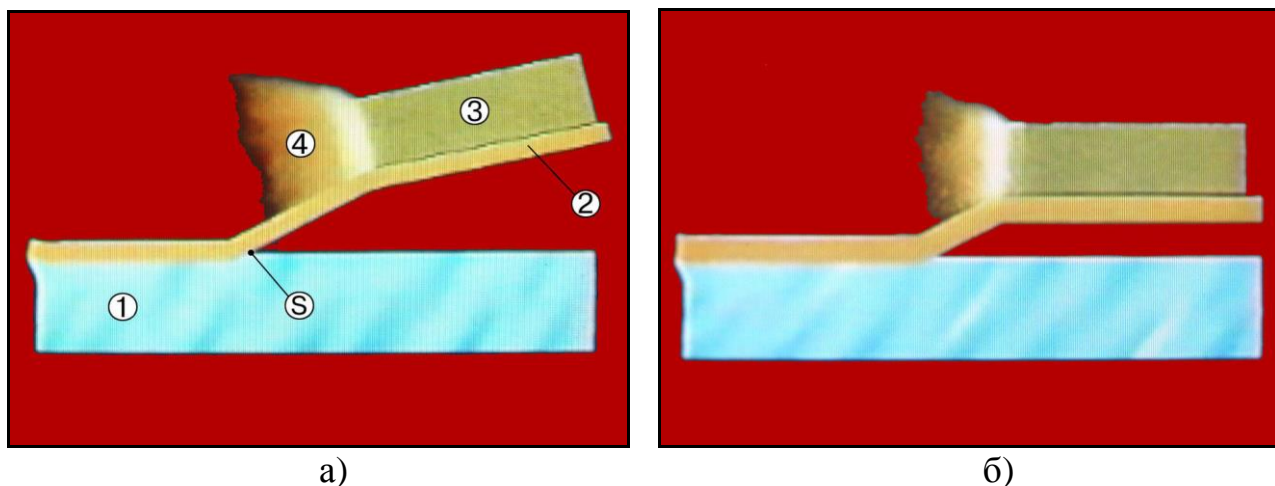


Рис.1.3 Принципові схеми здійснення процесу зварювання металів вибухом під кутом (а) і паралельно (б): 1 – основна пластина; 2 – пластина, що метається; 3 – вибухова речовина; 4 – продукти детонації; S – точка (лінія) контакту зварних поверхонь

Величина основних параметрів істотно залежить від початкових технологічних параметрів. До них належать – взаємне розташування пластин, яке визначається початковою відстанню (проміжком) h_0 між пластинами і початковим кутом між ними α ; швидкість детонації D , залежна від виду і щільності використовуваної ВР, а також розмірів заряду; коефіцієнт навантаження ВР $r = \rho_{\text{ВВ}} H_{\text{ВВ}} / \rho_1 \delta_1$ (де $\rho_{\text{ВВ}}$ та $H_{\text{ВВ}}$ – щільність і товщина шару ВР; ρ_1 и δ_1 – щільність і товщина пластини, яка метається); міцність і теплофізичні властивості металу пластин [21]. Кінематичні параметри розраховуються за методикою і формулами [20], які добре відомі в літературі з питань ЗВ. Ці дані наведено в таблиці 1.1.

Висунуто ряд гіпотез, що пояснюють утворення з'єднання з різних точок зору [24-31]. Точний механізм, що описує процес утворення з'єднання при ЗВ на даний момент відсутній. Швидкоплинність процесу, високі швидкості пластичної деформації і високі тиски, великий градієнт температур у вузькій зоні, відсутність даних щодо властивостей матеріалів і їхніх змін у таких екстремальних умовах не дозволяють однозначно оцінити роль в утворенні з'єднання того або іншого параметра.

Методика і формули для розрахунку кінематичних параметрів зіткнення

Геометрична схема польоту метаючої пластини в певний момент часу	Основні формули з розрахунку кінематичних параметрів зіткнення згідно зі схемою
	$\gamma = \alpha + \arcsin(V_c / 2D); \quad (1.1)$ $V_k = D \sin(\gamma - \alpha) / \sin \gamma; \quad (1.2)$ $V_c / D = \frac{\sqrt{1 + 32/27r - 1}}{\sqrt{1 + 32/27r + 1}}; \quad (1.3)$ $V_c = Dr \sqrt{3/(k^2 - 1)(r^2 + 5r + 4)}, \quad (1.4)$ де: k – показник політропи ПД

Для ЗВ характерна локалізація у вузькій зоні пластичної деформації і протікання процесів рекристалізації з утворенням інтерметалідів і оплавлення зварних поверхонь [32-38].

Параметри заряду ВР визначають характер, кінетику розгону елемента, який метається й кількість енергії, що вводиться в систему пластин, які співударяються. Найважливішим параметром цієї підгрупи є швидкість детонації заряду ВР. Технологічні особливості зварювання вибухом висувають до ВР ряд специфічних вимог [39, 40]:

1. Швидкість детонації D повинна бути меншою швидкості звуку в з'єднаних металах c_0 і перебувати в діапазоні від $1500 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ до c_0 .
2. ВР повинні володіти необхідною стабільністю детонації і мати досить малі величини $H_{кр}$ – висота шару ВР, при якому здійснюється стійка детонація.
3. У фронті детонації повинні розвиватися тиски $p_{вв}$, достатні для забезпечення необхідних величин швидкостей зіткнення зварюваних тіл V_c ($100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ - $1500 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).
4. ВР повинні бути максимально безпечними в обігу, дешевими й стабільно зберігати властивості протягом певного періоду, встановленого для промислових ВР, а продукти детонації і саме ВР – нетоксичними.

5. Застосовувані ВР повинні мати властивості, що забезпечують можливість простого і швидкого виготовлення заряду необхідних розмірів і конфігурації.

Згідно даних [23], більше 260 пар різнорідних металів, отриманих за допомогою ЗВ, наявні і знайшли практичне застосування. Завдяки тому, що з ВР для ЗВ можливо формувати заряди різної конфігурації, за допомогою ЗВ отримують не тільки плоскі, а й циліндричні вироби [41-44].

Зварюванням вибухом можна отримувати як циліндричні заготовки суцільного перетину, так і порожнисті біметалеві. У разі плакування порожнистої заготовки, на відміну від суцільної, необхідно вживати спеціальні заходи щодо запобігання надмірної деформації плакувального елемента [45].

Для отримання порожнистих циліндричних біметалевих заготовок використовують схеми з зовнішнім і внутрішнім розташуванням заряду ВР (рис. 1.4).

Під час використання схем (рис. 1.4, а) застосовують спеціальний наповнювач 6, який відіграє роль опори для внутрішньої труби при зовнішньому впливі ВР [45]. Найбільш вживаним є легкоплавкий сплав Вуда ($t_{пл} = 69 \text{ }^\circ\text{C}$), який після зварювання легко видаляється шляхом розчинення в киплячій воді. Схема (рис. 1.4, б) не вимагає застосування додаткового оснащення і заходів щодо запобігання деформації і застосовується при виготовленні суцільних біметалевих циліндричних заготовок. Трубу 2 (рис. 1.4, б) встановлюють із проміжком на стрижень 1. Внутрішню поверхню труби і зовнішню поверхню стрижня зачищають механічним способом і знежирюють. На зовнішню поверхню труби розміщують заряд ВР 3. Для центрування труби щодо стрижня використовують спеціальні елементи 4. У вершині збірки встановлюється детонатор 5 для ініціювання ВР.

Детонаційна хвиля приводить у рух стінки зовнішньої труби, при ударі яких створюється високий тиск і забезпечують щільний контакт між стрижнем і зовнішньої трубою. Товщина плакувальної труби може коливатися в досить широких межах (0,5 мм-15,0 мм). У праці [42] зазначено, що немає жодних

обмежень на величину діаметра і довжину біметалічної труби, однак практично досяжні розміри не називаються.

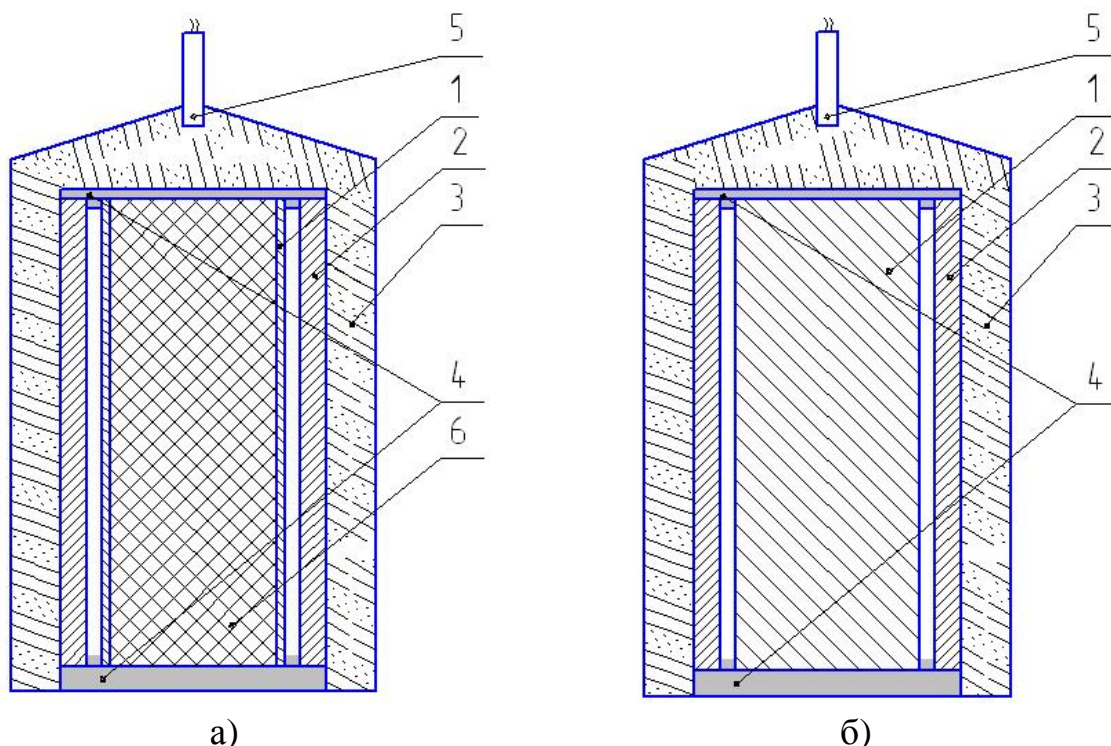


Рис. 1.4 Схеми зовнішнього плакування вибухом труб (а) і стрижнів (б):
1 – плакувальний елемент (труба або стрижень), 2 – зовнішня труба, 3 – ВР,
4 – центрові кришки, 5 детонатор, 6 – наповнювач

Схема внутрішнього плакування вибухом, представлена на (рис. 1.5, а), застосовується переважно для плакування труб невеликих розмірів.

Плакувальна труба 1 за допомогою заряду ВР 3 метастається на плакувальну трубу 2. При малій товщині труби 2 необхідно застосовувати спеціальну оправку (матрицю), що сприймає частину навантаження від вибуху заряду ВР [45], з метою зменшення деформації тонкостінної заготовки, яку плакують. Використання матриці має ряд недоліків: 1 – недовговічність конструкції матриці (залежно від потужності заряду ВР), 2 – складність отримання труби з матриці після вибуху, 3 – додаткова витрата матеріалу на виготовлення оправлення.

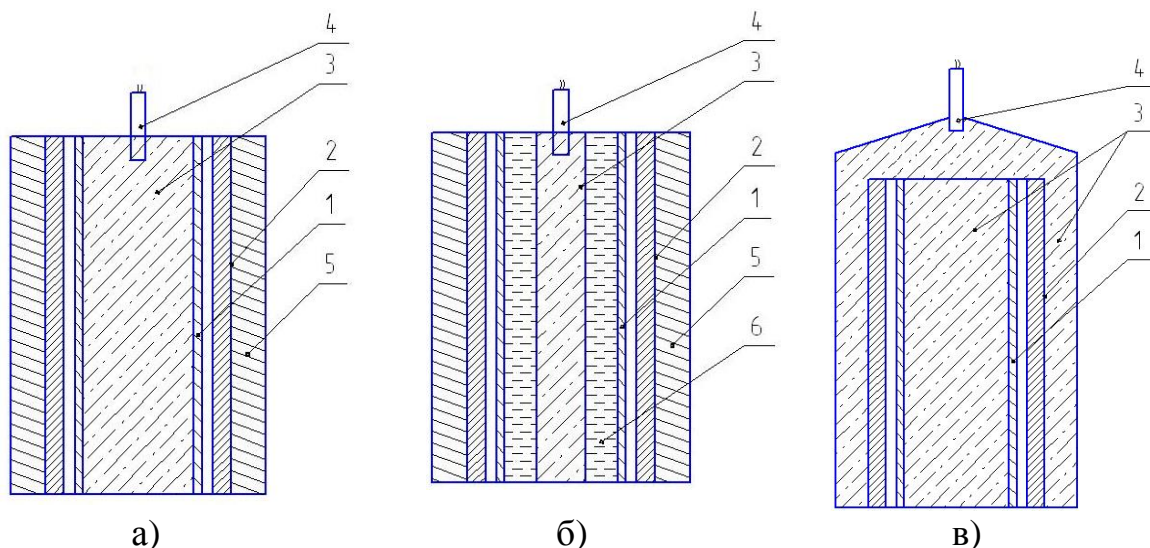


Рис. 1.5 Схеми внутрішнього плакування труб: (а) – плакування внутрішнім зарядом ВР; (б) – плакування крізь передавальне середовище; (в) – плакування двома синхронно ініційованими зарядами 1 – труба, яка кидається, 2 – зовнішня труба, 3 – ВР, 4 – детонатор, 5 – бандаж, 6 – інертне середовище

Схема, зазначена на (рис. 1.5, б), застосовується під час плакування труб, що мають канали діаметром приблизно від 20 мм до 50 мм. Дана схема відрізняється від попередньої наявністю кільцевого шару інертного передавального середовища 6 між плакувальною трубою 2 і зарядом ВР, а також додаткової оболонки, яка відділяє ВР від інертного середовища (вода, парафін тощо). Інертне передавальне середовище дозволяє узгодити величини (параметри) заряду вибухової речовини і зварювального проміжку, не відмовляючись від технологічно зручної схеми суцільного стрижневого заряду ВР (рис. 1.5, а).

Замість матриці при використанні схеми, зазначеної на (рис. 1.5, а і б), можна застосовувати додатковий заряд (рис. 1.5, в), розташований на зовнішній поверхні труби, що плакується. Основна складність у реалізації такої схеми полягає у забезпеченні синхронності швидкостей детонації внутрішнього і зовнішнього зарядів. При різниці швидкостей детонації зарядів відбувається втрата стійкості процесу і, як наслідок, зміна вихідної форми заготовки або навіть її руйнування [15].

При цьому з розвитком машинобудування в Україні і за кордоном все більше зростає потреба у вирішенні завдань, пов'язаних з використанням ЗВ для довгомірного плакування поверхонь циліндрів і трубчастих виробів струмопровідними, захисними корозійностійкими, жароміцними і тугоплавкими матеріалами, причому як при створенні нових виробів, так і при їх відновленні після завершення певного терміну експлуатації.

Довгомірність плакування труби можна охарактеризувати коефіцієнтом довгомірності заготовок у вигляді відношення їх довжини $L_{тр}$ до діаметра $d_{тр}$.

$$K_{дл} = L_{тр} * d_{тр}^{-1} \quad (1.5)$$

На необхідність плакування довгомірних заготовок вказують дві основні причини:

- отримання або відновлення стандартних виробів;
- підвищення продуктивності й економія дорогих матеріалів.

Технології плакування труб і стрижнів добре відомі, але до цього часу можливості їхнього використання обмежувалися короткомірними виробами ($K_{дл} < 5 \dots 10$) [46] і номенклатурою матеріалів нанесених покриттів (нержавіюча сталь, титан). В опублікованих з даного питання основних працях [47-52] відображені рівні розвитку технологій плакування труб вибухом. За цими даними постає висновок про необхідність подальшого розвитку і вдосконалення технологій, зокрема, для освоєння діапазону $K_{дл} > 5 \dots 10$, а також у процесі плакування електротехнічними матеріалами.

В роботі [53] показано можливість отримання довгомірних коаксіальних з'єднань ($K_{дл} = \sim 30$), однак при цьому вказується, що суцільність з'єднання в середньому становить 50% загальної площі контакту зварюваних поверхонь, що, можливо, є цілком прийнятним для електропровідності але не задовольняє, коли виріб піддається механічній дії (вигин, розплющення тощо).

Зони відсутності зварювання спостерігаються як при плакуванні суцільних заготовок, так і при отриманні порожніх біметалевих труб. До кінця причини втрати стійкості процесу зварювання вибухом невідомі. Автори [45] припускають, що ділянка нестійкості процесу зварювання спричинена

виникненням кумулятивного струменя, який оплавляє зварювані поверхні і в багатьох випадках спричиняє пробій плакувальної труби.

Іншими причинами зниження якості з'єднань матеріалів можуть бути експериментально встановлені неспіввісність і кривизна зварних елементів, нерівномірна структура заряду ВР по товщині або щільності, неправильна установка детонатора, що супроводжується відхиленням фронту поширення детонаційної хвилі від перпендикулярного до осі зварюваних заготовок, що, в свою чергу, призводить до утворення складок на поверхні, а також завихрень і порожнечі в зоні зварювання [54, 55].

На якість з'єднання також впливає газ, що знаходиться в проміжку між зварюваними трубами, який стискається і рухається попереду точки контакту з гіперзвуковою швидкістю [56-60].

Таким чином, вивчення впливу середовища у зварювальному зазорі на структуру і властивості отриманого з'єднання є актуальним завданням.

1.3 Обладнання для заварювання вибухом

Наслідком виконання ЗВ, є вражаючі фактори вибуху, які змушують проводити процес металообробки вибухом на полігонах, віддалених на значні відстані від промислових об'єктів і населених пунктів. Побічними факторами під час ЗВ є повітряна ударна хвиля, шум і забруднення навколишнього середовища токсичними продуктами вибуху.

Тому процес ЗВ можна вести на відкритих полігонах, але необхідними умовами є наявність великих площ і віддаленість від населених пунктів, що нерозривно пов'язано зі значними транспортними витратами і зростанням собівартості продукції. Найбільш повно ця особливість проявляється при виробництві заготовок невеликих розмірів.

Проведення робіт на відкритих полігонах ускладнено тим, що у вітряну погоду чи при опадах розкладка сипучих ВР ускладнена і незручна, а в умовах негативних температур, внаслідок зниження ударної в'язкості металів, можливо

їх крихке руйнування [45]. У «польових» умовах значно утруднена термообробка виробів безпосередньо після вибуху для запобігання утворення тріщин, що робить практично неможливим отримання ряду композицій багат шарових матеріалів.

Як наслідок, актуальною стає задача створення надійного захисного обладнання, а саме вибухових камер (ВК), для ЗВ.

Установки ВК проєктуються та створюються для виконання лабораторних і технологічних робіт. У проєктувальників установок ВК було прагнення створити універсальні установки, щоб кожна з них могла бути придатною для використання якщо не всіх, то, принаймні, багатьох (із заданою масою ВВ) як промислових, так і дослідницьких технологій [22]. Більше чотирьох десятиліть діяльності з проєктування і виготовлення ВК переконали творців в тому, що створити такі камери можливо, але не завжди доцільно.

При проєктуванні будь-якої ВК обов'язково повинна бути покладена в основу конкретна технологія, яка буде використана для виробництва певної технологічної продукції (наприклад, отримання біметалу зварюванням вибухом, штампування вибухом) або для виконання дослідних чи експериментальних робіт (наприклад, реєстрація руху тіл і детонаційних хвиль методом оптичної фотозйомки).

Вибухова камера зазвичай являє собою оболонку сферичної або циліндричної форми з торцевими напівсферичними днищами. Місце розташування технологічного люка на оболонці камери визначаються ергономічними вимогами - зручністю роботи з установкою. Всі елементи оболонки ВК виготовляють з однієї і тієї ж марки стали. Зварні шви виконують стиковими.

Однією з перших в Україні ВК, була вакуумна камера, виготовлена у Харківському авіаційному інституті [62]. Камера призначалася для листового штампування зарядами масою до 2 кг ВВ. Її конструкція виконана у вигляді циліндричної оболонки - ковпака діаметром 3.0 м, висотою 2.5 м і опорної частини, на якій може бути встановлено оснащення, діаметром до 2.0 м. Камера

не мала завантажувального люка, доступ до оснащення забезпечувався зняттям оболонки за допомогою тельфера.

Вибухова камера KB-02 призначена для обробки виробів з використанням енергії вибуху, а також для виконання досліджень вибухових процесів. Установка (рис. 1.6) складається з рами, на якій змонтований корпус, гідравлічних пристроїв для виконання маніпуляцій з корпусом і пристроїв для продувки (вентиляції) корпусу. Корпус складається з підставки з робочим столом і рухомої частини. Варіант виконання рухомої частини корпусу передбачає наявність ілюмінаторів для фотореєстрації процесів. Максимальна маса ВР в тротиловому еквіваленті при одному підриві дорівнює 0.2 кг.



Рис. 1.6 Камера вибухова KB-02 (рухома частина корпусу піднята)

Великий обсяг теоретичних і експериментальних робіт з конструкторської розробки і розрахунку на міцність оболонок, люків, опорних елементів та ін. виконаний в Інституті гідродинаміки ім. М.А. Лаврентьєва СВ РАН (ІГІЛ СО РАН) [63]. Вибухова камера ІГІЛ СВ РАН для обробки виробів

великої довжини (рис. 1.7) має циліндричну горизонтально розташовану оболонку (діаметром 1.6 м, товщиною 0.09 м, довжиною 8 м), розраховану на підриг заряду потужністю до 16 кг ВР. Камера оснащена завантажувальним люком, що має дві кришки - внутрішню (силову), що сприймає під час вибуху основне навантаження, і зовнішню (герметизуючу). У камери є предметний стіл (опора), виконаний з металевих листів з гумовими прокладками, істотним недоліком якого є мала довговічність верхнього листа, що витримує обмежене число підригів. Для завантаження камери служить спеціальний маніпулятор, який заштовхує виріб з зарядом у вибухову камеру. Зовнішня кришка відкривається гідроциліндром, а внутрішня відкривається і закривається штоком маніпулятора. У конструкції передбачений аварійний люк. Подібні камери експлуатуються на Новосибірському стрілочному заводі.



Рис. 1.7 Вибухова камера з висунутим робочим столом

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблено унікальну конструкцію і створено трубчасту вибухову камеру (ТВК), яка розрахована на 200 кг ВР у тротиловому еквіваленті (рис. 1.8). Камера складається з 216 труб діаметром 702 мм з товщиною стінки 12 мм. Внутрішній діаметр камери становить 8.4 м. Її розробка здійснювалася Дослідним конструкторсько-

технологічним бюро ІЕЗ ім. Є.О. Патона. До розробки і випробувань ТВК залучалися співробітники багатьох науково-дослідних і проектних організацій України. При цьому проводилися дослідження, на підставі яких вибиралися параметри основних елементів конструкції.

Недоліком даної конструкції ТВК є тривалий час завантаження та вивантаження заготовок. У випадку промислового виробництва використання такої установки недостатньо ефективне [64].

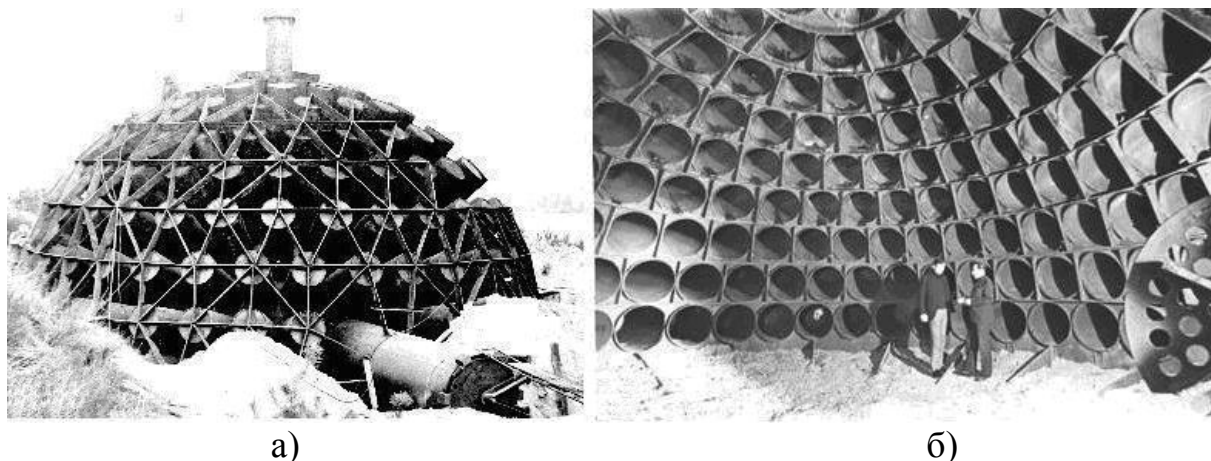


Рис 1.8 Загальний вигляд ТВК: (а) – зовні (на етапі будівництва); (б) – всередині

Тому наступним етапом розробок є створення вузькоспеціалізованих ВК, як елементу обладнання для серійного виробництва стандартної продукції. Для вузькоспеціалізованих камер актуальними є такі проблеми, як удосконалення системи автоматизованого завантаження-вивантаження і вентиляції всередині ВК, з метою скорочення проміжку часу між підривами.

Основним вузлом вибухової камери є оболонка. Оскільки ВК призначені для досить тривалої експлуатації, то конструктивні параметри оболонки повинні забезпечувати її тривалу міцність в умовах багаторазового динамічного навантаження .

У зв'язку зі складністю розрахунку напружень, які виникають в оболонці ВК, дослідження з вивчення їх напружено-деформованого стану при навантаженні вибухом, проводять на реальних установках. Це вимагає значних витрат на матеріали.

Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення фізичних систем. Комп'ютерні моделі дозволяють простіше і зручніше проводити обчислювальні експерименти, реальна постановка яких утруднена. Моделювання в деяких областях промисловості дозволяє уникнути дорогих і тривалих циклів розробки типу «проектування - виготовлення - випробування»

Таким чином, актуальним стає завдання розробки автоматизованої трубчастої вибухової камери та визначення напружено-деформованого стану в її силових елементах.

1.4 Структура мідно-алюмінієвих з'єднань та вплив атмосфери в зварювальному зазорі на їх властивості

За даними літератури, у зв'язку з відсутністю досліджень зони коаксіальних мідно-алюмінієвих з'єднань представляє інтерес вивчення структури в зоні з'єднання залежно від довжини отриманих заготовок і визначення максимальної довжини одержуваних заготовок з якісним з'єднанням. Як було зазначено вище, теоретичних обмежень на довжину зварювальних заготовок немає, проте безпосередньо після зварювання вибухом щодо можливої величини довжини біметалічної труби отримані результати, які суперечать даним роботи [42].

Так, наприклад, з роботи [65] відомо, що внутрішнє і зовнішнє плакування труб протікає стабільно лише на обмеженій довжині. Ця довжина може коливатися від одного досліду до іншого і становить орієнтовно $5 \div 10 R_n$ (де R_n – діаметр внутрішньої труби або стрижня). Причину втрати стійкості процесу зварювання труб вибухом автори однозначно пов'язують з кумулятивним струменем, причому механізм цього явища детально для них не ясний. Біметалічна труба, яка має ділянки нестійкого зварювання, ззовні нічим не відрізняється від доброякісної труби. Дефекти виявляються при дослідженні зони і властивостей з'єднання.

У 1960-х роках перші дослідження зі ЗВ проводилися зі зразками, між якими знаходилося повітря. Було відмічено, що повітря може закриватися між контактними поверхнями, викликаючи при адіабатичному стисненні окислення контактних поверхонь і навіть здуття плакуючого шару [66].

У зв'язку з цим ряд дослідників запропонували вакуумувати проміжок між контактними поверхнями.

В роботі [67] відзначається, що шкідливий вплив повітря в проміжку може полягати в тому, що порції повітря, які закриваються, викликають локальні осередки розігріву металів з утворенням інтерметалідів. Дійсно, температура повітря в проміжку, стисненого ударною хвилею, може досягати кілька тисяч градусів, причому температура значно підвищується, якщо порції повітря піддаються додатковому адіабатичному стисканню. Відзначається також гальмівна дія повітря.

У 1985 р. у компанії «Shockwave Metalworking Technologies BV» (Нідерланди) була створена камера, з можливістю вакуумування для проведення ЗВ, на даний момент там функціонує три камери, які вакуумуються, для різних типів пластин. Фахівцями цієї компанії [68] відзначається позитивний вплив вакууму на з'єднання алюмінію зі сталлю. При випробуванні на загин у біметалі, отриманому в середовищі вакууму, не спостерігається завихрень у зоні розтягування, на відміну від біметалу, отриманого на відкритому повітрі (рис. 1.9).

При цьому необхідно зазначити, що будівництво вибухової камери з можливістю вакуумування вимагає чималих матеріальних витрат, а продуктивність такої установки досить низька.

Вакуумування зварювального зазору, як елемент технологічного процесу при внутрішньому плакуванні труб вибухом, описано у праці [69]. Дещо різниться патент [70], який рекомендує ЗВ виконувати після заповнення газом, який характеризується високою швидкістю поширення звуку, наприклад, воднем або гелієм. Можливо, автори при цьому мають на увазі зниження тиску в ударній хвилі за рахунок більш низької щільності газів з високою швидкістю

звуку в них. Заповнення гелієм або воднем заздалегідь підготовлених труб здатне також запобігти окисненню контактних поверхонь при зберіганні заготовок. Однак можливість закривання названих газів між контактними поверхнями все ж не виключається, тому малоімовірно, що цей прийом буде використаний на практиці.



Рис. 1.9 Результати випробувань: зліва зразок, отриманий у вакуумній камері, а справа – на відкритому повітрі

У роботах [59, 71] було показано, що на утворення з'єднання, структуру і властивості впливає газ, який знаходиться у зварювальному проміжку. У дослідженні [40] йдеться про те, що при ЗВ газ у зварювальному проміжку стискається і нагрівається до високих температур, близько 3000°К, одночасно нагрівається і зварювальна поверхня алюмінію.

Таким чином, газ, що знаходиться в об'ємі між зварюваними поверхнями, впливає на якість властивостей сполук міді з алюмінієм, отриманих ЗВ. Такий вплив газу на процес утворення зварного з'єднання проявляється не тільки на значній відстані від місця початку зварювання, а й в будь-якому місці зварного з'єднання.

Як показано в п. 1.1, з усього ряду технологічних процесів отримання мідно-алюмінієвих композитів, ЗВ є найбільш перспективним методом. Отриманий таким способом біметал має високу міцність на відрив шарів 75 МПа...100 МПа, низький електроопір і високу стійкість до міжшарової електрохімічної корозії, що пов'язано зі 100%-ою суцільністю зварного з'єднання. При цьому, в ряді випадків, коли мідно-алюмінієвий біметал використовується у вигляді перехідних елементів [1, 72], до поверхонь яких висуваються високі вимоги ($R_z = 1,6$), зварені вибухом заготовки, що мають шорсткість поверхні не вище $R_z = 50$, піддають холодній прокатці [73-75] або протяжці, для випадку коаксіальних заготовок. Внаслідок сильного наклепу мідного шару подальші технологічні переробки зварених вибухом і прокатаних мідно-алюмінієвих заготовок, пов'язані з наданням їм певної просторової конфігурації, стають неможливими через утворення в них тріщин з боку міді навіть при незначному (до 30°) вигині. Зазвичай, для зняття наклепу використовують термічну обробку, проте в результаті високотемпературного нагрівання у зоні з'єднання міді з алюмінієм активізуються процеси дифузії, що відповідно до діаграми стану сплавів мідь-алюміній призводить до розвитку в ній структурної та хімічної неоднорідності. Небезпечним наслідком дифузії для властивостей мідно-алюмінієвого композиту є утворення і зростання інтерметалідного прошарку, який має високу твердість і знижену електропровідність, порівняно з матеріалами, що входять у композицію.

У літературі питання впливу температурно-часових умов на структурні й фазові перетворення на межі розділу шарів мідно-алюмінієвого композиту висвітлено досить добре [76, 77]. Однак отримані дані досить суперечливі.

Під час дослідження фазового складу перехідної зони листового біметалу А0+М1 автори роботи [78] початок реактивної дифузії виявили вже при 150°C з утворенням CuAl , що підтверджується даними роботи [79]. При 350°C з'являється додатково шар з'єднання [78] Cu_9Al_4 ; при 400°C між шарами CuAl_2 та Cu_2Al утворюється CuAl . У роботі [79] визначена величина коефіцієнта

взаємної дифузії D , при якій не відбувається утворення дифузійної зони, таке значення досягається при температурі нижче 150°C .

Однак єдиної думки про початок утворення дифузійної зони до цього часу не існує. Так, у роботі [80] наведено дані, що свідчать про те, що вже при двогодинному відпалі й температурному нагріванні 100°C ширина дифузійної зони становить $0.5\ \mu\text{м}$, що суперечить результатам робіт [81-84], в яких з'ясовано, що ознак утворення інтерметалідних фаз при температурі нагрівання нижче 200°C не виявлено. Автори роботи [84] встановили, що при 150°C через 2-4 год відзначається початок процесу рекристалізації, що призводить до певного збільшення міцності з'єднання до $85\ \text{МПа}$. Підвищення температури нагрівання до 250°C при витримці 2 год. призводить до подальшого розвитку процесу рекристалізації і утворення уздовж приграничної зони окремих ділянок інтерметалідного прошарку товщиною $1,2\ \mu\text{м} \dots 2\ \mu\text{м}$, міцність на відрив шарів знижується до $72\ \text{МПа}$.

Залежно від температурно-часових умов термічної обробки мідно-алюмінієвого композиту інтерметалідний прошарок складається з однієї або декількох фаз, що розрізняються концентрацією компонентів [78, 82-86].

Таким чином, аналіз наявних в літературі даних про величину термічних впливів на структуру і механічні властивості мідно-алюмінієвого композиту показав, що в даний час їх цілком недостатньо для призначення режимів термічної обробки, що забезпечують мінімальну структурну неоднорідність перехідної зони, високу міцність і пластичність. Для вирішення даного питання необхідно провести додаткові дослідження.

1.5. Мета і завдання досліджень

Застосування мідно-алюмінієвих композиційних елементів на підприємствах енергетичного комплексу та в авіабудуванні, дозволяє значно зменшити втрати електроенергії при з'єднанні різнорідних металів у контактних вузлах електроустаткування, економити дорогі матеріали (мідь) і знизити масу

виробу в цілому (надзвичайно важливо для авіабудування). Для виробництва біметалів з електротехнічною метою серед поширених способів доцільно застосовувати зварювання вибухом завдяки утворенню надійного металевого зв'язку по всій поверхні з'єднання металів, малому часу процесу і неможливості розвитку активних дифузійних процесів у зоні з'єднання різнорідних металів і сплавів. Це дозволяє отримувати з'єднання з міцністю, як найменш міцний із матеріалів пари, із забезпеченням високої електропровідності практично будь-яких поєднань металів і сплавів площею до десятків квадратних метрів.

Однак, незважаючи на те, що в області ЗВ накопичено чимало теоретичних і експериментальних даних, ряд явищ, що протікають при зварюванні, мало вивчено. Так при зварюванні довгомірних циліндричних заготовок практично невивченим є канальний ефект, що виникає під час ЗВ та перешкоджає отриманню якісного з'єднання великої довжини (більше 10 діаметрів заготовки для коаксіальних з'єднань).

Оскільки при ЗВ у подальшому з протяжкою матеріал зазнає багаторазову деформацію, відкритим залишається питання про вплив параметрів зіткнення і термообробки на механічні властивості мідно-алюмінієвого композиту.

З огляду на масовість виробництва біметалевих перехідників, виникає потреба в автоматизованих захисних пристроях – вибухових камерах, питання створення яких в кожному практичному випадку вимагає свого вирішення.

Метою даної дисертаційної роботи є створення із застосуванням зварювання вибухом технології отримання коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопровідних вузлів, перехідних елементів і устаткування для її реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати наступні завдання:

1. Дослідити вплив довжини мідно-алюмінієвих коаксіальних заготовок на структуру і якість з'єднань, які одержані зварюванням вибухом. Вивчити вплив вакуумування зварювального проміжку на формування з'єднання міді з алюмінієм в процесі зварювання вибухом довгомірних циліндричних виробів.

2. Вивчити вплив канального ефекту на структуру мідно-алюмінієвих коаксіальних з'єднань, отриманих зварюванням вибухом.

3. Вивчити вплив термічної обробки на структуру зони коаксіального з'єднання міді з алюмінієм після зварювання вибухом і подальшого протягання. Розробити режими термічної обробки, що забезпечують задані пластичні властивості коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок при мінімальній кількості утворених інтерметалідів.

4. На підставі комп'ютерного моделювання визначити найбільш навантажені зони трубчастої вибухової камери.

5. Експериментально дослідити вплив маси зарядів, що підриваються, на напружено-деформований стан елементів камери і оцінити точність виконання моделювання.

6. Розробити технологію виробництва на базі зварювання вибухом коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопроводів для систем управління авіатехніки та біметалевих мідно-алюмінієвих гільз для з'єднання багатожильних кабелів.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристики використаних матеріалів

У даній роботі в ролі зварювальних матеріалів були використані алюмінієвий сплав марки АД1 і мідь електротехнічна марки М1.

Вибір зазначених матеріалів обумовлений, перш за все, їх застосуванням або як основних, або як плакувальних елементів композиційних матеріалів електротехнічного призначення.

Для експерименту з дослідження канального ефекту використовували сталь 20 у формі труби і круга.

Алюміній не має поліморфних перетворень і кристалізується в решітці гранецентрованого куба з періодом при 20°C, що дорівнює 0,4041 нм. Він характеризується малою щільністю, високою теплопровідністю, низьким електроопором, високою пластичністю і корозійною стійкістю. Алюміній пластичний, добре зварюється, легко піддається обробці тиском (прокатці, куванню, штампуванню) і різанню. Домішки і легуючі елементи тією чи іншою мірою зменшують електропровідність алюмінію. Алюміній хімічно активний метал, в атмосфері на його поверхні утворюється окисна плівка, яка захищає його від подальшої взаємодії з навколишнім середовищем [87, 88]. Технічний алюміній, що випускається у вигляді деформованого напівфабрикату (листи, профілі, прутки тощо), маркується АД0 і АД1. Хімічний склад і механічні властивості алюмінію АД1 подано в таблицях 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1

Хімічний склад алюмінію марки АД1 за ДСТУ 4784-97

Al, не менше, % 99,3	Домішки, не більше, %						
	Ti	Mg	Cu	Mn	Zn	Si	Fe
	0,15	0,05	0,05	0,025	0,1	0,3	0,3

Механічні властивості алюмінію марки АД1 ДСТУ 21631-76

Стан матеріалу	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ %
Після відпалу	30	70	36

У міді не виявлено поліморфних перетворень, у всьому інтервалі температур нижче точки плавлення вона має гранецентровану кубічну решітку, параметр якої дорівнює 0,3607 нм. Висока електропровідність міді обумовлює її переважне застосування в електротехніці як провідникового металу. Чиста мідь має невелику міцність і високу пластичність, вона добре зварюється. Механічні властивості міді значною мірою залежать від чистоти металу і ступеня попередньої пластичної деформації. Домішки, що містяться в міді, знижують її електропровідність. В результаті пластичної деформації мідь зміцнюється. При деформації більше 40-50% межа міцності міді досягає 392 МПа-441 МПа при одночасному зниженні відносного подовження до 2-4%. Пластична деформація підвищує електричний опір майже на 3% [87-89]. Хімічний склад і механічні властивості міді М1 представлені у таблицях 2.3, 2.4.

Таблиця 2.3

Хімічний склад міді марки М1 за ДСТУ 859-78

Cu, не менше, % 99,90	Масова частка елементів, %									
	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O	Zn
	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,004	0,05	0,004

Таблиця 2.4

Механічні властивості міді марки М1 ДСТУ 495-92

Стан матеріалу	Тимчасовий опір σ_B , МПа	Відносне подовження δ , %
М'який	200..260	36

Для експерименту з дослідження канального ефекту використовували перлітну сталь 20 (труба, круг), основні властивості якої наведені в таблиці 2.5 [90].

Таблиця 2.5

Основні характеристики сталі ДСТУ 1050-88

Марка сталі	Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Тимчасовий опір σ_b , МПа	Відносне подовження $\delta\%$	Ударна в'язкість КСУ, Дж•см ⁻²
Сталь20	245	410	25	78

Вибухові речовини. Для зварювання металів вибухом у якості ВР найбільш часто застосовують амоніт №6ЖВ - найпростіша за складом порошкоподібна, водостійка, сумішева ВР (таблиця 2.6). Найважливішою характеристикою промислових ВР є швидкість детонації D , оскільки вона в ролі основного параметра закладається в розрахунок режимів процесу ЗВ (п. 1.2). Швидкість детонації для кожної ВР (D) в певних умовах підривання є величина постійна, але може змінюватися в широких межах залежно від загального впливу різних чинників: дисперсності, щільності та діаметра заряду [21, 23, 40, 91]. З усієї групи перерахованих факторів найбільше впливає на детонаційні характеристики діаметр або висота шару заряду. Оскільки чистий амоніт №6ЖВ є досить потужним ВР, у ряді випадків виникає необхідність зниження його детонаційних характеристик, оскільки для зварювання металів вибухом необхідно забезпечити швидкість детонації D у діапазоні $1500 < D < c_0$ м•с⁻¹ (c_0 – швидкість звуку в сполучуваних металах), а швидкість зіткнення V_c у діапазоні від 100 м•с⁻¹ до 1500 м•с⁻¹. Цього досягають шляхом змішування ВР з аміачною селітрою або кварцовим піском у різному співвідношенні компонентів.

Детальний аналіз наявних експериментальних даних щодо впливу складу суміші амоніту №6ЖВ з піском і селітрою на основні характеристики одержуваної ВР подано в роботах [20, 21, 93].

Характеристики амоніту №6ЖВ [21,92]

Насипна щільність, $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	Критичний діаметр, $d_{\text{кр}}$, мм	Бризантність, мм	Швидк. детонації, D , $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$	Теплота вибуху, $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$	Темп. вибуху (розрах.), $^{\circ}\text{C}$	Працездатність см^3
0,68 - 0,98	7..25	15..18	2,3..4,6	4320	2960	300..380

Спеціальними дослідженнями [94, 95] встановлено, що зі збільшенням діаметра заряду амоніту №6ЖВ підвищуються також тиск у фронті детонації і масова швидкість продуктів детонації.

Особливий інтерес представляє вивчення детонаційних характеристик кільцевих накладних зарядів, які застосовують при ЗВ біметалевих трубних заготовок. Дослідження, проведені на сталевих трубах, заповнених водою, показали, що зміна внутрішнього діаметра труб у межах від $d_{\text{тр}} = 0$ (суцільний стрижень) до 0,5 м незначно впливає на величину D . Так, заряди суміші 33/67 (амоніт №6ЖВ / аміачна селітра) в шарі 25 мм при діаметрі труби 75 мм детонують зі швидкістю $1900 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, рівній швидкості детонації цієї суміші для плоского накладного заряду, а при $d_{\text{тр}} = 0$, $D = 1570 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Це свідчить, що швидкість детонації кільцевих зарядів при діаметрах більше 60 мм -70 мм можна розраховувати як і таку, що для плоских зарядів [21].

Проведений аналіз результатів досліджень ряду авторів [20, 21, 23, 40, 91] показує, що суміші амоніту №6ЖВ з піском і аміачною селітрою забезпечує зміну швидкостей в необхідному для ЗВ діапазоні значень, що дозволяє їх використовувати для дослідницьких і технологічних завдань у межах цієї дисертаційної роботи.

2.2. Обладнання для комбінованих технологій

2.2.1. Обладнання для протяжки

Протяжку біметалевих мідно-алюмінієвих стрижнів проводили на установці для протягання подовжених кумулятивних зарядів ОБ2067 (рис. 2.1), яку було розроблено в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона і встановлено в науково-інженерному центрі «Матеріалообробка вибухом» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона.



Рис. 2.1 Установка для протягання біметалевих стрижнів

2.2.2 Обладнання для зварювання тертям

Дослідження можливості отримання сполуки біметалічної мідно-алюмінієвої трубної заготовки з алюмінієвої трубної заготовки проводилися на машині для зварювання тертям СТ-120, поданої на (рис. 2.2).

Установка для конвенційного зварювання тертям СТ-120 має привід обертання шпинделя, виконаний на основі двигуна постійного струму з регульованою частотою обертання. Це дозволяє змінювати лінійну швидкість на периферії зварюваних заготовок у широких межах. Гідросхемами передбачено роздільне включення і незалежне регулювання тиску у виконавчих циліндрах затиснення, гальмівної системи, а також осадки. Гідропривід

забезпечує триступеневу циклограму додатку осьового зусилля «притирка» - «нагрівання» - «проковка» в діапазоні 5 кН-120 кН.

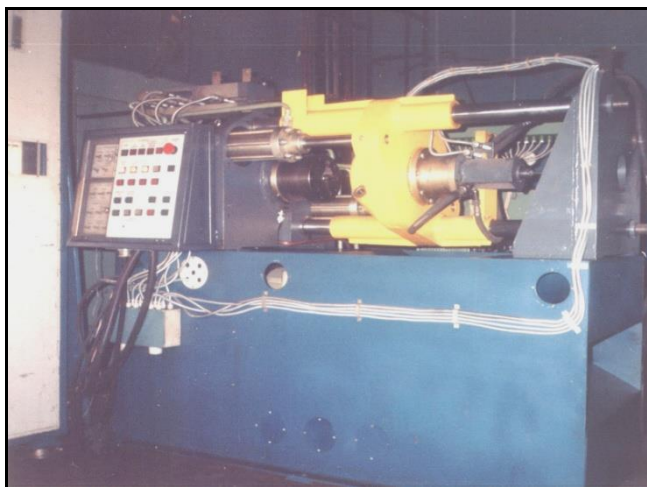


Рис 2.2 Вигляд машини для зварювання тертям СТ-120

Реалізація технології зварювання тертям біметалевих перехідників здійснена на машині для зварювання тертям СТ-120, що розроблена в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона.

На установці СТ-120 забезпечується можливість програмування основних технологічних параметрів, моменту й динаміки докладання зусилля проковки, що дозволяє залежно від діаметра, форми перерізу і матеріалу зварюваних заготовок реалізувати режими конвенційного або комбінованого процесу зварювання тертям у широкому діапазоні зварювальних перетинів.

В процесі виконання дослідницьких робіт було проведено модернізацію схеми управління приводом обертання і виконавчим гідроприводом гальмування, спрямовану на розширення технологічних можливостей установки СТ-120 за рахунок керування динамікою гальмування на заключній стадії процесу зварювання.

Модернізована схема управління у поєднанні з використанням фрикційного багатодискового гальма з регульованим гідравлічним приводом дозволяє управляти процесом гальмування обертання за запланованою програмою і реалізувати нову технологію зварювання тертям з регульованим гальмуванням.

Технічні характеристики машини для зварювання тертям

Потужність, кВ•А	30
Максимальне зусилля просідання, кН	120
Діаметр зварюваних заготовок, мм: - суцільний переріз - труби	10...30 до 40
Максимальна частота обертання, с ⁻¹	65
Продуктивність, шт за год.	до 120
Маса, кг	2100

2.3. Методи дослідження механічних властивостей біметалевих з'єднань, отриманих за комплексною технологією

Отримання біметалів з необхідними експлуатаційними властивостями можливе лише у процесі реалізації щільного з'єднання шарів по всій площі контакту, що зберігається при всіх наступних технологічних операціях обробки біметалу, а також під час його подальшої експлуатації.

Міцність і суцільність - найважливіші показники якості біметалевих з'єднань.

До мідно-алюмінієвого біметалу висунуто багато різних вимог: міцність з'єднання шарів повинна бути такою, щоб гарантувати відсутність розшарування між металами при його технологічних переробках (різанні, штампування, і т.п.); пластичність повинна виключати можливість появи тріщин у плакувальному й основному шарах біметалу після його згинання та профілювання. Все це обумовлює необхідність контролю якості біметалевих з'єднань.

Всі методи випробувань можна розділити на дві групи: кількісні і якісні [40, 96]. До першої групи належать: неруйнівні методи контролю готової

продукції, такі, як ультразвуковий, магнітний, електромагнітний тощо, за допомогою яких можна визначати суцільність з'єднання і здійснювати контроль топографії, кристалічної структури та хімічного складу шаруватих композитних матеріалів; до другої групи належать руйнівні методи, такі, як випробування на вигин, перегин, відрив, розрив, зріз, скручування і сплющування для трубних заготовок за ДСТУ 8695-75.

2.3.1 Методика випробування міцності на сплющування

Оскільки стандартні методики для оцінки міцності на відрив шарів біметалічного кільця, вирізаного з трубної заготовки, відсутні, то в нашій роботі для якісного оцінювання міцності зчеплення шарів було використано відому методику випробуванням біметалевих кілець на сплющування, кільце вирізалось з біметалічної трубної заготовки. Випробування проводилися з метою виявлення тріщин і розшарувань у зоні з'єднання під дією навантаження. Сплющення кільця, вирізаного з мідно-алюмінієвої труби, до дотику поверхонь і їх подальшого візуального огляду дозволяв зробити висновки про якість отриманого з'єднання.

2.3.2 Методика випробування біметалевих гільз на розрив

Оскільки біметалічні гільзи для з'єднання мідних і алюмінієвих кабелів, крім зварювання вибухом, мають зону зварювання, виконану зварюванням тертям, і під час експлуатації ця зона піддається впливу напружень, що розтягують, необхідно перевірити міцність з'єднання, отриманого зварюванням тертям.

Випробування на розрив біметалевих гільз здійснювали на розривній машині ЦД-4.

2.3.3 Методика випробувань коаксіальних струмопроводів на розрив і загин

Для оцінки пластичності коаксіальних струмопроводів, досліджуваних у межах цієї дисертаційної роботи, необхідно провести випробування на розрив, а для якісної оцінки міцності зчеплення шарів - на перегин.

Випробування на перевірку тимчасового опору розриву і відносного подовження виконували за ДСТУ 10446-80. Для проведення випробувань з одного прутка партії вирізаються три зразки довжиною не менше 200 мм, причому два зразка відрізаються від обох кінців дроту, а один - з середини прутка.

Початкову площу перерізу обчислюють за реальним діаметром зразка.

Зразок закріплюється у захватах випробувальної машини так, щоб крайні позначки, що обмежують розрахункову довжину, відстояли від захватів машини на відстані не менше двох діаметрів випробуваного зразка. Захвати повинні забезпечувати відсутність прослизання зразка під час випробування. Відносне подовження зразка після розриву визначали відповідно до ДСТУ 1497-84.

Ще однією вимогою, якій повинен відповідати струмопровід, є перевірка на міцність зчеплення шарів алюмінію і міді, яка здійснюється згідно з ДСТУ 1579-80 шляхом багаторазового перегину на 90° до повного руйнування.

У місці зламу не повинно бути відшарування мідного шару від алюмінієвого сердечника.

Для проведення випробувань згідно з ДСТУ 1579-80 було виготовлено (відповідно до схеми, поданої на рис. 2.3) спеціальне оснащення.

Випробувальне оснащення було сконструйовано таким чином, щоб витримати параметри, зазначені на (рис. 2.3), і розміри, наведені в таблиці 2.8. Розміри елементів наведені тільки для діапазону діаметра зразка від 8,0 мм до 10,0 мм.

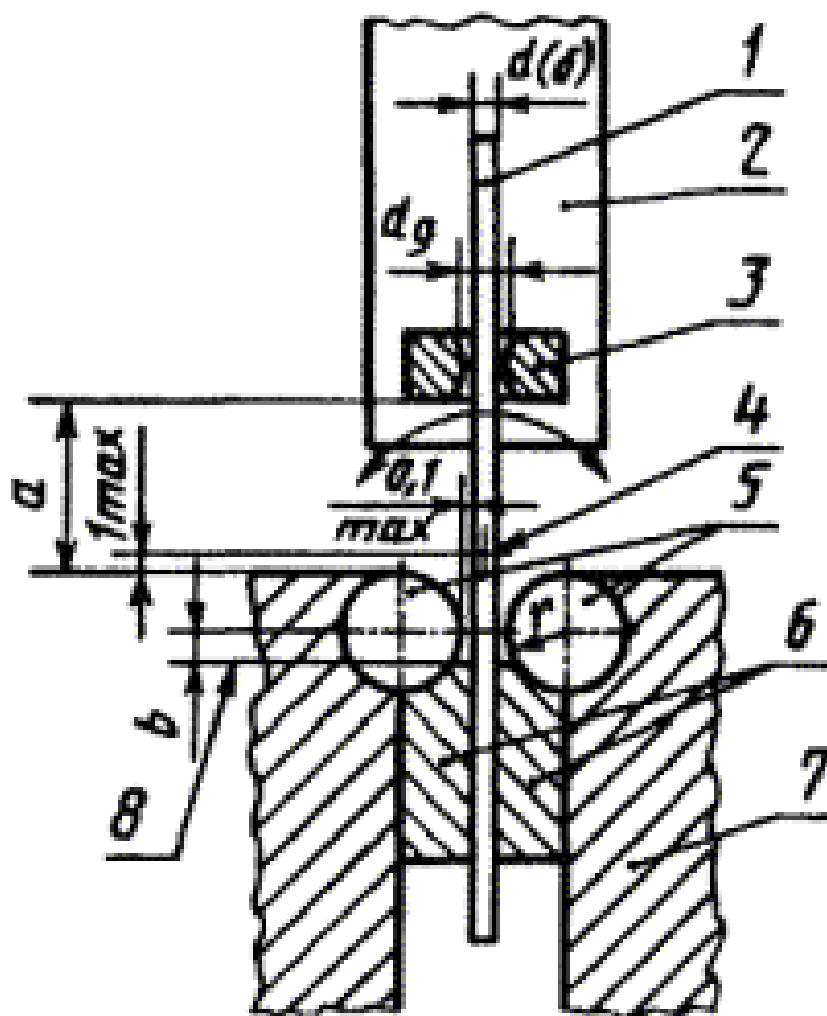


Рис. 2.3 Схема пристосування для визначення міцності зчеплення:
 1 – випробуваний зразок; 2 – згинальний важіль; 3 – поводок; 4 – вісь обертання згинального важеля; 5 – циліндричні валики; 6 – затискні губки; 7 – лещата;
 8 – найближча точка контакту з випробуваним зразком

Таблиця 2.8

Розміри елементів випробувальної машини

Номінальний діаметр зразка $d(\delta)$	Радіус циліндричного валика r , мм		Відстань між верхньою твірною валиків і нижньої поверхнею отвору повідка, a , мм	Діаметр отвору повідка d_q , мм
	Номінальний	Відхилення, що допускаються		
8,0 - 10,0	25	$\pm 0,1$	100	9,0 – 11,0

2.4. Методика виготовлення мікрошліфів і обладнання для дослідження структури біметалевих матеріалів

2.4.1. Методика вирізки і виготовлення мікрошліфів

Виготовлення та підготовка зразків для металографічних досліджень проводилися у кілька стадій:

- вирізка зразків;
- попередня груба обробка поверхонь зразків;
- шліфування;
- полірування;
- травлення (для вивчення мікроструктури).

Вирізка зразків для подальшого виготовлення із них шліфів проводилася механічним способом за допомогою кутової пилки, за схемою, поданою на (рис. 2.4). У будь-якому випадку нарізка проводилася з використанням охолоджувальної рідини.

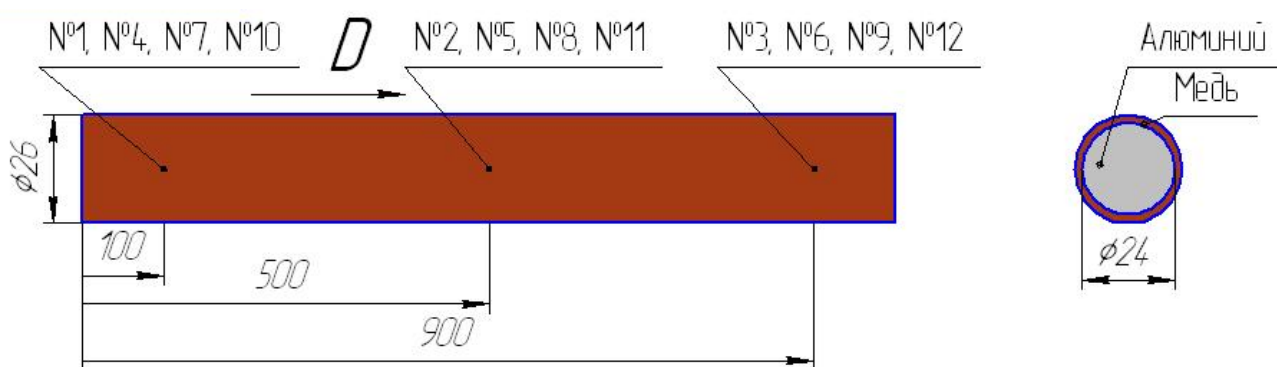


Рис. 2.4 Схема вирізки шліфів з біметалічного стрижня

У таблиці 2.9 наведено опис місця вирізки зразка для вивчення мікроструктури і вказано режим, у якому здійснювалася ЗВ.

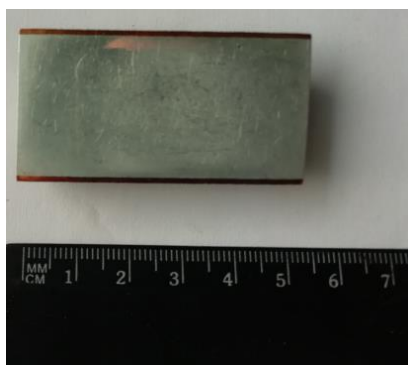
Зразки мікрошліфів мідно-алюмінієвих з'єднань після ЗВ показані на (рис. 2.5, а), після протяжки - на (рис. 2.5, б).

Таблиця 2.9

Номери шліфів, вирізаних зі стрижнів, зварених у різних режимах

Режим	$V_k = 2000, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	$V_k = 2600, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$
повітря	№1 – початок 70 – 100 мм	№7 – початок 70 – 100 мм
повітря	№2 – середина 450 – 500 мм	№8 – середина 450 – 500 мм
повітря	№3 – кінець 870 – 900 мм	№9 – кінець 870 – 900 мм
вакуум	№4 – початок 70 – 100 мм	№10 – початок 70 – 100 мм
вакуум	№5 – середина 470 – 500 мм	№11 – середина 470 – 500 мм
вакуум	№6 – кінець 870 – 900	№12 – кінець 870 – 900 мм

Термообробку заготовок, отриманих після протяжки, виконували в печі СНОЛ-1300 для дослідження впливу температуро-часових умов термообробки на структуру та механічні властивості мідно-алюмінієвих з'єднань.



а)



б)

Рис. 2.5 Зразок мікрошліфа біметалічного стрижня для металографічних досліджень після зварювання вибухом (а), зразки мікрошліфа, виготовлені з коаксіальних мідно-алюмінієвих з'єднань після протяжки (б)

2.4.2. Обладнання для дослідження мікроструктури

Металографічні дослідження структури металів після ЗВ і термічної обробки проводили за допомогою металографічного мікроскопа ММО-1600НА зі збільшенням до 1600х, Versamet-2 і Неофот-32. Фотографування мікроструктури здійснювалося за допомогою камери CMOS (фірма «KONUS», Італія) з розеткою USB.

Отримання біметалів з необхідними експлуатаційними властивостями можливо лише при реалізації міцного з'єднання шарів по всій площі контакту, що зберігається при всіх наступних технологічних операціях обробки біметалу, а також при його подальшій експлуатації.

Метод кількісної металографії застосовували з метою аналізу змін оплавлень й інтерметалідних включень залежно від умов зварювання і термообробки.

2.4.3. Растрова електронна мікроскопія

Растрові зображення структур дають можливість отримати мікрозображення з більшою глибиною поля зору, що дозволяє досліджувати структуру при великих збільшеннях і отримувати більш чітке уявлення деталей цих структур, порівняно зі світловою мікроскопією.

Дослідження структури, хімічного і фазового складу з поверхні зразків проводилися на Оже-мікрозонді JAMP-9500F фірми «JEOL» (Японія).

Оже-мікрозонд JAMP-9500F поєднує в собі властивості високоточного Оже-аналізатора з енергетичним розрізненням ($\Delta E/E=0,05\%$) і нормального графічного електронного мікроскопа з розділенням у вторинних електронах не гірше 3 нм на 24-міліметровому робочому відрізку.

Використання термостійкої електронної гармати і електронно-оптичної колони високої стабільності з максимальним струмом пучка 200 нА відкриває широкі аналітичні можливості при використанні JAMP-9500F:

- можливість картування за Оже-спектрами з просторовим розділенням не гірше 8 нм;
- можливість травлення зразків іонним пучком і дослідження їх структури і складу за глибиною;
- можливість вивчення локального фазового складу методами Оже-спектроскопії;
- проведення точного рентгенівського картування легких елементів в ультрависокому вакуумі (порядку 10^{-8} Па) без вуглецевої контамінації за допомогою енергодисперсійного спектрометра.

Аналітичну растрову електронну мікроскопію у комплекті з енергодисперсійним спектрометром використовували для вивчення загального характеру розподілу хімічних елементів у досліджуваній зоні та визначення хімічного складу в локальних ділянках, наприклад, у ділянці інтерметаліду.

Дослідження зміни елементного складу проводилися з метою вивчення особливостей фазоутворення у зоні зварювання міді й алюмінію у вакуумі й у повітрі.

2.4.4. Вимірювання мікротвердості

При випробуванні на твердість методом Віккерса у поверхню матеріалу вдавлюється чотиригранна алмазна пірамідка з кутом при вершині $\alpha = 136^\circ$. Після зняття навантаження вимірюються діагоналі відбитка d_1 і d_2 . Число твердості за Віккерсом HV підраховується за формулою 2.1 [96] або за допомогою спеціальних перевідних таблиць (ДСТУ 9450-76):

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin 68^\circ}{d^2} = \frac{1,854P}{d^2} \quad (2.1)$$

де, P – прикладене навантаження, г;

d – середньоарифметичні довжини обох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мкм.

У роботах [97–100] доведено відповідність зміни величини мікротвердості матеріалу від міцності його поверхневих шарів.

Метод визначення мікротвердості відрізняється високим рівнем точності і локальності, можливістю автоматизації процесу вимірювань, застосування для широкого кола матеріалів [101]. Саме це стає предметом зацікавлення багатьох вчених до вивчення закономірностей зміни структури і властивостей тонких поверхневих шарів деформованих металів і сплавів.

У даній роботі вимірювання мікротвердості здійснювали на мікротвердомірі ПМТ-3. Вимірювання проводили методом відновленого відбитка, який полягає у нанесенні на випробувану поверхню відбитка після прикладання до алмазного наконечника статичного навантаження 0,1 Н для міді М1 і алюмінію АД1. Крок вимірювань встановлювали у межах від 0,05 мм до 0,2 мм залежно від твердості матеріалу і відстані від межі з'єднання d (зі збільшенням d крок зростає). Налаштування приладу ПМТ-3 на дотик досліджуваного зразка здійснювали при навантаженні $P = 0,005$ Н.

При вимірюванні мікротвердості полікристалічних матеріалів спостерігається розкид одержуваних значень, який може бути обумовлений випадковими причинами, похибкою вимірювального обладнання, анізотропією властивостей окремих зерен і матеріалу в цілому. Тому в кожному випадку проводилися багаторазові ($n = 3$) вимірювання мікротвердості.

2.5. Методика вакуумування

Величину вакууму встановлювали на рівні 20 кПа.

Вакуумування зварювального проміжку здійснювали за такою методикою (рис. 2.6):

1. На підготовлену до зварювання мідну трубку, що має в нижній частині стопорне кільце всередині труби (для упору стрижня) одягали вакуумну трубу з приєднаним кульовим краном (кран №1).

2. Підготовлений стрижень із алюмінію з встановлювальними (центруючими) «виступами» опускали в трубу.

3. Верхню частину труби закривали пробкою, що забезпечує герметизацію дрібних отворів.



Рис. 2.6. Устаткування для вакуумування зварювального проміжку

4. До крану підключали вакуумний насос. На шлангу підключення встановлено кульовий кран (кран №2), після якого розміщено відведення з манометром. Таким чином, схема вакуумування виглядає наступною: вакуумний насос - шланг – кран №2 – відвід для манометра – кран №1 - мідна трубка.

5. Випробування даної схеми проводили кілька разів:

- I. Відкачували повітря зі зварювального зазору;
- II. Перекривали кран №2;
- III. Спостерігали за зниженням тиску.

6. Перевіряли кран №1. Для цього після від'єднання насоса перекривали кран №1 і відкривали кран №2. Потім витримували фіксований час, закривали кран №2 й відкривали кран №1. Якщо не спостерігається різке зростання тиску в декількох випробуваннях або воно близьке за величиною - можна вважати, що кран №1 герметичний.

7. Після перевірки герметичності системи на зборку мідної трубки з алюмінієвим стрижнем одягали пластикові труби, центрували їх і засипали ВР.

8. Після підготовки зборки її встановлювали у місці підриву.

9. Послідовність операцій при вибухових роботах наступна:

- I. Вакуумували зварювальний проміжок;
- II. Перекривали кран №1;
- III. Відокремлювали шланг від насоса, крана і манометра;
- IV. Вставляли детонатор і робили підрив.

Висновки до розділу 2

1. Визначено перелік матеріалів для проведення досліджень.
2. Розроблено спеціальне оснащення та методика для випробувань на згин для біметалевих струмопроводів.
3. Для дослідження властивостей зварених вибухом біметалевих мідно-алюмінієвих матеріалів достатньо використання загально прийнятих методів.

РОЗДІЛ 3

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ЗВАРЮВАННЯМ ВИБУХОМ КОАКСІАЛЬНИХ МІДНО-АЛЮМІНІЄВИХ З'ЄДНАНЬ

3.1. Вплив умов зварювання вибухом на структуру з'єднань міді з алюмінієм

Практична значущість отримання біметалевих коаксіальних мідно-алюмінієвих з'єднань з тонким мідним шаром зумовила необхідність вивчення фізичної і хімічної неоднорідності на межі розділення шарів у початковому стані (після ЗВ), після глибокої пластичної деформації і термообробки.

Значного впливу зазнає процес утворення з'єднання при ЗВ коаксіальних з'єднань міді з алюмінієм від ударно-стисненого газу, що заповнює об'єм між зварюваними поверхнями і рухається зі швидкістю, яка перевищує швидкість точки контакту. Для сполучення мідь-алюміній атмосфера у зварювальному проміжку впливає на формування структури сполуки. Висока температура газу перед точкою контакту призводить до нагрівання зварюваних поверхонь. Збільшення розмірів вихрових зон (аж до розплавів і руйнування плакувального шару) з віддаленням від початку процесу зварювання свідчать про підвищення кількості енергії, що поглинається металом у зоні утворення зварювального з'єднання.

Часто біметалічні й багатошарові мідно-алюмінієві заготовки, отримані ЗВ, піддають подальшій обробці тиском (штамбування, витяжки, пресування, прокатки тощо), що призводить до перерозподілу залишкових напружень, зміни фізико-механічних властивостей і структури композиції. Процеси деформування, що протікають при спільній прокатці шаруватих композитів, теоретично досліджені при деяких припущеннях у ряді робіт [102-105]: деформацію кожного зі з'єднуваних шарів розглядали як незалежну, опір деформації – постійним, а матеріал жорсткопластичним тощо.

В роботі [106] вивчено склад і мікромеханічні властивості дифузійного прошарку в композиційному матеріалі системи Cu-Al, отриманому за комплексною технологією (зварювання вибухом + прокатка). В діапазоні робочих температур 20°C - 500°C визначено механічні властивості 3- і 9-шарового композитів складу мідь М1 + алюміній АД1 з різним обсягом інтерметалідів. Однак ця робота присвячена проблемі деформування мідно-алюмінієвого багат шарового композиту, отриманого за пласкою схемою, з інтерметалідним прошарком, створеним в результаті термічної обробки.

Відсутність досліджень щодо можливості обробки тиском коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок, що забезпечують отримання композиційних деталей із заданими механічними характеристиками і службовими властивостями, значно ускладнює їх оптимальне проектування і виготовлення.

Для визначення максимальної довжини, на якій можливе отримання якісного зварного коаксіального з'єднання міді й алюмінію, були проведені експерименти зі зварювання вибухом на режимах, зазначених у таблиці 2.9.

Як зварювальний матеріал використовувалися трубка з міді марки М1 зовнішнім діаметром $\varnothing 28$ мм і товщиною стінки 1 мм і стрижень з алюмінію марки АД1 (рис. 3.1, а), зварювальну ділянку якого проточували до $\varnothing 24$ мм. Довжина зварювальних заготовок становила 1000 мм. Зварювання вибухом проводилося у двох режимах, при швидкості зіткнення $320 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ і $390 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ та швидкості точки контакту $2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ і $2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ відповідно, з вакуумуванням зварювального проміжку і без нього. Перед зварюванням мідні трубки травили в 10% -му розчині азотної кислоти для зняття окалини після відпалу, а алюмінієві стрижні зачищали наждачним папером із величиною зерна Р120. Для рівномірності засипки використовували контейнер, який складається з декількох частин (рис. 3.1, б). Величина зварювального проміжку дорівнювала товщині стінки мідної трубки.

Вакуумування зварювального проміжку здійснювалося за методикою, описаною у п. 2.5.

Отримані зразки піддавалися металографічним дослідженням (рис. 3.2). В результаті досліджень було виміряно обсягову частку інтерметалідів і ширину інтерметалідного шару та побудовано графіки залежності вищезазначених параметрів від режиму зварювання вибухом й наявності чи відсутності вакууму в зварювальному проміжку (рис. 3.3 – 3.4).

Зразки для металографічних досліджень вирізали за схемою, зазначеною у розділі 2 та на (рис. 2.4).

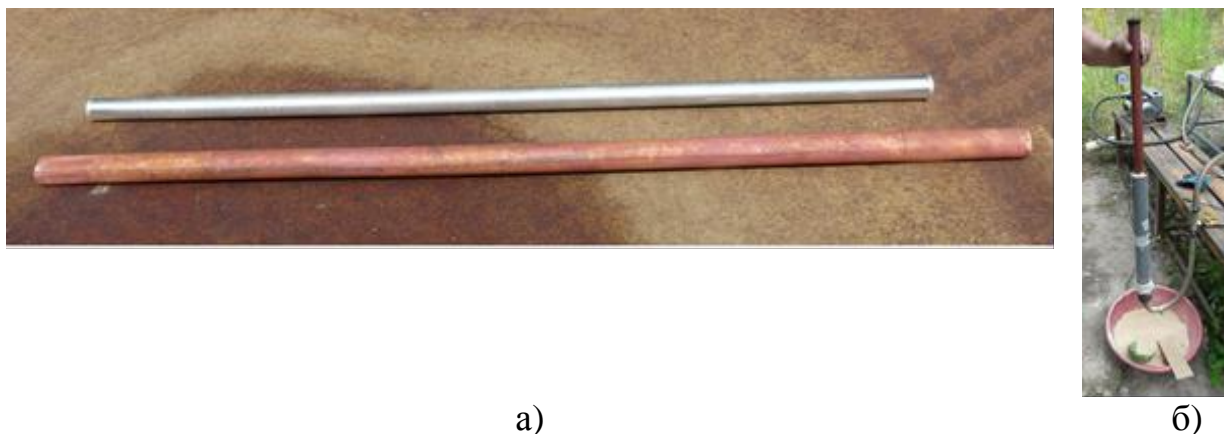


Рис. 3.1 Заготовки для зварювання вибухом (а), засипка вибухової речовини у складовий контейнер (б)

На рисунку 3.2 (а, б, в) наведено фото мікроструктури різних зон (початок, середина, кінець) біметалічного стрижня, отриманого при $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у повітрі, а на рисунку 3.2 (г, д, е) – у вакуумі. Фото мікроструктури різних зон (початок, середина, кінець) біметалічного стрижня, отриманого зварюванням в повітрі й вакуумі при $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, представлено на рисунку 3.2 (ж, з, і) і 3.2 (к, л, м) відповідно.

Проведений металографічний аналіз межі коаксіального з'єднання в мідно-алюмінієвих стрижнях показав, що на різних ділянках біметалевих стрижнів при зварюванні у різних режимах і в повітрі, і при наявності вакууму в проміжку, неможливо отримати з'єднання без утворення інтерметалідів.

При зварюванні вибухом міді з алюмінієм на швидкості точки контакту $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ лінія з'єднання має профіль, близький до хвилеподібного з наявністю ділянок оплавленого металу біля основ горбиків деформації. Крім

того, пластична течія у металах, які зварюються, однорідна в напрямку вектору швидкості точки контакту. Інтенсифікація режимів зварювання (збільшення швидкості точки контакту до $2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) призводить до формування хвильового профілю з'єднання з нестабільними параметрами хвиль і утворенню суцільного прошарку з інтерметалідів як у вакуумі, так і без нього. При цьому утворюється завихрення в основі хвилі, всередині якого спостерігаються рихлості, частки міді й інші включення (рис. 3.2).

Спостережуване зростання обсягової частки (рис. 3.3) і товщини прошарку (рис. 3.4) інтерметалідів у зоні з'єднання із віддаленням від точки ініціювання незалежно від середовища у зварювальному проміжку (повітря або вакуум), має закономірний характер і пояснюється каналним ефектом при ЗВ.

Наприклад, якщо під час зварювання у повітрі на режимі $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ на початку зразка обсягова частка інтерметалідів становить 60%, то при зварюванні у вакуумі, у тому ж режимі вона дорівнює 48% (рис. 3.3), що в 1,25 рази менше. При цьому відношення обсягової частки інтерметалідів у повітрі до цієї ж частки у вакуумі на початку зразка при зварюванні на режимі $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ становить 1,08. Це свідчить про те, що при збільшенні швидкості точки контакту, перехід із кінетичної енергії у теплову переважно відбувається за рахунок пластичної деформації металу навколо шовної зони, і меншою мірою за рахунок каналного ефекту, який на невеликій відстані від початку ініціювання процесу ЗВ слабо виражений.

В середині і наприкінці зразка співвідношення обсягової частки інтерметалідів у повітрі й у вакуумі при зварюванні у режимі $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ становить 1,05 до 1,03 відповідно, тобто показники майже наближаються один до одного. Це свідчить, що на цій відстані в зварювальному проміжку при зварюванні у вакуумі накопичується повітряна «пробка» з ударно-стисненого повітря і частинок з поверхні металів, що зварюються, яка розігріває зварювані поверхні.

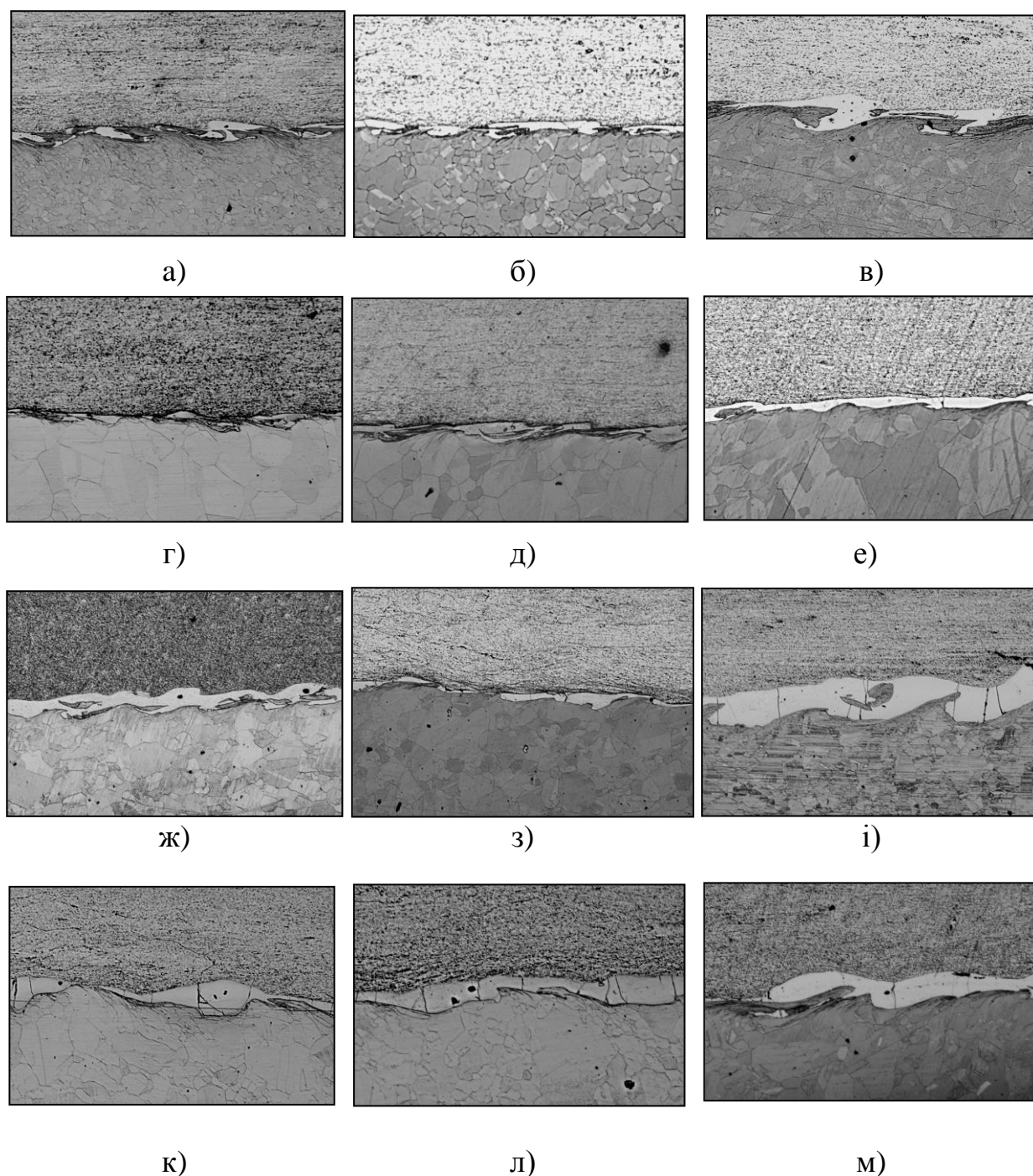


Рис. 3.2 Зміна мікроструктури зони з'єднання залежно від відстані і середовища у зварювальному проміжку при різних швидкостях точки контакту (x150, алюміній вгорі) від початку зварювання:

а, б, в – початок, середина, кінець, $V_k = 2000$ – у повітрі; г, д, е – початок, середина, кінець, $V_k = 2000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ у повітрі; ж, з, і – початок, середина, кінець, $V_k = 2600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ у повітрі; к, л, м – початок, середина, кінець, $V_k = 2600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ у вакуумі

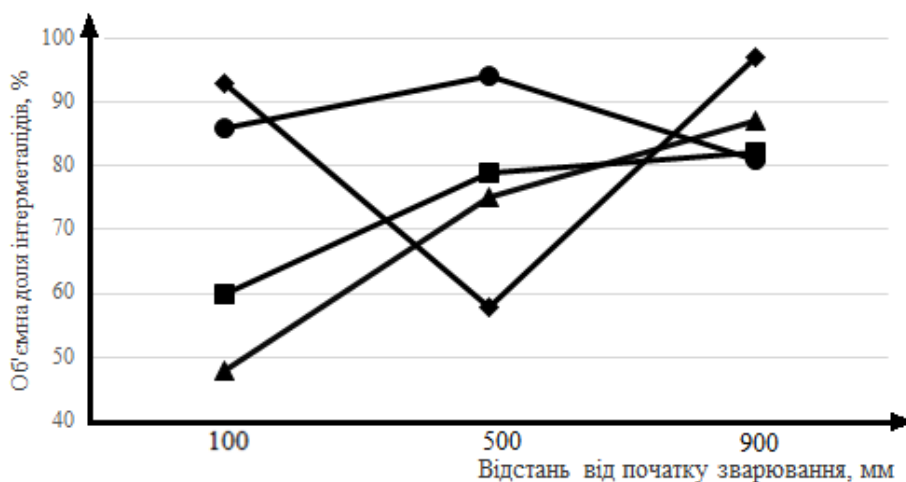


Рис. 3.3 Залежність обсягової частки інтерметалідів у % від режиму й відстані від початку зварювання: ■ – $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у повітрі; ▲ – $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у вакуумі; ◆ – $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у повітрі; ● – $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у вакуумі

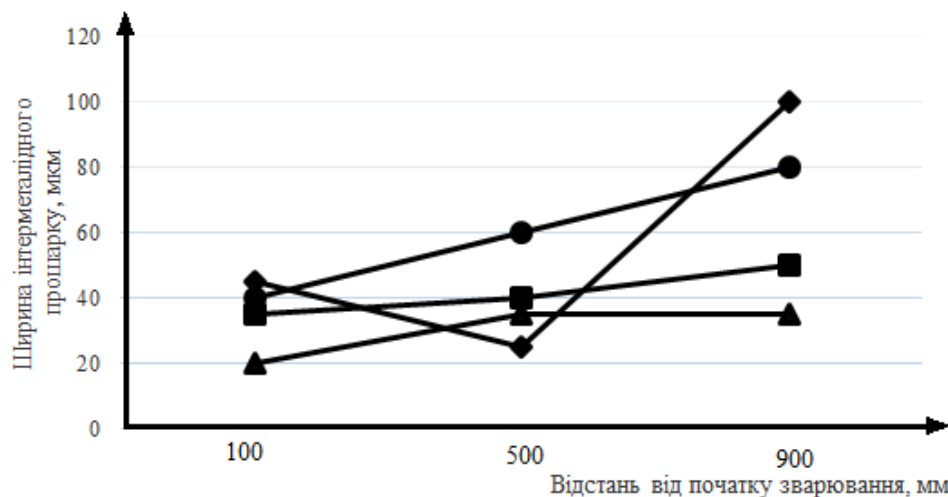


Рис. 3.4 Залежність ширини інтерметалідного прошарку (мкм) від режиму і відстані від початку зварювання: ■ – $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у повітрі; ▲ – $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у вакуумі; ◆ – $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у повітрі; ● – $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у вакуумі

Як видно з (рис. 3.3), співвідношення обсягової частки інтерметалідів у повітрі й у вакуумі в середині зразка при зварюванні на режимі $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ становить 0,61. Таким чином, обсягова частка інтерметалідів, отриманих при зварюванні у вакуумі, у 1,5 рази вища, ніж при зварюванні в повітрі. Це

пояснюється тим, що при зварюванні в повітрі на відстані 250 мм від початку процесу відбувається розрив плакувального шару (рис. 3.5), і як наслідок, витікання розігрітого ударно-стисненого повітря. При цьому на заготовці, отриманій з вакуумуванням зварювального проміжку початок виникнення дефектів у вигляді розриву плакувального шару спостерігається на відстані близько 500 мм від початку процесу.

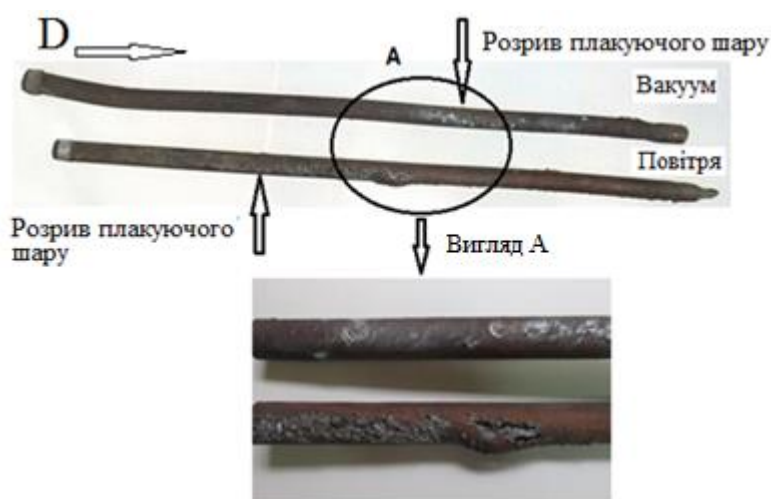


Рис. 3.5 Довгомірна коаксіальна заготовка після зварювання вибухом: загальний вигляд зверху – при зварюванні у вакуумі $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, знизу – у повітрі, напрямом детонації зліва направо $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; вигляд А - розрив плакувального шару, зверху – у вакуумі, знизу – у повітрі

Схожим чином виглядає і графік залежності ширини інтерметалідного прошарку від режиму і відстані від початку зварювання (рис. 3.4). З графіка видно, що на початковій ділянці зразка ширина інтерметалідного прошарку при зварюванні у повітрі при режимі $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ становить 35 мкм, що істотно більше (в 1,75 рази), ніж при зварюванні у вакуумі - 20 мкм. При цьому ширина інтерметалідного прошарку при зварюванні у повітрі на режимі $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ становить 45 мкм, і в 1,125 рази більше, ніж при зварюванні у вакуумі – 40 мкм. Таким чином, також можна стверджувати, що на початковому етапі зварювання основним механізмом переходу механічної енергії в теплову, є пластична деформація металу навколо шовної зони.

На середній ділянці заготовки при зварюванні у режимі $V_k = 2000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ширина інтерметалідного прошарку збільшується щодо початкової ділянки як при зварюванні у вакуумі, так і при зварюванні у повітрі, знижуються показники співвідношення ширини інтерметалідного прошарку, отриманого при зварюванні у повітрі й у вакуумі, до 1,14 рази. На кінці заготовки при зварюванні у повітрі при режимі $V_k = 2000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ спостерігається зростання ширини інтерметалідного прошарку в 1,25 рази, порівняно зі середньою ділянкою, а при зварюванні у вакуумі зростання ширини не спостерігається.

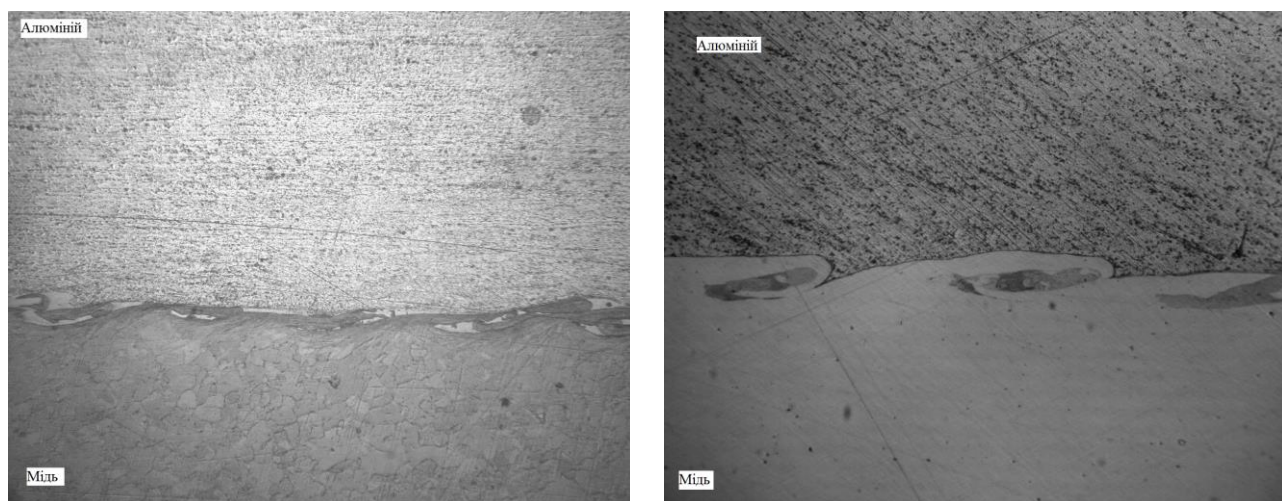
Таким чином, можна стверджувати, що вакуумування зварювального проміжку при ЗВ довгомірних коаксіальних з'єднань дозволяє знизити ширину і обсягову частку інтерметалідного прошарку, але водночас не дозволяє уникнути утворення інтерметалідів [107].

Менша кількість інтерметалідів при зварюванні у вакуумі свідчить про те, що основний енергетичний внесок в утворення інтерметалідів дає каналний ефект, який особливо проявляється при ЗВ коаксіальних з'єднань.

Для порівняння мікроструктури з'єднань міді й алюмінію, отриманих за коаксіальною та за плоскою схемою, були виготовлені зразки плоских з'єднань. При цьому параметри процесу зварювання плоского з'єднання були обрані таким чином, щоб енерговкладення було близьким, до енерговкладення при отриманні коаксіального з'єднання.

За результатами порівняння мікроструктури з'єднань плоских і циліндричних виробів після ЗВ видно (рис. 3.6), що при близьких за енерговкладенням режимах ЗВ у циліндричних виробах кількість інтерметалідних включень значно більше. Це пов'язано з впливом рухомого з гіперзвуковою швидкістю розігрітого ударно-стисненого газу у зварювальному проміжку, який, не маючи бокового витікання, набагато інтенсивніше впливає на зварювальні поверхні, ніж у випадку з плоскими зразками. При цьому виключається можливість розширення зварювального проміжку попереду фронту детонації через жорсткість труби.

Також з (рис. 3.6) видно, що межа з'єднання має хвильовий характер, однак при зварюванні за циліндричною схемою гребні хвиль у міді є більш витягнутими.



а

б

Рис. 3.6 Мікроструктура з'єднання міді з алюмінієм, отриманого при близьких параметрах зварювання (x100): а – коаксіальна схема, б – паралельна схема

Зниження (більш ніж удвічі) ширини інтерметалідного прошарку при зварюванні у повітрі, порівняно із зварюванням у вакуумі, на режимі $V_k = 2600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ у середній частині зразка, як і зниження обсягової частки інтерметалідів, пов'язане з розривом плакувального шару.

Окрім цього, вакуумування зварювального зазору дозволяє отримувати майже удвічі довші коаксіальні заготовки без руйнування плакувального шару. І якщо під час зварювання за наявності повітря у зварювальному проміжку вдається отримати заготовки довжиною близько 10 їх діаметрів, тобто $K_d \sim 10$, то при зварюванні з вакуумуванням зварювального проміжку можливе отримання заготовки довжиною близько 20 її діаметрів без руйнування плакувального шару. Тому для отримання коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок довжиною до 20 їх діаметрів доцільно використовувати вакуумування і обирати режим зварювання зі швидкістю точки контакту $V_k = 2000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Значний науковий і практичний інтерес представляють процеси деформування навколо шовної зони зі значними відмінностями фізико-механічних властивостей.

Металографічним методом, описаним у роботі [108], було проведено дослідження закономірностей пластичного деформування основного металу (алюмінію), що дозволяє виявити відмінності пластичної течії навколо шовної зони при зварюванні у вакуумі й у повітрі.

На (рис. 3.7) показано залежність ширини пластичної деформації в Al за довжиною зварюваних заготовок від режиму зварювання і наявності повітря у зазорі. За даними цього рисунку можна стверджувати, що ширина зони пластичної деформації Al на різних ділянках зварюваних заготовок (початок, середина, кінець) при ЗВ у вакуумі в 1,4 – 1,6 рази перевищує величину пластичної деформації при зварюванні з повітрям у проміжку.

Це є свідченням того, що повітря, не маючи можливості стікання, значно протидіє польоту міді, тому швидкість зіткнення зварювальних поверхонь у вакуумі вища, ніж при наявності повітря у проміжку. Цей факт необхідно враховувати при призначенні режимів ЗВ у вакуумі.

Після виконання ЗВ довгомірних заготовок відбувається розрив плакувального шару, а також спостерігаються дефекти у вигляді бульбашок.

Характерним для обох зразків є те, що більшість бульбашок і всі дефекти у вигляді розривів зосереджені на одній твірній. Це можна пов'язати з нерівномірністю фронту детонації, який по одній із твірних завжди буде відставати [109]. Така нерівномірність буде залежати, перш за все, від зсуву між центрами ініціювання заряду ВР та заготовок під зварювання у зборі, а також від нерівномірності швидкості детонації і товщини заряду за довжиною з'єднання. Встановлений після певного часу від початку ініціювання фронт детонації можна представити у вигляді лінії ABCDE на розгортці циліндричної поверхні на площину (рис. 3.8, а).

На деякій площині поперечного перерізу складення, позначеного лінією FG, під ВР, яка проривувала (заштрихована зона) мідна оболонка буде

практично притиснута до алюмінієвого стрижня, зменшивши свій радіус. У тому місці де ВР ще не продетонувала (незаштрихована зона), мідна оболонка буде мати первинне значення радіуса, набуваючи форму, відмінну від циліндричної. При відсутності вакуумування, через тиск повітря, яке стиснуто ударною хвилею, радіус мідної оболонки в центрі незаштрихованої зони перерізу FG, ймовірно, може стати трохи більшим початкового (рис. 3.8, б).

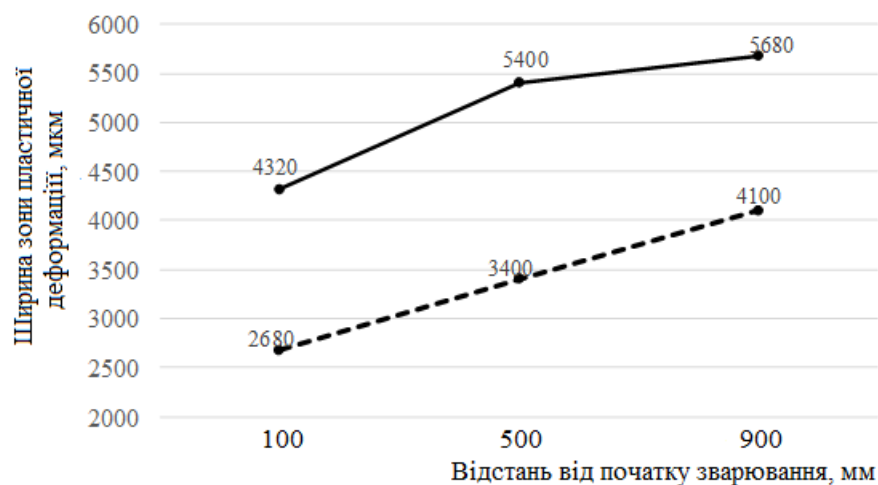


Рис. 3.7 Залежність ширини зони пластичної деформації в Al за довжиною зварюваних заготовок від наявності повітря у зазорі при режимі $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$: — у вакуумі; - - - - - у повітрі

При проходженні такого фронту детонації на ділянці BCD у просторі між мідною оболонкою і алюмінієвим стрижнем утворюється кумулятивний струмінь, який потрапляє в алюмінієвий стрижень і нагріває його, внаслідок чого пошкоджується сам стрижень і руйнується мідна оболонка.

Дослідження мікротвердості зони зварного з'єднання коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок (рис. 3.9), отриманих ЗВ у вакуумі і без нього на різних режимах ($V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ і $2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ відповідно) показало, що в зоні з'єднання спостерігається типовий для ЗВ характер розподілу мікротвердості зі значеннями 946 МПа – 1100 МПа, що на 10...15% перевищує значення 860 МПа – 940 МПа для біметалу мідь-алюміній, отриманого за плоскою схемою [110].

Спостерігається зміцнення приконтактних шарів, мікротвердість міді при зварюванні вибухом на режимі $V_k = 2000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ у вакуумі становить 1190 МПа, що вище, ніж мікротвердість приконтактних шарів при зварюванні в такому ж режимі у повітрі на 150 МПа (зразки №6 і №3 відповідно). Зона максимальної мікротвердості міді (946 МПа – 1100 МПа) досягає 0,05 мм – 0,15 мм. Це також є підтвердженням того, що швидкість зіткнення при зварюванні у вакуумі перевищує швидкість зіткнення при зварюванні в повітрі.

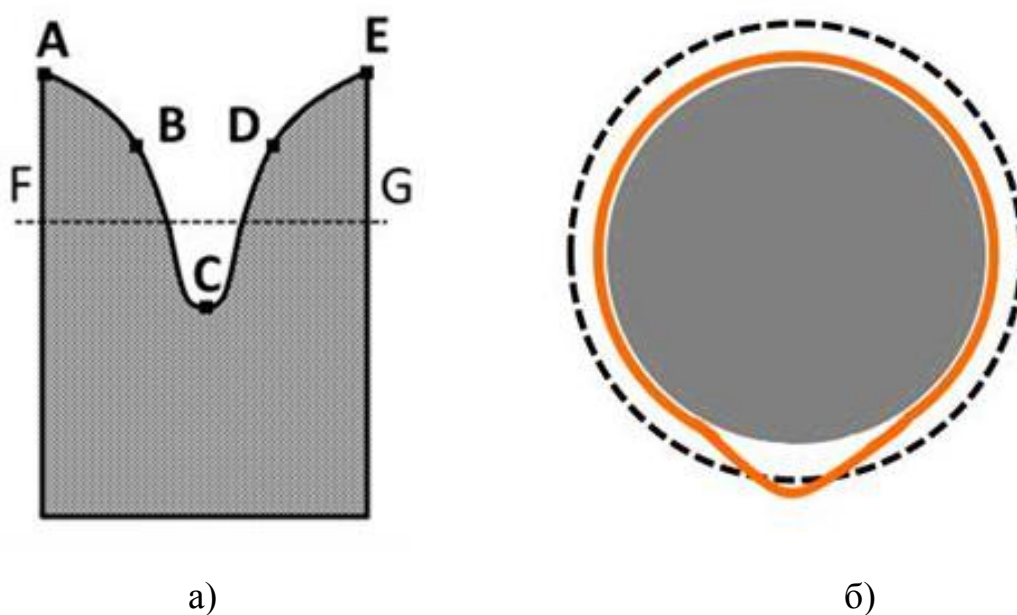


Рис. 3.8 Схема утворення дефектів: (а) – розгортка фронту детонації ВР, розташованої на циліндричній поверхні; (б) – схема деформування мідної плакувальної труби в її поперековому перерізі, де штрихова лінія – первісна (до зварювання) форма перерізу труби, помаранчева лінія – форма перерізу труби на лінії FG (а), сіре коло – алюмінієвий стрижень

Мікротвердість алюмінію у приконтактній зоні знаходиться у діапазоні 336 МПа – 413 МПа, що на 5-12% нижче, ніж максимальна мікротвердість алюмінію (400 МПа – 460 МПа) для біметалу мідь-алюміній, отриманого за паралельною схемою [110], при цьому в приконтактній зоні на глибині 0,02 мм – 0,05 мм мікротвердість має значення нижче, ніж на більшій глибині. Ймовірно, це пов'язано з тим, що при ЗВ за циліндричною схемою відбувається більш інтенсивне нагрівання поверхневого шару, порівняно з плоскою схемою,

і тонкий шар алюмінію, що має низьку температуру плавлення, частково відпалюється і стає м'якшим.

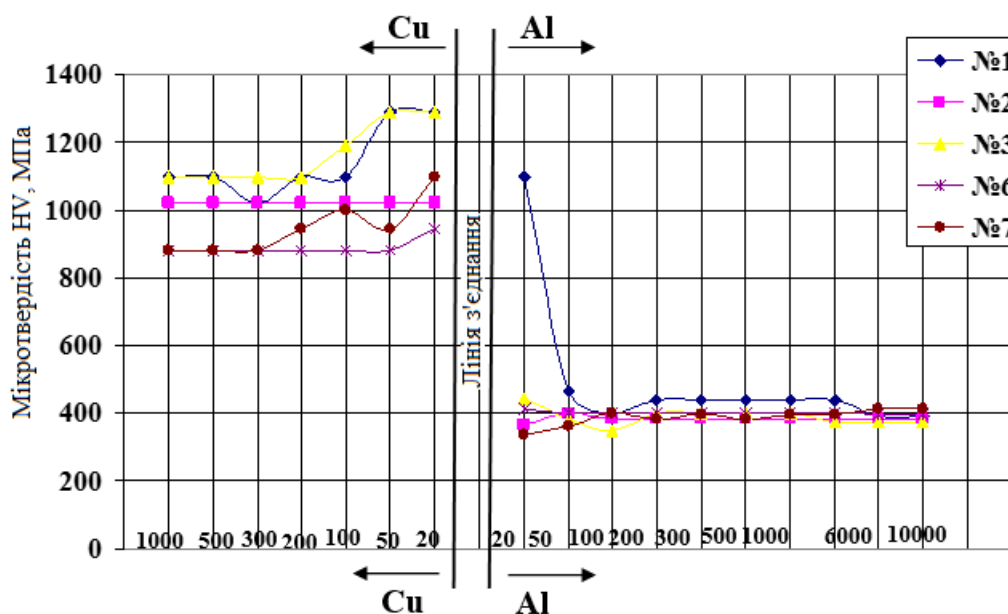


Рис. 3.9 Зміна мікротвердості у зварному з'єднанні залежно від режиму зварювання і наявності повітря у проміжку (номери зразків відповідають рис. 2.4, розділ 2)

3.2. Явище «канального ефекту» при зварюванні вибухом

У практиці застосування ЗВ у процесі виробництва довгомірних біметалевих виробів (листів, труб із захисними покриттями каналів) постає така проблема, як зниження якості зварного з'єднання із віддаленням від точки ініціювання детонації на відстань близько 1 м і більше для плоских, а для коаксіальних на відстанях 5...10 зовнішніх діаметрів [20]. Відбувається зниження механічних властивостей зварного з'єднання і навіть руйнування плакувального шару. При цьому виразним є збільшення розміру вихрових зон хвильової межі з'єднання аж до утворення суцільного прошарку оплавленого металу, що обумовлено комплексним впливом декількох факторів (збільшення швидкості точки контакту і швидкості зіткнення), основним з яких є так званий «канальний ефект» при зварюванні вибухом.

Зварювання великих за розміром виробів виконується за паралельною схемою: з'єднані пластини (або циліндричні оболонки) встановлюються з невеликим проміжком сталої ширини уздовж всієї зварюваній поверхні. Канальний ефект при зварюванні вибухом – це виникнення в зварювальному проміжку потоку кумулятивних викидів металу та газу, який заповнює проміжок та фронт якого рухається з надтонаційною швидкістю [111], на відміну від детально вивченого детонаційного каналного ефекту [112]. Схематично каналний ефект при зварюванні вибухом зображено на рисунку 3.10.

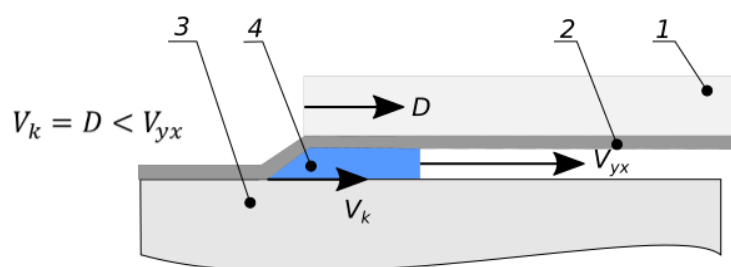


Рис. 3.10 Схематичне зображення каналного ефекту: 1 – вибухова речовина; 2 – пластина, яка кидається; 3 – основна пластина; 4 – область ударно-стиснутого газу

Маємо також загальне уявлення про швидкість, масу й енергію потоку кумулятивних часток у проміжку. Однак одночасний розгляд ударної хвилі в газі та потоку кумулятивних часток вдається дуже складно. Особливо це є утрудненим з огляду на виконання зварювання довгомірних виробів, оскільки із віддаленням процесу ЗВ від точки ініціювання маса потоку металевих частинок поступово збільшується за рахунок ерозії з поверхні частинками первинного потоку. У зв'язку з цим, оцінювання впливу «каналного ефекту» здійснювали шляхом прямих експериментів.

З метою оцінювання виносу маси потоку металевих частинок зі з'єднаних поверхонь було проведено дослідження. Воно виконувалося з використанням зборки (рис. 3.11) зі сталевго стрижня діаметром 25 мм і співвісною йому сталевій труби товщиною стінки 3,5 мм (матеріал – сталь 20).

Ширина зварювального проміжку становила 1,5 мм. Повна довжина зборки – 750 мм; при цьому перші 600 мм припадали на робочу ділянку, зварювану зовнішнім зарядом ВР. Утворений при зварюванні кумулятивний потік проходив у проміжок кінцевого відрізка зборки довжиною 150 мм, який не містить ВР і виконує роль досліджуваного зразка.

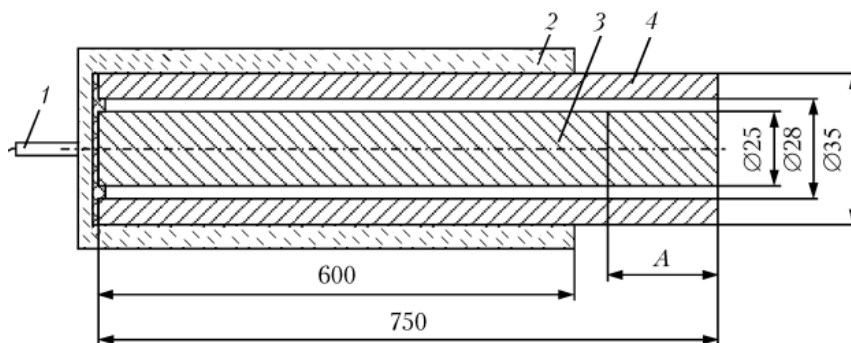


Рис. 3.11 Схема зборки з дослідження каналного ефекту: 1 – детонатор; 2 – заряд ВР (амоніт 6ЖВ + аміачна селітра); 3 – сталевий циліндр; 4 – сталева оболонка, яка плакується; А – вимірювальна ділянка

Для оцінки стану з'єднаних поверхонь проміжку безпосередньо перед проходженням фронту детонаційної хвилі вимірювали товщину віднесеного з поверхні шару металу й оцінювали зміну висоти нерівностей поверхні. Товщина шару металу, який віднесло з поверхні стрижня, складала 30 мкм, а висота нерівностей рельєфу збільшилася з 3 мкм до 6 мкм...12 мкм, що набагато менше висоти хвиль, які утворюються при зварюванні [113].

Отримані результати дозволили зіставити внесок первинних і вторинних частинок у загальний потік кумулятивних викидів. Скориставшись формулою з роботи [114]:

$$d_{к.с}/d_{об} = \text{tg}^2(\alpha/2), \text{ де} \quad (3.1)$$

$d_{к.с}$ — напівтовщина кумулятивного струменя; $d_{об}$ — товщина оболонки, яка метається; α — динамічний кут зіткнення, знаходимо, що при ідеальній кумуляції товщина струменя повинна складати 40 мкм...50 мкм. Однак, за даними [23], при малій швидкості точки контакту (в нашому випадку $2300 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) значення $d_{к.с}$ може бути в 3...5 разів менше ідеального. Таким

чином, товщина шару металу, винесеного в кумулятивний струмінь із кожної зі з'єднаних поверхонь, могла становити 4 мкм...8 мкм, що в 4...7 разів менше виносу, який спостерігається на вимірювальній ділянці. Збільшення повної маси кумулятивного струменя в 5...8 разів, порівняно з первинним потоком (кумулятивний струмінь, який виникає при зіткненні двох поверхонь), призводить до значного зниження його швидкості, яка стає менше швидкості точки контакту і детонації. У результаті точка контакту обганяє сповільнений каналний потік і захоплює його у завихрення в «кишені». Навіть, якщо припустити, що каналний потік має радіальну структуру (високошвидкісний первинний потік у привісній зоні й повільний вторинний потік у приповерхневому шарі), основна частина вмісту проміжку повинна піддаватися захопленню.

У разі детонаційного каналного ефекту накопичення маси в переддетонаційній зоні призводить до періодичності процесу детонації або його обриву. Мабуть, те ж саме відбувається і при ЗВ.

Розглянемо механізм ерозії поверхонь. Згідно з даними праці [115], швидкість первинного потоку кумулятивних часток у наших умовах можна оцінити як $3,0 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$... $3,5 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$. З досліджень щодо високошвидкісних зіткнень відомо, що в цьому діапазоні швидкості косі зіткнення часток з поверхнею твердих тіл супроводжуються значними деформаціями (появою вм'ятин) і перетворенням кінетичної енергії частинок у теплову енергію тіл, які зіштовхуються.

За іншим дослідженням [87], при швидкій деформації низьковуглецевих сталей зниження на порядок значення межі плинності спостерігається при температурі 800°C і більше. При типовому режимі ЗВ кінетична енергія первинного кумулятивного потоку приблизно дорівнює енергії, необхідній для нагрівання сталі до 800°C або навіть вище. Енергія, що передається повітряною ударною хвилею у зварювальному проміжку, у 10 разів менше цього значення. На підставі цього можна зробити висновок, що основною причиною ерозії є нагрівання і винесення матеріалу приповерхневого шару металу в результаті

зіткнень із частинками кумулятивного потоку. Питання механізму формування вихрових зон і їх вмісту вивчене недостатньо; дослідження складу і структури їх вмісту є джерелом інформації про каналні процеси та їх вплив на властивості одержуваних сполук. Вивчення хімічного і фазового складу вмісту вихрових зон проводилося на зразках біметалу мідь-алюміній, отриманих ЗВ у вакуумі і в повітрі (рис. 3.12).

Результати аналізу фазового складу за таблицями 3.1 і 3.2 показали, що при зварюванні у вакуумі і в повітрі на межі з'єднання утворюється шар литих включень з інтерметалідів міді й алюмінію. При цьому під час зварювання у повітрі утворюються тверді розчини міді в алюмінії на основі інтерметалідів типу Al_2Cu (θ -фаза, $\sim 28,2\%$ - 29% Al) та $AlCu$ (η -фаза, $\sim 46\%$ - $46,7\%$ Al). При зварюванні у вакуумі утворюється Al_3Cu (ζ -фаза, $\sim 24,6\%$ - $25,3\%$ Al). При вмісті міді в алюмінії близько 67% утворюється легкоплавка евтектика Al- Al_2Cu [110].

За даними [110] відомо, що руйнування θ і η -фази протікає крихко, а питомий електроопір θ -фази майже в 6 разів більше, ніж алюмінію. Електроопір для більшості фаз, за винятком фази δ_2 знаходиться на рівні $0,1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2\cdot\text{м}^{-1}$ – $0,18 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2\cdot\text{м}^{-1}$. При зварюванні у вакуумі утворюються евтектики, які мають більшу електропровідність і кращі механічні властивості, ніж евтектики, утворені при зварюванні у повітрі.

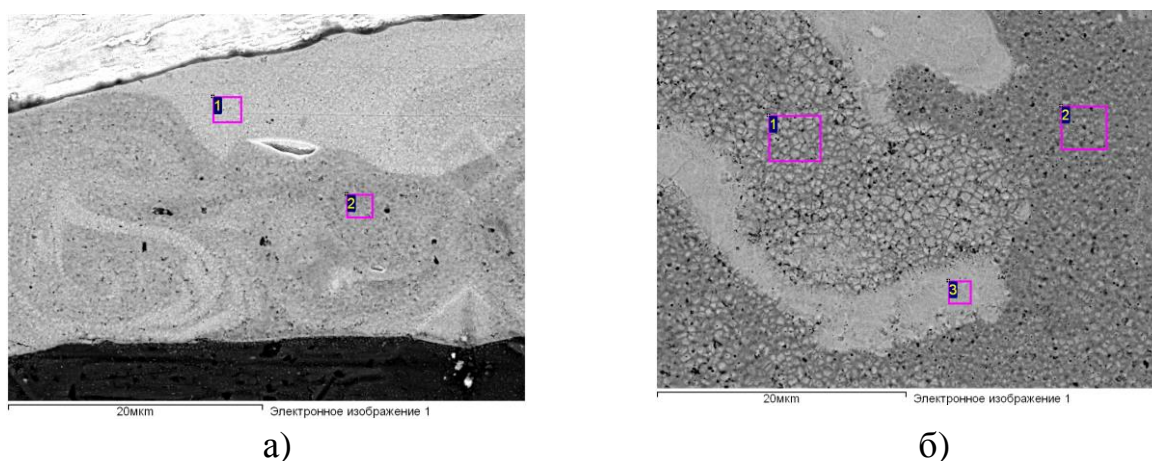


Рис. 3.12 Мікроструктура з'єднань, отриманих при наявності повітря у проміжку (а) та у вакуумі (б)

Таблиця 3.1

Результати аналізу всіх елементів при зварюванні у вакуумі

№ точки вимірювання	C	O	Al	Cu
1	1,10	0,98	31,51	66,41
2	0,99	1,02	35,48	62,51
3	0,79	0,71	24,71	73,79

Таблиця 3.2

Результати аналізу всіх елементів при зварюванні в повітрі

№ точки вимірювання	C	O	Al	Cu
1	2,02	0,86	27,54	69,58
2	1,88	1,09	41,26	55,77

Таким чином, виявлено, що склад литих включень залежить від атмосфери у зварювальному проміжку.

3.3. Вплив температуро-часових умов на структуру і властивості мідно-алюмінієвого з'єднання після зварювання вибухом і подальшого протягування

Як зазначалося у п. 1.3, заготовки перехідних мідно-алюмінієвих елементів силових ланцюгів, виготовлені ЗВ, внаслідок сильного наклепу мідного шару набувають низьких пластичних властивостей, а виготовлення з них перехідних елементів складної форми з кутом вигину більше 30° неможливо через утворення тріщин у плакувальному мідному шарі.

Термічна обробка (ТО) мідно-алюмінієвого біметалу, що використовується у різних електротехнічних пристроях у якості перехідних елементів різної просторової конфігурації, є завданням, яке вимагає комплексного вирішення. З одного боку, при ТО необхідно забезпечити максимально можливі пластичні властивості плакувального мідного шару з метою запобігання утворенню в ньому тріщин під час згинання. З іншого боку,

високотемпературне нагрівання мідно-алюмінієвого композиту впливає на зміну структури металів, які входять до композиції, й утворенню твердих інтерметалідних фаз, що може позначитися на одній із основних характеристик мідно-алюмінієвого біметалу – електроопорі перехідної зони, а також призведе до зниження його пластичних властивостей.

За наявною класифікацією, при ЗВ у композиціях з різнорідних металів (мідь – алюміній, титан - сталь, магній – алюміній тощо) утворюються крихкі інтерметаліди, які належать до небезпечних видів хімічної неоднорідності, і знижують працездатність та надійність створюваних конструкцій при впливі одно- та двовісних розтягуючих напружень. Причинами утворення інтерметалідів у вигляді локальних включень або суцільних проміжних прошарків є завищені, порівняно з оптимальними, режими ЗВ або високотемпературного нагрівання, що обумовлює протікання реактивної дифузії між різнорідними металами, які з'єднуються [102, 116].

Плакування тонкими шарами (до 0,5 мм) методом ЗВ без використання спеціальних прийомів практично неможливо, тому часто (особливо для пластичних матеріалів) використовують комбіновану технологію ЗВ і подальшу протяжку (для круглих виробів).

У даній роботі для отримання мідно-алюмінієвого біметалу з тонким мідним шаром (300 мкм) проводили протяжку (зі ступенем обтиску 90%), отриманих зварюванням вибухом на режимі $V_k = 2000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ заготовок.

Після протяжки структура міді й алюмінію поблизу межі розділу являє собою деформовані, витягнуті в напрямку прокатки дрібні зерна та з часточками крихких інтерметалідних включень, які пластично не деформуються (рис. 3.13).

Металографічний аналіз отриманих ЗВ коаксіальних з'єднань свідчить, що при холодній протяжці зі збільшенням ступеня деформації відбувається формування нових дислокаційних структур з підвищеною їх щільністю і, як наслідок, зміцнення металу (наклеп). Для зняття наклепу необхідно проводити термічну обробку. Тому з метою вивчення впливу температури на збільшення

інтерметалідного прошарку було досліджено мікроструктуру мідно-алюмінієвого з'єднання після протяжки при різних температурах і залежно від часу витримки зразків при заданій температурі (табл. 3.3). Мікроструктуру зазначених зразків наведено на (рис. 3.14).

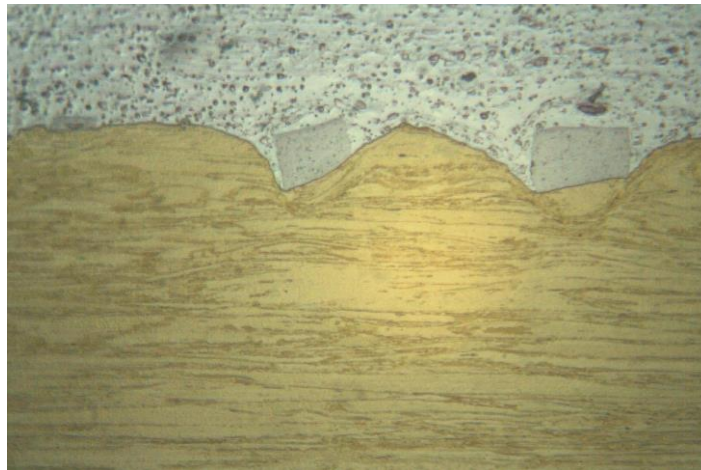


Рис. 3.13 Мікроструктура міді й алюмінію після холодної протяжки сумарним обтисненням 90% (x400)

Проведений аналіз мікроструктури зони з'єднання після протяжки у різних режимах термообробки свідчить, що при температурі 300°C і часу витримки 60 хв на межі з'єднання утворюється суцільний інтерметалідний прошарок товщиною 1 мкм-2 мкм, а при температурі 350°C і часу витримки 60 хв товщина прошарку досягає 4 мкм – 5 мкм. Наявність інтерметалідного прошарку негативно позначається на електропровідності й знижує механічні властивості з'єднання .

При температурі 300°C і часу витримки 45 хв на межі з'єднання суцільний інтерметалідний прошарок не утворюється і при витримці одну годину за температури 250°C і 180°C також. Оскільки випробування на відрив плакувального шару для коаксіальних з'єднань провести неможливо, то отримані заготовки випробовували на розрив з метою визначення їх пластичних властивостей.

Для дослідження величини відносного подовження заготовок після протяжки було виготовлено стандартні зразки довжиною 200 мм для

випробувань на розрив. Випробування проводили на розривній машині ЦД-4 як для заготовок безпосередньо після протягування, так і для заготовок, термічно оброблених за такими режимами (табл. 3.3).

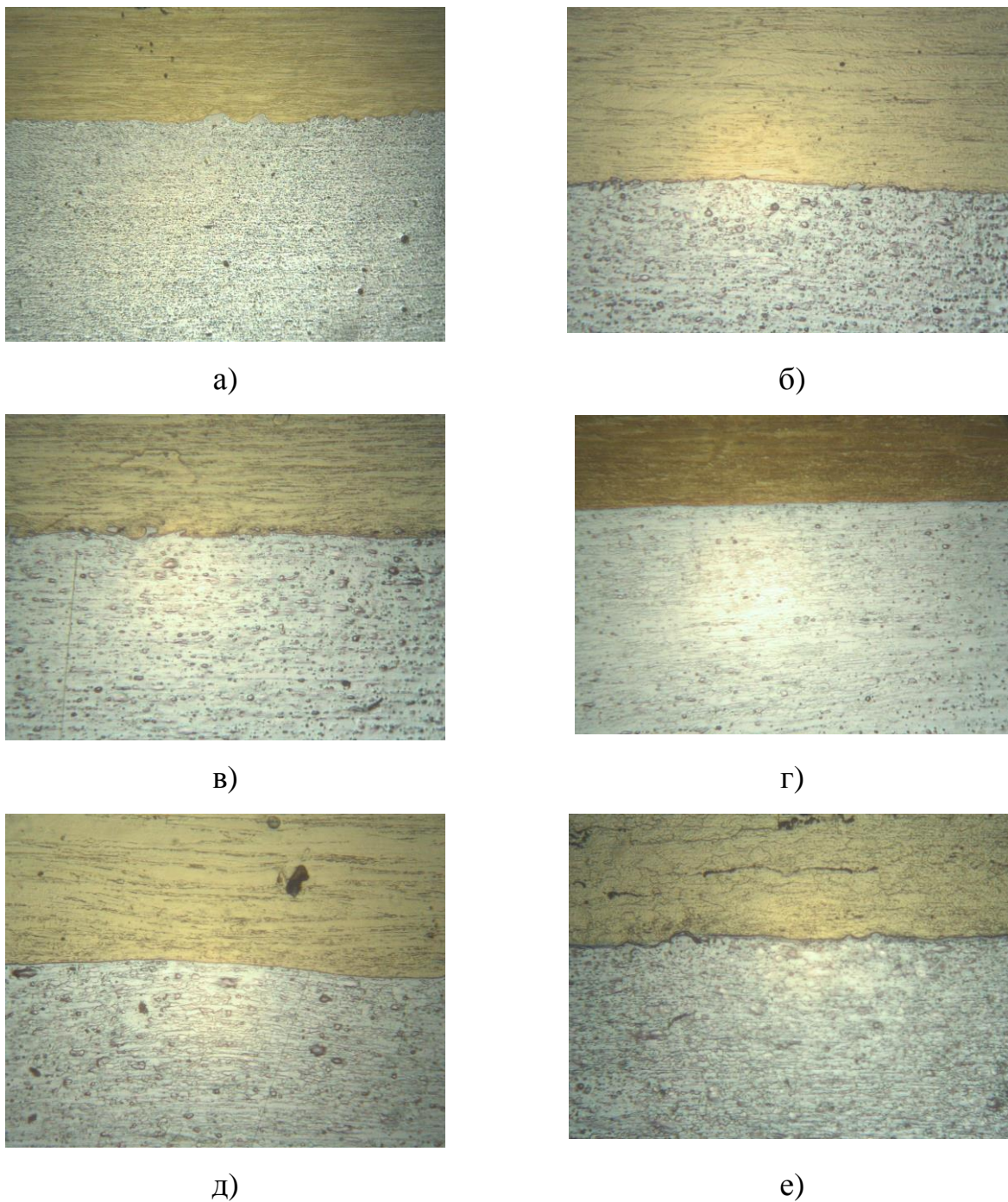


Рис. 3.14 Мікроструктура зони з'єднання після протяжки у різних режимах термообробки (x100): (а) – без ТО, (б) – ТО1, (в) – ТО2, (г) – ТО3, (д) – ТО4, (е) – ТО5 (табл. 3.3)

Режими термічної обробки після протягування

№ ТО	1	2	3	4	5
Температура, °С	180	250	300	300	350
Час, хв	30	60	45	60	60

На рисунку 3.15 показано вигляд зразків після дослідження механічних властивостей.

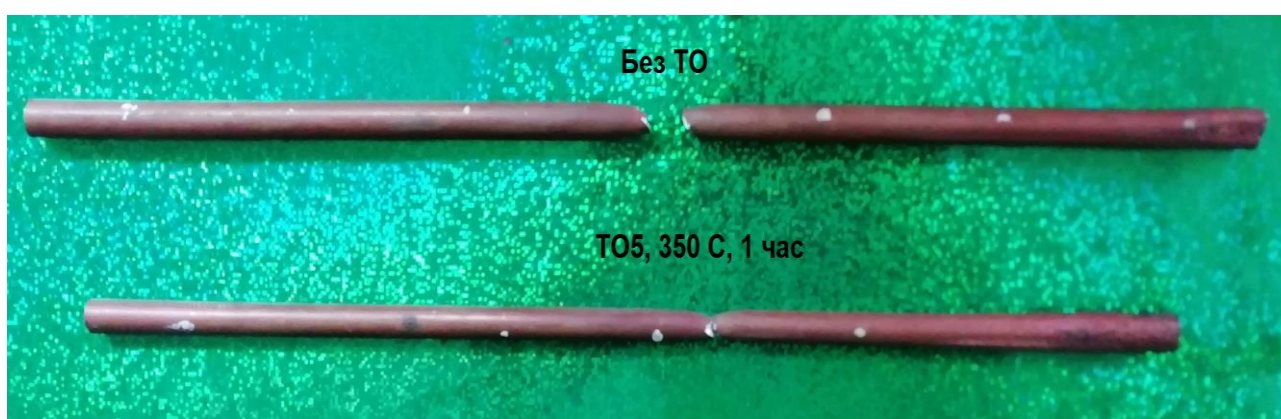


Рис. 3.15 Вигляд зразків після випробування на розрив

Результати випробувань наведені в таблиці 3.4. На підставі даних таблиці 3.4 було побудовано графік залежності відносного подовження біметалевих зразків δ від режимів температурної обробки (табл. 3.3) (рис. 3.16). Як видно з графіка, при температурній обробці нижче 300°C не досягається необхідне за технічними вимогами (ТУ У28.7-05416923-001: 2012) відносне подовження. При ТО у режимі №3 або №4 пруток стає досить пластичним. Це пояснюється тим, що він складається на 87,5 % за об'ємом з чистого алюмінію, а температура відпалу для чистого алюмінію становить 300°C.

У результаті проведених досліджень встановлено, що після ТО у режимах №3 і №4 досягається пластичність, задана в технічних вимогах, і при цьому не відбувається зростання інтерметалідного прошарку. При режимі ТО №5 пластичні властивості помітно покращуються, але при цьому на межі вже

відбувається зростання інтерметалідного прошарку, що знижує якість з'єднання в цілому.

Таблиця 3.4

Механічні властивості біметалічного дроту, отриманого за схемою «обтиснення вибухом з подальшим протяганням»

№	Режим ТО	Границя плинності σ_T , МПа	Границя міцності σ_B , МПа	Відносне подовження δ , %
1.	Без ТО	187,1	209,7	11,6
2.	ТО1	183,2	205,9	16,1
3.	ТО2	170,8	187,3	18,2
4.	ТО3	127,3	148,5	27,5
5.	ТО4	89,2	130,4	37,2
6.	ТО5	44,2	113,3	57,5

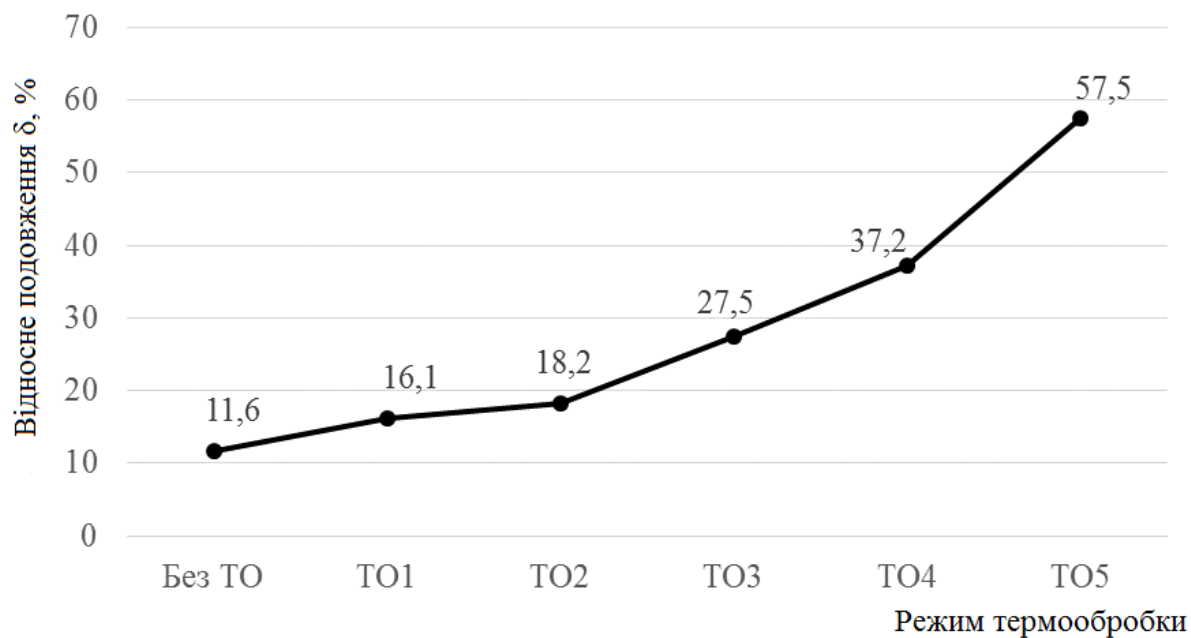


Рисунок 3.16 Графік залежності відносного подовження δ , % від режиму термообробки

Висновки до розділу 3

1. Експериментально встановлено, що при зварюванні вибухом міді з алюмінієм за коаксіальною схемою з вакуумуванням зварювального проміжку можна отримати заготовку без дефектів плакування довжиною до 500 мм при діаметрі 26 мм, а при зварюванні без вакуумування зварювального проміжку - тільки до 200 мм...250 мм при тому ж діаметрі.

2. На підставі металографічних досліджень встановлено, що вакуумування зварювального проміжку дозволяє знизити ширину інтерметалідного прошарку в середньому за довжиною майже в 1,4 рази на режимі $V_k = 2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ та у 1,2 рази на режимі $V_k = 2600 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, і знизити обсягову частку інтерметалідів у 1,1 рази й в 1,15 рази при зварюванні у вищезазначених режимах відповідно. Це пояснюється тим, що основний енергетичний внесок в утворення інтерметалідів дає каналний ефект.

3. Встановлено, що при зварюванні вибухом міді й алюмінію за циліндричною та плоскою схемою на близьких режимах, утворюється різна кількість інтерметалідних включень. Причому при зварюванні за циліндричною схемою їх утворюється більше і це пов'язано з рухом ударно-стисненого газу у зварювальному проміжку, який, не маючи можливості бокового витікання, інтенсивніше впливає на зварювальні поверхні.

4. У результаті аналізу фазового складу встановлено, при зварюванні у вакуумі і в повітрі на межі з'єднання утворюється шар литих включень з інтерметалідів міді й алюмінію різного типу. Причому при зварюванні з вакуумуванням зварювального проміжку утворюються інтерметаліди, які мають вищу електропровідність і кращі механічні властивості, ніж ті, які утворюються при зварюванні у повітрі.

5. Вперше введено в науковий обіг термін «каналний ефект» й описано його механізм при зварюванні вибухом, який полягає у виникненні в зварювальному проміжку потоку кумулятивних викидів металу і ударно-стиснутого газу, фронт якого рухається з надзвуковою швидкістю.

6. Експериментально визначено режим термічної обробки мідно-алюмінієвого стрижня після холодної протяжки зі ступенем деформації 90%, при якому відносне подовження збільшується з 11,6% у початковому стані до 27,5% без утворення на межі з'єднання інтерметалідного прошарку. Встановлено, що термообробку необхідно проводити при температурі 300°C і час витримки повинен бути близько 45 хв.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТРУБЧАСТОЇ ВИБУХОВОЇ КАМЕРИ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ МАЛОГАБАРИТНИХ ВИРОБІВ

4.1. Розробка методики чисельного моделювання плоского заряду для зварювання вибухом у вибуховій камері

У сучасних процесах металообробки вибухом застосовують заряди ВР масою від декількох грамів до сотень кілограмів. Велика частина енергії, що виділяється при вибуху, випромінюється у навколишнє середовище у вигляді ударних хвиль, сейсмічних збурень, розльоту осколків. Повітряна ударна хвиля (УХ) – найбільш небезпечний вражаючий фактор вибуху. Тому ЗВ проводять на полігонах (відкритих і підземних), віддалених на значні відстані від житлових і промислових об'єктів, і у ВК [20, 40]. Для проведення робіт з проектування таких захисних пристроїв, у тому числі для оптимізації їх конструкцій з метою зниження загальної металоємності виробів, необхідно визначити навантаження на силові елементи вибухової камери. Таке навантаження здійснюється в результаті взаємодії повітряної УХ і потоку продуктів детонації (ПД) заряду ВР з внутрішньою поверхнею вибухової камери. Тому для його визначення необхідно знати всю інформацію про поведінку цих двох основних факторів вибуху.

На (рис. 4.1) зображена схема масштабної моделі М 1: 5 ТВК, форма якої має вигляд напівсфери, зварювані пластини розташовуються у її центрі, на них зверху укладається плоский заряд ВР. Очевидно, що для такої форми і розташування заряду ВР основна дія повітряної УХ буде направлена вертикально вгору. Саме в цьому напрямку УХ здійснює свій максимальний вплив на силові елементи камери, які являють собою набір зварених сталевих труб із закритою донною частиною.

Тому для оптимізації конструкції ВК необхідно визначити параметри повітряної УХ і потоку ПД, що досягають усіх трубчастих елементів конструкції.

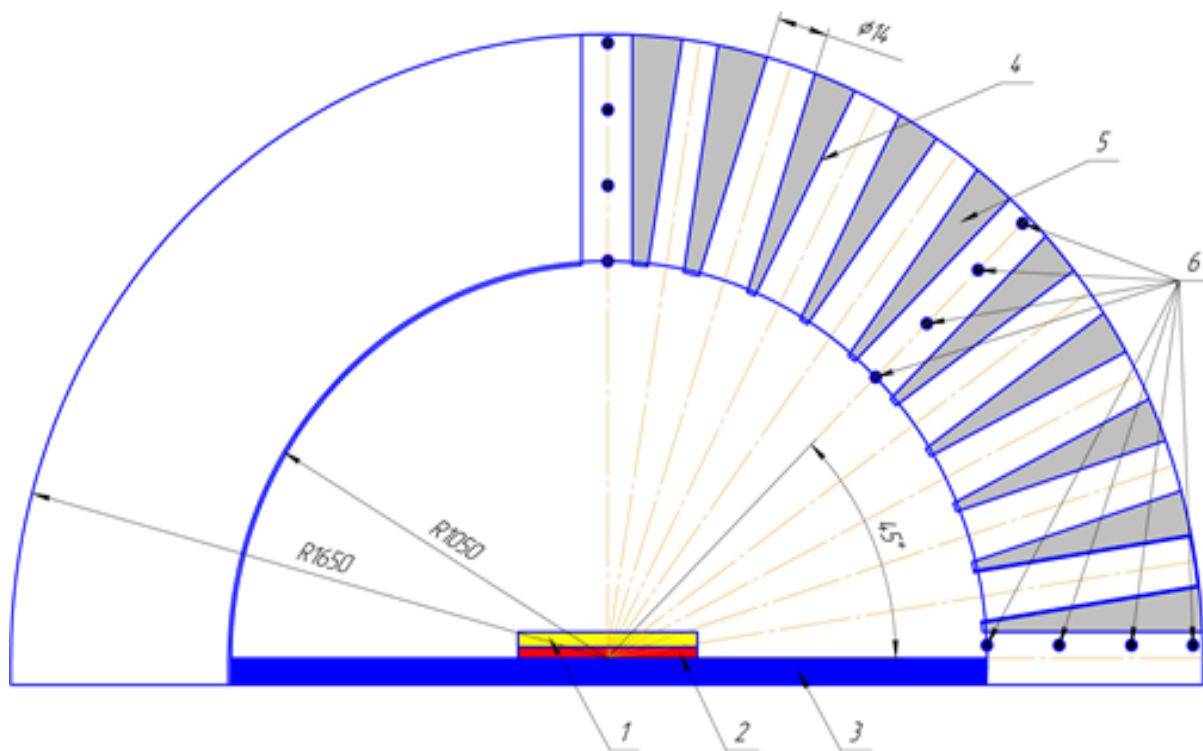


Рис. 4.1 Схема поперечного перерізу трубчастої вибухової камери: 1 – заряд ВР, 2 – деталі, що зварюються, 3 – робочий стіл (плита), 4 – несучі елементи конструкції (труби), 5 – сипучий наповнювач, 6 – маркери

Для отримання необхідної інформації проводили комп'ютерне моделювання. Спочатку визначали розрахункову схему і метод моделювання. З урахуванням вищевикладеного було розглянуто задачу про вибух плоского заряду ВР (амоніту) масою 2,4 кг на абсолютно жорсткій поверхні в камері, заповненій повітрям (без труб). З огляду на той факт, що форма поперечного перерізу ВК, форма заряду ВР і його розташування всередині камери мають осьову симетрію, моделювання проводилося у двомірній плоскій побудові. Тоді розрахункова схема завдання виглядала наступним чином (рис. 4.2).

Розрахункова площа задачі являє собою квадрат зі стороною 1700 мм. У лівому нижньому кутку цієї ділянки розташований заряд ВР висотою 30 мм.

Довжина заряду дорівнює 160 мм, що становить половину найбільшого лінійного розміру. Ініціювання процесу детонації заряду відбувається у точці з координатами (0; 0).

Було побудовано скінченно-елементну розрахункову сітку для визначення параметрів повітряної УХ. Для моделювання задач вибуху рекомендується використовувати скінченний елемент у формі гексаедра [117]. Даний скінченний елемент є об'ємним (3D) і використовується для вирішення об'ємних 3-D задач. Поставлене завдання (2-D) дозволяє істотно знизити вимоги щодо продуктивності використовуваного комп'ютера. З метою адаптування тривимірного скінченного елемента для вирішення задачі у двомірній постановці, розрахункова схема була доповнена граничними умовами. Вони стосуються накладення заборони щодо будь-якого переміщення усіх вузлів скінченно-елементної сітки в напрямку, перпендикулярному площині, що завдана осями X-Y.

Зварювальні деталі розташовуються на робочому столі ВК. Отже, наявність опори не дозволяє продуктам детонації і повітрю переміщуватися вниз. Введення додаткової граничної умови на заборону переміщення вузлів скінченно-елементної сітки, розташованих на осі X (нижня межа розрахункової ділянки задачі), у вертикальному напрямку Y, задовольняє цю умову, еквівалентну моделюванню абсолютно жорсткої перепони.

Далі, наявність у завданні осьової симетрії дозволяє моделювати тільки одну її геометричну половину. Реалізація даної умови можлива шляхом введення додаткового обмеження для всіх вузлів розрахункової сітки, розташованих на осі Y (ліва межа розрахункової ділянки задачі) і полягає в накладенні заборони на їх переміщення у горизонтальному напрямку.

Для вузлів, що знаходяться на верхній і правій границі розрахункової ділянки, жодних додаткових обмежень не накладалося, що є однаковим для моделювання "прозорих" границь. Іншими словами, продукти детонації, які під дією внутрішнього тиску розширюються і витіснені ними повітря можуть безперешкодно перетинати границі і в подальшому вибувати з розгляду.

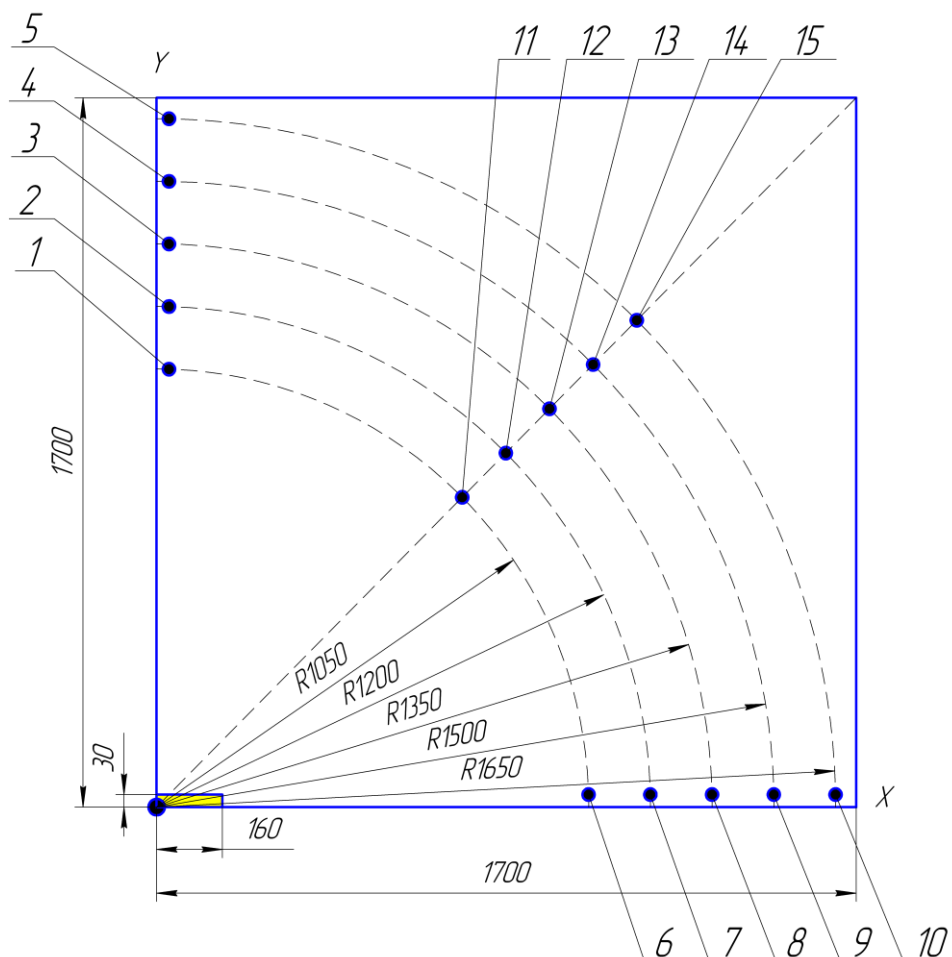


Рис. 4.2 Розрахункова схема задачі при вибуху плоского заряду

Для проведення комп'ютерного моделювання в ролі матеріалу ВР був взятий склад заряду HNS-1 (США), за характеристиками близький до амоніту №6 ЖВ. Цей заряд був вибраний виходячи з того, що, на відміну від вітчизняного складу, для цієї ВР відомі експериментальні значення параметрів рівняння стану 4.1 у формі Джонса-Уілкінса-Лі (JWL) [118, 119]:

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{\omega \cdot E}{V}, \quad (4.1)$$

де V – відносний об'єм ПД.

Довідкові величини відповідних параметрів [118, 119] складають:

- початкова щільність заряду $\rho_0=1000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$,
- швидкість детонації $D=5100 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$,
- тиск продуктів детонації на фронті детонаційної хвилі $P_{C-J}=7,5 \text{ ГПа}$.
- $A=162,7 \text{ ГПа}$; $B=1,082 \text{ ГПа}$; $R_1=5,4$; $R_2=1,8$; $\omega=0,25$; $E_0=4,1 \text{ ГПа}$.

Поведінка навколишнього повітря з початковим значенням щільності, рівним $\rho_0=1,26 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ описувалося за допомогою рівняння стану 4.2 у формі лінійного полінома:

$$P = C_0 + C_1 \cdot \mu + C_2 \cdot \mu^2 + C_3 \cdot \mu^3 + (C_4 + C_5 \cdot \mu + C_6 \cdot \mu^2) \cdot E, \quad \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1, \quad (4.2)$$

де ρ – поточне значення щільності повітря.

Величини інших параметрів рівняння вибиралися відповідно до рекомендацій [120, 121].

Важливою проблемою чисельного аналізу є питання визначення розміру скінченного елемента розрахункової сітки, за допомогою якої можна здійснити адекватне моделювання даного процесу. Одним із критеріїв, що визначають правильність вибору розміру скінченного елемента, є не тільки точність відтворення параметрів повітряної УХ, яка є наслідком детонації заряду ВР, а й точність відтворення при моделюванні самого процесу детонації.

Тому спочатку було розглянуте завдання щодо детонації заряду HNS-1, але з меншими розмірами розрахункової ділянки. Порівняно з основним завданням, ці розміри були зменшені з 1700 ммх1700 мм до 200 ммх200 мм. Розміри заряду ВР були збережені і становили 160 ммх30 мм.

Зменшення розмірів розрахункової ділянки дозволило застосувати для побудови скінченно-елементної розрахункової сітки скінченні елементи з розмірами: 0,1 мм; 0,25 мм; 0,5 мм; 1 мм; 2 мм і 5 мм. Основні параметри розрахункових скінченно-елементних сіток кожного варіанта представлені в таблиці 4.1.

Розрахунок проводився до моменту часу 30 мкс, що відповідає часу проходження детонації по заряду ВР. Для варіантів завдання з розміром кінцевих елементів 0,25 мм і 0,1 мм розмір розрахункової ділянки було зменшено з 200 ммх200 мм до 200 ммх60 мм. Це пов'язано з обмеженими можливостями персональної обчислювальної машини, а саме малим об'ємом оперативної пам'яті.

Основні параметри скінченно-елементних сіток задачі детонації
заряду вибухової речовини

Розмір скінченного елемента, мм	Кількість елементів		
	ВВ	Повітря	Всього
5	192	1408	1600
2	1200	8800	10000
1	4800	35200	40000
0,5	19200	140800	160000
0,25*	76800	115200	192000
0,1*	480000	720000	1200000

* розміри розрахункової ділянки становили 200 ммх60 мм.

Порівняльна картина моделювання процесу руху детонаційної хвилі уздовж заряду ВР на скінченно-елементних сітках із різним розміром елемента представлена на рисунку 4.3.

Крім того, можна спостерігати відмінності в значеннях тиску Чепмена-Жуге (P_{C-J}). Порівняльні графіки зміни тиску на фронті детонаційної хвилі при моделюванні процесу вибуху заряду ВР на скінченно-елементних сітках з різною роздільною здатністю наведено на рисунку 4.4.

Найкращий результат відповідає варіанту зі скінченим елементом розміром 0,1 мм. При цьому відмінність розрахункового значення тиску на фронті детонаційної хвилі від експериментального становить 7%. Якщо вважати задовільною розрахункову похибку не більше 10%, то для моделювання формування і поширення повітряної УХ слід використовувати характерний розмір елемента 0,25 мм. Тоді для вирішення завдання потрібно 46240000 розрахункових елементів. Чисельний аналіз на такий розрахункової сітці на теперішній час для обчислювальної машини є дуже складним завданням.

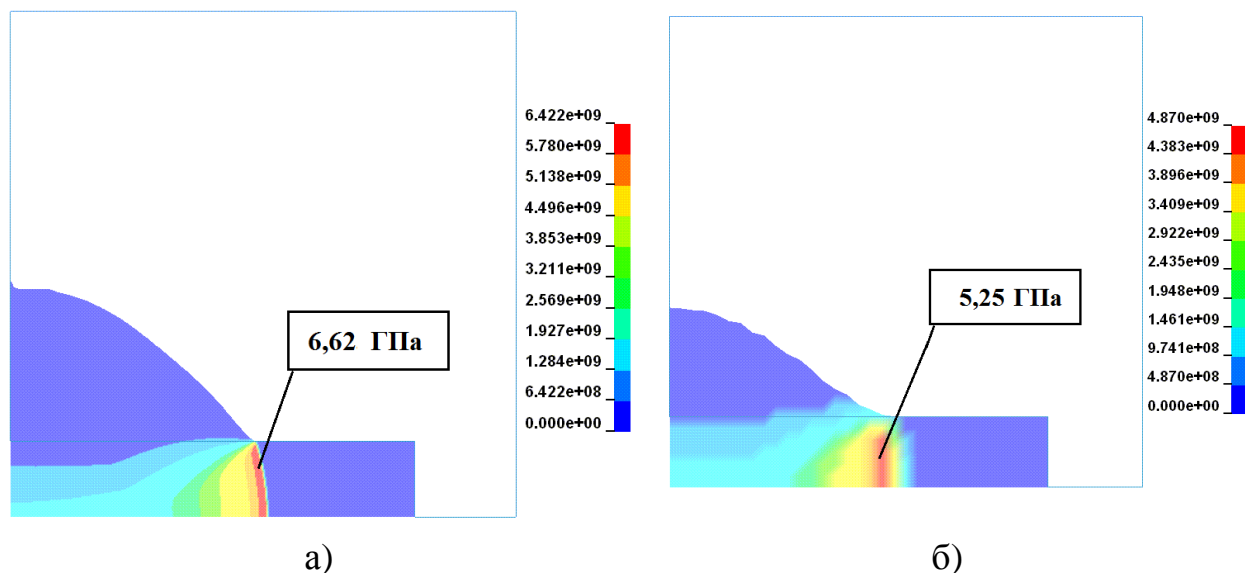


Рис. 4.3 Кадри комп'ютерного моделювання процесу руху детонаційної хвилі уздовж заряду вибухової речовини при використанні скінченно-елементної сітки різної роздільної здатності: а) – характерний розмір скінченного елемента 0,5 мм; б) – характерний розмір скінченного елемента 5 мм

Дані (рис. 4.4) підтверджують висновок про те, що, зменшення розміру скінченного елемента, підвищує точність вирішення, але при тому зростає тривалість розрахунку одного варіанта задачі (табл. 4.2).

Тому для вирішення основного завдання дослідження було розглянуто кілька варіантів завдання з скінченно-елементної сіткою меншої роздільної здатності, а саме для її побудови були взяті скінченні елементи у формі куба зі стороною 2 мм, 3 мм, 4 мм, 5 мм, 6 мм і 10 мм. Основні параметри побудованих на їх основі скінченно-елементних сіток наведено в таблиці 4.3.

На (рис. 4.5) видно, що фронт УХ є формою перевернутого дзвона. Основний вплив вибуху зосереджено у вертикальному напрямку. При цьому плоска форма УХ зберігається до 300 мкс і ширина фронту приблизно дорівнює 1 м, що становить близько трьох характерних розмірів заряду ВР.

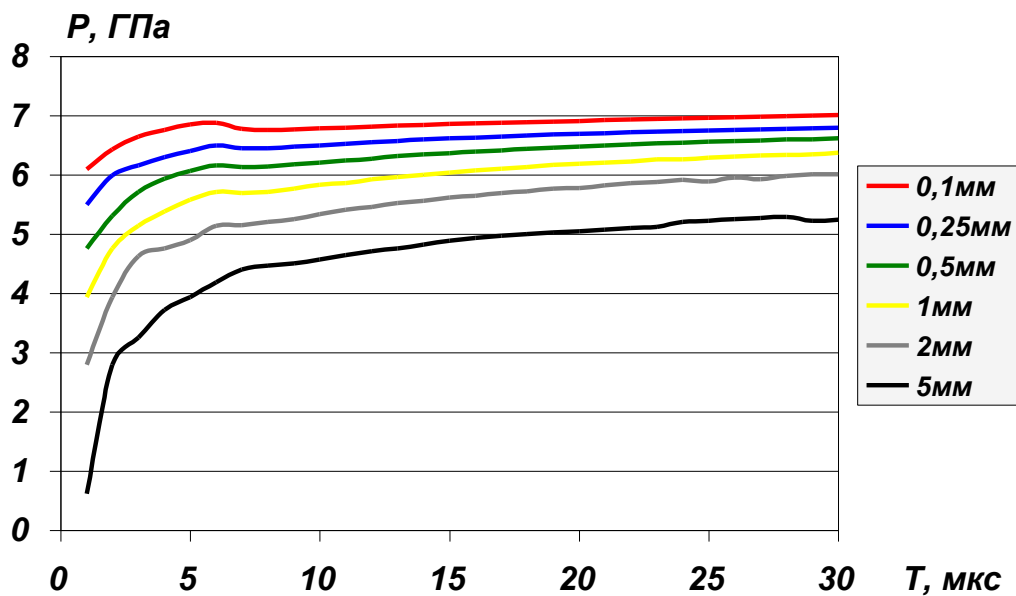


Рис. 4.4 Тиск на фронті детонаційної хвилі при моделюванні процесу вибуху заряду вибухової речовини на скінченно-елементних сітках із різною роздільною здатністю

Таблиця 4.2

Якість відтворення значень тиску на фронті детонаційної хвилі

Параметр	Характерний розмір скінченного елемента, мм					
	0,1*	0,25*	0,5	1	2	5
Тиск, ГПа	6,975	6,795	6,623	6,375	6,015	5,25
Похибка відтворення тиску на фронті детонаційної хвилі в заряді ВР, %	7	9,4	11,7	15	19,8	30
Приріст величини похибки, %	2,4	2,3	3,3	4,8	10,2	
Тривалість розрахунку на комп'ютері, хв	354	85	33	4	0,5	0,04

Основні параметри скінченно-елементних сіток задачі

Розмір елемента (сторона куба, мм)	Кількість елементів			Тривалість безперервного розрахунку на ПЕОМ до $t=500$ мкс, хв
	Заряд ВР	Повітря	Всього	
2	1200	721300	722500	198
3*	530	319826	320356	111
4**	320	180305	180625	55
5	192	115408	115600	22
6**	135	79954	80089	17
10	48	28852	28900	3

* довжина заряду ВР -159 мм,

** висота заряду ВР – 32 мм, а розмір розрахункової ділянки – 1698 ммх1698 мм,

*** довжина заряду ВР – 162 мм, а розмір розрахункової ділянки – 1698 ммх1698 мм.

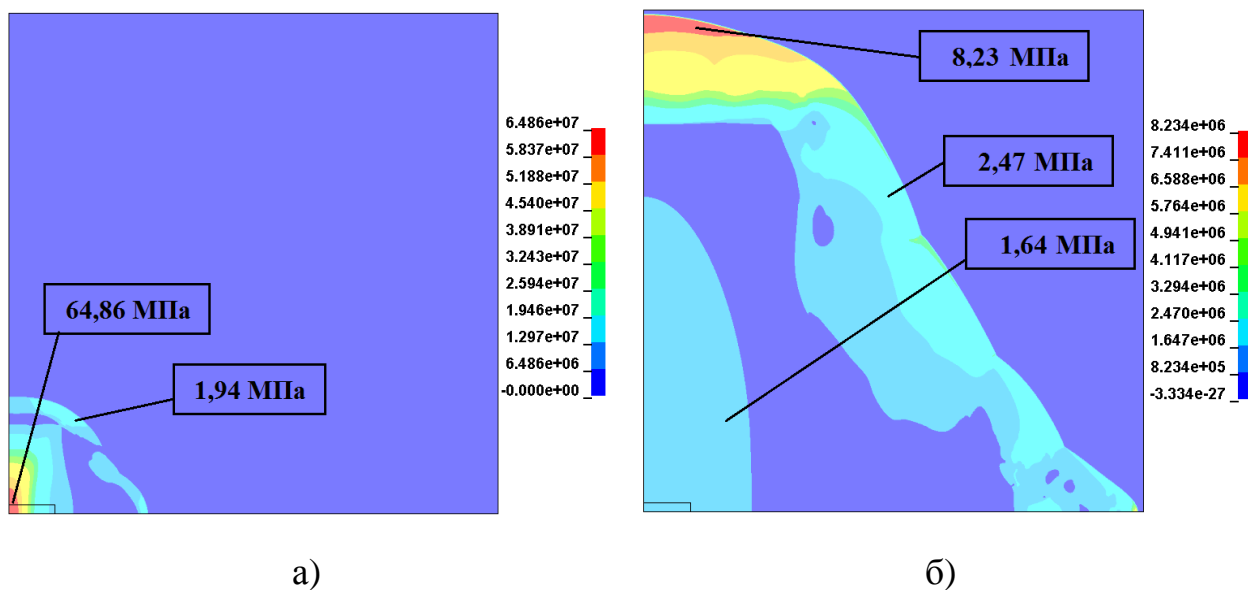


Рис. 4.5 Кадри двомірного комп'ютерного моделювання повітряної ударної хвилі від вибуху плоского заряду в повітрі (722 тис. скінченних елементів): а) – 100 мкс, б) – 500 мкс

Для оцінювання основних відмінностей у рівні навантаження на різних відстанях і напрямках від точки ініціювання детонації заряду ВР (центра камери) було обрано відповідні значення надлишкового тиску в 15 точках простору, по 5 значень у кожному з трьох напрямів – горизонтальному, вертикальному і під кутом 45°. Положення зазначених точок зображено на (рис. 4.1 і 4.2), вони позначені як маркери.

Основні результати розрахунку наведені в таблицях 4.4 і 4.5.

Таблиця 4.4

Максимальні значення тиску в різних точках простору, МПа

Напрямок	R, мм	Характерний розмір скінченного елемента, мм					
		2	3	4	5	6	10
Вертикальний	1040	12,1	11,9	12,0	11,8	11,5	10,1
	1200	11,5	11,3	11,5	10,8	10,7	9,61
	1350	10,6	10,3	10,4	10,0	9,79	9,00
	1500	9,33	9,16	9,36	9,23	8,85	8,30
	1645	8,46	8,23	8,43	8,32	8,04	7,56
Під кутом 45°	1040	2,55	3,9	4,25	4,19	4,03	4,09
	1200	3,91	4,49	5,17	3,49	3,89	3,89
	1350	4,07	4,156	3,97	2,96	3,93	3,44
	1500	3,31	3,13	3,26	2,52	3,41	3,04
	1645	2,69	2,68	2,84	2,20	2,82	2,72
Горизонтальний	1040	8,01	7,93	7,58	4,10	5,53	4,22
	1200	6,92	6,77	6,63	3,47	4,59	3,42
	1350	6,07	5,98	5,81	3,05	3,92	2,85
	1500	5,34	5,29	5,15	2,71	3,40	2,39
	1645	4,96	4,77	4,59	2,41	3,01	2,03

Результати розрахунків підтвердили висловлене припущення про неоднорідність формування поля тиску в різних напрямках від місця вибуху

плоского заряду ВР. При цьому найбільший рівень навантаження дійсно реалізується у вертикальному напрямку.

Таблиця 4.5

Час настання максимального значення тиску в різних точках простору, мкс

Напрямок	R, мм	Характерний розмір скінченного елемента, мм					
		2	3	4	5	6	10
Вертикальний	1040	294	298	300	314	310	321
	1200	342	347	348	363	359	368
	1350	388	393	394	411	406	418
	1500	437	442	442	460	455	469
	1645	487	492	493	510	505	522
Під кутом 45°	1040	351	378	371	351	358	354
	1200	449	447	432	428	439	429
	1350	523	515	507	505	517	509
	1500	595	596	589	591	600	596
	1645	681	682	671	676	684	679
Горизонтальний	1040	262	271	277	342	305	334
	1200	316	329	336	426	377	414
	1350	370	386	396	511	451	498
	1500	429	446	458	603	530	590
	1645	488	508	524	695	611	690

Наступним характерним напрямком з високим рівнем навантаження є горизонтальний. Однак порівняно з вертикальним, максимальні значення надлишкового тиску в цьому напрямку в середньому нижче в 1,7 рази [122].

Найменш навантаженим є напрям під кутом 45°. Якщо порівняти середні значення тиску в цьому напрямку зі значеннями в вертикальному і горизонтальному напрямках, то вони виявилися нижчими в 3 і 1,8 рази відповідно.

Залежно від розміру скінченного елемента результати розрахунків практично не відрізняються між собою для 2 мм, 3 мм і 4 мм елементів. Максимальна розбіжність значень тиску для цих варіантів завдання становить 2,5%. При цьому слід зазначити, що для напрямку дії вибуху під кутом 45° , для всіх розмірів скінчених елементів реалізуються практично однакові значення надлишкового тиску.

Отримані результати вказують на таку тенденцію: чим нижче абсолютне значення надлишкового тиску в точці простору, тим більша кількість чисельних вирішень, отриманих з використанням скінченно-елементних сіток, побудованих на скінчених елементах з різними характерними розмірами, має однакове значення. Така поведінка може стати основою для укладання рекомендацій із побудови скінченно-елементної сітки задачі, а саме щодо вибору розміру скінченного елемента залежно від того, в якій зоні від місця вибуху необхідно оцінити його дію – ближній, середній або дальній.

Крім того, слід звернути увагу на значення часу настання максимального значення тиску в різних точках простору. Зі збільшенням характерного розміру скінченного елемента розрахункова швидкість поширення повітряної УХ і продуктів детонації зменшується. Однак, як і в разі визначення надлишкового тиску, ці значення майже не відрізняються для результатів, отриманих з використанням кінцевих елементів розміром 2 мм, 3 мм і 4 мм.

Це узгоджується з висловленим в [123] твердженням про те, що для адекватного моделювання вибухових процесів мінімальна необхідна кількість скінчених елементів ейлерової сітки має становити 6-10 елементів на мінімальний характерний розмір конструкції.

4.2 Моделювання впливу вибухових навантажень на напружено-деформований стан елементів трубчастої камери

Способом отримання параметрів напружено-деформованого стану силових елементів трубчастої вибухової камери, внаслідок вибуху в середині

неї заряду амоніту, було вибрано комп'ютерне моделювання. Дане моделювання проводилося за допомогою програми ANSYS / LS-DYNA.

Спочатку необхідно було визначитися з розрахунковою (геометричною) схемою завдання, її скінченно-елементною моделлю і методом моделювання.

Для побудови оптимальної розрахункової схеми необхідно детально вивчити модельовану конструкцію камери на предмет наявності у ній площини симетрії.

Якщо обрати для вирішення поставленого завдання декартову систему координат, центр якої розташовується у середині робочого столу камери, вісь Z направити вертикально вгору перпендикулярно столу, а осі X і Y розташувати горизонтально на поверхні столу, то конструкція вибухової камери має подвійну симетрію:

- перша – відносно площини ZX ,
- друга – відносно площини ZY .

Таким чином, розрахункова схема задачі може включати в себе $\frac{1}{4}$ частину конструкції камери з накладеними на неї відповідними граничними умовами, а саме заборону переміщення у горизонтальному напрямку Y поверхонь силових елементів камери, заряду ВР і повітря навколо, отриманих в результаті їх розрізання площиною ZX , і в напрямку X аналогічних поверхонь, що належать січній площині ZY .

Аналогічно можна моделювати поведінку робочого столу. Як допущення приймали, що даний елемент конструкції є абсолютно жорстким тілом. Тоді в розрахунковій схемі задачі він буде поданий як гранична умова, що полягає у забороні переміщення у вертикальному напрямку Z усіх контактуючих з ним поверхонь.

З огляду на те, що основна дія повітряної УХ зосереджена у вертикальному напрямку, було прийнято рішення включити до розрахункової моделі задачі тільки 3 силових труби (рис. 4.6). Перша труба №1 вертикальна діаметром 140 мм і відкритим торцем і дві із закритим дном – №2 діаметром

100 мм з відхиленою від вертикалі віссю симетрії на кут 9° та №3 діаметром 140 мм, але вже відхиленою на кут 18° .

При цьому, наявність у камери описаних вище властивостей симетрії, дозволяє у розрахунковій схемі ці силові елементи представити лише своїми половинками, отриманими шляхом розрізання труб поздовжніми площинами.

Положення точки ініціювання детонації заряду ВР розташовується у точці з координатами (0,0,0) (рис. 4.6, а).

Таким чином, у розрахунковій схемі розмір заряду ВР становить 160 ммх125 ммх30 мм, а ділянки, заповненої повітрям, – 604 ммх305 ммх1680 мм.

Як відомо, сьогодні для опису поведінки різних середовищ з огляду на вплив імпульсного навантаження частіше використовуються два підходи – ейлеровий і лагранжевий [124, 125]. Ейлеровий підхід застосовується для опису руху середовищ через нерухому розрахункову сітку і найкращим чином підходить для вивчення перебігу рідин і газу. Лагранжевий, на відміну від ейлерового, використовує рухому сітку, яка жорстко зв'язується з середовищем і деформується разом з ним. Останній зручний для дослідження поведінки твердих тіл, в тому числі металів. З огляду на те, що в нашій задачі розглядаються як газоподібні матеріали – ПД, повітря, так і тверді – металеві труби, то комп'ютерне моделювання проводилося з використанням змішаного - лагранжево-ейлерового підходу [126].

Після визначення метода моделювання будували скінченно-елементну модель задачі. Для цього з бібліотеки скінченних елементів програми ANSYS було обрано скінченний елемент SOLID 164. Даний елемент є об'ємним, тому використовується для вирішення динамічних нестационарних тривимірних (3D) задач.

У зв'язку з тим, що для моделювання процесу навантаження силових елементів трубчастої камери було обрано змішаний лагранжево-ейлеровий підхід, це дозволило використовувати різний розмір скінченного елемента для різних середовищ – газоподібних і металевих.

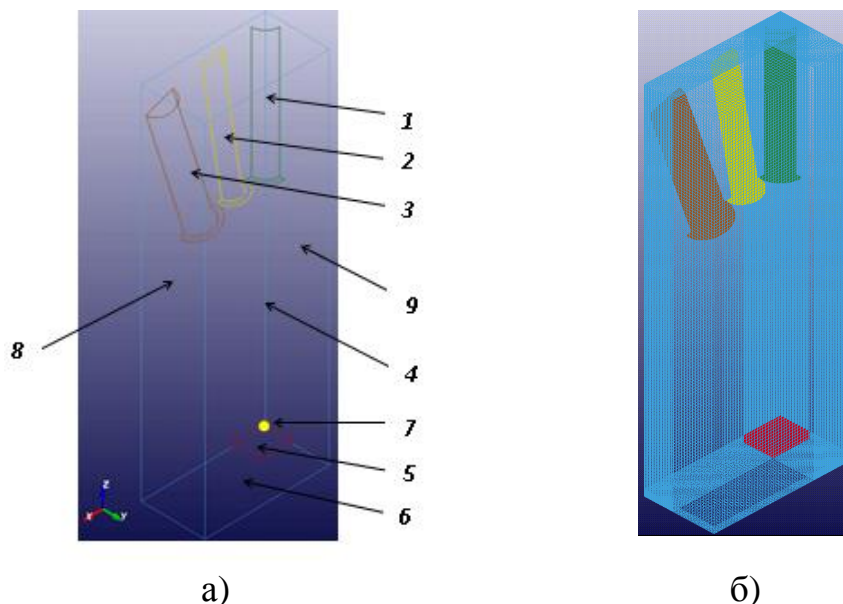


Рис. 4.6 Схеми задачі про вибух плоского заряду вибухової речовини всередині трубчастої вибухової камери (а – геометрична; б – звичайно-елементна): 1 – труба №1, 2 – труба №2, 3 – труба №3, 4 – повітря, 5 – заряд вибухової речовини, 6 – робочий стіл вибухової камери, 7 – точка ініціювання детонації заряду ВР, 8 – площина симетрії ZX, 9 – площина симетрії ZY

Для розрахунків застосовувався персональний комп'ютер із чотирьохядерним центральним процесором IntelCore2Quad з тактовою частотою ядра 2,83 ГГц, 8 Гб оперативної пам'яті і 2 Тб на жорсткому диску.

Для побудови скінченно-елементної сітки труб ВК був обраний скінченний елемент із максимальним характерним розміром рівним 1 мм. Тоді загальна кількість кінцевих елементів склала 678872 шт:

- труба №1 – 170000 шт,
- труба №2 – 251796 шт,
- труба №3 – 257076 шт.

Для побудови скінченно-елементної сітки заряду ВР і повітря навколо нього використовувався кінцевий елемент у формі куба з двома характерними розмірами:

- 6 мм – для заряду ВР,
- 12 мм – для повітря.

При цьому, скінченні елементи повітря, розташовані у вертикальному і горизонтальному напрямках, чітко над бічною і торцевою поверхнями заряду ВР, мали форму паралелепіпеда з висотою 12 мм і поперечним перерізом 6х6 мм. Таким чином, їх кількість склала на заряд ВР 22260 шт, на повітря – 736980 шт.

Загальна кількість кінцевих елементів склало 1438112 шт. Побудована кінцево-елементна модель задачі показана на рисунку 4.6 б.

В якості матеріалу труб використовували сталь 09Г2С, поведінка якої в математичній постановці описувалася за допомогою пружно-пластичної моделі матеріалу з кінематичним зміцненням «PLASTIC-KINEMATIC». Параметри моделі мали такі значення:

- щільність $\rho=7850 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$,
- модуль пружності першого роду $E=210 \text{ ГПа}$,
- коефіцієнт Пуассона $\mu=0,25$,
- границя плинності $\sigma_T=350 \text{ МПа}$.

Розширення продуктів детонації (ПД) описувалося за допомогою рівняння 4.1.

Варто зазначити, що в літературі для ВР типу амоніт №6 ЖВ відсутні дані про чисельні значення параметрів даного рівняння.

Тоді проблема вирішувалася у такій послідовності:

1. Спочатку для ПД розраховувалися коефіцієнти рівняння стану Орленка у формі двочлена, піднесеного до ступеня [127]:

$$p = B \cdot \rho^k + C \cdot \rho^{\Gamma+1}, \quad (4.3)$$

де, B , C , k – коефіцієнти, що визначаються за параметрами в точці Чепмена-Жуге [120], $\Gamma=0,25$. При цьому продукти детонації на фронті детонаційної хвилі мають тиск $P_{C-J}=4,33 \text{ ГПа}$, щільність $\rho = 1333 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

2. Методом математичного підбору параметрів рівняння JWL проводився пошук такої групи даних величин, щоб крива JWL найкращим чином апроксимувати криву Орленка. Як критерій оцінки результату

апроксимації використовувався критерій пошуку мінімального значення нормованої на величину тиску площі між зазначеними залежностями.

Результатом проведеної роботи стали значення коефіцієнтів рівняння JWL:

$$A=140 \text{ ГПа}; B=3 \text{ ГПа}; R_1=5,49; R_2=1,8; \omega=0,25; E_0=4 \text{ ГПа}.$$

Поведінка навколишнього повітря з початковим значенням щільності рівним $\rho_0=1,26 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ описувалося за допомогою рівняння 4.2.

Кінетика розрахунку процесу формування повітряної УХ і потоку ПД, якими навантажуються силові елементи трубчастої ВК представлено на рисунку 4.7.

На рисунку 4.7 видно, що до 30 мкс процесу детонаційний фронт (ДФ) проходить меншу сторону заряду ВР, а до 50 мкс детонацією охоплений весь заряд. Такий результат підтверджує, що чисельна схема програми правильно відтворює значення швидкості детонації рівній $4200 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

В результаті відбиття детонаційного фронту від границі двох середовищ ВР – повітря, в продуктах детонації формується хвиля розрідження, яка рухається у напрямку до площин симетрії задачі. При підході до осі Z починається процес її відбиття самої від себе з формуванням ділянки високого тиску. У момент часу 100 мкс максимальне значення тиску ПД у цій ділянці досягає 112 МПа. У міру розширення ПД тиск у них падає до 68 МПа (150 мкс), 25 МПа – при 200 мкс, 13 МПа – при 225 мкс. На момент $t=250$ мкс тиск у ПД у ділянці точки ініціювання детонації заряду ВР знижується до величини тиску на їх фронті і становить 8 МПа. Надалі, незважаючи на те, що із розширенням ПД тиск на їх фронті знижується (7 МПа – 300 мкс, 5,3 МПа – 350 мкс, 4,7 МПа – 370 мкс) його величина вже постійно перевищує тиск у згаданій вище ділянці на осі Z. На момент часу 370 мкс починається процес взаємодії повітряної УХ і труб камери (рис. 4.8).

На рисунку 4.8 видно, що першою у контакт із повітряною УХ вступає труба №2 при $t=370$ мкс. У цей момент часу в результаті їх взаємодії на зовнішній поверхні фланця труби виникають перші внутрішні напруження.

Другою у контакт вступає труба №3 (375 мкс), а останньою – труба №1 (380 мкс).

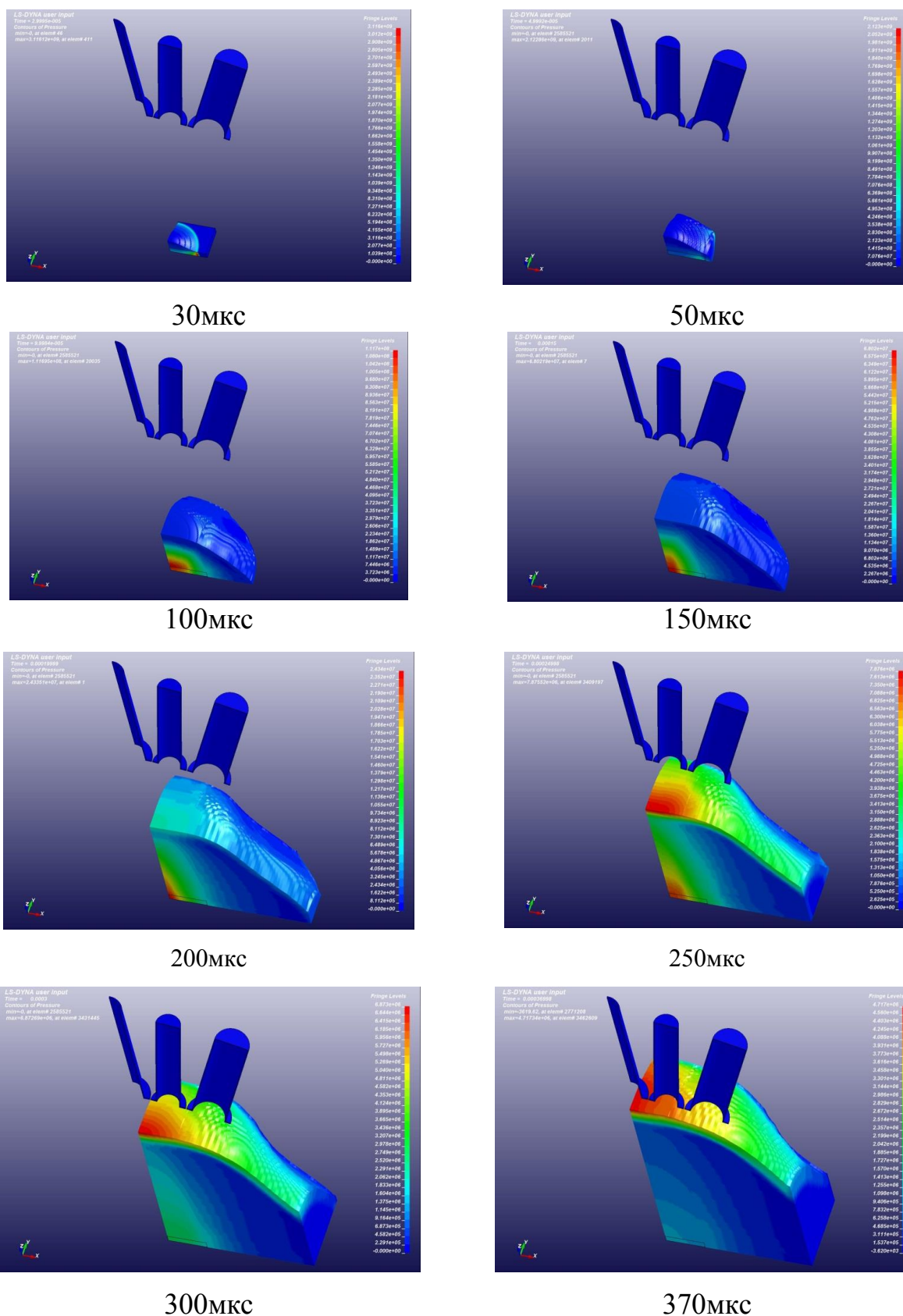


Рис. 4.7 Кінетика розподілу тиску в потоці продуктів детонації заряду вибухової речовини

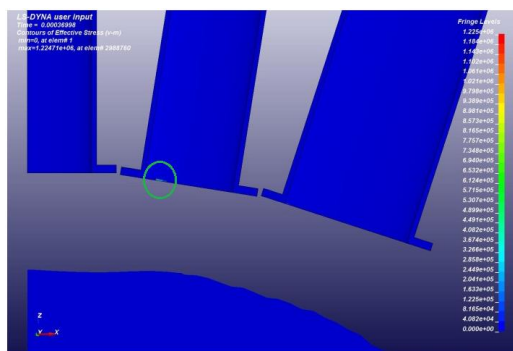
На четвертому кадрі процесу (390 мкс) видно процес формування на фланцях труб нових осередків з відмінними від нуля значеннями внутрішніх напружень (осередків напружень). Їх зовнішній вигляд нагадує форму полум'я – широку біля основи і загострену до вершини. Причому відстань між осередками напружень на трубах різна. Якщо в трубі №1 вони зосереджені досить близько і практично зливаються в одне ціле, то в трубі №2 відстань між ними збільшується, а в трубі №3 їх розподіл має локальний характер.

У міру розвитку даного процесу (400 мкс, 410 мкс) розмір осередків напружень збільшується. В основному вони витягуються у напрямку до зовнішнього торця труб. При цьому можна констатувати, що в трубі №1 осередки напружень являють собою безперервні вузько спрямовані і практично паралельні твірній труби лінії. У трубах №2 і №3 вони хоч і витягуються, але мають обмежену довжину.

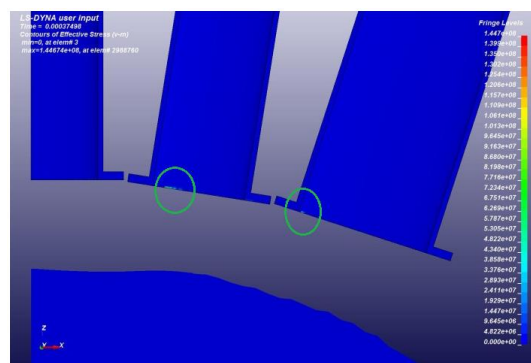
Причому осередки напружень шикуються в деяку лінію-ланцюжок осередок за осередком. При цьому відстань між ними уздовж цих ліній у труби №3 приблизно дорівнює довжині самої плями. Надалі будемо називати ці лінії-ланцюжки, лініями-напружень.

Тут слід зазначити, що на момент чіткого формування в трубах картини внутрішніх напружень ($t=410$ мкс), ПД тільки підходять до фланців труб і починається процес їх проникнення спочатку всередину труби №2, потім №1 та №3 (430 мкс).

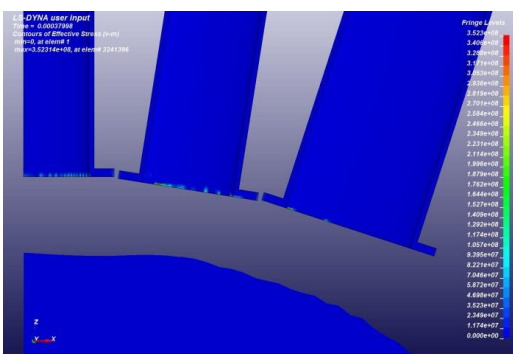
Процес формування ліній-напружень у трубах ВК закінчується до 800 мкс. Саме до цього моменту часу ПД вже повністю охоплюють всі труби (рис. 4.9, $t=800$ мкс). З плином часу рівень напружень у трубах практично не змінюється. Про це свідчить той факт, що в проміжку часу від 800 мкс до 1500 мкс максимальне значення напружень у трубах зростає всього лише на 18 МПа з 518 МПа до 536 МПа. До того ж підвищуються вони головним чином на торцевих фланцях труб.



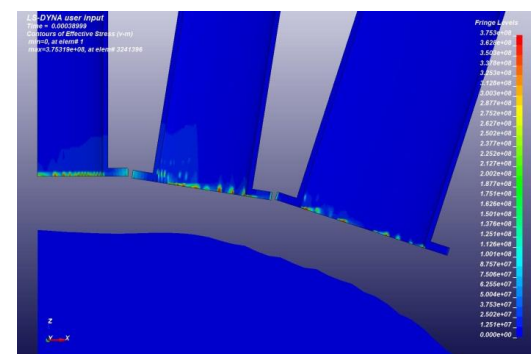
370мкс



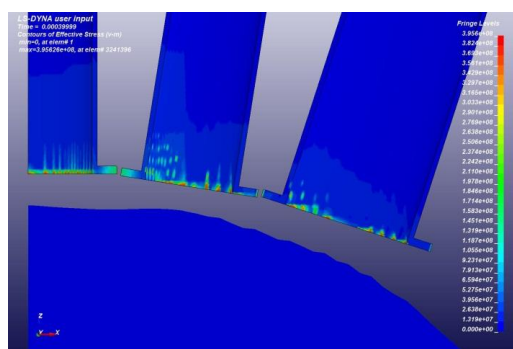
375мкс



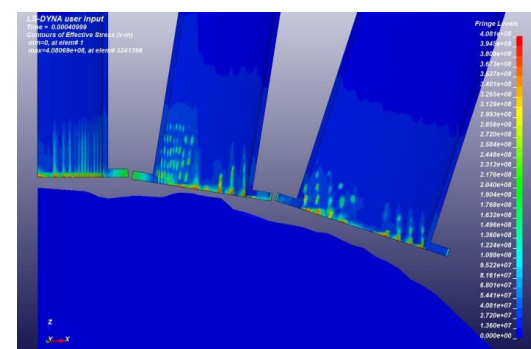
380мкс



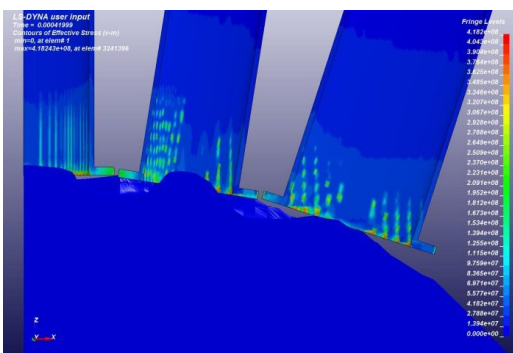
390мкс



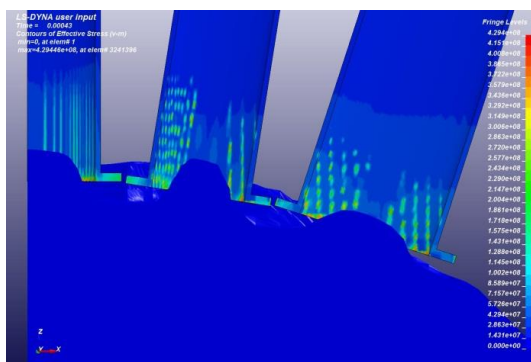
400мкс



410мкс



420мкс



430мкс

Рис. 4.8 Кінетика процесу взаємодії повітряної ударної хвилі з силовими елементами трубчастої вибухової камери

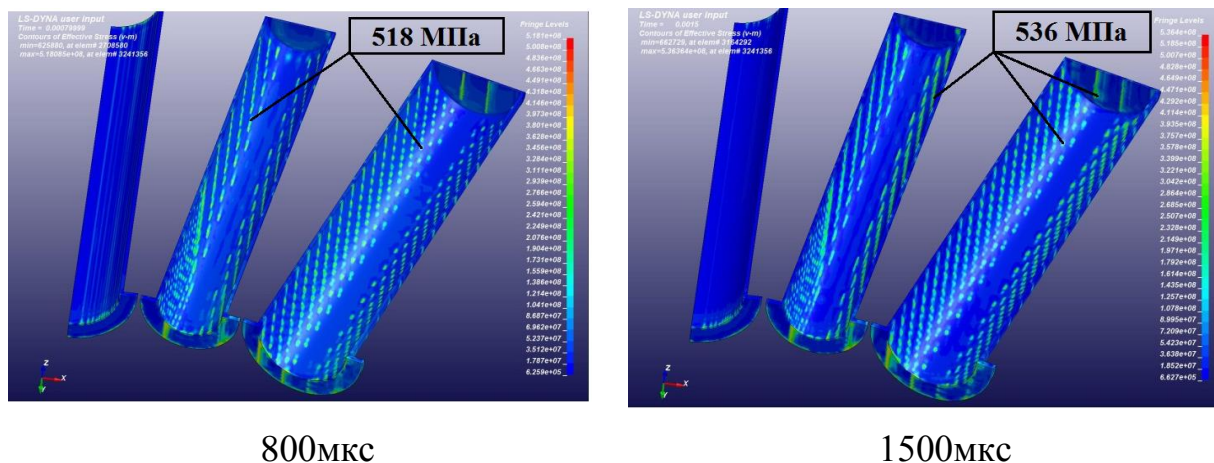


Рис. 4.9 Розрахункова картина напружень в трубах в різні моменти часу

На рисунках 4.8 та 4.9 видно, що незважаючи на те, що траєкторії ліній напружень мають різний кут нахилу відносно твірної труб, всі вони паралельні між собою [128]. Це можна пояснити тим, що основна дія повітряної УХ в даному місці камери зосереджена практично вертикально, а самі труби (з огляду на особливості конструкції камери) нахилені під кутом 9° та 18° від вертикалі. У той же час, якщо подивитися на форму фронту ПД, які йдуть за УХ, то він досить викривлений.

Крім того, зберігається різна відстань між осередками напружень в різних трубах, і як наслідок, їх утворюється різна кількість (рис. 4.10).

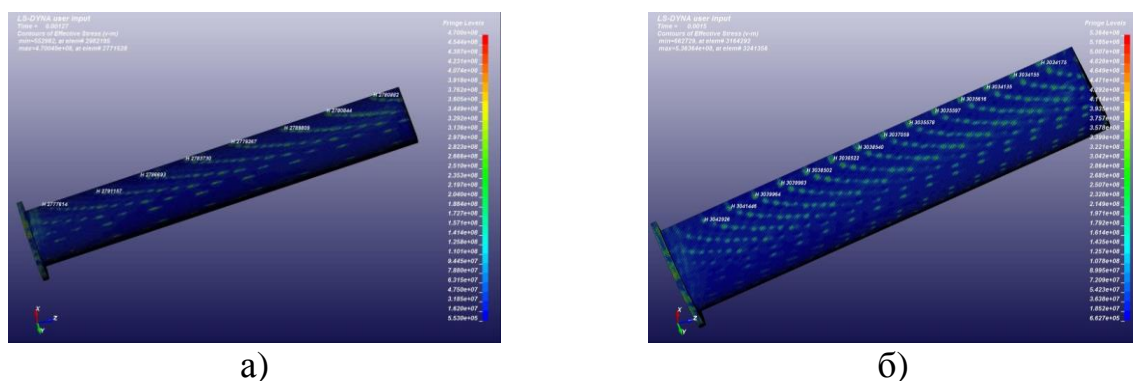


Рис. 4.10 Лінії підвищених внутрішніх напружень у трубах вибухової камери ($t=1500$ мкс): а – труба №2; б – труба №3

Якщо в трубі №2 їх налічується 8-10, то в трубі №3 – 16-18. На формування даного явища, ймовірно, вплинула нерівномірність навантаження поверхні труб з боку повітряної УХ і ПД, тобто передача інформації про силу

впливу від УХ на труби проходить по всій поверхні контакту не плавно, поступово, а локально.

Така нерівномірність навантаження може бути спричинена однією з двох причин:

- особливостями чисельної схеми при передачі інформації (навантаження) від ейлерової сітки до лагранжевої, які були побудовані з використанням скінченних елементів із різними характерними розмірами (в силу обмежених можливостей використовуваної ПЕОМ).

- справді складною структурою фронту повітряної УХ і фронту ПД, які мають не рівномірний розподіл тиску по всій поверхні.

Якщо хоча б одне з висловлених припущень є правильним, то додатково до них необхідно враховувати і геометричну особливість конструкції камери, у якій труби нахилені під різним кутом від вертикалі. Тому, якщо уявити, що паралельний виключно вертикальний вплив на труби №2 і №3 здійснюють вузли звичайно-елементної сітки, що належать повітряної УХ, з досить великою, але однаковою відстанню між собою, то схема взаємодії двох середовищ може бути представлена у вигляді прямокутного трикутника. В ній одним із катетів є відстань між вузлами ейлерової скінченно-елементної сітки. Причому вузол (назвемо його вузол «А») знаходиться ближче до осі симетрії Z знаходиться в контакті з поверхнею труби (відповідна точка «А'» на поверхні труби). Іншим катетом є відстань між другим, необов'язково сусіднім вузлу «А», вузлом «В» і вертикальної проекцією даного вузла-точки на поверхню труби (точка «В'»). Тоді відстань між точками на трубі $A'-B'$, а в перспективі сформованими в трубах лініями-напруженнями, буде відповідати величині гіпотенузи. Таким чином, відстань між лініями-напруженнями буде залежати від кута нахилу твірної труби до ліній нерухомої ейлерової скінченно-елементної сітки. Чим більше кут, тим більше довжина гіпотенузи $A'-B'$ і тим самим менше формується ліній-напружень.

Крім того, цікавим був характер зміни в часі значень еквівалентних напружень (за Мизесом) в вершинах, описаних вище осередків, розташованих

на початку різних ліній-напружень (рис. 4.11). Для відповіді на це питання вибиралися відповідні елементи звичайно-елементної моделі задачі, номери і схема розташування яких показані на рисунку 4.11, а для труби №2 і на рисунку 4.11, б для труби №3.

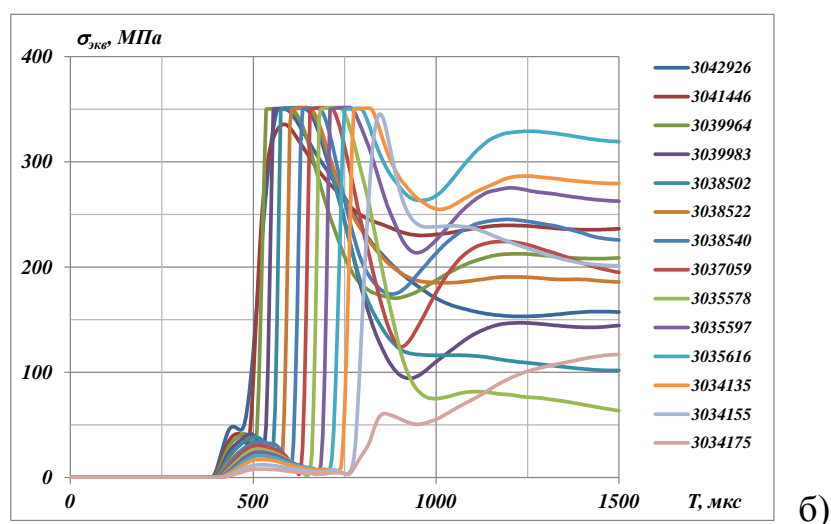
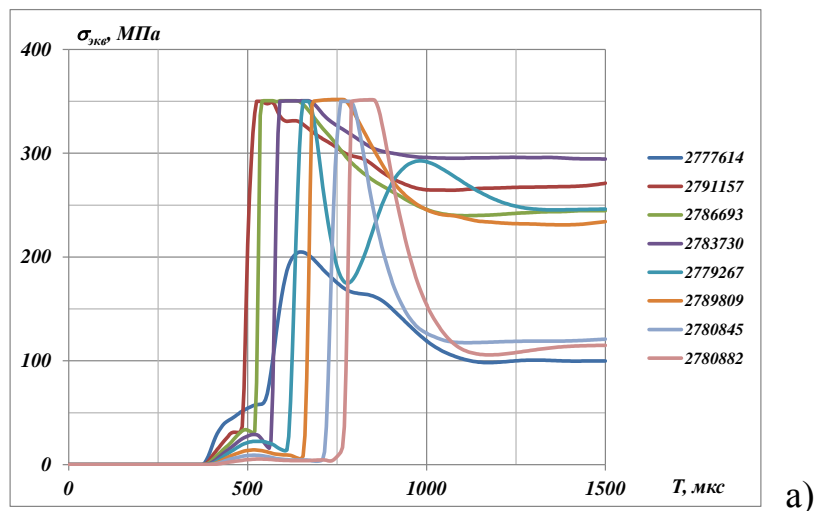


Рис. 4.11 Історія зміни значень внутрішньої напруги на початку ліній-напружень: (а) – труба №2; (б) – труба №3

На рисунку 4.11 видно, що характер всіх залежностей практично однаковий. Всі графіки мають перший пік у районі 500 мкс. Така їх поведінка в цей момент часу пояснюється впливом пружного передвісника, що розповсюджується по трубах.

Відмінність лише спостерігається в точний час настання пікового значення і його абсолютної величини. Якщо перші дві лінії, які характеризують

зміну напружень в скінченних елементах, розташованих ближче всіх до відкритого краю труб, мають максимальні значення 30 МПа...35 МПа в трубі №2 і 50 МПа в трубі №3 в момент часу $t=450$ мкс, то в скінченних елементах, розташованих ближче всіх до торця труби, дане значення падає до рівня 5 МПа...9 МПа. Причому для останніх скінченних елементів характерна деяка сталість пікового значення напруження, яка приблизно настає між 500 мкс і 550 мкс. Така тимчасова затримка говорить про те, що створена математична модель задачі з задовільною точністю відтворює значення швидкості поширення пружного провісника [128], (зі швидкістю звуку в сталі, $c=5100 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$).

Подальше повторне підвищення напружень пов'язане з впливом зростаючого внутрішнього тиску на труби, який виникає в результаті руху в них ПД. На рисунку 4.11 видно, що максимальні значення напружень досягають величини статичної границі плинності матеріалу, закладеного в розрахунок (350 МПа). Вони зберігають це значення деякий час. Як наслідок, матеріал змушений переходити з пружної зони деформування у пластичну з накопиченням відповідних пластичних деформацій. Далі розпочинається процес розвантаження (спад значення напружень) і повторне навантаження, яке є наслідком внутрішніх хвильових процесів у ПД.

Крім того, наведені вище залежності вказують на суттєві відмінності між значенням швидкості руху УХ у металі і швидкістю руху фронту ПД. Якщо на початку труб (у відкритих торців) ПД повторно їх навантажують до величини границі плинності через 60 мкс і 120 мкс – труби №2 і №3, то після проходження пружного передвісника по придонній ділянці труб ПД її навантажують вже через 185 мкс і 270 мкс відповідно. Таким чином, розрахунки показують, що фронт ПД рухається із середньою швидкістю в трубі №2, що дорівнює $2250 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а в трубі №3 – $2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, що в 2,2 ... 2,5 рази менше, ніж швидкість звуку в сталі.

4.3 Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану в елементах трубчастої вибухової камери

Для вивчення характеру деформування ТВК було проведено дослідження її напружено-деформованого стану (НДС) до засипання піском і після.

Дослідження НДС вісесиметричної конструкції ТВК було проведено на трубах і зв'язках. Датчики на трубу були наклеєні таким чином, щоб реєструвати осьові й поздовжні деформації як поблизу зовнішнього торця труби, так і на відстані 220 мм від нього. Датчики, які наклеювалися на стрижні, реєстрували деформацію розтягування.

Для досліджень НДС масштабної ТВК було використано методику електротензометрування. Ця методика побудована на використанні комплексу приладів і пристроїв для вимірювання деформації та оцінювання напруженого стану в елементах конструкції. Аналоговий вимірювальний комплекс складається з тензометричної станції ШТС-8 і каліброваного пристрою, який доповнюється для балансування мостів осцилографом С8-17.

Сигнали від наклеєних на випробуваному об'єкті датчиків деформацій (тензорезистори типу КФ-5П1-1-100) надходять у реальному масштабі часу на широкосмугову тензостанцію ШТС-8М. Блок включає в себе цифровий осцилограф марки Fluke 124. Зовнішній вигляд конструкції ТВК із наклеєними датчиками (рис. 4.14).

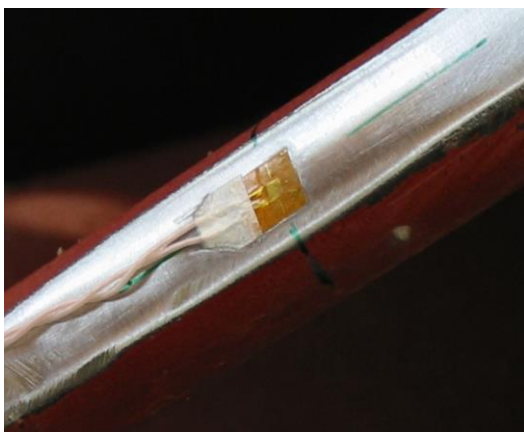
Як пристрій для обробки інформації використовували персональний комп'ютер. Експериментальне дослідження характеристик міцності ТВК проводили за схемою поетапного навантаження підривом серії зарядів з поступовим збільшенням їх маси. В якості вибухового матеріалу використовувався амоніт № 6ЖВ і його суміші з селітрою і піском. Маса зарядів ВР на різних етапах вимірювань наведена у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

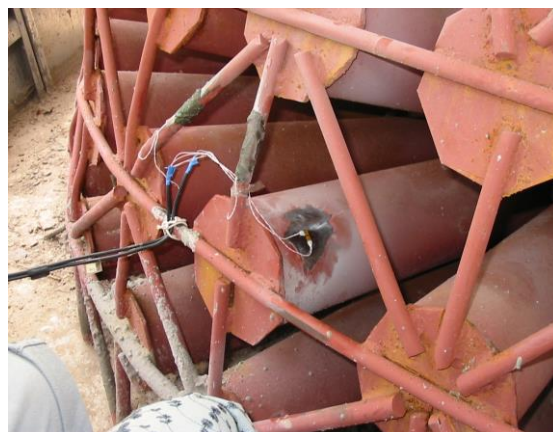
Маса зарядів на послідовних етапах випробувань

Етап	1	2	3	4	5
Маса заряду, $M_{\text{ВВ}}$, кг	1,0	1,4	1,6	2,0	2,4

Всі вимірювання виконувалися з плоскими зарядами (заряд ВР формувався зі стандартних патронів амоніту №6 ЖВ), симетрично розташованими всередині камери на опорі з піску. Плоский заряд для випробувань був обраний тому, що він здійснює значно більший деформаційний вплив на стінки ВК, ніж зосереджений, а також найбільш близький за формою до зарядів, які використовують під час ЗВ.



а)



б)

Рис. 4.14 Розміщення тензорезисторів на конструкції вибухової камери: а) – загальний вигляд тензорезистора, приклеєного на зв'язках; б) – «розетка» тензорезисторів, приклеєна біля зовнішнього торця труби

Наклеювання датчиків і вимірювання здійснювали на трьох рівнях: верх – 2-й ряд труб; середина – 5-й ряд труб; основа – 8-й ряд труб (рис. 4.15).

На кожному з цих рівнів вибирали одну трубу, на якій встановлені чотири тензорезистори, два – в окружному і два – в осьовому напрямку (рис. 4.14, б), а на "зв'язках" між рядами наклеювали по одному тензорезистору (рис 4.14, а). Схема установки датчиків базувалася на припущенні, що в стінках труб виникають осьові напруження за рахунок зіткнення УХ із заглушками труб і окружні – за рахунок тиску прохідного газового потоку на стінки труб. Так само було зроблено чотири вимірювання у точках, віддалених від меридіана труб, на якому проводилися вимірювання, на 120° – з метою перевірки симетричності навантаження.

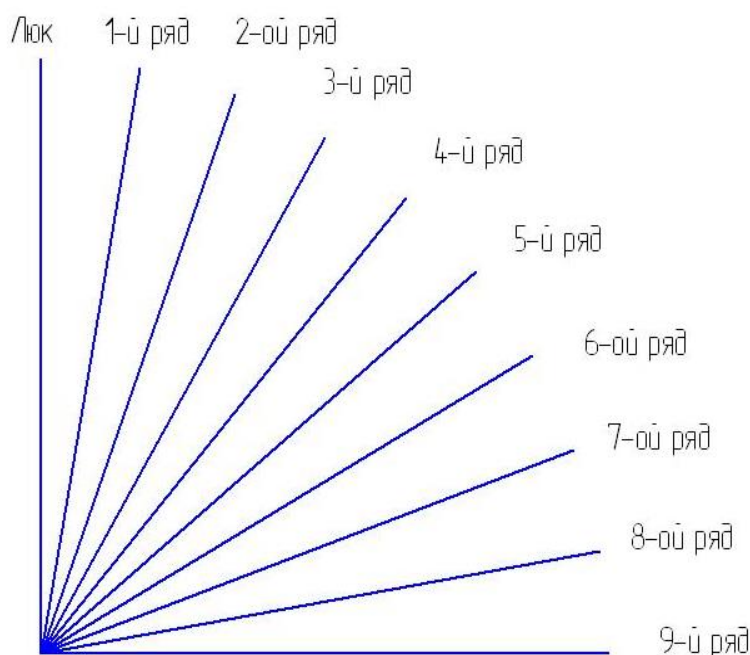


Рис. 4.15 – Схема розміщення рядів труб у трубчастій вибуховій камері

Опрацювання отриманих деформаційних залежностей, типова з яких наведена на рисунку 4.16, показала, що деформування усіх елементів камери починається одночасно, сам процес деформування досліджуваної конструкції має складний характер, що свідчить про порушення у її елементах багатьох близьких за частотою форм коливань.

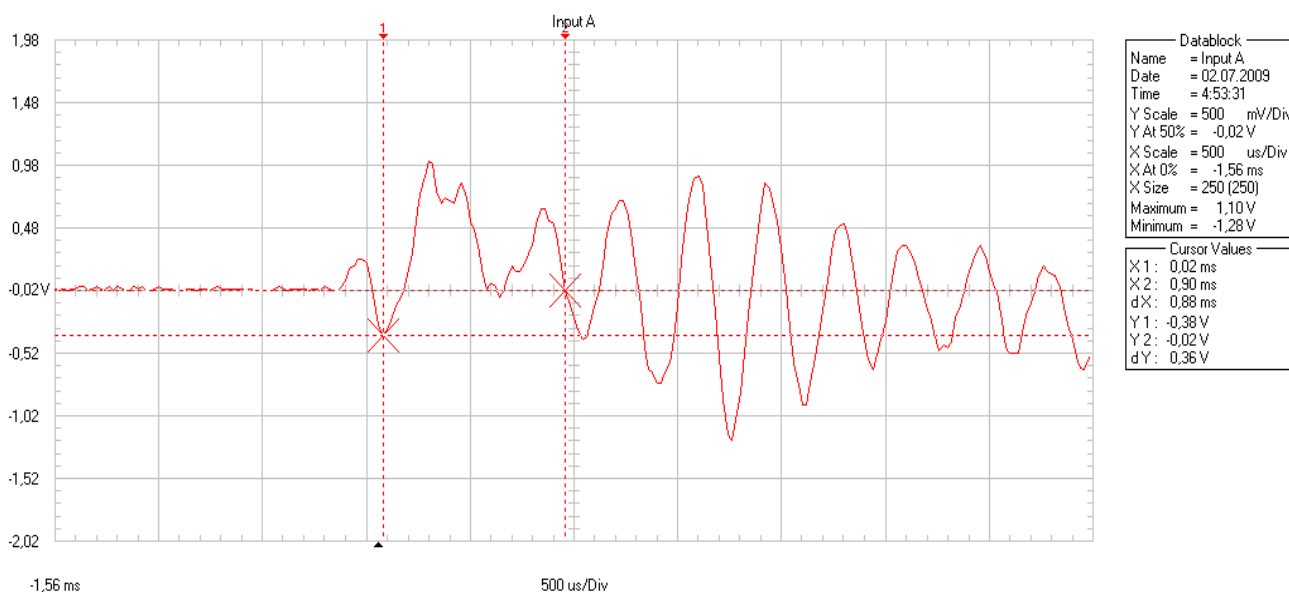


Рис. 4.16. Типова осцилограма, отримана при підриві заряду з амоніту БЖВ (1,0 кг) (датчики наклеєні поблизу заглушок другого ряду труб)

На отриманих осцилограмах величина відносної деформації пропорційна напрузі U_1 (в мілівольтах). Залежність між величиною прогину тарувальної балки і одержуваної при цьому деформації виражається формулою [129]:

$$\varepsilon = 6 \cdot 10^{-4} \cdot f, \text{ де} \quad (4.4)$$

ε – відносна деформація;

f – величина прогину балки, мм.

Величина прогину балки, отримана при таруванні, пропорційна напрузі U_2 (в мілівольтах), тому, вимірявши U_1 та U_2 , знаходимо:

$$\varepsilon = 6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{U_1}{U_2} \quad (4.5)$$

Розрахунок напружень на трубах, беручи до уваги гіпотезу плоского напруженого стану, був виконаний за формулами:

$$\sigma_x = \frac{\varepsilon_x + \mu \varepsilon_y}{1 - \mu^2} \cdot E \quad (4.6)$$

$$\sigma_y = \frac{\varepsilon_y + \mu \varepsilon_x}{1 - \mu^2} \cdot E, \text{ де} \quad (4.7)$$

σ_x σ_y – відповідно, осьові і окружні напруження;

μ , E – відповідно, коефіцієнт Пуассона і модуль пружності матеріалу труби.

Як свідчать результати опрацювання осцилограм (табл. 4.7), значний внесок у формування деформаційного процесу на різних ділянках труб належить деформації розтягування у поздовжньому і окружному напрямках. Стрижні при цьому зазнають деформацію розтягування [130]. Так, поблизу заглушок труб 2-го ряду окружні напруги перевищують поздовжні у 1,5 рази. У міру віддалення від торця заглушок величина окружних напружень зменшується і на відстані 220 мм стають майже удвічі менше, ніж поздовжні.

У широтному напрямку ця закономірність зберігається, але величини самих напружень зменшуються і на трубах 8-го ряду вони не перевищують 50% рівня напружень, що виникають в трубах 2-го ряду.

Максимум деформацій на датчиках, розташованих поблизу одне одного у взаємно перпендикулярних напрямках реєструється одночасно. Максимальна

Напруження, що виникають в елементах трубчастої камери

№ досліджу	Місце розташування датчика	Маса ВР, кг	σ_x , МПа	σ_y , МПа	σ , МПа
1	2-й ряд труб 40мм від зовнішнього торця	1,0	164	217,9	
		1,6	179	247	
2	Зв'язки між першим і другим рядами труб	1,0			205,8
		1,6			462
3	Зв'язки між 2-м і 3-м рядами труб	1,0			193
		1,6			390,6
4	5-й ряд труб 40мм від зовнішнього торця	1,0	211,4	130,6	
		1,6	229	140	
5	5-й ряд труб 220мм від зовнішнього торця	1,0	265	144,4	
		1,4	328	232,8	
6	8-й ряд труб 40мм від зовнішнього торця	1,0	72,9	89	
7	На зв'язках між 7-м і 8-м рядами труб	1,0			94,5
		1,4			126
8	Зв'язки між 2-м і 3-м рядами труб під піском	1,0			140,6
		1,6			237
		2,0			300,5
		2,4			344
8	2-й ряд труб 40мм від зовнішнього торця під піском	2,0	201	366	
		2,4	240	390	

амплітуда деформацій реєструється у різних точках вимірювань не одночасно, а тривалість затримки появи максимуму варіюється від чверті до трьох мілісекунд. Час затримки для фіксованої точки постійний і не залежить від потужності заряду і типу ВР.

Як видно з рис. 4.17 при підриві заряду до 1,0 кг і понад 2,0 кг найбільшої деформації зазнають труби, а при підриві заряду близько 1,5 кг найбільші деформації припадають на зв'язки. Також слід зазначити, що поблизу зовнішнього торця труби окружні напруження перевищують осьові. Ймовірно, це пояснюється тим, що хвиля стисненого повітря, яка контактує із заглушкою, розширюється і створює тиск на стінки труби в радіальному напрямку.

Результати вимірювань відносної деформації при навантаженні камери сумішевими ВР показали, що під час вибуху заряду однієї і тієї ж маси амоніту №6 ЖВ і суміші цього ж амоніту з піском (відповідно 55/45), величина відносної деформації у разі використання чистого амоніту збільшується практично в 1,5 рази. Під час вибуху зарядів однієї і тієї ж маси амоніту №6 ЖВ і суміші цього амоніту з селітрою (55/45), величини відносних деформацій практично рівні між собою [131].

Оцінювання точності отриманих результатів проводилося шляхом порівняння з даними, які отримані в результаті комп'ютерного моделювання (пункт 4.2).

Для порівняння отриманих даних експерименту в розрахунковій моделі задачі бралися відповідні скінченні елементи, розташовані на відстані 40 мм в трубі №2.

Слід зазначити, що за даними розрахунків саме в цьому місці труби №3 розташовується один з осередків із підвищеним значенням напружень (рис. 4.10, б). З причини неможливості точного визначення розташування датчика відносно скінченно-елементної сітки задачі було прийнято рішення досліджувати усі скінченні елементи, які знаходяться на ділянці цього осередку. Таким чином, було розглянуто поведінку напружень у 14 скінченних елементах (рис. 4.18). З огляду на той факт, що розміри датчика є скінченними і більшими за характерний розмір скінченного елемента, що дорівнює 1 мм, то на рисунку 4.18 представлено додаткову середню лінію, що відповідає середнім напруженням у всіх 14 скінченних елементах. Це має відповідати значенням, які реєструє датчик. Пунктирна лінія відповідає експериментальним даним.

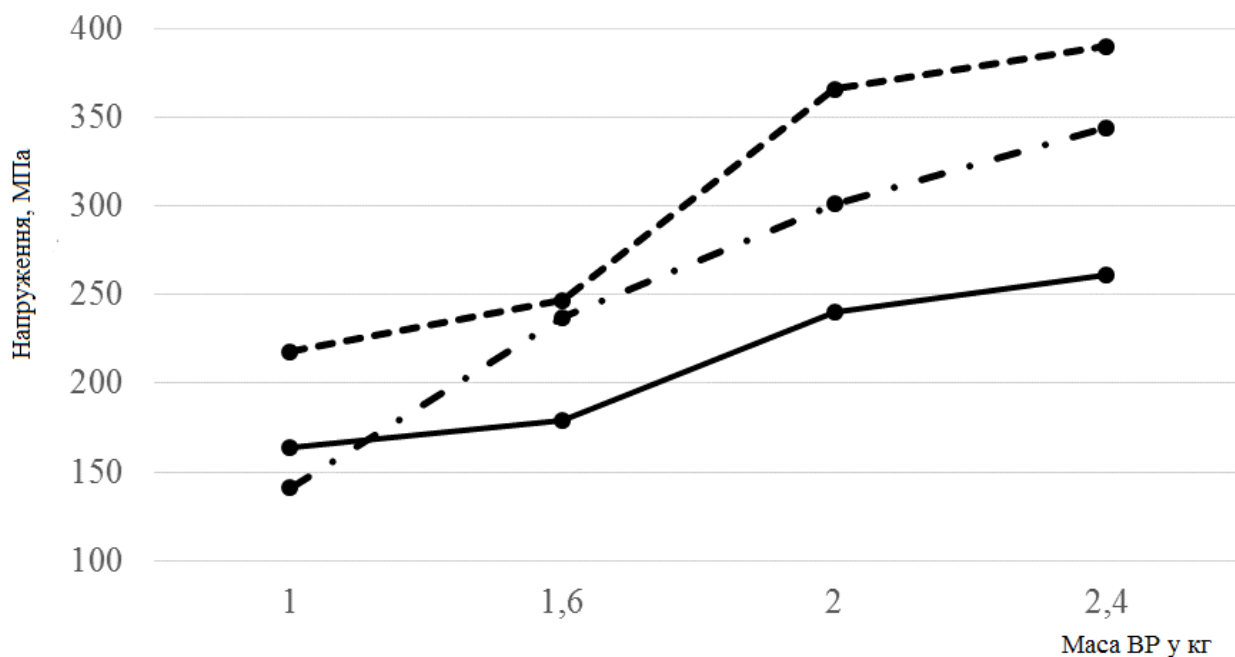


Рис. 4.17 Графік залежності напружень від маси вибухової речовини (датчики наклеєні на трубах 2-го ряду 40 мм від торця і на стрижнях між 2-м і 3-м рядами труб, значення σ при 2,0 кг і 2,4 кг отримані після засипки камери піском)

- поздовжні напруження;
- — окружні напруження;
- . - . - — напруження у зв'язках

З рисунку 4.18 видно, що середнє розрахункове максимальне еквівалентне напруження в цій частині труби відповідає значенню, навколо якого відбуваються відхилення значень експериментальної кривої.

Крім того, результати розрахунку допомогли визначити одну з причин руйнування в приграничній ділянці труб камери, розрахованої на 200 кг ТНТ еквівалента. Якщо порівняти фотографії характеру руйнування деяких труб другого ярусу (рис. 4.19) з кадрами комп'ютерного моделювання, що описують розподіл внутрішніх напружень, то можна констатувати задовільну кореляцію між траєкторіями руху тріщин і лініями високих напружень, описаних раніше.

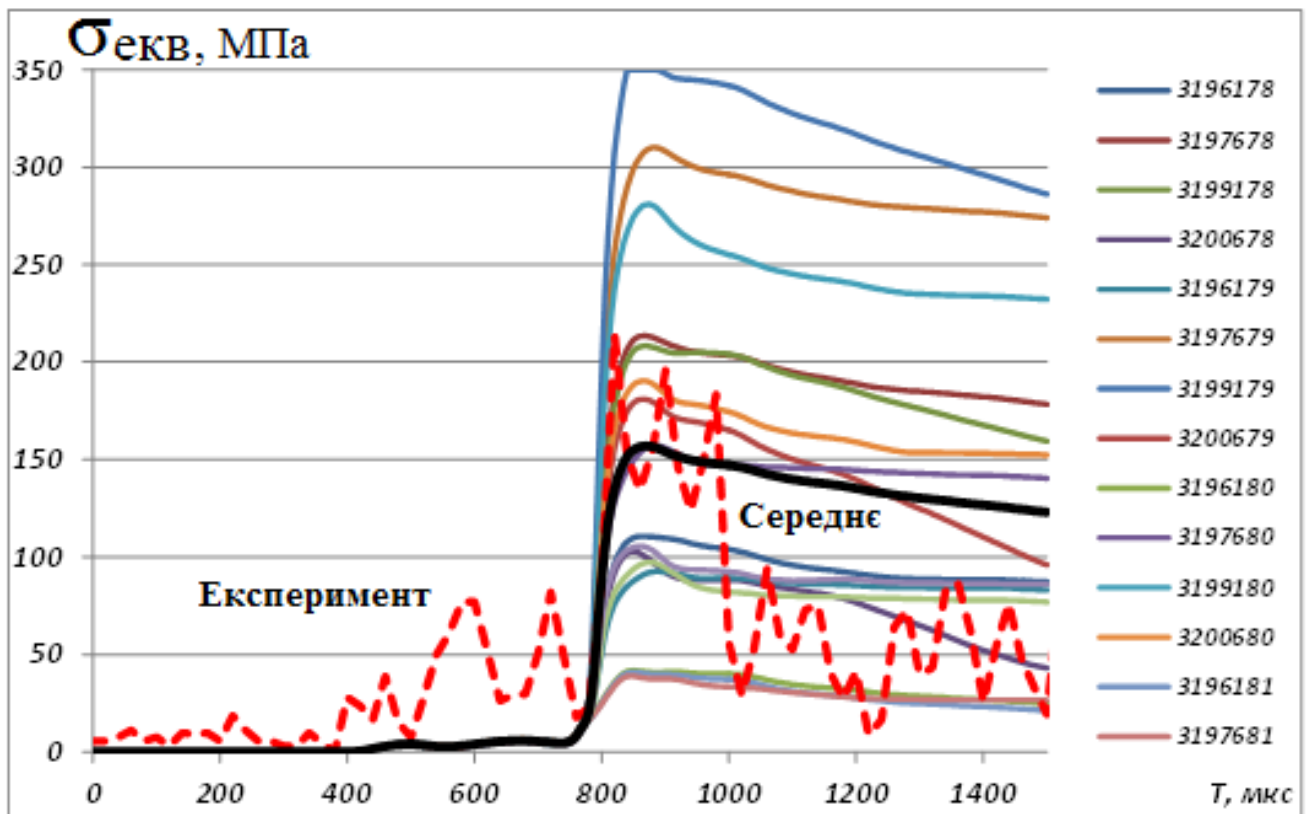


Рис. 4.18 Розподіл внутрішніх напружень в трубі №2 на відстані 40 мм від торця труби

Таким чином, результати математичного моделювання на відріжку 780 мкс...1000 мкс узгоджуються з експериментальними даними, відрізняючись в більшу сторону на 10%, і їх можна використовувати для попередніх оцінок міцності конструкцій подібного класу.

Якщо порівняти також характер руйнування конструкції вибухової камери, розрахованої на 200 кг ТНТ, у ділянці біля торця труби №3 з картиною розрахункових напружень (рис. 4.20), то видно, що напруження з максимальними значеннями розподілені прямо уздовж периметру торця або лінії зварювання двох деталей – труби і донної кришки.

Отриману математичну модель, враховуючи достатню узгодженість її результатів з експериментом, можна використовувати для оптимізації форми труби з точки зору міцності конструкції камери.

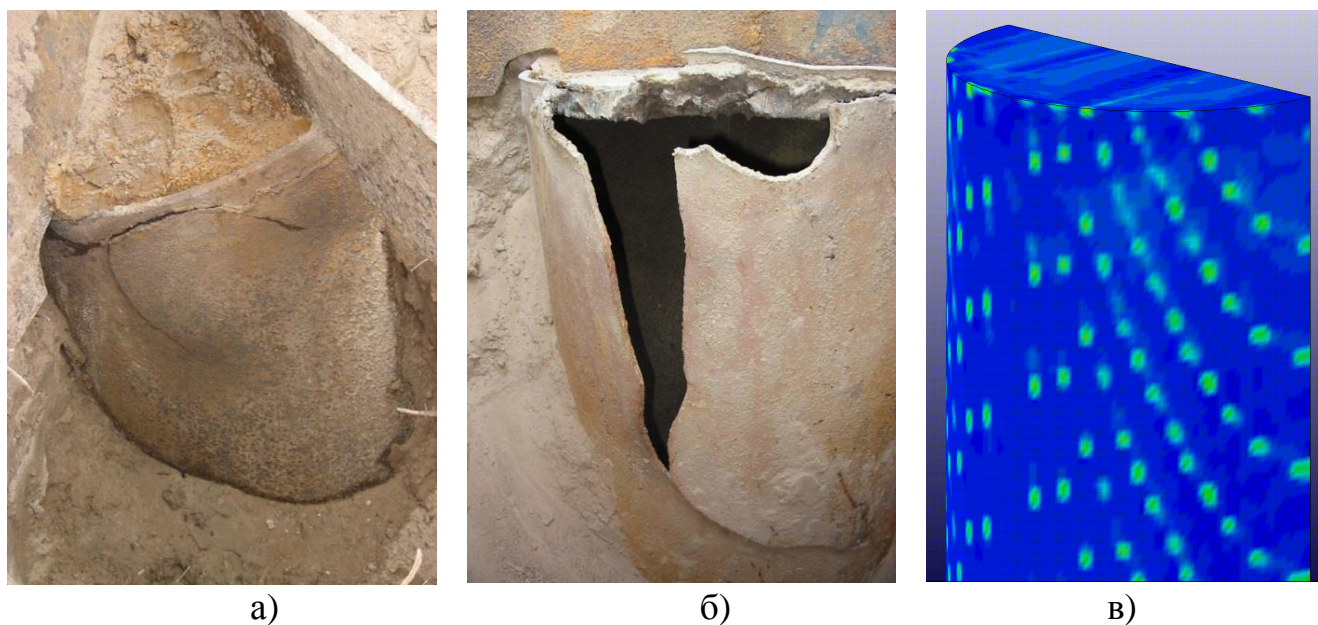


Рис. 4.19 Зовнішній вигляд труби: а), б) – тріщини в трубах камери розрахованої 200 кг ТНТ, в) – результат чисельного моделювання

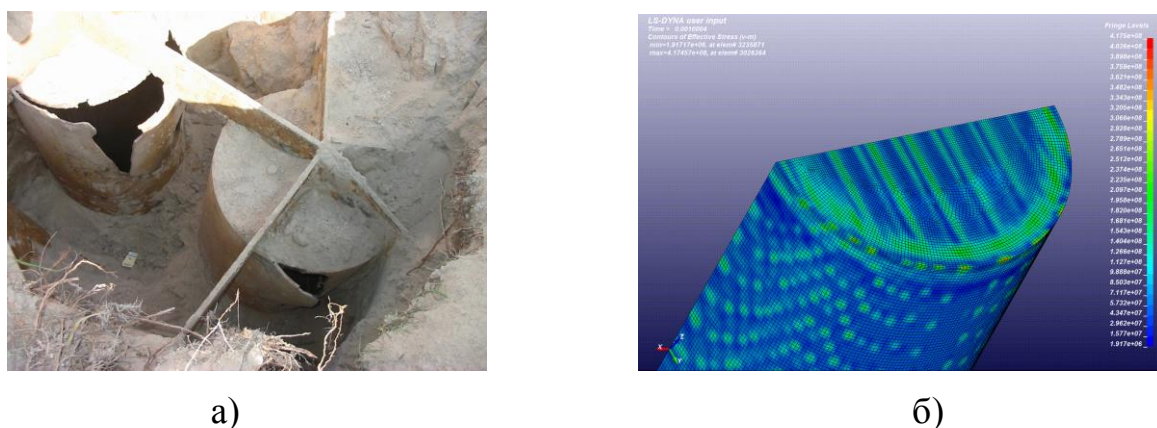


Рис. 4.20 Зовнішній вигляд торця труби №2: а) – експериментальний; б) – картина розрахункових напружень

В результаті проведеної роботи на полігоні ІЕЗ ім. Є.О. Патона смт Глеваха створено вдосконалену масштабну (1:5) модель – малу трубчасту вибухову камеру, розраховану на підрив 2,4 кг амоніту №6ЖВ (рис. 4.21). Після проведених досліджень камеру засипали піском.



Рис. 4.21 Загальний вигляд трубчастої камери для зварювання вибухом

Грунтовий насип навколо зовнішньої сторони ТВК відіграє роль приєднаної маси, яка додатково знижує амплітуду коливань конструкції ТВК і поглинає їхню енергію. У першому русі елементів конструкції назовні в ґрунті виникає хвиля стиснення, яка передає йому значну частку отриманого конструкцією імпульсу. Надалі ґрунт рухається за інерцією назовні, а металева конструкція у цей час відчуває вільні коливання зменшеної амплітуди.

4.4 Автоматизація та особливості роботи камери

Автоматизація роботи ТВК є актуальною і являє собою складну конструкторську задачу, вирішення якої дозволило значно прискорити процес виробництва біметалевих заготовок методом зварювання вибухом.

В існуючій ТВК, розрахованій на 200 кг ВР, доставка всередину камери зварюваних заготовок проводиться на візку через завантажувальний люк. Візок зачочується всередину камери тимчасовими рейковими шляхами, які знімаються після виїзду візка з камери. Після виїзду візка з камери отвір завантажувального люка закривається і тільки після цього проводиться процес ЗВ. Усі операції зі встановлення і зняття рейкового шляху, зачочування і викочування візка здійснюються вручну, що займає велику кількість часу і знижує продуктивність процесу виробництва. Оскільки ця камера проєктувалася, як лабораторна установка, яка не була розрахована на масове виробництво, то така система завантаження є цілком прийнятною.

Спроба прискорити зазначений процес за рахунок застосування візка як запірною пристрою камери, який одночасно є і робочим столом камери (опорою, на якій проводиться ЗВ), представлено на рисунку 4.22, до позитивного результату не призвели.

Вже після проведення перших пробних підривів зарядів ВР масою 0,2 кг і 0,5 кг було виявлено явище викиду робочого столу камери. Це відбувалося, незважаючи на те, що основна дія вибуху направлена вгору, а тиск – вниз. Враховуючи наведене, тиск, який виникав під час вибуху, мав би притискати робочий стіл до опори, але цього не відбувалося.

Після аналізу причин викидання робочого столу, було вжито заходи щодо герметизації проміжку між ним і тунелем камери, в результаті чого був виготовлений конструктивний елемент (рис. 4.23), що дозволяє герметизувати проміжок між робочим столом і тунелем камери.

Герметизація проміжку запобігає перепаду тисків, який викидає візок з ТВК. Для додаткової фіксації робочого столу до основи камери були приварені

упори, які входять у зчеплення з виїмкою у днищі робочого столу при його опусканні.

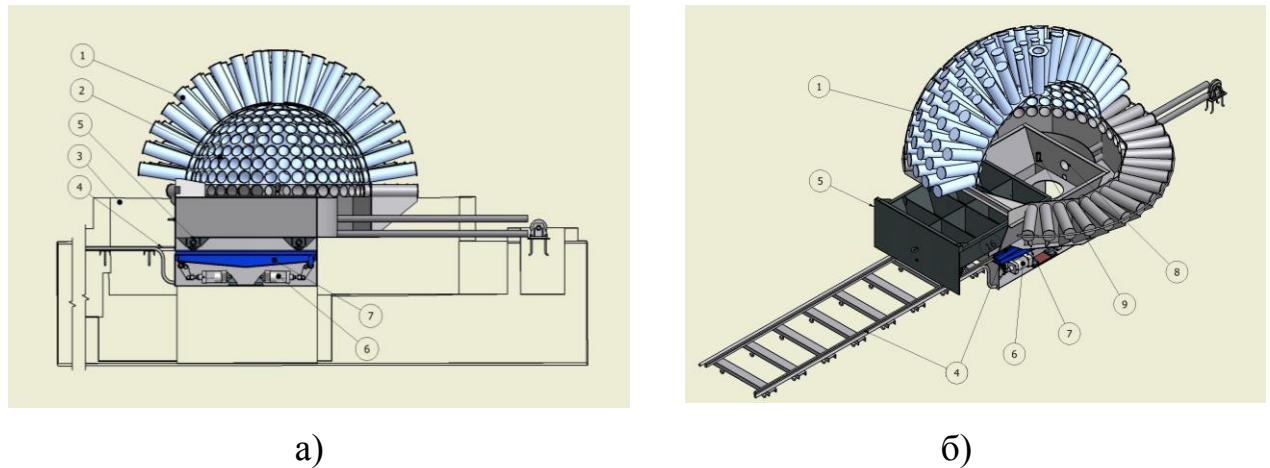


Рис. 4.22 Схема конструкції трубчастої вибухової камери: а – зі всунутим робочим столом; б – із висунутим робочим столом; 1 – труби; 2 – корпус камери; 3 – бетонна основа камери; 4 – рейковий шлях; 5 – рухомий візок; 6 – пневмоцилінри; 7 – рухливі балки; 8 – тунель; 9 – геометричний центр камери (місце вибуху заряду)

На основі пневматичного приводу, що працює від стандартного компресора потужністю 1500 Вт і продуктивністю $150 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$, було розроблено спеціальний механізм опускання і піднімання робочого столу.

Після реалізації комплексу технологічних заходів проводилися випробування ТВК. При цьому особлива увага приділялася поведінці робочого столу і конструктивним елементам для герметизації проміжку між робочим столом і тунелем камери. В результаті було встановлено, що прийнятий комплекс заходів повністю запобігає викиданню візка, а власне конструктивні елементи, що зазнають впливу тиску, не деформуються і не схильні до руйнування [132].

Принцип роботи камери пояснюється на рисунках 4.22 і 4.23, на яких показана конструкція камери в різних проєкціях. Вона складається з напівсферного корпусу 2, який утворений трубами 1, і в якому виконаний глухий тунель 8 для заїзду та виїзду візка-опори 5. У тунелі 8 прокладені

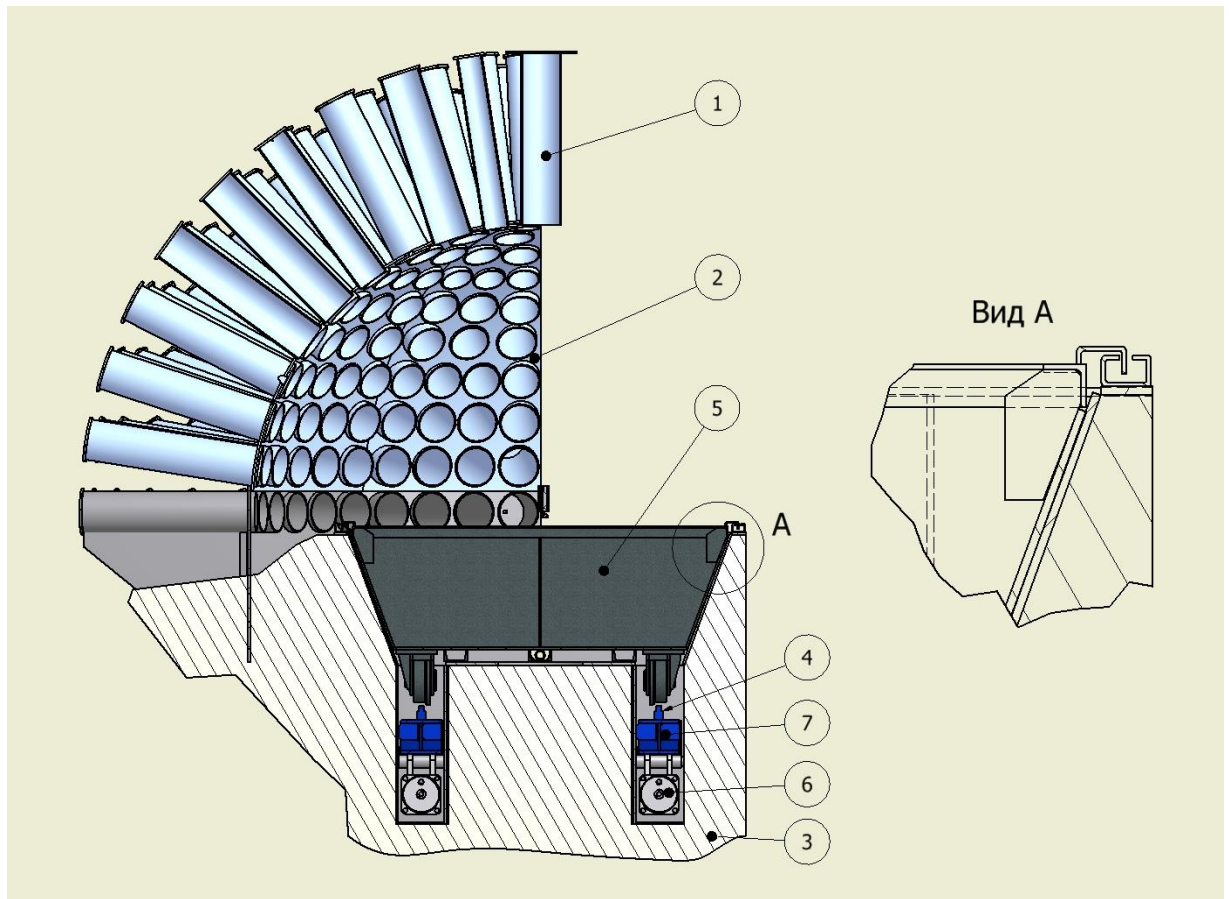


Рис. 4.23 Переріз трубчастої вибухової камери 1 – труби; 2 – корпус камери; 3 – бетонна основа камери; 4 – рейковий шлях; 5 – рухомий візок; 6 – пневмоцилінри; 7 – рухомі балки;

рухомі балки 7, на яких розташовані рейки 4, які піднімають і опускають візок-опору 5. Рухомі балки 7 піднімаються й опускаються за допомогою пневмодомкратів 6, встановлених під ними. Крім того, для руху візка поза камерою рейки 4 виконані нерухомими. На рисунку 4.23 показаний вигляд А, який пояснює принцип герметизації зазору між робочим столом і тунелем камери по периметру.

При виконанні робіт зі ЗВ виконується наступна послідовність робіт. В технологічне поглиблення візка-опори 5 встановлюється виріб і заряд ВР. При переміщенні візка-опори 5 всередину камери рейки 4, які встановлені на балці 7 знаходяться у піднятому положенні, а їх рівень збігається з рівнем рейок 4 поза камерою. Візок-опора 5 рухається в камеру до упору, після його зупинки

пневмдомкрати 6 опускають балку 7 і візок-опора 5 опускається на основу, а балка 7 опускається ще нижче, таким чином, колеса візка знаходяться у підвішеному стані, що забезпечує жорстку його фіксацію в процесі виконання зварювання вибухом.

Висновки до розділу 4

1. За результатами випробувань і досліджень НДС камери визначено, що найбільш навантаженими елементами конструкції є «зв'язки». Це дозволяє використовувати зв'язки для візуальної оцінки експлуатаційного ресурсу камери.

2. Встановлено, що напруження, які виникають в елементах конструкції, залежать від «широтної» координати. При цьому в нижніх рядах труб напруження мінімальні, а в рядах труб поблизу вентиляційного люка – максимальні. Встановлено, що при використанні плоских зарядів збільшуються навантаження на елементи верхньої частини камери. Показано, що напруження в елементах камери однакові при використанні зарядів однакової маси з амоніту №6ЖВ і його сумішей з селітрою, а при використанні сумішей амоніту з піском – зменшуються

3. Розроблено чисельну методику визначення напружено-деформованого стану силових елементів трубчастої камери під час вибуху в ній плоского заряду ВР кінцевих розмірів. Величини розрахункових напружень, які визначаються за допомогою цієї методики, задовільно корелюють з експериментальними результатами.

За результатами чисельного аналізу встановлено, що:

- в силових елементах вибухової камери (трубах) напруження з граничними значеннями розподілені по гвинтовій лінії, що дозволяє пояснити характер руйнування труб в приграничній ділянці;

- у трубах вибухової камери кількість гвинтових ліній з граничними значеннями інтенсивності напружень зростає зі збільшенням кута падіння фронту повітряної ударної хвилі на їх внутрішню поверхню;

4. Таким чином, розроблена й успішно випробувана принципово нова маломасштабна (М 1: 5) ТВК потужністю 2,4 кг ВР у тротиловому еквіваленті, що відрізняється напівавтоматичним і дистанційним режимом завантаження-вивантаження заготовок.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ МІДНО-АЛЮМІНІЄВИХ ВУЗЛІВ ТА ПЕРЕХІДНИКІВ

5.1. Розробка технології виготовлення зварюванням вибухом з подальшим протяганням коаксіальних мідно-алюмінієвих струмопроводів для систем управління авіатехніки

Результати проведених досліджень стали основою для розробки технології виготовлення мідно-алюмінієвих струмопроводів для систем управління авіатехніки за допомогою зварювання вибухом мідно-алюмінієвих біметалевих матеріалів коаксіальної форми і подальшого протягання.

При розробці технологічних основ зварювання вибухом коаксіальних з'єднань особлива увага приділяється комплексному вирішенню всіх питань, від підготовки вихідних матеріалів до визначення параметрів вибухового навантаження і контролю якості, при цьому повинні бути вирішені такі завдання:

1. Забезпечення якості ЗВ шляхом розробки оптимальних геометричних параметрів заготовок і режимів навантаження.
2. Зниження собівартості виробу.
3. Забезпечення максимальної продуктивності процесу з урахуванням вимог безпеки під час виконання підривних робіт.

За технічним завданням ДП «Антонов» було розроблено технологічний процес отримання мідно-алюмінієвих струмопроводів з певними вимогами до їх конструкції, викладеними нижче.

Пруток повинен складатися з алюмінієвого сердечника, покритого суцільним шаром міді, що становить не більше 32% по масі, товщина мідного шару повинна бути $0,3 \text{ мм} \pm 0,02 \text{ мм}$.

Маса алюмомідного дроту має бути меншою маси аналогічного мідного дроту в 2,6 рази.

Прутки для дослідної та серійних партій повинні виготовлятися діаметром $8,0 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ та $8,8 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$.

Овальність перетину не повинна виводити розміри прутка за граничні відхилення по діаметру.

Пруток по всій довжині повинен мати гладеньку поверхню (шорсткість $R_a = 0,32$) без тріщин, задирок, порожнин, раковин, забоїн і сторонніх включень. Глибина поверхневих дефектів не повинна перевищувати граничних відхилень діаметру прутка.

На всій довжині прутка має бути міцне зчеплення алюмінію з мідним шаром.

Перевірку на міцність зчеплення алюмінію і міді для прутка здійснювали згідно з ДСТУ 1579-80 шляхом багаторазового (7 циклів) згинання на $+ 90^\circ$ до повного руйнування. У місці зламу не повинно бути відшарування мідного шару від алюмінієвого сердечника.

Тимчасовий опір розриву дроту повинен бути не менше 90 МПа, відносне подовження – не менше 25 %.

Питомий електричний опір відпаленого прутка постійному струму, перерахований на температуру 20°C , має бути не більше $0,0270 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$.

Виконання вищезазначених вимог досягається завдяки забезпеченню:

- оптимального проміжку між мідною трубою і алюмінієвим стрижнем уздовж довжини і діаметру;
- мінімальної деформації у процесі ЗВ;
- умов для максимально рівномірної детонації ВР за довжиною циліндричного зразка;
- умов для витікання газу з проміжку без утворення дефектів плакування;
- оптимізації геометричних параметрів заготовок, що дозволяють виробляти подальше протягання і отримати необхідний по товщині шар міді в кінцевому виробі.

- на межі з'єднання видна темна смуга, яка свідчить про відсутність з'єднання;

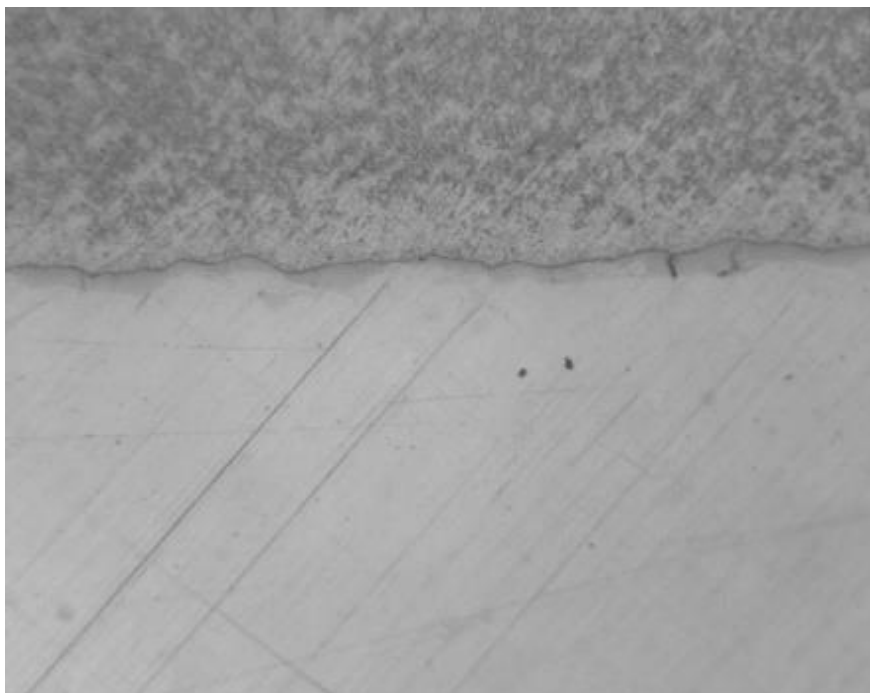


Рис. 5.1 Мікроструктура з'єднання, отримана на режимі обтиску без проміжку (x200)

Таким чином, наведені вище результати показують відсутність з'єднання труби зі стрижнем, яке досягається обтисненням без проміжку.

У [133] було показано, що ЗВ коаксіального мідно-алюмінієвого дроту дозволяє отримати заготовку без дефектів плакування довжиною до 180 мм у відсутності вакуумування, а з вакуумуванням зварювального проміжку – до 500 мм. Таким чином, вакуумування дозволить збільшити довжину зварювальних заготовок. Однак, в умовах масового виробництва використання вакуумування веде до ускладнення технології, а також до збільшення собівартості продукції. Тому було поставлене завдання розробки технології виробництва якісних біметалевих стрижнів без вакуумування зварювального проміжку.

Для вибору оптимального типорозміру вихідних заготовок алюмінієвого дроту і мідної трубки (рис 5.2) розроблено метод розрахункової оцінки їх геометричних параметрів [134].

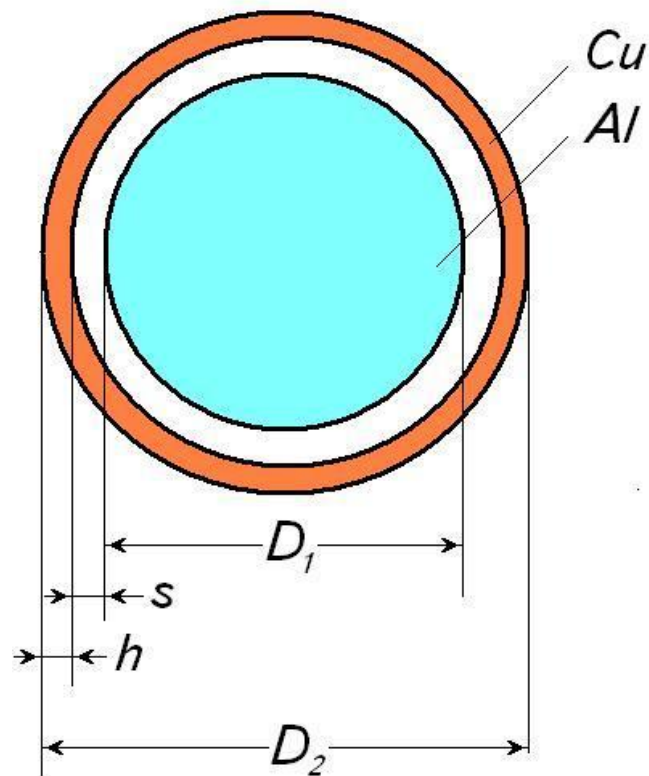


Рис. 5.2 Позначення, прийняті при виборі геометрії заготовок D_1 – діаметр алюмінієвого стержня; D_2 – зовнішній діаметр мідної труби; h – товщина стінки мідної труби, що купується для виготовлення мідних заготовок; s – проміжок між поверхнями, які сполучаються, що встановлюється перед обтисненням вибухом

При цьому передбачається, що зварювальний проміжок між міддю і алюмінієм дорівнює товщині стінки мідної трубки (що відповідає практичним режимам зварювання) і нехтуються розрахунковими величинами другого порядку меншості.

Діаметр прутка d , який повинен бути виготовлений, і допустима товщина шару міді в ньому h_m задані в технічних умовах. При виготовленні заготовок орієнтувалися на стандартну мідну трубу, що має стандартний типорозмір, який визначається її зовнішнім діаметром D_{Cu} і товщиною стінки h . Для підвищення продуктивності D_{Cu} повинен бути якомога більшим, при цьому може бути обмеженим можливостями волочильного обладнання. Виходячи з цих

міркувань обирали стандартний діаметр мідної труби і визначали розрахункову товщину стінки за виразом:

$$h_p = h_m \cdot D_{Cu} \cdot d^{-1} \quad (5.1)$$

Значення h визначається заокругленням h_p до стандартного. Товщина мідного шару у виробі оцінюється за виразом:

$$h_b = h \times d \times D_{Cu}^{-1} \quad (5.2)$$

і буде заздалегідь більша визначеної замовником. Варіюючи стандартним діаметром мідної труби, можна підібрати найбільш оптимальний її типорозмір з урахуванням вимог до величини h_b і продуктивності процесу виготовлення прутка. Діаметр алюмінієвого дроту D_{Al} розраховується наступним чином:

$$D_{Al} = D_{Cu} - 2h - 2s, \text{ де} \quad (5.3)$$

s — зварювальний проміжок.

Визначається коефіцієнт подовження при протягуванні K :

$$K = (D_{Cu}^2 - 4D \times h) \times d^{-2} \quad (5.4)$$

Довжина циліндричної частини заготовок L_3 визначається, виходячи із заданої замовником мінімальної довжини прута $L_{пр}$:

$$L_3 \geq L_{пр} \times K^{-1} + L_x, \quad (5.5)$$

де L_x — довжина заготовки на виготовлення проміжних хвостовиків і визначається технологією протягання.

У результаті проведених розрахунків по 5.1 – 5.5 були обрані оптимальні розміри вихідних заготовок: мідна трубка діаметром 28 мм із товщиною стінки 1 мм, алюмінієвий пруток (марки АД1) діаметром 24 мм.

Розробка режимів ЗВ і технологічної схеми складання (зборки) вихідних заготовок проводилася з урахуванням вимог до серійного цілорічного виробництва. Заготовки у зборці для ЗВ показані на рисунку 5.3, *а*. На рисунку 5.3, *б* показана схема зборки з контейнером для ВР, яка дозволяє у найкоротший термін проводити складання вихідних елементів.

Контроль проміжку між мідною трубкою і пластиковою оболонкою заряду здійснювали за допомогою штангенциркуля і спеціально виготовленого пристосування у вигляді 1/8 кільця з товщиною, яка дорівнювала висоті шару

ВР, зовнішній діаметр якого дорівнює внутрішньому діаметру пластикової труби.



а)



б)

Рис. 5.3 Схема складання заготовок під зварювання (а) та схема з контейнером для ВВ (б)

Оскільки розробка технології проводилася без застосування вакуумування зварювального проміжку, то з метою забезпечення якісного з'єднання довжина ЗВ заготовки була знижена до 300 мм. З урахуванням рекомендацій, наведених вище, було розроблено спеціальну форму алюмінієвої заготовки (рис. 5.4). Довжина ділянки, придатної для подальшого протягання, становила 160 мм. Запропонована форма алюмінієвої заготовки має ряд переваг, порівняно з циліндричною формою заготовки, а саме:

1. На відстані 160 мм від початку процесу зварювання передбачено поступове зменшення діаметра заготовки до 10 мм. Таким чином, для повітря, що знаходиться у проміжку, з'являється додатковий об'єм для витікання і, як наслідок, знижується температура ударно стисненого газу і час його впливу на зварювані поверхні, в результаті чого поліпшується якість отриманого з'єднання.

2. Хвостовик діаметром 10 мм вільно проходить через філь'єру і служить для обтиску в протяжному верстаті, що виключає трудомістку операцію обтиску хвостовика на пресі.

3. Конусна форма верху заготовки сприяє рівномірності розподілу (поширенню) фронту детонації у кільцевому заряді.

4. Нижня і верхня проточка для центрування під конусом дозволяють виконувати точну установку стрижня в мідну трубу з необхідним проміжком.

5. Нижній конус забезпечує поступовий перехід від більшого діаметра до меншого, що запобігає відриванню хвостовика при вибуховому навантаженні.

Поверхня отриманих біметалевих стрижнів (рис. 5.5 а) після зварювання не мала здуття, розривів і тріщин.

У результаті проведених раніше (див. Розділ 3) досліджень було обрано режим ЗВ зі швидкістю точки контакту $V_k = 2000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Мікроструктура на кінцевій ділянці (біля «верхнього конуса», рис. 5.5, в) зварної заготовки істотно відрізняється від мікроструктури в її інших ділянках (рис. 5.5, б). Це пов'язано з тим, що через наявність конуса на алюмінієвій заготовці, зварювальний проміжок розширюється і ударно-стиснений газ має можливість витікати. Як наслідок, зварювані поверхні менше розігріваються, в результаті чого істотно знижується кількість інтерметалідів.

Після виготовлення біметалевих заготовок ЗВ здійснювалася їх протягання на протяжному верстаті ОБ2216.

Протягання заготовок виконували за наступним маршрутом:

- протягання з $\varnothing 26$ мм до $\varnothing 16$ мм із кроком філь'єр 1 мм;
- протягання з $\varnothing 16$ мм до $\varnothing 9$ мм із кроком філь'єр 0,5 мм;
- протягання до $\varnothing 8,8$ мм (додаткова операція протягування через філь'єру $\varnothing 8,8$ мм).

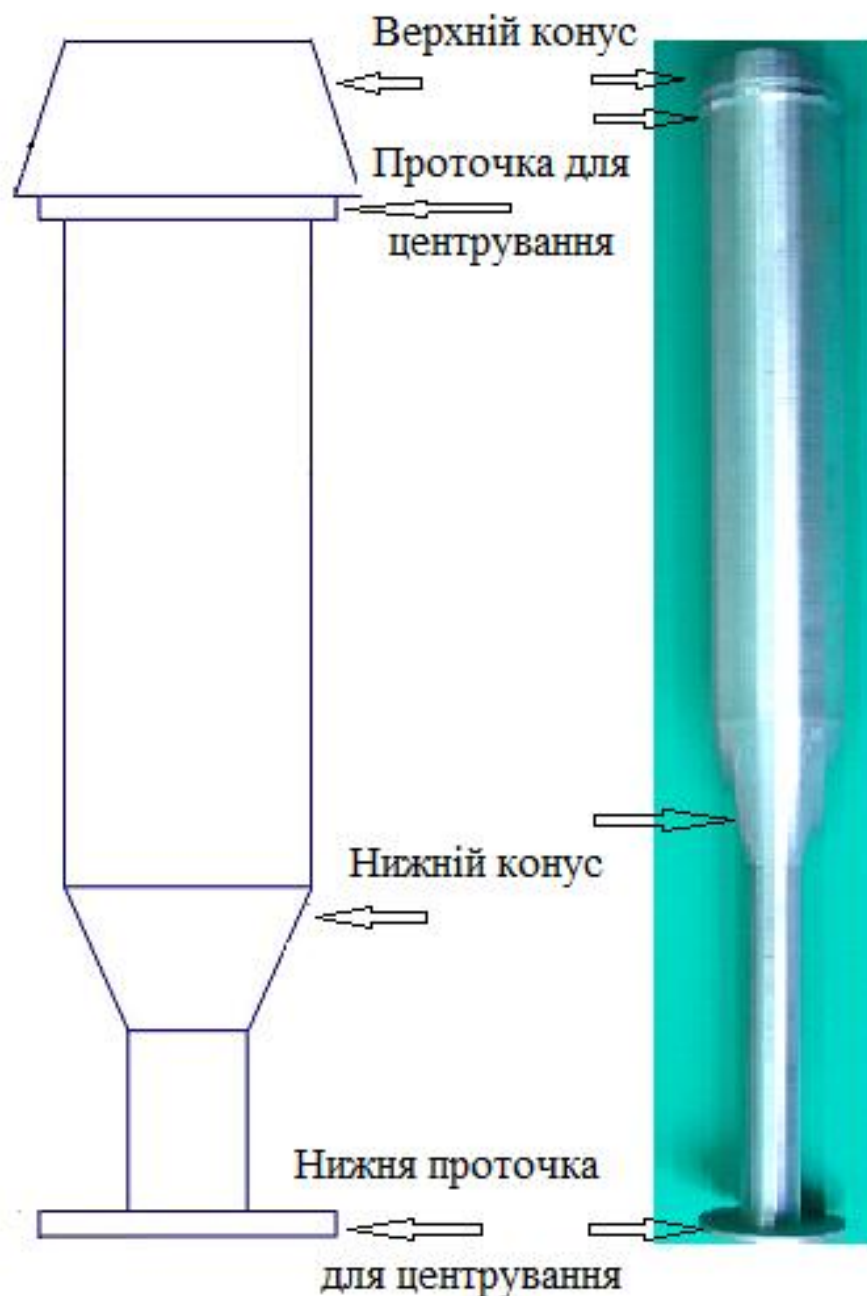


Рис. 5.4 Схема алюмінієвої заготовки спеціальної форми і заготовка після токарного оброблення

Протягання проводилося без попереднього і проміжного підігріву (холодне протягання). У результаті протягання відбувалося зміцнення (наклеп) металу.

Товщину мідного шару після протягання до $\varnothing 8,8$ мм вимірювали на мікросліф по перерізу, перпендикулярному напрямку протягання (рис. 5.6).

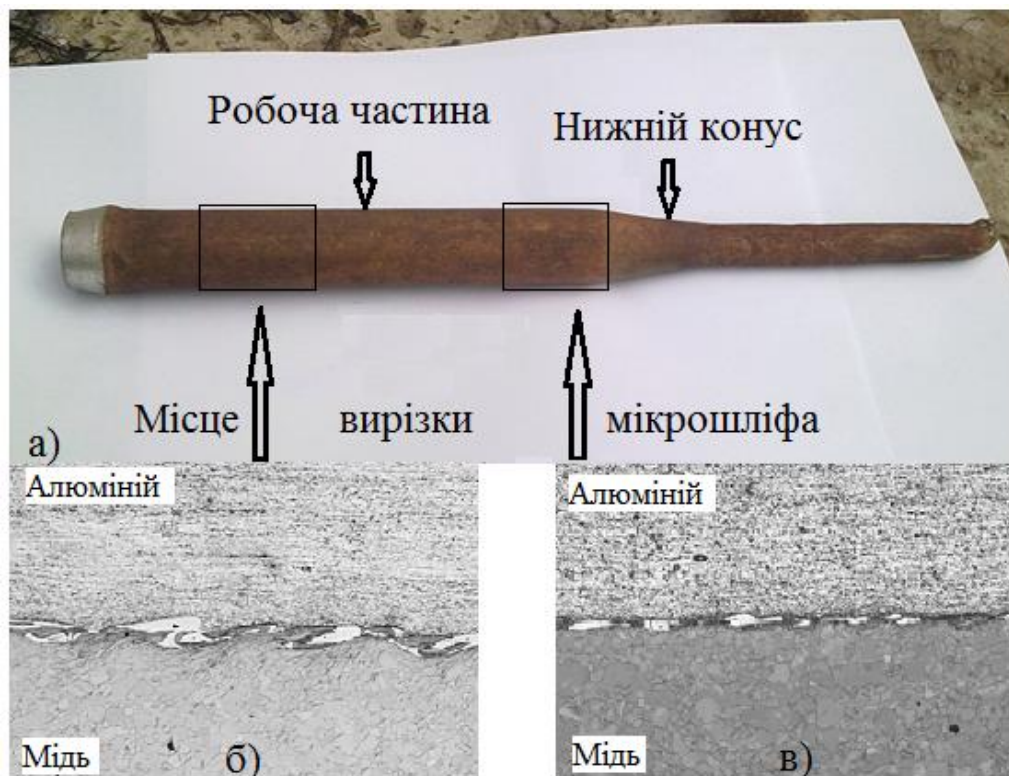


Рис. 5.5 Заготовка після ЗВ (а) і мікроструктура зони з'єднання в різних частинах заготовки (б, в) (x100)

Для забезпечення необхідних пластичних властивостей виготовлених за цією технологією мідно-алюмінієвих струмопроводів після протягання виконували термообробку при температурі 300°C і часу витримки 45 хв. Такий режим термообробки був обраний на підставі результатів досліджень, представлених в розділі 3 (режим ТОЗ), які показали, що саме такий режим нагрівання і витримки зразків дозволяє забезпечити хороше поєднання міцності і пластичних властивостей елементів, що з'єднуються. Механічні випробування струмопроводів підтвердили вдалий вибір режиму їх ТО. Зазначена ТО забезпечила необхідні механічні властивості виробу: тимчасовий опір розриву дроту 148,5 МПа (вимога не менше 90 МПа), відносне подовження не менше 27,5 % (вимога 25%).

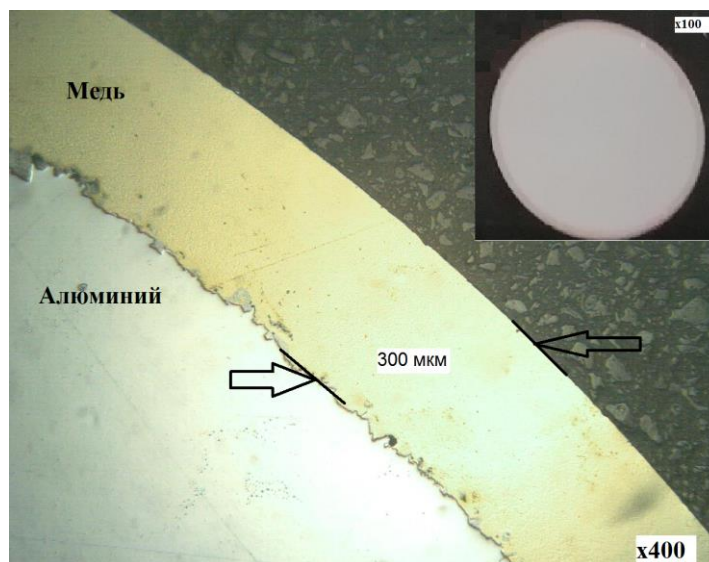


Рис. 5.6 Мікрошліф, виготовлений для вимірювання товщини мідного шару

Відповідно до технічних вимог коаксіальний біметалічний струмопровід не повинен мати розшарувань на лінії з'єднання міді з алюмінієм у місці зламу при випробуваннях на загин.

Випробування на загин (ДСТУ 1579-80) проводили на зразках в початковому стані рис. 5.7 (після протягання без ТО і після ТО за режимами таблиця 3.3).

Як показали результати випробувань (таблиця 5.1), зразки в початковому стані витримували 2 – 4 перегину (перегин – відхилення прутка в одну зі сторін на кут 90°), при цьому в місці зламу не відбувалося відшарування міді від алюмінію. Зразки після ТО за режимом №3 витримували 14 перегинів і відшарування міді від алюмінію також не відбувалося [135]. Зовнішній вигляд зламу після випробувань на перегин показаний на рисунку 5.8.

Таблиця 5.1

Результат випробувань на міцність зчеплення

Режим ТО	Без ТО	ТО1	ТО2	ТО3	ТО4	ТО5
Кількість перегинів	2-4	3-5	8-10	14	16	<18



Рис 5.7 Випробування на міцність зчеплення алюмінію і міді

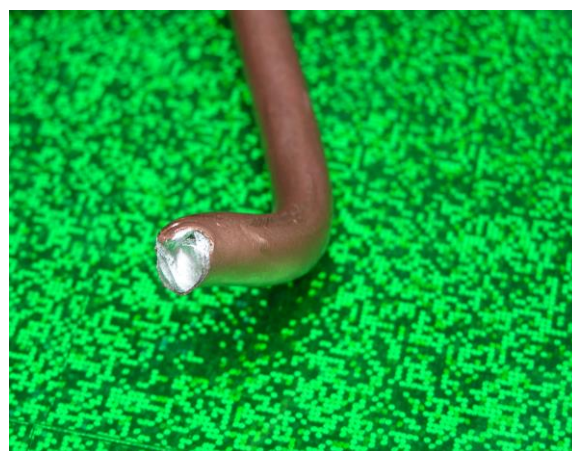
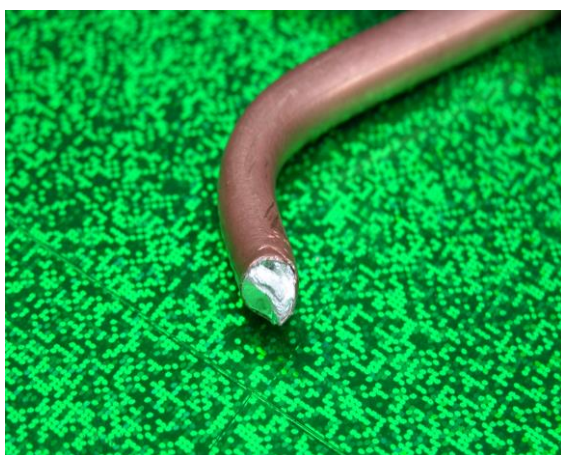


Рис. 5.8 Результат випробування на загин

Разом зі зниженням маси струмопроводів важливим фактором є збереження їх електропровідності. Висока провідність коаксіального біметалічного струмопроводу ґрунтується на явищі скін-ефекту. Щільність струму максимальна біля поверхні провідника.

Вимірювання проводили на відрізку біметалічного дроту довжиною 1000 мм і діаметром 8,8 мм. Питомий електричний опір розраховували за формулою 5.6:

$$\rho = R \frac{S}{L}, \text{ де} \quad (5.6)$$

ρ – питомий опір провідника, Ом \times м;

R – опір провідника, Ом;

S – поперечний переріз, мм²; для даного зразка $S = 60,8 \text{ мм}^2$.

L – відстань між електродами при вимірюванні, м.

Опір провідника розраховували за формулою 5.7:

$$R = \frac{U_{\text{п}}}{I} \quad , \text{ де} \quad (5.7)$$

$U_{\text{п}}$ – падіння напруги на вимірюваній ділянці, В;

I – струм, який протікає відрізком дроту.

При струмі в біметалічному пруті 60 А падіння напруги на одному метрі зразка становила $27,8 \cdot 10^{-3}$ В.

Питомий електричний опір дроту при температурі $26,5^{\circ}\text{C}$ склав $0,028 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2\cdot\text{м}^{-1}$, а приведений до температури 20°C буде становити $\rho = 0,027 \cdot 10 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2\cdot\text{м}^{-1}$.

На рисунку 5.9 показано зовнішній вигляд заготовок для виробництва дослідно-промислової партії мідно-алюмінієвих струмопроводів для електрообладнання авіатехніки.

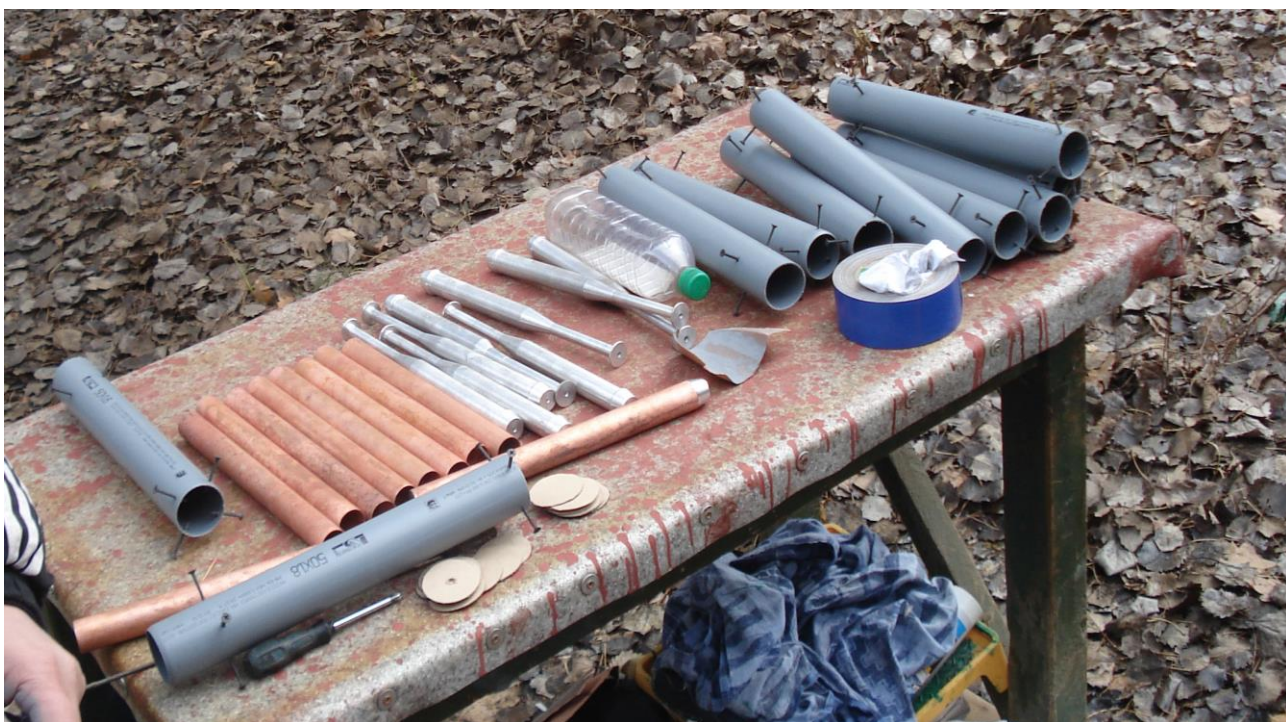


Рис. 5.9 Заготовки для виготовлення дослідно-промислової партії

На рисунку 5.10 показана дослідно-промислова партія біметалевих струмопроводів, готова до відвантаження на ДП «Антонов».

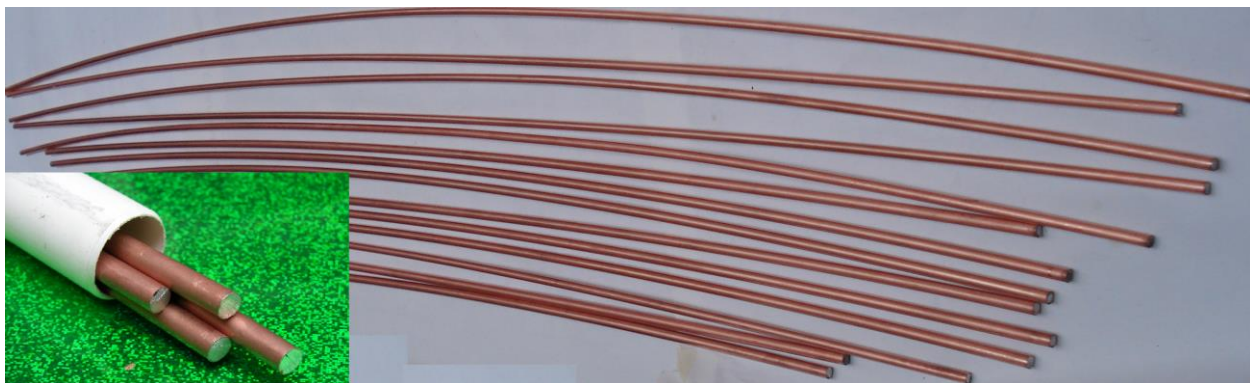


Рис. 5.10 Дослідно-промислова партія мідно-алюмінієвих струмопроводів

На основі результатів дослідження було розроблено і затверджено технічні умови «ТУ У 28.7-5416923-00 діє до: 2012 Прут алюмомідний електротехнічний, марки ПАМ», що визначають технічні вимоги до двошарових стрижнів, виготовленими ЗВ для промислового виробництва біметалевих струмопроводів (додаток 1).

5.2. Розробка комплексної технології виготовлення біметалевих мідно-алюмінієвих гільз для з'єднання багатожильних кабелів

У межах міжнародного контракту з компанією (Eltech, Республіка Корея) розроблено технологічний процес отримання біметалевих гільз за комбінованою технологією ЗВ і зварюванням тертям для з'єднання багатожильних кабелів. Гільза, конструкція якої представлена на рисунку 5.11 застосовується для з'єднання багатожильного мідного кабелю з алюмінієвим.

Для виготовлення гільз використовували технічно чистий алюміній марки АД1 і технічно чисту мідь марки М1 (див. Розділ 2).

Відповідно до технічного завдання досліджували дві технологічні схеми виготовлення біметалевих гільз (див. табл. 5.2).

Як вже було зазначено в розділі 1, схеми ЗВ циліндричних виробів поділяються на два основні види: з зовнішнім і внутрішнім плакуванням. Зовнішнє розташування заряду ВР на поверхні металу труби дозволяє здійснювати плакування стрижнів і труб. При плакуванні сам стрижень

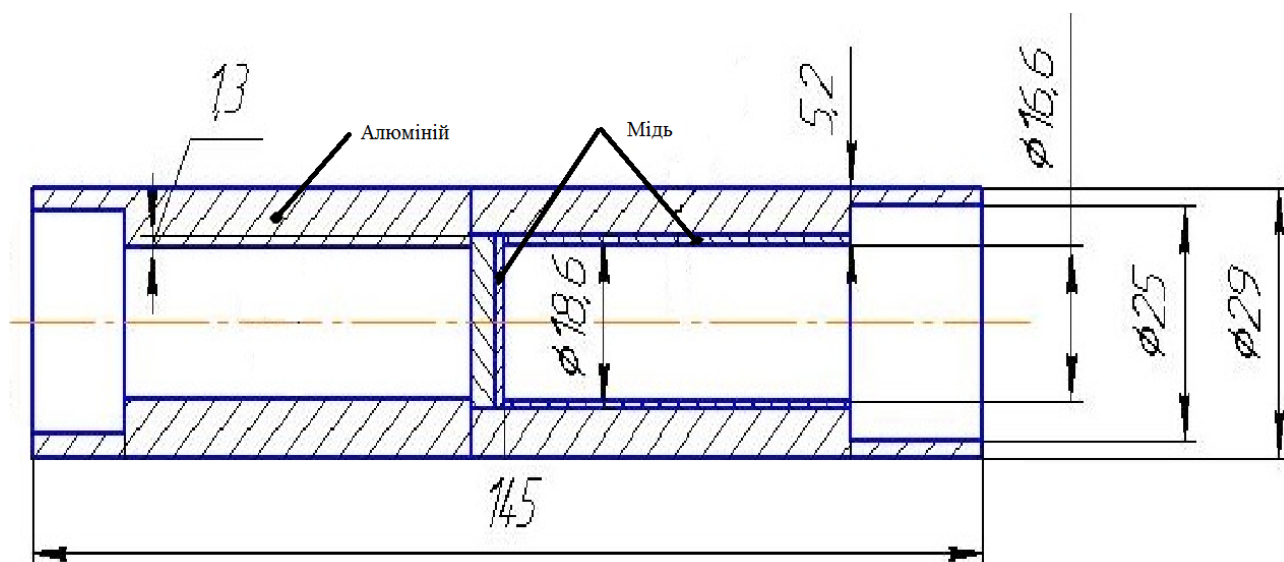


Рис. 5.11 Конструкція біметалічної гільзи

Таблиця 5.2

Принципові схеми отримання біметалевих муфт

Вариант А	Вариант Б
<p data-bbox="347 1099 564 1128">Зварювання тертям</p> <p data-bbox="635 1099 852 1128">Зварювання вибухом</p> 	<p data-bbox="946 1093 1163 1122">Зварювання тертям</p> <p data-bbox="1241 1093 1458 1122">Зварювання вибухом</p> 

виступає як опора і залишкові деформації у матеріалі при цьому мінімальні. При плакуванні зовнішнім зарядом трубної заготовки необхідно забезпечити цілісність заготовки, яка деформується під дією продуктів детонації і УХ [136]. У цьому випадку необхідним і важливим елементом зборки є опора, що розміщується всередині елемента, який плакується. В ролі опори може виступати будь-який наповнювач, при правильному виборі якого забезпечується мінімальна деформація виробу.

Головними вимогами до наповнювача, особливо при масовому виробництві, є довговічність, легкість вилучення його після зварювання і

мінімальні залишкові деформації виробу [23]. При цьому матеріал опорного наповнювача повинен мати акустичний опір, близький до такого для плакуючого елемента, що дозволить запобігти багатьох відбитків імпульсів стиснення на межі елемента й опорного наповнювача [137].

Відоме застосування металевго дробу в ролі опори для плакування криволінійних поверхонь лопаток турбін [23] і металевго дробу з рідиною для отримання двохшарових трубних заготовок з внутрішнім корозійним шаром з нержавіючої сталі 08X18H10T [138]. Заповнення простору між дробом рідиною дозволяє знизити тиск у зоні її контакту з виробом, оскільки вода нестислива і сприймає частину імпульсу від вибуху. Це знижує глибину відбитків дробу на внутрішній поверхні труби, яка виступає в ролі плакуючої.

Було проведено дослідження [139] впливу наповнювача з металевго дробу всередині сталевї труби на глибину відбитків на її стінках (рис. 5.12).

В результаті досліджень встановлено, що глибина відбитків у сталевї трубї досягає 0,65 мм, що є неприпустимим для контактних поверхонь.

З огляду на те, що мідь досить пластична, застосування наповнювача з металевго дробу для неї є не доцільним і не прийнятним.

Після проведення експериментальної роботи було визначено, що оптимальною схемою зовнішнього плакування для трубних заготовок із м'яких матеріалів є схема (рис. 5.13) з використанням сталевго стрижня, який вставляли з проміжком 1 мм в попередньо заповнену розплавленим сплавом Вуда мідну трубку.

Такий підхід дозволяє, по-перше, усунути проміжок між трубкою і стрижнем, а по-друге, дає можливість відносно легко витягти стрижень з оснащення після зварювання шляхом нагрівання зборки до температури $\sim 70^{\circ}\text{C}$.

Вигляд зборки з засипаною ВР наведено на рисунку 5.14.



Рис. 5.12 Зовнішній вигляд відбитків наповнювача з металевого дробу на внутрішній стінці сталеві труби



Рис. 5.13 Схема зборки для зварювання вибухом зі сталевим стрижнем залитим сплавом Вуда всередині мідної трубки



Рис. 5.14 Вигляд зборки для зварювання вибухом мідно-алюмінієвих біметалевих труб із засипаною вибуховою речовиною

На початковому етапі відпрацювання технології було виявлено, що після ЗВ на поверхні алюмінієвої заготовки виникають відбитки збою детонації (рис. 5.15). Такий дефект неприпустимий і може виникати внаслідок нерівномірності засипки ВР.



Рис. 5.15 Відбитки збою процесу детонації на поверхні алюмінієвої заготовки

Для вирішення цієї проблеми було розроблено спеціальну конструкцію корпусу заряду, що складається з набору кілець, на яких знизу і зверху робилися спеціальні проточки для їх щільної посадки одне на одне. Основні етапи формування зборки під зварювання показано на рисунку 5.16. Таким чином, засипку ВР можна робити послідовно в кожне кільце і забезпечувати рівномірність її ущільнення.

На рисунку 5.16, а показані зварювані заготовки: мідна трубка зі спеціальною вставкою, що забезпечує проміжок і рівномірність детонації заряду, алюмінієва труба і корпус заряду, зібраний з окремих кілець. Потім мідна трубка вставляється в алюмінієву (рис 5.16, б), після цього корпус заряду ВР збирається послідовно із засипанням ВР у кожне кільце (рис. 5.16, в). На рис 5.16, г показано вигляд зборки із засипаною ВР і встановленим електродетонатором у спеціальне центруюче кільце.

В ролі елемента, який метається використовувалася трубка з алюмінію АД1 товщиною стінки 6 мм, а в ролі основи – трубка з міді М1 19 мм х 1,5 мм. ЗВ здійснювалася на режимі $V_k = 2050 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Параметри процесу ЗВ міді з алюмінієм в обраному режимі є найбільш доцільними із позиції енергетичних витрат і, як наслідок, забезпечують зниження утворення інтерметалідних з'єднань. Проведені металографічні дослідження структури отриманого з'єднання (рис. 5.17) показали, що межа з'єднання має хвилеподібний характер і незначний (близько 20% площі з'єднання) вміст інтерметалідів. При цьому необхідно зазначити, що відсоток вмісту інтерметалідів у зоні з'єднання, отриманого при метанні алюмінію на мідь, істотно нижче, ніж при метанні міді на алюміній, що збігається з результатами [19].

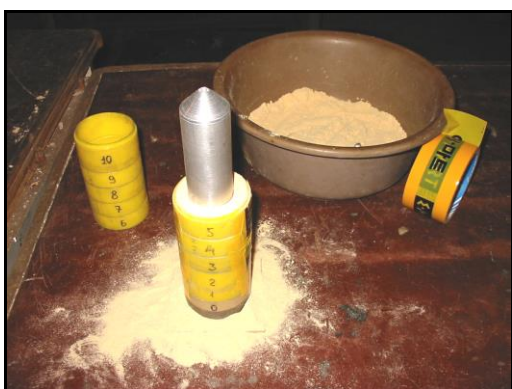
З використанням зазначеного режиму ЗВ була виготовлена дослідна партія трубчастих заготовок. Згодом вони оброблялися на токарному верстаті до необхідних розмірів, і, таким чином, отримували готові фрагменти виробу, зовнішній вигляд якого показано на рисунку 5.18.



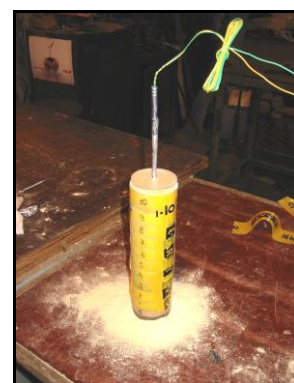
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.16 Основні етапи формування подовженого заряду вибухової речовини: а) – зовнішня і внутрішня заготовки і контейнер для ВР; б) – нижнє кільце контейнера для зборки готове до установки і засипки у нього ВР; в) – п'ять кілець контейнера для зборки встановлені і в них засипано ВР; г) – вигляд зборки із засипаною ВР і встановленим електродетонатором у спеціальне кільце для центрування

Для запобігання контакту мідних і алюмінієвих багатожильних проводів методом ЗВ виготовляли біметалічну вставку (рис 5.19, а), яка розміщувалася між біметалічною і алюмінієвою трубками перед їх з'єднанням зварюванням тертям.

З'єднання біметалічної та алюмінієвої заготовок виконували методом зварювання тертям (рис. 5.19, б) на установці для конвенційного зварювання тертям СТ-120.

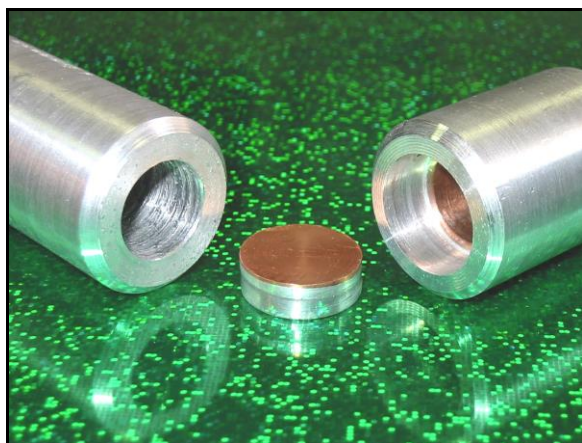
Особливістю зварювання тертям різнорідних металів і сплавів є асиметрія температурного і деформаційного полів. Причиною такої асиметрії є відмінність інтенсивності відводу тепла через різні теплофізичні характеристики зварювальних матеріалів і відмінності їх механічних властивостей.



Рис. 5.17 Мікроструктура отриманого з'єднання (x100, алюміній зверху)



Рис. 5.18 Біметалічні заготовки після зварювання вибухом і токарної обробки



а)



б)

Рис. 5.19 Алюмінієва і біметалічна трубчаста заготовки до (а) і після зварювання тертям (б)

Співвідношення товщини шарів міді й алюмінію у біметалічній вставці необхідно вибрати таким чином, щоб при подальшому зварюванні тертям запобігти її перегріванню і не допустити утворення крихкого інтерметалідного шару в зоні з'єднання ЗВ. З цією метою було проведено дослідження і встановлено, що температура вставки в зоні контакту з гратом (рис. 5.19, б) при зварюванні тертям становить $300^{\circ}\text{C}..350^{\circ}\text{C}$ протягом 2...4 с. Розміри біметалічної вставки було обрано такі: товщина міді 2 мм, алюмінію – 8 мм.

Зварювання тертям виконувалася не режимах, наведених у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Параметри зварювання тертям і якість отриманого з'єднання

Тиск, Р, МПа	Час зварювання, t, с	Кутова швидкість, рад•с ⁻¹	Якість
30 – 50	2,5 – 3,5	2,5 – 3,0	Не зварюється
50 – 70	1,5 – 2,5	2,0 – 2,5	Суцільне з'єднання
70 – 90	0,8 – 1,5	1,5 – 2,0	Перегрівання металу й висока деформація

Після відпрацювання режимів зварювання тертям було виготовлено макрошліф перерізу біметалічної трубки, звареної з алюмінієвою (рис. 5.20).

За двома технологічними схемами (табл. 5.2) було виготовлено біметалічні гільзи і для порівняння даних технологічних схем зроблено макрошліфи їх перерізів (рис. 5.21).

Проведений аналіз запропонованих технологічних схем виготовлення біметалевих гільз свідчить, що в гільзах, виготовлених за варіантом Б (таб. 5.1), не забезпечується щільний фізичний контакт між вставленими мідною та алюмінієвою пластинами, у проміжок між ними після зварювання тертям потрапляє алюмінієвий грат, що контактує з міддю, який неможливо видалити без руйнування отриманої заготовки. Внаслідок цього при протіканні електричного струму може утворитися гальванічне сполучення мідь-алюміній і розвиватися корозія. Тому для виготовлення дослідної партії була вибрана технологія виготовлення за варіантом А (табл. 5.2).



Рис. 5.20 Макрошліф біметалічної трубки, звареної зварюванням тертям з алюмінієвою трубкою

Для проведення досліджень механічних властивостей з'єднання, отриманого зварюванням вибухом, з виготовлених біметалевих мідно-алюмінієвих циліндрів були вирізані зразки у вигляді кільця.

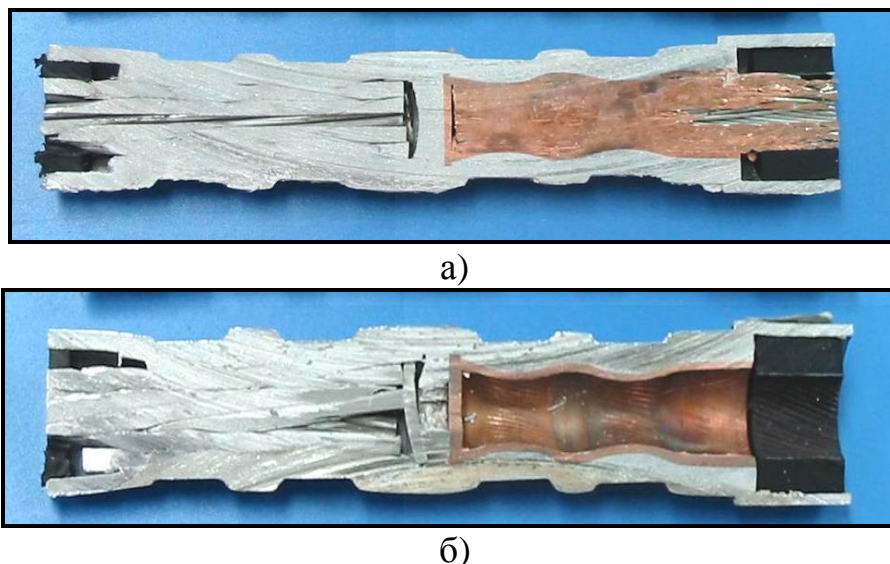


Рис. 5.21 Макрошліфи біметалевих гілз, виготовлених за комбінованою технологією зварювання вибухом + зварювання тертям: а) - біметалічна вставка і трубка, отримані методом зварювання вибухом і з'єднані з алюмінієвою трубкою зварюванням тертям; б) – вставка, виготовлена з двох окремих пластин, біметалічна трубка, отримана методом зварювання вибухом і з'єднана з алюмінієвою трубкою зварюванням тертям

Оцінка міцності зчеплення проводилася шляхом випробування на сплющення кільця, результати якого показали, що розшарування у зоні з'єднання не відбувалося (рис. 5.22). Це свідчить про якісне виконання зварювання.

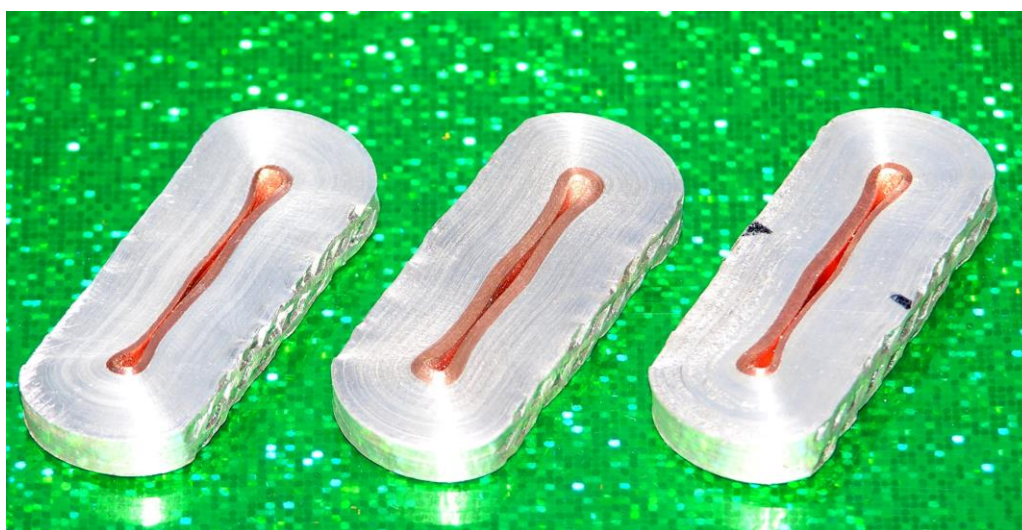


Рис. 5.22 Випробування на міцність зчеплення

Ще однією важливою вимогою, яка висувається до біметалічних гільз, є твердість зовнішньої поверхні алюмінію, оскільки необхідно проводити обтиснення механічним інструментом в місцях, показаних на рисунку 5.23, для закріплення багатожильного дроту, вставленого в гільзу.

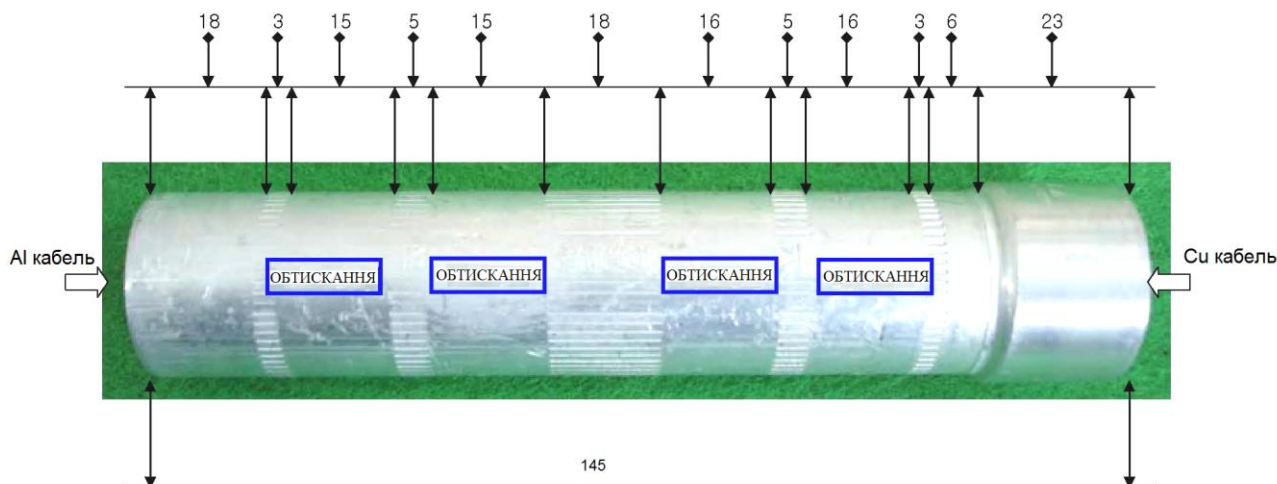


Рис. 5.23 Схема розташування місць обтиснення гільзи

Під дією вибуху поверхня металу зміцнюється, а поблизу зони з'єднання зварюванням тертям відбувається перегрівання алюмінію, що також призводить до зміни його механічних властивостей. З огляду на це було проведено дослідження твердості поверхні алюмінію поблизу зони зварювання тертям, результати якого представлено на рисунку 5.24.

Як видно з рисунку 5.24, на відстані ближче 1 мм від зони з'єднання мікротвердість поверхні досягає значення 500 МПа – 540 МПа, що майже удвічі більше, ніж твердість чистого алюмінію 250 МПа. Однак на відстані 2 мм і більше мікротвердість знижується до 350 МПа – 370 МПа, що відповідає вимогам «Замовника».

Виготовлені гільзи з обтиснутими в них багатожильними кабелями (рис. 5.25, а), випробовували (рис. 5.25, б) на розривній машині ЦД-4. В результаті випробувань встановлено, що руйнування сталося по алюмінієвому кабелю, що свідчить про задовільну міцність з'єднання, отриманого зварюванням тертям.

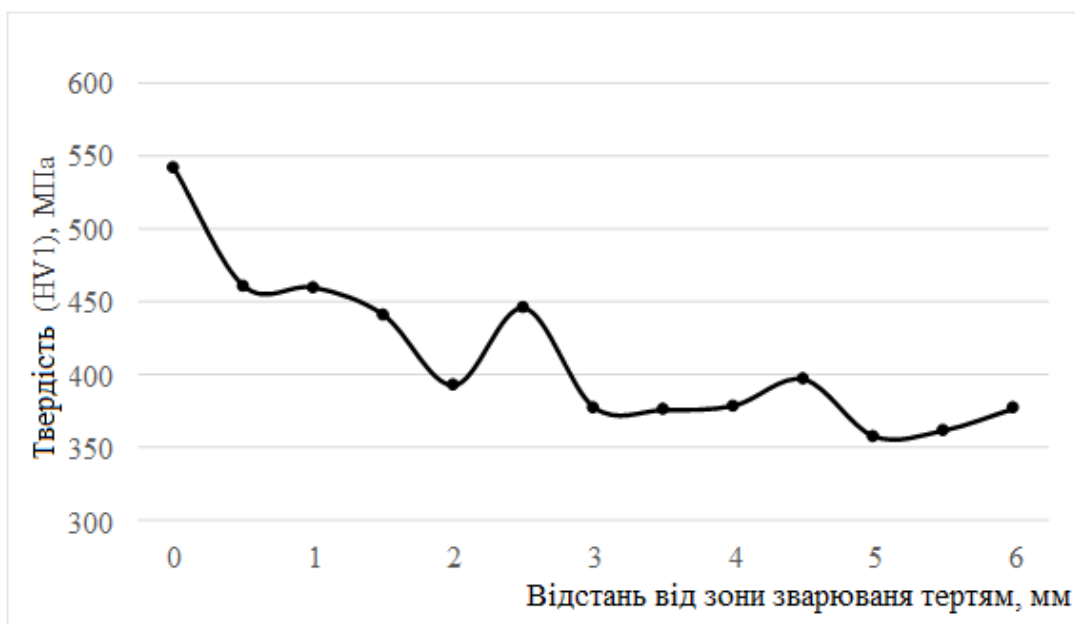


Рис. 5.24 Результати вимірювання мікротвердості алюмінієвої поверхні біметалічної гільзи



а)

б)

Рис. 5.25 Гільзи з обтиснутими в них багатожильними кабелями (а) зразок біметалічної гільзи на розривній машині (б)

На рисунку 5.26 наведено зовнішній вигляд дослідної партії біметалевих гільз для з'єднання гнучких багатожильних мідних і алюмінієвих кабелів, готової до відвантаження замовнику.



Рис. 5.26 Партія біметалевих гільз, готових до відвантаження замовнику

В енергосистемі Республіки Корея за допомогою отриманих за комбінованою технологією біметалевих гільз виконують з'єднання мідних і алюмінієвих багатожильних кабелів на електричних мережах (рис 5.27).

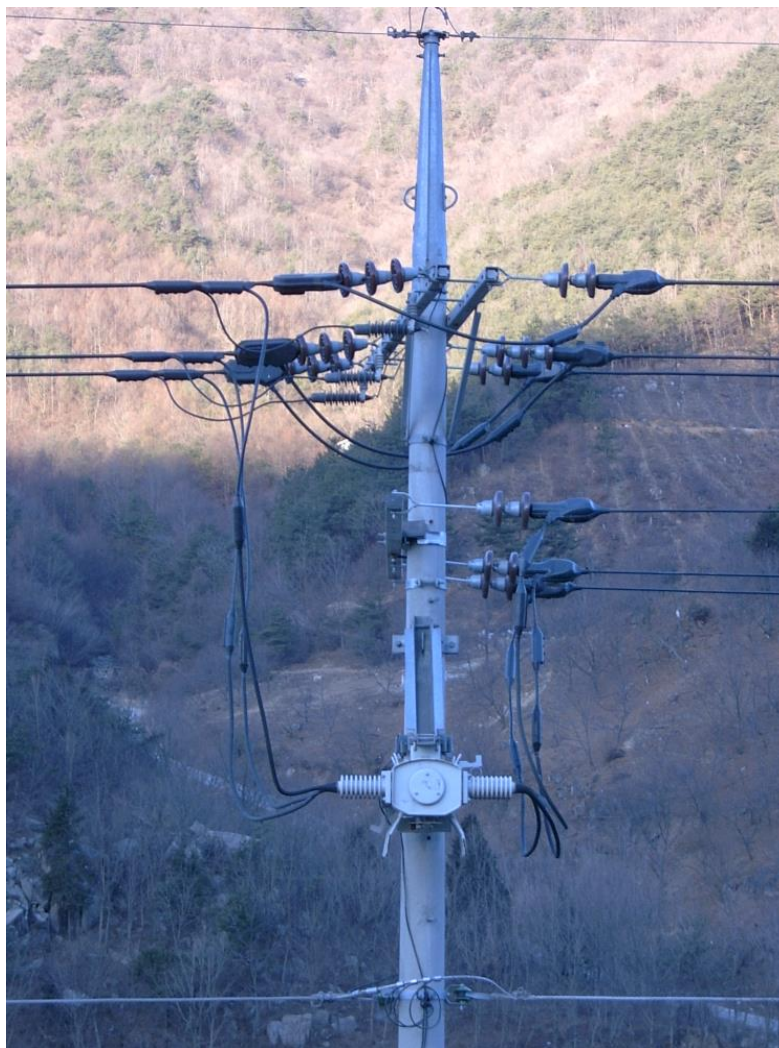


Рис. 5.27 Біметалічні гільзи, встановлені на електричних мережах

Таким чином, розроблена технологія для виробництва біметалічних гільз за комбінованою технологією має практичне застосування в електричних мережах.

Висновки до розділу 5

1. Показано, що після обтиснення вибухом мідної трубки і алюмінієвого стрижня без проміжку неможливо здійснити їх спільне якісне протягування, внаслідок відсутності з'єднання між ними. Отже, перед протягуванням повинне бути з'єднання.

2. Розроблено метод розрахункової оцінки оптимальних геометричних характеристик вихідних заготовок алюмінієвого дроту і мідної трубки з метою отримання після протягування заданої товщини плакуючого шару.

3. Розроблено оригінальну форму алюмінієвої заготовки, що забезпечує оптимальну температуру і час впливу ударно-стисненого газу на зварювані поверхні у зварювальному проміжку при одночасному формуванні хвостовика для затиснення у обладнанні для протягування.

4. Показано, що для отримання зварювання вибухом циліндричних виробів за «зворотною» схемою з мінімальним ступенем деформації, у ролі наповнювача необхідно використовувати сталевий стрижень, проміжок між яким і плакувальною трубою заповнювати сплавом Вуда, який виключає ум'ятини на внутрішній поверхні труби, відводить енергію ударних хвиль від зони з'єднання, знижує залишкову деформацію трубної заготовки.

5. Розроблено комбіновану технологію отримання біметалічних мідно-алюмінієвих муфт для з'єднання гнучких багатожильних мідних і алюмінієвих кабелів, що ґрунтується на поєднанні методів зварювання вибухом і тертям.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлено, що для отримання коаксіальних з'єднань з міді та алюмінію без дефектів плакувального шару довжиною більше 10 діаметрів заготовки необхідно здійснювати вакуумування зварювального проміжку.

2. Вперше введено термін «канального ефекту» для зварювання вибухом і експериментально вивчено механізм цього явища, що дозволило пояснити зниження якості зварного з'єднання із віддаленням від точки ініціювання детонації.

3. Встановлено, що при виборі режимів зварювання вибухом міді з алюмінієм за коаксіальною схемою, слід призначати параметри процесу, які б забезпечували мінімальний енергетичний внесок у зону з'єднання, обмежуючи швидкість точки контакту граничною величиною $2000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

4. За результатами досліджень визначено режими термічної обробки коаксіальних з'єднань міді та алюмінію після зварювання вибухом і протягування (сумарним обтиснення 90%), що забезпечують задані пластичні властивості коаксіальних мідно-алюмінієвих заготовок без утворення інтерметалідного прошарку. Показано, що для запобігання утворенню інтерметалідного прошарку ТО необхідно виконувати при температурі $300 \text{ }^\circ\text{C}$ і часу витримки 45 хв.

5. Розроблено розрахункову модель процесу детонації плоского заряду ВР у трубчастій вибуховій камері, показано, що основна дія УХ зосереджена у вертикальному напрямку. На основі даної моделі визначені напруження в елементах трубчастої вибухової камери.

6. Створена і випробувана вдосконалена камера, яка є масштабною моделлю трубчастої вибухової камери, розрахованої на 200 кг ТНТ у еквіваленті і яка відрізняється від вихідної конструкції пристосованістю до умов масового виробництва (вдосконалена вхідний пристрій, є обладнання для автоматизованого завантаження / розвантаження). Трубчаста вибухова камера

успішно пройшла випробування на вибух плоских зарядів вибухової речовини розрахункової маси (2,4 кг амоніту №6ЖВ).

7. За розробленою імпортозамінною технологічною схемою зварювання вибухом + холодне протягування було виготовлено дослідно-промислову партію мідно-алюмінієвих струмопроводів діаметром 8 мм і 8,8 мм із товщиною мідного плакувального шару 300 мкм для систем управління авіатехніки на замовлення ДП «Антонов». Розроблено і вперше затверджено технічні умови «ТУ У 28.7-5416923-001 «Пруток алюмомідний електротехнічний, марки ПАМ». На замовлення компанії «Eltech» (Республіка Корея) розроблено технологію «зварювання вибухом + зварювання тертям» біметалевих перехідників діаметром 29 мм для з'єднання мідних і алюмінієвих багатожильних кабелів.

Перелік використаної літератури

1. Чугунов Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей / Е.А. Чугунов, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак и др. // Энергетик. – 2001. – №9. – С. 13 – 15.
2. Липунцов В. Аппаратные зажимы для алюминиевых и сталеалюминевых проводов. Методы изготовления и типы маркировки / В. Липунцов // Новости электротехники. – 2004 – №5 (29).
3. Дзекцер Н.Н. Монтаж контактных соединений в электроустановках: справочник электромонтажника / Н.Н. Дзекцер, В.А. Кингель, Л.Г. Саргсян; под ред. А.Д. Смирнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 208 с.
4. Быков А.А. Этапы развития производства биметаллов / А. А. Быков // Metallurg. – 2009. – №8. – С. 70–75.
5. Чепурко М.И. Биметаллические материалы / М.И. Чепурко. – Л.: Судостроение, 1984. – 272 с.
6. Хансин М. Структуры двойных сплавов / М. Хансин , К. Андерго; под. ред. И.И. Новикова, пер. с англ. И.Л. Рольберга. – М.: Metallurgiya. – 1962. – Т. 1. – 608 с.
7. Рябов В.Р. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. – К.: Наук. думка, 1983. – 264 с.
8. Рабкин Д.М. Сварка алюминия с медью /Д.М. Рабкин, Н.М. Воропай //Автомат.сварка. – 965 . – №9. – С.42-46.
9. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.
10. Диффузионная сварка материалов: справочник / под ред. Н.Ф. Казакова. – М.: Машиностроение,1981. – 271 с.
11. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе /Э.С. Каракозов. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.

12. Стройман И.М. Холодная сварка металлов / И.М. Стройман. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 224 с.
13. Фокин Н.В. Особенности прессования биметаллических труб / Н.В. Фокин, Я.И. Космацкий //Актуальные направления научных исследований: от теории к практике: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Чебоксары, 2015. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 263-264.
14. Тодоров Р.П. Биметаллические контакты / Р.П. Тодоров, Л.Н. Кюнстлер, Г.И. Бакалов. – М.: Metallurgy, 1976. – 88 с.
15. Король В.К. Основы технологии производства многослойных металлов / В.К. Король, М.С. Гильдергорн. – М.: Metallurgy, 1970. – 237 с.
16. Исследование переходной зоны в соединениях меди с алюминием, выполненных магнито-импульсной сваркой / Ю.А. Сергеева, В.А. Чудаков, Г.Н. Гордань //Автомат. сварка. – 1989. – №12. – С.5-8,11.
17. Особенности механизма структурообразования в условиях магнито-импульсной сварки / Л.И. Маркашова, Ю.А. Сергеева, В.В. Стаценко, В.А. Чудаков //Автомат. сварка. – 1991. – №3. – С.21-26.
18. Дудин Л.А. Магнито-импульсная сварка металлов / Л.А. Дудин. – М.: Metallurgy, 1979. – 128 с.
19. Чувичилов В.А. Исследование и разработка технологии изготовления сваркой взрывом композитов электротехнического назначения с двусторонней симметричной плакировкой: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Волгоград, 2005. – 19с.
20. Кудинов В.М. Сварка взрывом в металлургии / В.М. Кудинов, А.Я. Коротеев. – М.: Metallurgy, 1978. – 166 с.
21. Лысак В.И. Сварка взрывом / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
22. Петушков В.Г. Применение взрыва в сварочной технике / В.Г. Петушков. – К.: Наук. думка, 2005. – 753 с.
23. Конон Ю.А. Сварка взрывом/ Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.

24. Crossland B. Explosive welding of metals and its application. – Belfast, Oxford, UK: Clarendon Press, 1982. – 233 p.
25. Deribas A. A. Classification of flows arising with oblique impacts of metal plates.in: 2nd Int. Symp. 'Use of explosive energy for producing metal materials with new properties //Marianskie Lazni, Czechoslovakia, Pardubice. – 1973.
26. Holtzman A.H., Cowan G.R. Bonding of metals with explosives // Welding Res. Coun. Bull. – 1965. – № 104, Apr.
27. Pat. 3137937 US. Explosive bonding / G.R. Cowan, J.J. Douglass, A.H. Holtzman. – Publ. 1964.
28. Pocalyko A. Explosively clad metals // Encyclopedia of Chemical Techn. – 1981. – № 15. – P. 275-296.
29. Banker J.G., Reineke E.G. Explosion welding // AsM Handbook. – 1993. – № 6. – P. 303-305.
30. Patterson A. Fundamentals of explosion welding // Ibid. – P. 160-164.
31. Simonov V. A. Comparison of the lower boundaries for the welding region for two composites based on steel : 9th Int. Conf. of HERF, Novosibirsk, 1986.
32. Кузьмин Е. В. Особенности формирования медно-алюминиевых соединений при сварке взрывом с воздействием ультразвука / Е. В. Кузьмин и др. // Изв. ВолгГТУ. – 2015. – №10. – С. 70-78.
33. Особенности пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом меди с алюминием / А.П. Пеев, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, Е.А.Чугунов // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – С. 71-76.
34. Добрушин Л. Д. Тепловые явления на волнообразной поверхности соединения при сварке взрывом / Л.Д. Добрушин, Ю. И. Фадеенко // Изв. ВолгГТУ. – 2006. – №9. – С. 23-24.
35. Гринберг Б. А. Процессы расплавления, вихреобразования и фрагментации при сварке взрывом / Б. А. Гринберг и др. // Сварка и Диагностика. – 2010. – №6. – С.34-38.

36. Кузьмин С. В. Особенности пластической деформации металла околошовной зоны при сварке взрывом разнородных металлов /С. В. Кузьмин и др. // Изв. ВолГТУ. – 2010. – № 4. – С. 4-11.

37. Бондарь М. П. О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом /М. П. Бондарь, В. М. Оголихин // Физика горения и взрыва. –1985. –Т.21, №2. – С. 147-157.

38. Бердыченко А. А. Процессы, происходящие во время образования сварного соединения при сварке взрывом / А. А. Бердыченко // Ползунов. вестн. – 2009. – №4. – С. 211-215.

39. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А.А.Дерибас. –Новосибирск.: Наука, 1980. – 222 с.

40. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом / И.Д. Захаренко. – Мн.: Наука и техника, 1990. – 205 с.

41. Дидык Р.П. Биметаллические трубы / Р.П. Дидык, М.И. Чепурко и др. – М.: Металлургия, 1974.

42. Баррингтон. Соединение труб взрывом. Патент США №3364561, 1966.

43. SUN Xian-jun, TAO Jie, GUO Xun-zhong. Bonding properties of interface in Fe/Al clad tube prepared by explosive welding// Nonferrous Met. Soc. China. –2011.– Vol.21, №10. – P. 2175–2180.

44. Mendes R., Ribeiro J.B., Loureiro A..Effect of explosive characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration//. MaterialsandDesign. –2013. –№51. – P. 182–192.

45. Деформация металлов взрывом / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев, Н.И. Шефтель, А.Г. Кобелев. – М.: Металлургия, 1975. – 416 с.

46. Мелихов В.П. О длине устойчивости сварки взрывом эксцентрично расположенных цилиндров / В.П.Мелихов // Сварка и резка взрывом / под ред. докт. техн. наук В.М. Кудинова. – К.: Изд. ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 1979. – С. 25-28.

47. Цемахович Б.Д. Перспективы сварки взрывом в атомном машиностроении Б.Д. Цемахович // VII Всесоюз. совещ. по сварке и резке взрывом, г. Киев, 29-30 сент. 1987 г.: сб. тез. докл. – К.: ИЭС им. Е. О. Патона, 1987. – С. 60-66.

48. Ковалевский В.Н. Плакирование толстостенных труб энергией взрыва / В.Н.Ковалевский, Ю.Г.Алексеев, Е.В. Сагарда // Применение энергии взрыва в сварочной технике / под ред. В.М. Кудинова. – К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1985. – С. 103-108.

49. К вопросу о теории процесса сварки труб взрывом / В.Н. Ковалевский, Ю.Г. Алексеев, Г.М. Сенченко и др. // Сварка и родственные технологии: Республ. межвед. сб. – Мн, 2001. – № 4. – С. 37-39.

50. Тарасенко Н.Н. Исследование движения стенки трубы под действием продуктов детонации внутреннего заряда ВВ / Н.Н. Тарасенко // Физика горения и взрыва. – 1974. – № 5. – С. 737-746.

51. Цемахович Б.Д. Некоторые результаты плакирования взрывом внутренних цилиндрических поверхностей / Б.Д. Цемахович, С.Г.Цыбочкин, Е.Б. Первухин // V Всесоюз. совещ. «Сварка и резка взрывом», г. Киев, 22-24 нояб. 1977 г.: сб. тез докл. – К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1977. – С. 20-24.

52. Расчет параметров сварки взрывом при метании цилиндрической оболочки / Э.С. Атрощенко, А.Е. Розен, И.С. Лось и др. // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.И. Лысака. – Волгоград: ВолгГТУ, 2000. – С. 24-30.

53. Малахов А.Ю. Плакирование взрывом длинномерных цилиндрических изделий функциональными покрытиями: автореф. дисс. ... канд. техн. Наук / А.Ю. Малахов. – Черногоровка, 2019.

54. Дидык Р.П. Приближенный расчет осесимметричных движений стенки трубы при деформации взрывом / Р.П. Дидык, С.С.Красновский, А.Г.Тесленко // Физика горения и взрыва. –1968. – №2. – С. 260-265.

55. Чепурко М.И. Биметаллические материалы / М.И. Чепурко. – Л.: Судостроение, 1984. – 272 с.

56. Бердыченко А. А. Исследование возможности самоочищения поверхностей при сварке взрывом в результате действия температурных напряжений / А. А. Бердыченко, М. Х. Флат // Ползунов. альманах. – 2010. – №10. – С. 210-214.

57. Исследование возможности самоочищения поверхностей при сварке взрывом в результате действия температурных напряжений / А. А. Бердыченко, М. Х. Флат // Ползунов. альманах. – 2010. – №10. – С. 210-214.

58. Ишуткин С.Н. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин / С. Н. Ишуткин, В. И. Кирко, В. А. Симонов // Физика горения и взрыва. – 1980. – № 6. – С. 69-73.

59. Бердыченко А. А. О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц при сварке титана взрывом / А. А. Бердыченко и др. // Физика горения и взрыва – 2003. – № 2. – С. 128–136.

60. Первухин Л.Б. К вопросу о предельных размерах листов, получаемых сваркой взрывом / Л.Б. Первухин и др. // Изв. ВолгГТУ. – 2016. – № 10. – С. 76–86.

61. Первухин Л.Б. Теоретические и технологические основы промышленного производства биметаллов / Л.Б. Первухин, О.Л.Первухина, С.Ю.Бондаренко // Изв. ВолГТУ. – 2010. – № 4. – С.75.

62. Бажин И.И. Опыт проектирования вакуумных камер установок цехового типа / И.И. Бажин, Н.Г. Стукалов, Ю.И. Чебанов // Импульсная обработка давлением. – 1970. – Вып. I. – С. 84-87.

63. Демчук А.Ф. Металлические взрывные камеры / А.Ф. Демчук, В.П. Исаков. – Красноярск: РИО КрасГУ, 2006. – 297 с.

64. Шленский П.С. Камеры для сварки металлов взрывом : обзор / П.С.Шленский, Л.Д. Добрушин, Ю.И. Фадеенко, С.Д. Венцев // Автомат. Сварка. – 2011. – № 5 – С. 57 – 61.

65. Гаек Ю.В., Бобошко Н.М. // Материалы III Всесоюз. совещ. по сварке и резке металлов взрывом. – Волгоград, 1969.

66. Никано Минору и др. Сварка взрывом титана со сталью. Патент (Япония), №24982, 1965.
67. Рольстан, Кант. Сварка взрывом ударной волной. Патент, США, в.3, №403875, 1968.
68. Buijs N.W. Explosive welding of metals in a vacuum environment. *StainlessSteel World*, 2010, March, p. 1-4.
69. Оцуки Мисао и др. Способ изготовления металлических труб взрывом. Патент. Япония №2354, 1965.
70. Ригельмаер, Рот, Рихтор. Способ плакирования металлических поверхностей. Патент ФРГ в СССР, №271437, 1968.
71. Первухина О.Л. Особенности сварки взрывом стали с титаном в защитной атмосфере / О.Л.Первухина и др. // *Автомат. сварка.* – 2009. – №11. – С.23-26.
72. Лысак В.И. Новые биметаллические переходные элементы для силовых электрических цепей / В.И. Лысак, С.В.Кузьмин, Е.А.Чугунов, Ю.Г. Долгий и др. // *Энергетик.* – М.: Изд. НТА Энергопресс, 1995. – №4. – С.23-24.
73. Беляев В.И. Прокатка биметаллов, полученных сваркой взрывом / В.И. Беляев, С.В.Воронов, Д.Г. Девойно, А.В. Степаненко // II совещание по обработке материалов взрывом: сб. научн. тр. – Новосибирск: Изд-во ИГ СО АН СССР, 1981. – С.48-50.
74. Титлянов А.Е. Влияние прокатки на износостойкость медно-алюминиевого диффузионного слоя / А.Е. Титлянов, А.Г. Радюк, С.М.Печурин // *Изв.вузов. Чёрн. металлургия.* – 1998. – №11. – С.76-77.
75. Трыков Ю.П. Структура и теплофизические свойства слоистых интерметаллидных композитов / Ю.П. Трыков, А.П. Ярошенко, Д.В. Проничев и др. // *Свароч. производство.* – 1997. – №7. – С.7-9.
76. Трыков Ю. П. Микромеханические свойства и тонкая структура медно-алюминиевой композиции, полученной по комплексной технологии / Ю. П. Трыков, В. Г.Шморгун, В. Н.Арисова, О. В. Слаутин // *Перспект. Материалы.* – 2002. – №6. – С. 81-85.

77. Трыков Ю.П., Шморгун В. Г., Слаутин О. В. Кинетика роста диффузионных прослоек в биметалле медь-алюминий, полученном по комплексной технологии // Перспективные материалы, 2003. - № 3. С. 83-88.

78. Лайнер Д.И., Куракин А.М. О реакционной диффузии при получении биметалла медь-алюминий // Цветн. металлы. – 1964. – №10. – С. 63.

79. Воропай Н.М. Влияние нагрева на диффузионные процессы и свойства биметаллических соединений алюминия с медью Н.М. Воропай, А.Я.Шиняев // Металловедение и терм. обработка металлов. – 1967. – №12. – С.55–57.

80. Чарухин К.Б. Биметаллические соединения/ К.Б.Чарухин ,С.Л. Голованенко, В.А.Мастеров, Н.Ф.Казаков. – М.: Металлургия, 1970. – 280 с.

81. Слизберг С.К. и др. // Автомат. сварка. – 1962. – №9. – С.52–53.

82. Рабкин Д.М. Закономерности роста прослоек в свариваемом биметалле медь-алюминий / Д.М. Рабкин, А.В.Лозовская, В.Р. Рябов // Автомат. сварка. – 1969. – №2. – С.19-23.

83. Лариков Л.Н. Диффузионные процессы в твёрдой фазе при сварке / Л.Н. Лариков , В.Р.Рябов, В.М. Фальченко. – М.: Машиностроение, 1975. – 192 с.

84. Отчёт по теме 0153-82-17/9-06-130 «Исследование работоспособности полученных сваркой взрывом биметаллов АДО+МЗР, 09Г2С+ВТ 1-0 с выдачей рекомендаций по термообработке и интервалам рабочих температур в химоборудовании, а также изучению влияния остаточных напряжений и сварки на коррозионную стойкость и малоцикловую усталость углеродистых сталей, плакированных нержавеющей сталью и медью». – Северодонецк, 1983. – 171 с.

85. Локшин Ф.Л. Фазовый состав пограничного слоя биметалла медь-алюминий / Ф.Л. Локшин, Ф.Г. Гольдер, Р.М. Сизова // Металловедение и терм. обработка металлов. – 1967. – №11 . – С.72.

86. Гуляев Б.Б. Физико-химические основы синтеза сплавов / Б.Б. Гуляев. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1980. – 192 с.

87. Гуляев А.П. Металловедение: учеб. для вузов / А.П.Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
88. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов: справочник / А.В. Бобылев. – М.: Металлургия, 1980. – 296 с.
89. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов / С.М. Гуревич. – К.: Наук. Думка, 1981. – 605 с.
90. Лахтин Ю.М. Материаловедение: учеб. для высш. техн. учеб. завед. / Ю.М.Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1990. -528 с
91. Физика взрыва / под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
92. Дубнов Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревич, А.И. Романов. –3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
93. Бабков А.Д. Комплексное исследование основных характеристик смесей аммонита № 6ЖВ с кварцевым песком применительно к сварке взрывом / А.Д.Бабков, Ю.П.Бесшапошников, В.Е. Кожевников // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. тр. – ВолгПИ, Волгоград, 1991 . – С 92-99.
94. Шведов К.К. О параметрах детонации промышленных ВВ и их сравнительной оценке / К.К. Шведов, А.Н. Дремин // Взрывное дело: сб. №76/33. – М.: Недра, 1976. – С.137-150.
95. Потапов И.Н. Слоистые металлические композиции / И.Н. Потапов, В.Н.Лебедев, А.Г.Кобелев. – М.: Металлургия, 1986. – 216 с.
96. Фетисов Г. П. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учеб. для студ. машиностроител. спец. вузов / Г.П.Фетисов и др. / под ред. Г.П. Фетисова. –3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 638с.
97. Новиков В.Ф. О связи между микротвердостью и пределом текучести / В.Ф. Новиков // Изв. вузов. Черн. металлургия. – 1969. – № 7. – С. 137.

98. Лисицин В.Д. О связи между макро- и микротвердостью металлов / В.Д. Лисицин // Заводская лаборатория. – 1985. – №4. – С. 467 – 470.
99. Гудков А.А. Методы измерения твердости металлов и сплавов / А.А. Гудков, Ю.И. Славский. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
100. Металловедение и термическая обработка стали. Методы испытаний и исследования: справочник / под ред. М. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
101. ГОСТ 9450 – 76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 9 с.
102. Трыков Ю.П. Свойства и работоспособность слоистых композитов: монография / Ю.П. Трыков, В.Г. Шморгун; ВолгГТУ. – Волгоград, 1999. – 190 с.
103. Архангельский А.В. Исследование неравномерности послойных деформаций при плакировании биметаллов / А.В. Архангельский, А.Г. Кобелев, А.М. Байдуганов // Изв. вузов. Черн. металлургия. – 1985. – №9. – С. 159-160.
104. Голованенко А.С. Сварка прокаткой биметаллов / А.С. Голованенко. – М.: Металлургия, 1977. – 158 с.
105. Семенов А.П. Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании / А.П. Семенов. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 120 с.
106. Трыков Ю. П. Свойства слоистых интерметаллидных композитов системы CuAl, полученных по комплексной технологии / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, О.В. Слаутин, С.А. Абраменко // Изв. вуз. Цветная металлургия. – 2004. – №5. С. – 51 – 55.
107. Пашин М.О. Особливості формування структури коаксіальних з'єднань міді та алюмінію при зварюванні вибухом з вакуумуванням зварювального проміжку / М.О. Пашин, П.С. Шльонський, А.Г. Бризгалін, О.С. Кушнарєва та Н.Л. Тодорович // Автомат. зварювання. – 2021. – №2. С – 3 – 9.

108. Кривенцов А. Н. Об оценке величин деформаций в приконтактных зонах, сваренных взрывом соединений металлографическим методом / А. Н., Кривенцов, А. В. Лазарев, Ю. П. Трыков, А. И. Улитин // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. тр. ; ВолгПИ. – Волгоград, 1975. – С. 55-61.
109. Bryzgalin A. G., Shlonskii P. S., Ventsev S. D. , Pekar E. D. and Problems of explosion welding of long-length coaxial Cu+Al rods with a thin cladding layer. Int. conf. «Explosive Production of New Materials». – Saint-Petersburg, Russia 14-18 May 2018. – P.38.
110. Трыков Ю.П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов / Ю.П. Трыков, Л.М. Гуревич, В.Г. Шморгун. – М.: Metallurgizdat, 2004. – 230 с.
111. Добрушин Л.Д. Канальный эффект при сварке взрывом / Л.Д. Добрушин, Ю.И.Фадеев, С.Ю.Илларионов, П.С. Шлэнский // Автомат. сварка. – 2009. – № 11. – С. 19-21.
112. Дубнов А.В. О механизме канального эффекта при детонации конденсированного ВВ / А.В. Дубнов, Л.Д. Хотина // Физика горения и взрыва. – 1966. – №4. – С. 97-104.
113. Channel effect in parallel-scheme explosive welding of long-length parts / Yu. I. Fedeenko, S. Yu. Illarionov, L. D. Dobrushin, P. S. Shlensky // Shock-assisted and modification of materials / Ed. A. A. Deribas, Yu. B. Scheck. Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2006. – P. 45.
114. Тришин Ю. А. Физика кумулятивных процессов / Ю.А. Тришин. – Новосибирск: Изд. Ин-та гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2005. – 324 с.
115. Дерibas А. А. О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин / А. А. Дерibas, И.Д. Захаренко // Физика горения и взрыва. – 1974. – 10, №3. – С. 409-423.

116. Трыков Ю.П. Деформация слоистых композитов: монография / Ю.П. Трыков, В.Г. Шморгун, Л.М. Гуревич; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2001. – 242 с.

117. Шленский П.С. Численное моделирование разлета продуктов детонации и распространения воздушных ударных волн при взрыве плоского заряда конечных размеров / П.С.Шленский, Ю.М. Сидоренко // Вісн. НТУУ «КПІ». Сер. Машинобудування. – 2011. – №62. – С. 223 – 232.

118. Dobratz V.M. and Crawford P.C. LLNL Explosive Handbook/ Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulation/ Livermore, 1985. – 541 p.

119. Физика взрыва: в 2 т. / С.Г. Андреев, Ю.А. Бабкин, Ф.А. Баум и др. ; под ред. Орленко Л.П. – Изд. 3-е, перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – Т.1. – 832 с.

120. LS-DYNA 971. Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC), 2007. – Volume 1. – 2206p.

121. John O. Hallquist. LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation. March 2006. – 680p.

122. Сидоренко Ю.М. Чисельне моделювання розльоту продуктів детонації і розповсюдження повітряних ударних хвиль при вибуху плоского заряду кінцевих розмірів / Ю.М. Сидоренко, П.С. Шленский // Прогресивна техніка і технологія: тез. доповід. XII Міжнар. наук.-техн. конф. Київ – Севастополь, Україна, 20-24 червня, 2011 р. – С. 27.

123. Одинцов В.А. Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации / В.А.Одинцов, Ю.М. Сидоренко // Оборон. техника. – 2001. – № 1-2. – С. 17-20.

124. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: навч. посіб. / К.М.Рудаков. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 379 с.

125. Бабкин. А.В. Численные методы в задачах физики взрыва и удара / А.В.Бабкин, В.И.Колпаков , В.Н. Охтинин и др.; под ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – Т. 3. – 516 с.

126. Сидоренко Ю.М. Напряжено-деформированное состояние элементов трубчатой взрывной камеры / Ю.М.Сидоренко, П.С. Шлэнский // International Conference Shock waves in condensed matter, Kyiv, Ukraine, 16-21 September 2012 p. С 413-417.

127. Колпаков В.И. Математическое моделирование функционированиякумулятивных зарядов / В.И. Колпаков, С.В.Ладов, А.А. Рубцов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 38 с.

128. Сидоренко Ю.М. К оценке напряженно-деформированного состояния силовых элементов конструкции трубчатой взрывной камеры / Ю.М. Сидоренко, П.С. Шленский // Пробл. Прочности. – 2013. – №2 – С. 121 – 134.

129. Отчет о научно-исследовательской работе по теме № 44-78 “Исследование динамической прочности бронеканеры трубчатого типа при взрывном нагружении”. Рук. темы А.В. Колодяжный. – Х.: Ин-т пробл. машиностроения, 1978.

130. Dobrushin L. D., Shlensky P.S., Fadeenko Yu. I. Deformation modes in tubular explosion chambers// Int. conf. «Explosive Production of New Materials», Bechichi, Montenegro June 7–11, 2010. – P.20.

131. Шленский П.С., Добрушин Л.Д., Ярещенко В.Г., Черномыз Н.Д., Попов М.П. «Динамика напряженно-деформированного состояния трубчатой взрывной камеры» Материалы VI Международной научно-технической конференции «Строительные конструкции спортивных и пространственных сооружений» Киев 06-10. 09. 2010. С. 176 – 177.

132. Патент №100280 «Камера для обработки металів вибухом» / Патон Б.Є, Шимановський В.А., Добрушин Л.Д., Буштедт Ю. П. Шленский П.С. и др.

133. Шлэнский П.С., Пекарь Е.Д., Брызгалин А.Г., Венцев С.Д. «Особенности применения вакуума при сварке взрывом коаксиального медно-алюминиевого прутка» Известия ВолгГТУ, серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений», № 6, 2017. – С. 62-67.

134. Брызгалин А.Г., Добрушин Л.Д., Шлёнский П.С. и др. «Изготовление коаксиальных медно-алюминиевых прутков с помощью сварки взрывом и протяжки» Авт. сварка, 2015, №3-4 – С. 72-76.

135. L.D. Dobrushin, A. G. Bryzgalin, P. S. Shlonskii, I.G. Lavrenko, I.M. Romashko, and H. D. Groeneveld Combined explosive cladding/drawing technology for production of coaxial Cu-Al electric conductors for aerospace application. Int. conf. «Explosive Production of New Materials». – Strasbourg, France, May 2–5, 2012. P.35.

136. Оголихин, В.М. Сварка взрывом в электрометаллургии/ В.М. Оголихин, И.В. Яковлев; отв. Ред. Б.Д. Аннин. – Рос. Акад. Наук, Сиб. Отд-ние, Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 160 с.

137. Качан, М.С. Способы устранения разрушающего воздействия ударных волн при сварке взрывом цилиндрических деталей/ М.С. Качан, Ю.В. Киселев, Ю.А. Тришин. Кн: Тезисы докладов всесоюзного совещания по сварке и резке взрывом. – Киев, 1973, С. 17-18.

138. Малахов, А.Ю. Особенности сварки взрывом труб по «обратной схеме» / А.Ю. Малахов, И.В. Сайков, Л.Б. Первухин // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – № 3. – С. 1139-1141.

139. Шльонський П.С., «Зварювання вибухом мідно-алюмінієвих труб за зворотною схемою», Автоматичне зварювання, 2020, № 8 – С. 51-53.

ДОДАТКИ

Додаток 1 Акт ДП «Антонов»

ЗАМОВНИК
ДП «Антонов»
03062, м. Київ, вул. Туполева, 1.
р/р 26009735051210, «Брокбізнесбанк», м.
Київ, МФО 300249
Свідоцтво платника податку 100270160
Індивідуальний податковий номер
143075226658

ВИКОНАВЕЦЬ
ІЕЗ ім. Є.О. Патона
03680, м. Київ-150, МСП, вул. Боженка 11,
р/р 31257272210243 в ГУДК м. Києва, МФО
820019.
одержувач: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ
Ідентифікаційний код 05416923
Міністерство, відомство 07614
Свідоцтво платника податку 100165789
Індивідуальний податковий номер
054169226504

АКТ

приймання-передачі дослідної партії алюмомідного прутка

Ми, нижчепідписані, представник Замовника Головний конструктор ДП «Антонов» Рудюк Г.І. з однієї сторони та представник Виконавця заст. директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона академік Кучук-Яценко С.І. з іншої сторони склали акт про те, що у відповідності з етапом 3 Календарного плану «Виготовлення дослідної партії мідно-алюмінієвого прутка» до договору № АНО1-6(11)/2180 від 11.02.2011 г. «Розробка технології виготовлення алюмомідного прутка для виготовлення електричних шин літаків серії «АН» Виконавець передав, а Замовник прийняв дослідну партію алюмомідного прутка:

Найменування	Од. вим.	Кількість
Пруток алюмомідний Ø 8,0 мм, L ≥ 1000 мм	кг	1,5
Ø 8,8 мм, L ≥ 1000 мм	кг	2,0

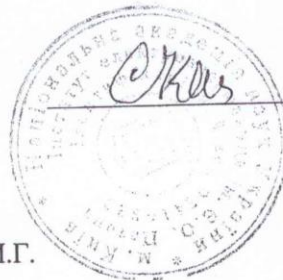
на суму 3000 грн. в т.ч ПДВ 500 грн.



Головний металург *[Signature]* Лавренко І.Г.

Начальник ППО *[Signature]* Власюк В.Г.

Передав



Кучук-Яценко С.І.

Додаток 2 ТУ на пруток алюмомідний

ДКПІ 28.73.15.700

УКНД 29.060.20

СОГЛАСОВАНО

Первый Вице-президент –
Главный конструктор ГП «Антонов»



Рудюк Г.И.
2012

УТВЕРЖДАЮ

Зам директора ИЭС им. Е.О. Патона
Академик



Кучук-Яценко С.И.
2012

ПРУТОК АЛЮМОМЕДНЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ МАРКИ ПАМ
ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
ТУ У 28.7-05416923-001:2012
(введены впервые)

Срок введения: с _____

Срок действия: без ограничения срока действия




СОГЛАСОВАНО
ЦНИИ «Материалобработка взрывом»
Директор филиала
Волгин Л.А.

ГП «Антонов»

Зам. гл. конструктора



Филичев А.В.

Гл. металлург



Лавренко И.Г.

30.01.12

РАЗРАБОТАНО

Отдел сварки, резки и обработки металлов
взрывом ИЭС им. Е.О. Патона

Зав. отд., д.т.н.



Добрушин Л.Д.

С.н.с., к.т.н.



Брызгалин А.Г.