

Чернігівський національний технологічний університет
Міністерство освіти і науки України

Донбаська державна машинобудівна академія
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

НОВОМЛИНЕЦЬ ОЛЕГ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.791:539.378.3

ДИСЕРТАЦІЯ

**НАУКОВІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОТРИМАННЯ
ПРЕЦИЗІЙНИХ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ ЗВАРЮВАННЯМ
ТИСКОМ**

спеціальність 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ О.О. Новомлинець

Науковий консультант: Фальченко Юрій В'ячеславович
доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Чернігів – 2018

Анотація

Новомлинець О.О. Наукові та технологічні основи отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Чернігівський національний технологічний університет, Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2018.

Дисертація присвячена вивченню закономірностей формування прецизійних нероз'ємних з'єднань із різних однорідних та різнорідних матеріалів і розробці на цій основі технологій прецизійного зварювання тиском.

У *першому розділі* дисертації проведено огляд літератури щодо існуючих способів обмеження деформації деталей при зварюванні тиском та активації поверхонь й інтенсифікації процесу зварювання тиском, сформульовано мету роботи і визначено основні задачі досліджень.

У *другому розділі* наведено перелік матеріалів, які використовуються в роботі, їх властивості, описано технологічні параметри устаткування, методика підготовки зразків та проведення досліджень.

У *третьому розділі* приведено результати досліджень впливу основних параметрів зварювання тиском на деформацію матеріалів, що зварюються.

Розроблено математичну модель спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності і повзучості для умов високотемпературного стиснення зразків з конкретного металу при їх зварюванні тиском, яка дозволяє оцінити вплив основних факторів на прецизійність зварних з'єднань та обрати оптимальний режим зварювання ($T_{зв}$, $P_{зв}$ та $t_{зв}$).

У *четвертому розділі* досліджено здатність до прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів з модифікацією поверхневих шарів. Встановлено, що при іонній модифікації збільшення тривалості оброблення

та прискорюючої напруги дозволяє суттєво розширити розміри зони взаємодії при зварюванні різнорідних матеріалів. Показано, що іонна обробка мідного покриття на молібдені дозволяє у 4–5 разів розширити зону дифузійної взаємодії та у 2 рази підвищити міцність зварного з'єднання міді з молібденом, у порівнянні зі зварюванням без обробки.

Встановлено, що модифікація поверхневих шарів алюмінію електроіскровим легуванням матеріалом з високим питомим електричним опором дозволяє додатково локалізувати теплову енергію в стику та отримати прецизійні нероз'ємні з'єднання при електроконтактному точковому зварюванні. Показано, що застосування при електроконтактному точковому зварюванні алюмінію АД00 прошарку з порошку марганцю, дозволяє отримати міцність зварних з'єднань на рівні 90 % міцності основного матеріалу при відносній деформації менше 2 %.

В н'ятому розділі досліджено здатність до прецизійного зварювання тиском однорідних металевих матеріалів з локалізацією теплової та механічної енергії в стику.

Встановлено, що застосування перфорованого прошарку з матеріалу, що має високий електричний опір дозволяє додатково локалізувати температурне поле та інтенсифікувати мікропластичну деформацію у стику при нагріві імпульсом струму. Розроблено новий спосіб дифузійного зварювання металевих деталей через прошарок та технологію низькотемпературного з'єднання вольфрамокобальтових твердих сплавів, сутність якої полягає у локалізації теплової та механічної енергії у стику за рахунок використання нагріву імпульсом струму та проміжного перфорованого прошарку з високим електричним опором.

Встановлено, що застосування проміжних тонких прошарків із зварювального матеріалу при електроконтактному зварюванні дозволяє локалізувати теплову енергію в стику та підвищити прецизійність зварних з'єднань. Розроблено нову технологію електроконтактного точкового та стикового зварювання опором алюмінію через тонкі проміжні прошарки з

алюмінію. Показано, що міцність зварних з'єднань, отриманих на оптимальних режимах складає 95-100% міцності основного металу, а зона з'єднання представляє собою загальну зону взаємного розплавлення основного матеріалу без зміни хімічного складу та властивостей перехідної зони, при деформації основного матеріалу не більше 2 %.

В шостому розділі досліджено можливість використання *хімічної активації* для прецизійного зварювання однорідних матеріалів.

Встановлено, що видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні відбувається при змочуванні контактуючих поверхонь рідким металевим прошарком Al-Si, що виникає при виділенні вільного Si при попередньому введенні в контакт суміші складу $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ або у вигляді напиленого шару Si на алюмінієву фольгу. Розроблено спосіб дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів з використанням проміжного хімічно активного прошарку, який дозволяє отримати з'єднання деталей з алюмінію та його сплавів з міцністю до 90 % від міцності основного матеріалу, при величині відносної деформації порядку 2 %.

Встановлено, що отримання прецизійного зварного з'єднання при зварюванні тиском у твердій фазі вуглецевої сталі визначається механічною обробкою поверхонь, параметрами процесу і наявністю проміжного шару вуглеводневої суміші. Запропоновано технологію зварювання тиском сталі 45, яка дозволяє отримувати якісні нероз'ємні з'єднання при деформації основних матеріалів менше 1 %.

В сьомому розділі досліджено можливість використання наноструктурованих прошарків для прецизійного дифузійного зварювання важкодеформуємих та напівпровідникових матеріалів. Показано, що при зварюванні вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу з алюмінідом титану та жароміцного нікелевого сплаву використання багат шарових фольг забезпечує формування якісних зварних з'єднань, коли у випадку зварювання цих матеріалів напряму з'єднання взагалі не утворюється. Показано, що

застосування пористого прошарку з міді при зварюванні сплаву Ni-Cr дозволяє отримати з'єднання з міцністю 78 % від міцності основного матеріалу. Показано, що міцність зварного з'єднання Bi_2Te_3 з міддю отриманого через пористу фольгу в 2 рази більше у порівнянні зі з'єднаннями отриманими без прошарку.

Встановлено, що застосування суцільних м'яких прошарків з алюмінію, як з застосуванням формуючої матриці так і без неї, не дозволяє в повній мірі активувати поверхні при обмеженні рівня пластичної деформації основних матеріалів при дифузійному зварюванні алюмінію АМгб з титаном ВТб.

В восьмому розділі досліджено можливість використання поверхневих фізико-хімічних процесів, що протікають самовільно, як засіб активації поверхонь, що зварюються, при обмеженні рівня пластичної деформації. Встановлено, що міцність зварних з'єднань, отриманих із застосуванням сублімованих прошарків, на 15-20 % більше міцності з'єднань, зварених без прошарку.

Розроблено новий технологічний процес прецизійного дифузійного зварювання міді з тугоплавкими металами та титаном з використанням спеціалізованої оснастки, яка дозволяє здійснювати зварювання через сублімовані прошарки за один цикл в одній робочій камері. Показано, що при зварюванні на оптимальних режимах деформація основних матеріалів не перевищує 1 %, а міцність зварних з'єднань досягає 90 % міцності основного матеріалу.

Запропоновано модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні в твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів.

В дев'ятому розділі розглянуто технологічні аспекти і рекомендації з практичного використання запропонованих засобів активації поверхонь, що зварюються, для прецизійного зварювання тиском однорідних та різнорідних матеріалів. Створено методологію управління процесом перетворення

ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину при прецизійному зварюванні тиском. Розроблено типову загальну технологію отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском, ефективність якої апробовано при виготовленні різних виробів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Отримали подальшого розвитку теоретичні основи твердофазного з'єднання та встановлено закономірності формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском. Показано, що основною вимогою для забезпечення прецизійності є перетворення в процесі зварювання ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину за рахунок: 1 – локалізації теплової та механічної енергії в стику; 2 – модифікації поверхонь; 3 – використання проміжних багатошарових, пористих наноструктурованих прошарків та хімічно активних шарів; 4 – використання поверхневих фізико-хімічних процесів, які протікають самовільно. Створено методологію управління процесом перетворення ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину.

2. Вперше розроблено термомеханічну модель процесу прецизійного зварювання, яка дозволяє оцінити вплив основних факторів на прецизійність зварних з'єднань та обрати режими зварювання ($T_{зв}$, $P_{зв}$ та $t_{зв}$). Розроблено методику розрахунку, яка дозволяє на основі вихідних даних про матеріал деталі, що зварюється, та температуру нагріву отримувати максимально можливий тиск та час зварювання для забезпечення допустимого рівня деформації основного матеріалу.

3. Вперше встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової та механічної енергії в стику при електроконтактному зварюванні є застосування перфорованого прошарку з матеріалу, що має високий електричний опір. Показано, що використання проміжного перфорованого прошарку з титану, при електроконтактному зварюванні твердих сплавів дозволяє локалізувати температуру в стику, яка в 2 рази більше, ніж при

безпосередньому зварюванні цих сплавів без використання прошарку, та забезпечити утворення якісних нероз'ємних з'єднань.

4. Вперше встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової енергії в стику та активації поверхонь при електроконтактному зварюванні є використання тонких прошарків зі зварювального матеріалу. Застосування тонких прошарків із зварювального матеріалу дозволяє підвищити прецизійність та міцність зварних з'єднань. Показано, що міцність зварних з'єднань з алюмінію отриманих електроконтактним зварюванням через тонкі прошарки з алюмінію складає 95-100% міцності основного металу при відносній деформації основного матеріалу порядку 2 %.

5. Отримало подальшого розвитку дослідження процесу хімічної активації поверхонь та розроблено технологічні рекомендації щодо його застосування для прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів. Вперше встановлено, що отримання прецизійного зварного з'єднання ($\epsilon \leq 1\%$) при зварюванні тиском у твердій фазі вуглецевої сталі визначається механічною підготовкою поверхонь, параметрами процесу ($T_{зв}$, $P_{зв}$ та $t_{зв}$) і наявністю проміжного шару вуглеводневої суміші, що наноситься до зварювання на поверхні. Вдосконалено технологічний процес видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні за рахунок використання нового засобу створення рідких металевих прошарків шляхом внесення в контакт суміші складу $Na_2SiO_3-HCl-Mg$.

6. Отримало подальшого розвитку дослідження поверхневих фізико-хімічних процесів (адсорбція, автовакуумування, розчинення, самоочищення від оксидних плівок, сублімація та конденсація). Вперше встановлено ефективність використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском у вакуумі різнорідних металів. Показано, що конденсований шар одного з металів, що зварюється, на поверхні іншого дозволяє підвищити на 15-20 % міцність з'єднань при інших рівних умовах.

Практична цінність. Створено наукові підходи та технологічні основи прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів.

Встановлені закономірності впливу технологічних параметрів на особливості формування прецизійних зварних з'єднань. Розроблено методику розрахунку параметрів процесу зварювання тиском в залежності від допустимого рівня деформації основних матеріалів.

Розроблена нова типова загальна технологія прецизійного зварювання тиском різних матеріалів, ефективність якої було апробовано при виготовленні: твердосплавного інструменту при зварюванні алмазно-твердосплавних пластин з твердим сплавом; високоміцних інтерметалідних багат шарових пластин на основі інтерметаліду – алюмініду титану Ti_3Al при зварюванні алюмінію з титаном; прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення з алюмінієвих сплавів при дифузійному зварюванні.

Отримані результати можуть бути використані при розробці технологій виготовлення різних прецизійних деталей та вузлів приладів і механізмів з однорідних та різнорідних матеріалів.

Ключові слова: прецизійне нероз'ємне з'єднання, дифузійне зварювання у вакуумі, електроконтактне зварювання, однорідні та різнорідні матеріали, модифікації поверхневих шарів, локалізації теплової та механічної енергії в стику, хімічна активація поверхонь; пористі та багат шарові прошарки, поверхневі фізико-хімічні процеси.

Summary

Novomlynets O.O. Scientific and Technological Fundamentals of Producing Precise, Non-detachable Joints by Pressure Welding – As a manuscript.

Thesis for a Doctor Degree in Technical Sciences. Specialty 05.03.06 – "Welding and Related Processes and Technologies" – Donbas State Machine-Building Academy, Kramatorsk, 2018.

The thesis focuses on the regularity investigation of the precision non-detachable joints formation from various homogeneous and heterogeneous materials and the development of precision welding techniques and procedures based on it.

The first chapter provides a literature review on the existing methods of limiting the part deformation during pressure welding and surface activation and the intensification of the pressure welding process. The research goal and its main objectives have been determined.

The second chapter provides the list of materials used in the study, their properties, describes the technological parameters of the equipment, the methodology of specimens preparation and research development.

The third chapter presents the research results concerning the influence of the main parameters of pressure welding on the deformation of the welded materials.

The mathematical model of joint development of elastic deformations, instant plasticity and creep flow for conditions of high-temperature compression of specimens from a concrete metal in the process of pressure welding has been developed. It makes possible to estimate the influence of the main factors on the precision of the welded joints and to choose the optimal welding conditions (T_w , P_w and t_w).

The fourth chapter examines the capability of metal materials with the surface layers' modification to pressure welding. It has been established that during ionic modification the increase of the processing time and accelerating voltage makes it possible to expand the dimensions of the interaction zone significantly in case of heterogeneous materials welding. It has been stated that ion-beam processing of copper coating on molybdenum helps to expand the zone of diffusion interaction by a factor of 4-5 and to increase the strength of copper welded joint with molybdenum twofold, compared with welding without processing.

It was established that the modification of the aluminum surface layers by an electro sparking alloying with high specific electrical resistance material provides additional localization of thermal energy at the junction and precise non-detachable joints production by electrical contact dot welding. It has been indicated that application of manganese powder interlayer allows us to obtain the strength of welded joints at 90% strength of the main material with a relative deformation less than 2% during electrical contact dot welding of aluminum AD00.

In the fifth chapter the precision pressure welding capability of homogeneous metal materials with the localization of thermal and mechanical energy at the junction has been explored.

It has been established that the application of a perforated layer of a high electrical resistance material provides additional localization of the temperature field and intensification of microplastic deformation at the junction when heated by current impulse. A new method of diffusion welding of metal parts through the interlayer and technology of low-temperature weld of tungsten cobaltic solid alloys have been developed. The key point is about localization of thermal and mechanical energy at the junction due to the use of heating by current impulse and an intermediate perforated layer with high electrical resistance.

It has been determined that the application of intermediate thin layers of welding consumables during electrical contact welding makes it possible to locate thermal energy at the joint and increase the precision of welded joints. A new technology of electrical contact dot and butt resistance welding of aluminum through thin intermediate layers of aluminum has been developed. The strength of welded joints under the optimal conditions is indicated to be 95-100% of the main metal strength, and the weld junction represents the general zone of mutual melting of the parent material without changes of the chemical composition and properties of the transition zone, with the deformation of the parent material no more than 2%.

In the sixth chapter the possibility of chemical activation for precision welding of homogeneous materials has been investigated.

It has been found out that the removal of the oxide film from the surface of aluminum and its alloys and the formation of physical contact during diffusion welding occurs when the contacting surfaces are wetted by the liquid metal layer of Al-Si, which takes place when the free Si is released with the preliminary introduction of $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-NaF-Mg}$ into the mixture contact or in the form of a spray Si layer on aluminum foil. The method of diffusion welding of aluminum and its alloys in a vacuum with the use of an intermediate chemically active layer provides welding joints from aluminum and its alloys with the strength of up to 90% of the strength of the main material, with the magnitude of relative strain of 2 %.

It has been established that producing a precision weld joint during pressure welding in a solid phase of carbon steel is determined by mechanical surface treatment, process parameters and the availability of an intermediate layer of a hydrocarbon mixture. Pressure welding technology of steel C45 has been proposed, which provides quality non-detachable joints with the deformation of parent materials less than 1%.

In the seventh chapter, the possibility of nanostructured layers application for precision diffusion welding of hard-deformable and semiconductor materials has been investigated. It has been pointed out that when welding of carbon-carbon composite material with titanium aluminide and a heat-resistant nickel alloy, application of multilayer foils provides the formation of quality welded joints, when welding these materials directly joint is not produced at all. It has been presented that application of copper porous interlayer provides a joint strength of 78% of the strength of the main material when welding Ni-Cr alloy. The strength of the welded joint of Bi_2Te_3 with copper obtained through the porous foil has been stated to be twice fold compared with the joints produced directly.

The application of continuous soft aluminum interlayers, with or without a molding matrix, does not provide the surfaces activation to the full extent when limiting the level of plastic deformation of the parent materials during the diffusion welding of aluminum AMg₆ with titanium DIN 3.7164.

The eighth chapter explores the possibility of surface physicochemical processes that occur spontaneously as a means of welded surfaces' activation limiting level of plastic deformation. It is found out that the strength of the welded joints produced with application of sublimation layers is 15-20% more than the strength of joints welded directly.

A new technological procedure of precision diffusion welding of copper with refractory metals and titanium with the use of special purpose tooling has been developed. Special purpose tooling provides welding through sublimation layers in a single cycle in a single working chamber. It is shown that the deformation of the main materials does not exceed 1%, and the strength of the welded joints arrives at 90% of the strength of the main material when welding under optimal conditions.

The model of non-detachable joints formation during welding in the solid phase using surface physical and chemical processes has been proposed.

In the ninth chapter technological aspects and recommendations concerning practical application of the proposed techniques of activating welded surfaces for the precision pressure welding of homogeneous and heterogeneous materials have been considered. A methodology for controlling the process of transforming an ultrathin surface layer into a plastic, activated state or liquid with precision pressure welding has been developed. A typical general technology for obtaining precision non-detachable welded joints has been developed, the effectiveness of which was tested during the manufacture of various products.

Scientific novelty of the obtained results.

1. The theoretical principles of the solid-phase joints have been further developed and the process regularities of precision non-detachable joints during pressure welding have been determined. It has been indicated that the main requirement for precision provision is the transformation of an ultrathin surface layer into a plastic, activated state or liquid during the welding process by:
1 – localization of thermal and mechanical energy at the junction; 2 - surfaces modification; 3 – application of intermediate multilayer, porous nanostructured

interlayers and chemically active layers; 4 – application of surface physical and chemical processes proceeding spontaneously. The methodology for controlling the process of transforming an ultrathin surface layer into a plastic, activated state or liquid has been created.

2. For the first time a thermo mechanical model of the precision welding process has been developed, which makes it possible to estimate the influence of the main factors on the precision of the welded joints and to select the welding modes (T_w , P_w and t_w). The method of calculation has been developed. It enables on the basis of the raw material data of the welded part and the heating temperature to obtain the maximum possible pressure and welding time for ensuring the acceptable deformation level of the main material.

3. For the first time, it has been established that an efficient mean of localizing of the thermal and the mechanical energy in the joint during the electrocontact welding is the usage of a perforated layer from the material that has a high electrical resistance. It has been shown that the usage of the intermediate perforated layer of titanium in the electrocontact welding of solid alloys allows to localize of the temperature at the joint, which is in 2 times higher than in the direct welding of these alloys without the usage of the layer, and to provide the formation of qualitative nondetachable connections.

4. It has been determined for the first time that application of thin layers of welding consumables is an effective means of thermal energy localization at the joint and surfaces' activation during electrical contact welding. It is stated that application of thin layers of welding consumables provides an increase of precision and strength of welded joints. It has been shown that the strength of aluminum welded joints produced by electrical contact welding through thin layers of aluminum is 95-100% of strength of the parent metal with a relative deformation of the parent material of 2 %.

5. The study of chemical surface activation has been further developed and technological recommendations for its application for precision pressure welding of metallic materials have been worked out. It has been found out for the first time

that producing a precision weld joint ($\varepsilon \leq 1\%$) during welding in a solid phase of carbon steel is determined by the mechanical surface preparation, the process parameters (T_w , P_w and t_w) and the thickness of the intermediate layer of the hydrocarbon mixture applied to the surface before welding. The technological process of oxide film removal from aluminum surface and its alloys and the formation of physical contact during diffusion welding has been improved using the innovative tool of the creation of liquid metal layers by contacting a mixture of $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$.

6. The study of surface physical and chemical processes (adsorption, autovacuuming, dissolution, oxide films self-cleaning, sublimation and condensation) has been further developed. It is determined that in the case of heating non-hermetic volumes in a vacuum, the time required for the formation of condensed layers from one of the contacting metals decreases for a factor of 10 regardless of the nature of another metal. The effectiveness of surface physical and chemical processes for precision pressure welding of heterogeneous metals in a vacuum has been established. It has been presented that the condensed layer of one of the welding metals on the surface of another can increase the joint strength up to 15-20% under other equal conditions.

Practical value. Scientific approaches and technological foundations of precision pressure welding of various homogeneous and heterogeneous materials have been developed.

The regularities of the influence of technological parameters on the peculiarities of the precision welded joints have been determined. The method of calculation of the process parameters of pressure welding based on the permissible deformation level of the parent materials has been elaborated.

A new typical general technology of precision pressure welding of various materials has been developed, the effectiveness of which was tested in the manufacture of a carbide tool when welding diamond and hard-alloy carbides with hard metals; high-strength intermetallide multilayer plates based on Ti_3Al when

welding aluminum with titanium; special use precision housing units from aluminum alloys in case of diffusion welding.

The obtained results can be used in the development of technologies for manufacturing various precision parts and units of devices and mechanisms made from homogeneous and heterogeneous materials.

Key words: precision non-detachable joint, vacuum diffusion welding, electrical contact welding, homogeneous and heterogeneous materials, modifications of surface layers, localization of thermal and mechanical energy at the junction, chemical activation of surfaces; porous and multilayer layers, surface physical and chemical processes.

Список публікацій здобувача

Статті у наукових фахових виданнях та виданнях, внесених до наукометричних баз даних:

- [1] Г. К. Харченко, В. В. Арсенюк, М. М. Руденко, та **О. О. Новомлинець**, «Зварювання тиском титану з алюмінієм (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 21, С. 101–106, 2004. [фахове видання] (0,5 друк.арк.)
- [2] Ю. Е. Николаенко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, и **О. А. Новомлинец**, «Сварка давлением с нагревом в вакууме титана с медью в технологии изготовления тепловых труб», *Технологические системы*, № 2 (22), С. 56–59, 2004. [фахове видання] (0,2 друк.арк.)
- [3] Г. К. Харченко, В. В. Арсенюк, Ю. В. Фальченко, та **О. О. Новомлинець**, «Зварювання тиском алюмінію з міддю (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 22, С. 81–90, 2005. [фахове видання] (0,45 друк.арк.)
- [4] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, Д. М. Демиденко, та Ю. В. Фальченко, «Дослідження впливу сублімаційних процесів в стику на якість зварних хром-мідних з'єднань», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 22, С. 91–93, 2005. [фахове видання] (0,15 друк.арк.)
- [5] **О. О. Новомлинець**, І. М. Крапивний, та Ю. В. Фальченко, «Зварювання тиском алюмінієвих сплавів через рідкі евтектичні прошарки», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 26, С. 105–107, 2006. [фахове видання] (0,2 друк.арк.)
- [6] Ю. В. Фальченко, А. І. Устінов, В. Є. Федорчук, Г. К. Харченко, та **О. О. Новомлинець**, «Особливості зварювання у твердій фазі алюмінідів титану з вуглець-вуглецевим композиційним матеріалом», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 34, С. 133–137, 2008. [фахове видання] (0,25 друк.арк.)

- [7] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, М. М. Руденко, та В. В. Свириденко, «Дифузійне зварювання вольфрам кобальтових твердих сплавів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 40, С. 14–17, 2009. [фахове видання] (0,2 друк.арк.)
- [8] І. О. Дудла, Т. В. Ганєєва, та **О. О. Новомлинець**, «До питання щодо використання алюмінію і його сплавів та проблеми їх зварювання (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 42, С. 156–161, 2010. [фахове видання] (0,3 друк.арк.)
- [9] Е. В. Половецький, Л. М. Капитанчук, и **О. А. Новомлинец**, «Влияние толщины промежуточной прослойки на структуру и свойства сварных соединений сплава алюминия АМГ6 со сплавом титана ВТ6 способом диффузионной сварки в вакууме», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 1 (63), С. 131–138, 2013. [міжнародна наукометрична база даних eLIBRARY.RU, фахове видання] (0,4 друк.арк.)
- [10] Е. В. Половецький, **О. А. Новомлинец**, А. В. Лабарткава, М. В. Матвиенко, К. К. Трунин, и В. А. Мартыненко, «Исследование возможности применения принудительной схемы деформирования при диффузионной сварке сплавов АМГ6 и ВТ6», *Вісник НУК імені адмірала Макарова*, № 2, 2013. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://evn.nuos.edu.ua>. [електронне фахове видання] (0,3 друк.арк.)
- [11] **О. О. Новомлинець**, І. В. Завальна, та Є. В. Половецький, «Особливості отримання нероз'ємних з'єднань у процесі виготовлення термоелементів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 4 (69), С. 82–90, 2013. [міжнародна наукометрична база даних eLIBRARY.RU, фахове видання] (0,4 друк.арк.)
- [12] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, І. В. Завальна, та Є. В. Половецький, «Прецизійне електроконтактне точкове зварювання металевих матеріалів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 2 (73), С. 104–111, 2014.

- [міжнародна наукометрична база даних eLIBRARY.RU, фахове видання] (0,4 друк.арк.)*
- [13] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та В. О. Мартиненко, «Дослідження деформаційної кінетики алюмінію при високих температурах», *Технічні науки та технології*, № 2 (2), С. 67–72, 2015. *[міжнародна наукометрична база даних eLIBRARY.RU, фахове видання] (0,3 друк.арк.)*
- [14] V. F. Mazanko, H. K. Kharchenko, T. R. Hanieiev, **O. O. Novomlynets**, and I. V. Zavalna, «The distinctive features of diffusive interaction of copper and molybdenum at pressure welding through the layers modified by ion-beam processing», *Металлофизика и новейшие технологии*, т. 37, вип. 2, С. 233–241, 2015. *[міжнародні наукометричні бази даних Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, Eigenfactor score, Fiz Karlsruhe, INSPEC, EBSCO, Pascal, ВИНИТИ, eLIBRARY, Джерело, MedSci, фахове видання] (0,4 друк.арк.)*
- [15] Е. В. Половецький, **О. А. Новомлинец**, А. В. Лабарткава, В. А. Мартыненко, и М. В. Матвиенко, «Диффузионные и рекристаллизационные процессы при диффузионной сварке в вакууме сплава алюминия АМГ6 со сплавом титана ВТ6», *Збірник наукових праць НУК*, № 3, С. 34–40, 2015. *[міжнародні наукометричні бази даних eLIBRARY, WorldCat, CrossRef, фахове видання] (0,35 друк.арк.)*
- [16] Ю. Фальченко, Л. Петрушинець, А. Устінов, Т. Мельниченко, **О. Новомлинець**, та І. Гусарова, «Дифузійне зварювання в вакуумі тонколистового нікелевого сплаву», *Технічні науки та технології*, № 4 (6), С. 87–98, 2016. *[фахове видання] (0,6 друк.арк.)*
- [17] В. Мазанко, **О. Новомлинець**, С. Олексієнко, та С. Ющенко, «Дослідження процесів масоперенесення у процесі прецизійного електроконтактного зварювання алюмінію», *Технічні науки та технології*, № 2 (8), С. 75–81, 2017. *[міжнародні наукометричні бази даних Index*

- Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, *фахове видання*] (0,3 друк.арк.)
- [18] Л. Петрушинець, Ю. Фальченко, А. Устінов, Т. Мельниченко, та **О. Новомлинець**, «Дифузійне зварювання у вакуумі жароміцного сплаву на Ні основі», *Технічні науки та технології*, № 3 (9), С. 63–73, 2017. [міжнародні наукометричні бази даних Index Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, *фахове видання*] (0,3 друк.арк.)
- [19] О. В. Махненко, О. А. Великоіваненко, О. С. Міленін, Ю. В. Фальченко, та **О. О. Новомлинець**, «Методика розрахунку режимів зварювання тиском для отримання прецизійних нероз’ємних з’єднань», *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, № 5 (235), С. 111–116, 2017. [*фахове видання*] (0,4 друк. арк.)
- [20] Ю. В. Фальченко, **О. О. Новомлинець**, Л. В. Петрушинець, та І. В. Нагорна, «Основи використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском», *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 54–66, 2017. [міжнародні наукометричні бази даних Index Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, *фахове видання*] (0,9 друк.арк.)
- [21] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, Є. В. Половецький, «Прецизійне зварювання тиском алюмінієвих сплавів», *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 67–76, 2017. [міжнародні наукометричні бази даних Index Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, *фахове видання*] (0,5 друк. арк.)

Статті у наукових періодичних фахових виданнях інших держав:

- [22] Y. Falchenko, and **O. Novomlynets**, «Diffusion welding of titanium with copper using surface physical and chemical processes», *Collection of Scientific Papers: Information, Technologies, Management and Society*, Riga, Latvia, № 4 (12), P. 184-191, 2015. (0,3 друк.арк.)
- [23] Y. Falchenko, **O. Novomlynets**, and E. Polovetskyi, «Special features of precision pressure welding of carbon steel with chemical activation of

surfaces», *Scientific and educational journal*, Geneve, Switzerland, № 6, P. 65-70, July, 2016. (0,35 друк.арк.)

- [24] Y. Falchenko, and **O. Novomlynets**, «Precision low temperature pressure welding of solid alloys», *Modern Science - Moderní věda*, Praha, Ceska Republika, № 1, (P. II), P. 56-62, 2017. (0,7 друк.арк.)
- [25] Y. Falchenko, **O. Novomlynets**, I. Prybytko, and M. Rudenko, «The investigation of strain-tension state and diffuse interaction under the pressure welding of cutting alloy», *Scientific and educational journal*, Geneve, Switzerland, № 8, P. 95-101, July, 2017. (0,4 друк.арк.)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

- [26] **О. О. Новомлинець**, «Дослідження впливу сублімаційних процесів в стику на якість зварних з'єднань», на *III Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2005, С. 124. (0,05 друк.арк.)
- [27] Г. П. Болотов, **О. А. Новомлинець**, Т. Р. Ганєєв, и М. Г. Болотов, «Активация и модификация поверхностей металлов в вакууме перед сваркой и пайкой» на *Научно-практическом семинаре «Сварка и родственные процессы в промышленности»*, Киев: Экотехнология, 2006, С. 47–49. (0,15 друк.арк.)
- [28] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, та Т. Р. Ганєєв, «Дифузійне зварювання у вакуумі титану з міддю» на *IV Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2007, С. 29. (0,05 друк.арк.)
- [29] Г. К. Харченко, **О. А. Новомлинець**, и Т. Р. Ганєєв, «Применение ионной модификации поверхностных слоев при диффузионной сварке в вакууме меди с молибденом», на *8-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия»*, Москва: «МАТИ» - РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2009, С. 290–292. (0,15 друк.арк.)

- [30] G. K. Harchenko, **O. A. Novomlinets**, and M. N. Rudenko, «Diffusion Welding of Cobalt Cemented Carbide», in *18th Spanish Technical Sessions on Welding*, Industrial Engineering Madrid, Spain, oct., 2010. [Online]. Available: https://indusnet.etsii.upm.es/gestion_escuela/personal/adjuntos/presentaciones/864.pdf (0,2 друк.арк.)
- [31] **О. О. Новомлинець**, та М. М. Руденко, «Дослідження впливу матеріалу проміжного прошарку на температурні поля при електроконтактному нагріві твердих сплавів типу ВК», на *I міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2011, С. 122. (0,05 друк.арк.)
- [32] **О. О. Новомлинець**, «Прецизійне контактне зварювання алюмінію та його сплавів з використанням проміжних прошарків», на *III международной научно-технической конференции «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития»*, Под общ. ред. д-р техн. наук Н. А. Макаренко, Краматорск : ДГМА, 2012, С. 120–122. (0,2 друк.арк.)
- [33] **О. О. Новомлинець**, та П. С. Сластион, «Електроконтактне точкове зварювання алюмінію та його сплавів через проміжні прошарки» на *II міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2012, С. 60-61. (0,15 друк.арк.)
- [34] Ю. В. Фальченко, Е. В. Половецкий, та **О. А.Новомлинец**, «Влияние параметров режима диффузионной сварки на структуру биметаллических соединений АМг6-ВТ6», на *II міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2012, С. 64-66. (0,2 друк.арк.)
- [35] **О. О. Новомлинець**, та Т. Р. Ганєєв, «Розробка технології прецизійного електроконтактного точкового зварювання алюмінію та його сплавів», на *VII науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів*

- «Зварювання та споріднені технології», Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2013, С. 49. (0,15 друк.арк.)
- [36] С. В. Олексієнко, **О. А. Новомлинець**, И. А. Прибытько, и С. М. Ющенко, «Способ прецизионного соединения алюминия и его сплавов» на *VII науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2013, С. 50. (0,15 друк.арк.)
- [37] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, М. М. Руденко, та М. О. Хоменко, «Виникнення електричного потенціалу на поверхні металевих зразків при високотемпературному синтезі, що самопоширюється, в наночаруватих фольгах», на конференції *Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее: Тез. стенод. докл.*, Киев: Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2013, С. 103–104. (0,15 друк.арк.)
- [38] **О. О. Новомлинець**, та І. В. Завальна, «Дослідження прецизійного зварювання тиском напівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з міддю щодо виготовлення термоелементів», на *Международной научно-технической конференции «Университетская наука-2014»*, Мариуполь: ПГТУ, 2014, С. 142–144. (0,15 друк.арк.)
- [39] Є. В. Половецький, Л. М. Капітанчук, та **О. О. Новомлинець**, «Особливості формування структури з'єднань сплавів алюмінію зі сплавами титану при дифузійному зварюванні у вакуумі», на *Всеукраїнській науково-технічній конференції, присвяченій 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова, та III Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих науковців «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології»*, Миколаїв : НУК ім. адм. Макарова, 2014, С. 90–91. (0,1 друк.арк.)
- [40] S. V. Oleksiienko, **O. O. Novomlynets**, and S. M. Yushchenko, «Diffusion bonding technique concerning production of microchannel heat exchangers» in *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology*

- (*ELNANO*), Kyiv, 2016, P. 57–60. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7493009>. (0,2 друк.арк.)
- [41] S. V. Oleksiienko, L. Y. Berezin, I. V. Zavalna, та **О. О. Novomlynets**, «The investigation of weldability of Bi_2Te_3 semiconductor material with copper through the nanoporous interlayers» in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Kosice, 2015, С. 30–32. (0,1 друк.арк.)
- [42] G. K. Kharchenko, **О. О. Novomlynets**, I. O. Prybytko, and I. V. Nahorna, «The Search of New Ways of Thermoelements Production», in *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering «YSF-2016»*, Kharkiv, 2016, P. 156–159. [Online]. Available: <http://www.ysc.org.ua>. (0,2 друк.арк.)
- [43] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та Т. В. Ганєєва, «Досвід і перспективи виробництва мікроканалних теплообмінників», на *VI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 261–262. (0,1 друк.арк.)
- [44] І. В. Нагорна, **О. О. Новомлинець**, та Є. В. Половецький, «Вивчення бар'єрних властивостей іонно–модифікованих шарів», на *VI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 253–254. (0,1 друк.арк.)
- [45] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, та С. М. Ющенко, «Способи зварювання тиском алюмінієвих сплавів з обмеженням рівня деформації», in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 371–373. (0,15 друк.арк.)
- [46] **О. О. Новомлинець**, І. О. Прибитько, та І. В. Нагорна, «Вивчення дифузійних процесів при виготовленні термоелементів», in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 373–375. (0,15 друк.арк.)

Патенти:

- [47] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, І. О. Прибителько, Т. Р. Ганєєв, та М. М. Руденко, «Спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через сублімовані прошарки», *Патент № 41718 Україна*, Опубл. 10.06.2009 р, Бюл. № 11.
- [48] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, М. М. Руденко, С. В. Олексієнко, І. О. Прибителько, та Ю. В. Фальченко, «Спосіб дифузійного зварювання металевих деталей через прошарок», *Патент № 60407 Україна*, Опубл. 25.06.2011 р, Бюл. № 12.
- [49] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, Ю. В. Фальченко, та Л. В. Петрушинець, «Спосіб електроконтактного точкового зварювання металевих деталей через прошарок», *Патент № 89671 Україна*, Опубл. 25.04.2014 р, Бюл. № 8.
- [50] С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та **О. О. Новомлинець**, «Спосіб прецизійного дифузійного з'єднання алюмінію та його сплавів», *Патент № 94095 Україна*, Опубл. 27.10.2014 р, Бюл. № 20.
- [51] Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, **О. О. Новомлинець**, Л. В. Петрушинець, А. І. Устінов, Т. В. Мельниченко, та К. В. Ляпіна, «Спосіб дифузійного зварювання через пористу фольгу», *Патент № 94079 Україна*, Опубл. 27.10.2014 р, Бюл. № 20.
- [52] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, Є. В. Половецький, І. О. Прибителько, та І. В. Нагорна, «Спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок», *Патент № 117001 Україна*, Опубл. 12.06.2017 р, Бюл. № 11.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	30
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ ОДНОРІДНИХ ТА РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ	39
1.1 Аналіз процесів, відповідальних за утворення зварного з'єднання	40
1.1.1 Природа утворення з'єднання при зварюванні тиском	41
1.1.2 Аналіз процесів, які відбуваються у поверхневому шарі металу при нагріванні у вакуумі	54
1.2 Способи інтенсифікації процесу зварювання тиском	63
1.2.1 Інтенсифікація за рахунок регулювання основних параметрів зварювання	63
1.2.2 Накладення додаткових впливів	66
1.2.3 Попередня обробка контактних поверхонь	67
1.2.4 Застосування проміжних прошарків	73
1.3 Способи обмеження деформації деталей при зварюванні тиском	80
1.4 Аналіз основних процесів та факторів, які можуть впливати на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском різних матеріалів	93
Висновки до розділу 1	99
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	101
2.1 Матеріали, що досліджуються	101
2.2 Зварювальне обладнання	113
2.3 Методика підготовки зразків до зварювання, досліджень та випробувань	122
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ	131
3.1 Дослідження впливу основних параметрів зварювання тиском на	132

деформацію матеріалів, що зварюються	
3.2 Розробка методики розрахунку параметрів процесу прецизійного зварювання тиском	138
3.3 Прогнозування впливу технологічних параметрів зварювання тиском на залишковий деформований стан виробів з різних матеріалів	143
3.4 Математичне моделювання напруженого стану в нероз'ємних з'єднаннях з обмеженням пластичної деформації основних матеріалів	150
Висновки до розділу 3	153
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ З МОДИФІКАЦІЄЮ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ	155
4.1 Дифузійне зварювання у вакуумі через шари, модифіковані іонною обробкою	155
4.1.1 Дослідження іонної обробки на процес модифікації поверхневих шарів	155
4.1.2 Дослідження дифузійного зварювання металевих матеріалів через поверхневі шари модифіковані іонною обробкою	157
4.2 Електроконтактне зварювання через шари, модифіковані електроіскровою обробкою	163
Висновки до розділу 4	172
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ З ЛОКАЛІЗАЦІЄЮ ТЕПЛОВОЇ ТА МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СТИКУ	174
5.1 Використання локалізації теплової та механічної енергії для прецизійного зварювання тиском твердих сплавів	175
5.1.1 Дослідження формування зварних з'єднань твердих сплавів при зварюванні в твердій фазі	177
5.1.1.1 Дослідження температурних полів при зварюванні твердих сплавів з імпульсним нагрівом струмом	177

5.1.1.2 Дослідження зварюваності твердих сплавів з імпульсним нагрівом струмом через проміжні прошарки	185
5.1.1.3 Дослідження особливостей деформації проміжних прошарків при зварюванні твердих сплавів з імпульсним нагрівом струмом	194
5.1.1.4 Дослідження факторів, які впливають на якість зварних з'єднань твердих сплавів	197
5.1.2 Дослідження напружено-деформованого стану зварних з'єднань	201
5.1.3 Розробка технології прецизійного зварювання тиском твердих сплавів	209
5.2 Використання локалізації теплової енергії для прецизійного електроконтактного зварювання	213
5.2.1 Дослідження температурних полів при електроконтактному точковому зварюванні металевих матеріалів через тонкі прошарки із зварювального матеріалу	216
5.2.2 Дослідження електроконтактного точкового зварювання алюмінію та його сплавів через тонкі прошарки із зварювального матеріалу	222
5.2.3 Дослідження електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через тонкі прошарки із зварювального матеріалу	232
Висновки до розділу 5	235
РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ХІМІЧНОЇ АКТИВАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ	238
6.1 Дослідження здатності до прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів через евтектичні прошарки	239
6.1.1 Зварювання алюмінію та сплавів через хімічно активний прошарок з евтектичної суміші	241

6.1.2 Зварювання алюмінію та сплавів через кремнієвмісний рідкий евтектичний матеріал	243
6.2 Дослідження здатності до прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі вуглецевої сталі з використанням хімічної активації	248
6.2.1 Визначення оптимальних режимів дифузійного зварювання у вакуумі сталі 45	251
6.2.2 Дослідження впливу підготовки поверхні зразків на величину осадки, механічні властивості та структуру зварних з'єднань сталі 45	253
Висновки до розділу 6	255
РОЗДІЛ 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ВАЖКОДЕФОРМУЄМИХ ТА РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОМІЖНИХ ПРОШАРКІВ	257
7.1 Використання наноструктурованих багатошарових прошарків для зварювання важкодеформуємих матеріалів	261
7.2 Використання наноструктурованих пористих прошарків для зварювання фольг	269
7.3 Використання наноструктурованих пористих прошарків для зварювання напівпровідникового матеріалу з міддю	272
7.4 Дослідження здатності до прецизійного зварювання тиском різнорідних матеріалів через м'які прошарки	276
Висновки до розділу 7	280
РОЗДІЛ 8. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОВЕРХНЕВИХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	281
8.1 Вивчення особливостей утворення сублімованих шарів	283
8.2 Дослідження здатності до зварювання різнорідних матеріалів через сублімовані шари	288

Висновки до розділу 8	295
РОЗДІЛ 9. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ АКТИВАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ	297
Висновки до розділу 9	305
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	306
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	312
Додаток А. Акт впровадження результатів досліджень на підприємстві	340
Додаток Б. Акт впровадження результатів досліджень на підприємстві	342
Додаток В. Акт впровадження результатів досліджень на підприємстві	343
Додаток Д. Акт впровадження результатів досліджень на підприємстві	344
Додаток Е. Акт впровадження результатів дослідження у навчальний процес	345
Додаток Ж. Список публікацій здобувача за темою дисертації	346

ВСТУП

Актуальність теми

Розвиток сучасної науки і техніки потребує застосування нових конструкційних матеріалів, що мають високі механічні та спеціальні властивості, а також використання виробів складної конфігурації з однорідних та різнорідних матеріалів (метали, неметалеві матеріали, інтерметаліди, наноматеріали та інші). При цьому, в більшості випадків, отримання якісних виробів з таких матеріалів зварюванням плавленням неможливе внаслідок зміни їх властивостей. Крім цього, багато з таких матеріалів, а також виробів, при отриманні нероз'ємних з'єднань, окрім обмеження температури потребують ще й обмеження макро- та мікродеформацій. Ця проблема особливо актуальна при виготовленні сучасних деталей машин, конструкцій, виробів з тонколистових матеріалів, а також виробів з матеріалів, що мають дуже низьку деформаційну здатність.

Найбільш перспективними для отримання прецизійних з'єднань таких матеріалів є способи зварювання тиском, коли з'єднання утворюються в результаті пластичної деформації основних матеріалів. Широко розповсюдженими способами зварювання тиском є дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) та електроконтактне зварювання (ЕКЗ). На сьогоднішній день відсутні дані щодо визначення кількісних характеристик прецизійності зварних з'єднань, отриманих способами зварювання тиском, але більшість дослідників, говорячи про прецизійні з'єднання, оцінюють при цьому деформацію основних матеріалів на рівні не більше 1-2 % від вихідного розміру деталей. Тому основною проблемою, на вирішення якої направлено виконання роботи, є активація поверхонь, що зварюються, для утворення якісних нероз'ємних з'єднань при мінімально можливому рівні деформації основних матеріалів.

Відомо, що основними механізмами активації поверхонь, тобто механізмами руйнування хімічних зв'язків між адсорбованим киснем та атомами металу при зварюванні в твердій фазі металевих матеріалів, є

наступні: термічний, деформаційний (енергетичний), механічний та хімічний. В переважній більшості всі відомі технології способів зварювання тиском направлені на використання саме деформаційної та механічної активації, що, на жаль, пов'язано з достатньо високим рівнем пластичної деформації основних матеріалів. Відомі роботи, в яких для прецизійного дифузійного зварювання матеріалів, які мають низьку деформаційну здатність, використовували проміжні рідкі прошарки, вібраційні коливання ультразвукової частоти, циклічне прикладання тиску, циклічну зміну температури в процесі зварювання, попереднє напилювання, введення в стик м'яких прошарків; а для електроконтактного прецизійного зварювання пластичних металів – спеціальні цикли зварювання, які сприяють локалізації в стику механічної та теплової енергії, а також пришвидшують активацію зварних поверхонь й утворення зварних з'єднань. Але ці роботи носять безсистемний характер. Відсутня інформація щодо основ, принципів та засобів отримання таких прецизійних з'єднань зварюванням тиском.

На нашу думку застосування рідкої фази за рахунок внесення в стик проміжних прошарків евтектичного складу, модифікації поверхневих шарів, використання поверхневих фізико-хімічних процесів, хімічна активація, а також локалізація енергії в стику повинно дати можливість для вирішення проблеми прецизійного зварювання однорідних та різнорідних матеріалів.

Актуальність роботи визначається необхідністю проведення системних досліджень по вивчення основних закономірностей формування прецизійних нероз'ємних з'єднань з різних однорідних та різнорідних матеріалів при зварюванні тиском.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота проводилась у Чернігівському національному технологічному університеті за держбюджетними темами прикладних та фундаментальних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України та державного фонду фундаментальних досліджень України:

– 2006-2008 рр. - “Створення новітніх технологій зварювання виробів електронної техніки із різнорідних матеріалів”, № держреєстрації 0106U000426;

– 2007 р. - проект №Ф25.4/155 «Дослідження та розробка засобів модифікації поверхонь при зварюванні в твердій фазі», договір №Ф25/630-207, № держреєстрації 0107U010840;

– 2008 р. - проект GP/F26/0060 «Розроблення нового способу дифузійного зварювання через нанорозмірні сублимовані прошарки», договір №Ф26/436-2008, № держреєстрації 0108U005081;

– 2009-2010 рр. - “Дослідження та розробка технології низькотемпературного дифузійного з’єднання вольфрамокобальтових сплавів”, № держреєстрації 0109U000002;

– 2012-2014 рр. – «Наукові основи отримання прецизійних нероз’ємних з’єднань зварюванням тиском», № держреєстрації 0112U003008.

Мета і завдання досліджень

Метою роботи є встановлення закономірностей формування прецизійних нероз’ємних з’єднань із різних однорідних та різнорідних матеріалів і розробка на цій основі технологій прецизійного зварювання тиском.

Для реалізації цієї мети в роботі вирішувались наступні завдання:

1. Дослідити вплив термомеханічного циклу на формування прецизійних нероз’ємних з’єднань та розробити методику розрахунку параметрів процесу зварювання тиском в залежності від допустимого рівня деформації основних матеріалів.
2. Вивчити здатність до прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів з модифікацією поверхневих шарів та локалізацією теплової і механічної енергії в стику.

3. Дослідити можливість використання хімічної активації, багат шарових, пористих та м'яких прошарків для прецизійного зварювання тиском.
4. Вивчити здатність до прецизійного зварювання тиском різнорідних металевих матеріалів з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів, які відбуваються в стику.
5. Дослідити перехідну зону зварних з'єднань та вивчити основні закономірності формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском.
6. Розробити технологічні основи отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань та нові технології прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів.

При цьому основною практичною задачею досліджень є саме розробка сучасної ефективної технології отримання якісних прецизійних нероз'ємних з'єднань металевих матеріалів.

Об'єкт досліджень – процеси отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском.

Предмет досліджень – закономірності формування структури та механічних властивостей прецизійних зварних з'єднань зварюванням тиском.

Методи досліджень

Для приготування шліфів використовували хімічне, електролітичне та іонне травлення. Дослідження структури та фазового складу отриманих з'єднань проводили за допомогою методів оптичної мікроскопії на мікроскопі «Neophot-32», растрової електронної мікроскопії (РЕМ) на мікроскопі: JSM-840 «JEOL», Японія. Мікрорентгеноспектральний аналіз (МРСА) розподілу елементів проводили на установці «Comebax» SX50, (Франція).

Елементний склад окремих ділянок поверхні зварних зразків вивчали методом енергодисперсійного аналізу на електронному мікроскопі JSM-35CF «JEOL», (Японія) з приставкою «INCA-350», (Великобританія).

Для дослідження дифузійних процесів у зоні з'єднання використовували метод авторадіографії та радіоактивні ізотопи ^{60}Co , ^{63}Ni , які наносили гальванічним шляхом на поверхні, що підлягають зварюванню. Обробку авторадіограм проводили на мікрофотометрі МФ-4.

Моделювання процесу нагріву та аналіз напруженого стану з'єднань здійснювали за допомогою комплексного програмного пакету ANSYS 11.0, (підстава для використання: договір про передачу ліцензованого програмного забезпечення між Чернігівським національним технологічним університетом та ЗАТ «Кадфем Си-Ай-Ес» від 2010 року). Моделювання процесів пружно-пластичного деформування матеріалів при зварюванні тиском здійснювали на спеціалізованому програмному забезпеченні «Weldpredictions» спільно з ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

Дифузійне зварювання у вакуумі виконували на установках типу УВН і П-115 з радіаційною системою нагріву та У-394М з електронно-променевим джерелом нагріву зразків. Електроконтактне зварювання виконували на машині для точкового зварювання МТ-1216 та для стикового зварювання МС-802У. Іонну обробку проводили на модифікованій установці для вакуумного напилення УРМ-3.

Механічні випробування зварних з'єднань на розтяг проводили при кімнатній температурі на стандартних зразках. Дослідження міцності зварних з'єднань на зріз проводили на зразках розміром $5 \times 5 \times 10$ мм на машині УМ-5.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Отримали подальшого розвитку теоретичні основи твердофазного з'єднання та встановлено закономірності формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском. Показано, що основною вимогою для забезпечення прецизійності є перетворення в процесі зварювання ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину за рахунок: 1 – локалізації теплової та механічної енергії в стику; 2 – модифікації поверхонь; 3 – використання проміжних багаточарових, пористих наноструктурованих прошарків та хімічно

активних шарів; 4 – використання поверхневих фізико-хімічних процесів, які протікають самовільно. Створено методологію управління процесом перетворення ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину.

2. Вперше розроблено термомеханічну модель процесу прецизійного зварювання, яка дозволяє оцінити вплив основних факторів на прецизійність зварних з'єднань та обрати режими зварювання ($T_{зв}$, $P_{зв}$ та $t_{зв}$). Розроблено методику розрахунку, яка дозволяє на основі вихідних даних про матеріал деталі, що зварюється, та температуру нагріву отримувати максимально можливий тиск та час зварювання для забезпечення допустимого рівня деформації основного матеріалу.

3. Вперше встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової та механічної енергії в стику при електроконтактному зварюванні є застосування перфорованого прошарку з матеріалу, що має високий електричний опір. Показано, що використання проміжного перфорованого прошарку з титану при електроконтактному зварюванні твердих сплавів дозволяє локалізувати температуру в стику, яка в 2 рази більше, ніж при безпосередньому зварюванні цих сплавів без використання прошарку, та забезпечити утворення якісних нероз'ємних з'єднань.

4. Вперше встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової енергії в стику та активації поверхонь при електроконтактному зварюванні є використання тонких прошарків зі зварювального матеріалу. Показано, що застосування тонких прошарків із зварювального матеріалу дозволяє підвищити прецизійність та міцність зварних з'єднань. Показано, що міцність зварних з'єднань з алюмінію отриманих електроконтактним зварюванням через тонкі прошарки з алюмінію складає 95-100% міцності основного металу при відносній деформації основного матеріалу порядку 2 %.

5. Отримало подальшого розвитку дослідження процесу хімічної активації поверхонь та розроблено технологічні рекомендації щодо його застосування для прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів.

Вперше встановлено, що отримання прецизійного зварного з'єднання ($\varepsilon \leq 1\%$) при зварюванні тиском у твердій фазі вуглецевої сталі визначається механічною підготовкою поверхонь, параметрами процесу ($T_{зв}$, $P_{зв}$ та $t_{зв}$) і наявністю проміжного шару вуглеводневої суміші, що наноситься до зварювання на поверхні. Вдосконалено технологічний процес видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні за рахунок використання нового засобу створення рідких металевих прошарків шляхом внесення в контакт суміші складу $Na_2SiO_3-HCl-Mg$.

б. Отримало подальшого розвитку дослідження поверхневих фізико-хімічних процесів (адсорбція, автовакуумування, розчинення, самоочищення від оксидних плівок, сублімація та конденсація). Вперше встановлено ефективність використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском у вакуумі різнорідних металів. Показано, що конденсований шар одного з металів, що зварюється, на поверхні іншого дозволяє підвищити на 15-20 % міцність з'єднань при інших рівних умовах.

Практична значимість отриманих результатів

Створено наукові підходи та технологічні основи прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів.

Встановлені закономірності впливу технологічних параметрів на особливості формування прецизійних зварних з'єднань. Розроблено методику розрахунку параметрів процесу зварювання тиском в залежності від допустимого рівня деформації основних матеріалів.

Розроблена нова типова загальна технологія прецизійного зварювання тиском різних матеріалів, ефективність якої було апробовано при виготовленні: твердосплавного інструменту при зварюванні алмазно-твердосплавних пластин з твердим сплавом; високоміцних інтерметалідних багат шарових пластин на основі інтерметаліду – алюмініду титану при зварюванні алюмінію з титаном; прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення з алюмінієвих сплавів при дифузійному зварюванні.

Отримані результати можуть бути використані при розробці технологій виготовлення різних прецизійних деталей та вузлів приладів і механізмів з однорідних та різнорідних матеріалів.

Особистий внесок здобувача

Автором сформульована мета, задачі, висновки, розроблена постановка досліджень. Експериментальні дослідження по прецизійному зварювання тиском металевих матеріалів проведені автором безпосередньо. Вивчення структури зварних з'єднань та узагальнення результатів досліджень проводилися за участю автора.

При розробці технічних рішень брали участь співробітники кафедри зварювального виробництва та АПБК Чернігівського національного технологічного університету, Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, що отримало відображення в спільних статтях і патентах.

У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора відображено в авторефераті дисертації.

Апробація результатів дисертації

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних і національних галузевих науково-технічних конференціях: «Зварювання та споріднені технології» (м. Київ, Україна ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2005, 2007, 2013 рр.); «Сварка и родственные процессы в промышленности» (м. Київ, Україна, 2006 р.); «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (м. Москва, МАТІ, Росія, 2008 р.); «Spanish Technical Sessions on Welding» (м. Мадрид, Іспанія, 2010 р.); «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, ЧНТУ, Україна, 2011, 2012, 2016 рр.); «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития» (м. Краматорськ, ДГМА, Україна, 2012 р.); «Университетская наука-2014» (м. Маріуполь, ПГТУ, Україна, 2014 р.); «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» (м. Миколаїв, НУК, Україна, 2014 р.); «Ukraine – EU. Modern

technology, business and law» (Словаччина, м. Кошице, 2015 р., м. Братислава, 2016 р.); «International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)» (м. Київ, НТУУ «КПІ», Україна, 2016 р.); «International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering «YSF-2016»» (м. Харків, ІРЕ ім. О.Я.Усикова, Україна, 2016 р.)

Публікації

За темою дисертації оприлюднено 52 роботи: 25 статей у фахових виданнях, з яких 11 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних (в т.ч. Web of Science, Scopus, Index Copernicus та інших) та 4 у фахових виданнях інших держав; 21 у збірниках наукових праць і матеріалах конференцій (матеріали 2 конференцій входять до наукометричної бази даних Scopus); отримано 6 патентів України.

Структура та обсяг роботи

Дисертаційна робота складається з вступу, 9 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури. Робота викладена на 354 сторінках машинописного тексту, містить 147 рисунків, 36 таблиць, список літератури з 253 найменувань на 27 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ ОДНОРІДНИХ ТА РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проблему отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском найбільш яскраво демонструє дослід К. К. Хренова та Г. П. Сахацького [1], [2]. Зразки з алюмінію, міді, свинцю й цинку здавлювали в міцній розігрітій обоймі (рис. 1.1 [1]). Пластична деформація зразків в такій обоймі була ускладнена.

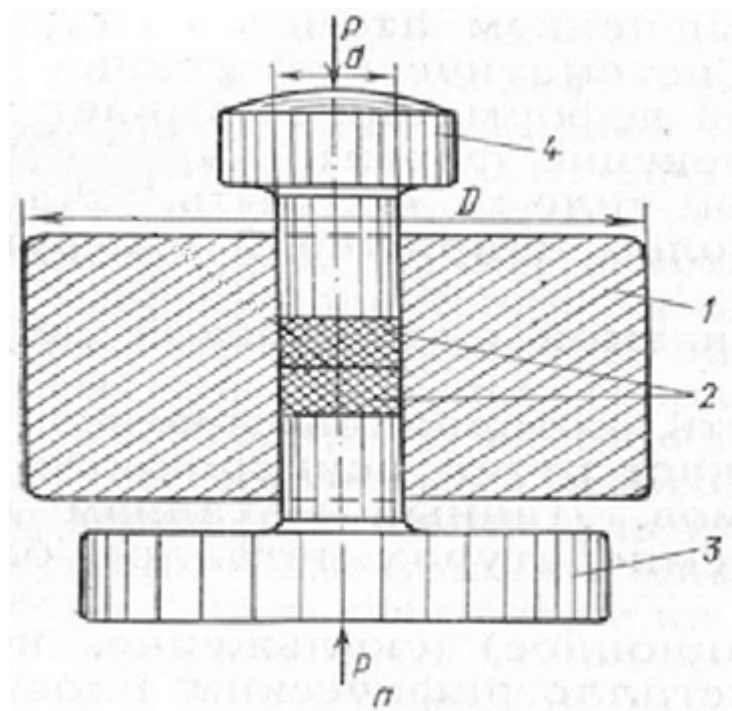


Рисунок 1.1 – Схема проведення дослідження по вивченню ролі пластичної деформації при зварюванні тиском [1]: 1 – обойма, 2 – зразки, що зварюються, 3,4 – верхній і нижній пуансони

Питомий тиск стискання зразків становив 5000 МПа, але деформації зразків у місцях їх контакту та утворення з'єднання не спостерігалось. Однак, якщо в місці контакту даних металів, створювали вільний простір, то це

забезпечувало протікання пластичної деформації, а монолітне нероз'ємне з'єднання утворювалося при тисках в 4-20 разів менших [2].

Таким чином, було доведено, що вирішальним для утворення нероз'ємних з'єднань при всіх способах зварювання в твердій фазі, є деформаційний вплив на матеріали, що зварюються.

У зв'язку з вищенаведеним, вирішення проблеми отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском є складним завданням, що потребує проведення глибоких теоретико-експериментальних досліджень, в тому числі й проведення попереднього детального літературного аналізу:

- процесів відповідальних за утворення зварного з'єднання;
- способів активації поверхонь та інтенсифікації процесу зварювання тиском;
- способів обмеження деформації деталей при зварюванні тиском;
- основних процесів та факторів, які можуть впливати на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском.

1.1 Аналіз процесів, відповідальних за утворення зварного з'єднання

Зварювання без розплавлення – це насамперед взаємодія поверхонь і тонких приповерхневих шарів твердих тіл. Тому властивості поверхонь, особливості їхньої будови й рельєфу істотно впливають на формування з'єднання при дифузійному зварюванні у вакуумі та інших способах зварювання тиском.

Фізико-механічні й хімічні властивості тонкого приповерхневого шару твердого тіла відрізняються від властивостей його в об'ємі. Це обумовлено аномальними властивостями поверхневих атомів у кристалічній решітці твердих тіл; наявністю на поверхні адсорбованих газів, оксидних і органічних плівок. Експериментальні дослідження, проведені на міді, нікелі,

молібдені й інших матеріалах показали, що квадрат амплітуди коливань поверхневих атомів у напрямку, нормальному до поверхні, удвічі, а в паралельному їй на 30% вище, ніж в атомів усередині кристала. Зі збільшенням відстані від вільної поверхні амплітуда коливань атомів швидко стабілізується. Уже в п'ятому від поверхні атомному шарі коливання практично аналогічні коливанням атомів в об'ємі [3]. Встановлено також, що в тонкому приповерхньому шарі пружні викривлення кристалічної решітки істотно вище, ніж в об'ємі, тому вище щільність вакансій біля поверхні. Як наслідок, швидкість дифузії в цій області значно вище, ніж у внутрішніх шарах металу. Пластична деформація поверхневого шару приводить до підвищення щільності дефектів кристалічної структури (вакансій, дислокацій). У результаті істотно прискорюється дифузія за механізмом вакансії (знижується енергія активація цього процесу).

1.1.1 Природа утворення з'єднання при зварюванні тиском

Про природу утворення з'єднань у твердому стані існує цілий ряд гіпотез: плівкова, рекристалізаційна, енергетична, дислокаційна, електронна, дифузійна й інші [4].

В гіпотезах, які існують, по різному пояснюється процес формування з'єднання, зокрема дається неоднакове значення впливу реальної структури поверхонь, що з'єднуються.

Для інтерпретації фізичних явищ, які приводять до схоплення при контактуванні твердих тіл, запропоновані чотири моделі, засновані на врахуванні міжфазної взаємодії, розчинення, електростатичної взаємодії і крихкого руйнування [5].

Модель міжфазної взаємодії, заснована на врахуванні в енергетичному балансі зникнення вільних поверхонь твердих тіл, визначає лише рушійні сили процесу схоплення і тому не може бути використана для кількісного

оцінювання схоплення металів навіть з ювенільними поверхнями, атоми яких мають ненасичені зв'язки [5].

Модель розчинення побудована на термодинамічних критеріях змішування фаз, що взаємодіють, у відповідності до діаграм стану. Вона також не дозволяє встановити принципову можливість і температурну область схоплення через наступну причину. Відомо, що процеси схоплення твердих тіл відбуваються при взаємодії між тонкими приповерхневими шарами, енергетичні і структурні характеристики яких при будь-якому стані поверхні (ювенільна, покрита оксидом, чи з адсорбованими атомами іншої речовини) суттєво відмінні від властивостей в об'ємі твердого тіла. В зв'язку з великою різницею в електронній будові атомів, статичних та динамічних параметрах решітки ці приповерхневі шари на глибині дебаївського радіуса екранування мають принципово різні кількісні співвідношення, які характеризують здатність до взаємного розчинення речовин і його граничні обмеження.

Багаточисельні експерименти показали, що схоплення можливе між матеріалами з доволі великою різницею в атомних радіусах, яка значно перевищує граничні значення для об'єму в умовах рівноваги [5].

Важливим є також врахування хімічного стану поверхні. Зокрема, при взаємодії металічних поверхонь, які покриті хімічно адсорбованим киснем, для пари Cu-Mo, яка у відповідності до рівноважної діаграми являється не змішуваною, з врахуванням ізобарно-ізотермічних потенціалів комплексів хемосорбції на вказаних металах можна зробити висновок про те, що утворення металічних зв'язків являється термодинамічно дозволеним процесом. Експериментальні дослідження підтверджують можливість з'єднання міді з молібденом в твердій фазі.

Відповідно до *моделі електростатичної взаємодії*, яка заснована на врахуванні дисперсійних сил Ван-дер-Ваальса і електростатичних сил, між атомами поверхонь, що контактують, не відбуваються обмінні процеси електронної взаємодії. Однак такий підхід не можна вважати правомірним,

оскільки слабкі дисперсійні і електростатичні сили не можуть забезпечити отримання з'єднання, міцність якого є співрозмірною з міцністю одного з матеріалів, що з'єднуються.

Крім того, в силу особливостей електронної будови металів при контактуванні ювенільних поверхонь неможливо уявити ситуацію, при якій не буде відбуватися утворення міжатомних зв'язків.

Очевидним є те, що міцні хімічні зв'язки забезпечують високі коефіцієнти адгезії між матеріалами різної природи, які можна експериментально спостерігати. Це підтверджується порівнянням коефіцієнтів адгезії металів у вакуумі, в газах, які фізично і хімічно адсорбуються. При випробуваннях в середовищі хімічно адсорбованих газів коефіцієнт адгезії різко знижується. Крім того, без утворення в зоні контакту міцних хімічних зв'язків неможливі подальші процеси релаксаційного характеру, такі, як дифузія і пов'язані з нею рекристалізація, утворення нових фаз та інше [5].

Модель крихкого руйнування, призначена для пояснення явища схоплення, основана на врахуванні енергії, яка необхідна для розповсюдження тріщини через середовище, яке має найнижчу поверхневу енергію.

Основною перевагою вказаної моделі, на відміну від раніше розглянутих, є те, що в ній міцність схоплення асоціюється з енергією розповсюдження тріщини вздовж першої площини контакту шляхом розриву атомних зв'язків, який відбувся в результаті напружень на кінцях тріщини. Тому модель крихкого руйнування є спробою підходу до явища схоплення з позиції хімічної кінетики [5].

Основою *рекристалізаційної гіпотези* є той факт, що при великих деформаціях температура рекристалізації металів може суттєво знижуватись.

Згідно цієї гіпотези основним процесом, який обумовлює утворення з'єднання при холодному зварюванні, являється рекристалізація у зоні контакту.

Однак перед тим як стане можливим утворення спільних зерен в зоні з'єднання, повинна сформуватися орієнтована в площині контакту міжзеренна границя, яка має всі ознаки, які властиві границі зерен в об'ємі металу. Іншими словами, рекристалізаційна гіпотеза розглядає процеси структурних змін в зоні з'єднання після того, як завершилося схоплення контактних поверхонь.

Згідно з дифузійною теорією вважається, що існує зона взаємної дифузії мінімальної ширини, яка забезпечує отримання високоякісного з'єднання, а збільшення ширини зони взаємної дифузії повинне супроводжуватись покращенням механічних властивостей з'єднання. Однак практика з'єднання металів в твердому стані, особливо різнорідних, приводить до протилежного результату, що змінює уявлення про переважаюче значення дифузійних процесів в утворенні з'єднання.

Дифузійні процеси, що відбуваються при будь-якому способі зварювання без розплавлення матеріалів, звичайно, впливають на формування з'єднання, однак являються супроводжуваними, а процеси активації і схоплення контактних поверхонь являються основними в утворенні з'єднань [5].

Відповідно до *електронної гіпотези* безпосереднього контакту матеріалів, при якому відстань між атомами поверхонь, що з'єднуються, рівна по порядку величини параметру кристалічної решітки, що не достатньо для утворення схоплення. Здатність до схоплення полікристалічних металів відповідає їхньому певному стану. Для проявлення схоплення необхідно, щоб енергія атомів, які знаходяться в металах, що контактують, перевищила певний для кожного металу рівень, який можна назвати енергетичним порогом схоплення. При цьому між поверхневими шарами матеріалів виникають металічні зв'язки, і їх поверхня розділу зникає. В даній гіпотезі вперше запропоновано розглядати процес утворення з'єднання в енергетичному аспекті, користуючись поняттями активованого стану і активного комплексу [5].

Таким чином, природа й механізм отримання з'єднання досить складні й складаються з комплексу наступних стадій: приведення в контакт поверхонь, що зварюють, ліквідації поверхневих оксидних і адсорбованих плівок, активації поверхневих шарів при деформуванні матеріалів, об'ємних дифузійних процесів, рекристалізації й т.д. Така багатостадійність процесу зварювання, перекриття окремих його стадій, свідчить про його складність і неможливість розгляду механізму зварювання з якої-небудь однієї точки зору.

Теорія процесу утворення зварного з'єднання, розвинена в роботах М. Ф. Казакова, Е. С. Каракозова, Ю. Л. Красулина, М. Х. Шоршорова ґрунтується на трьохстадійності процесу зварювання. І на сьогоднішній день більшість дослідників сходяться у твердженні, що утворення нероз'ємних з'єднань при зварюванні в твердій фазі зобов'язано виникненню хімічних зв'язків і розділяють весь процес зварювання на три стадії [6]:

- 1 - фізична (механічна, електростатична й ван-дер-ваальсова) взаємодія, що свідчить про утворення фактичного контакту поверхонь;
- 2 - хімічна взаємодія (схоплювання) при необхідному рівні активації поверхонь;
- 3 - об'ємна взаємодія в контактній зоні, обумовлена дифузійними процесами та супроводженням релаксацією внутрішніх напружень.

При цьому строгий розподіл процесу на стадії справедливий лише для окремих мікроділянок контактуючих поверхонь.

Конюшковим Г. В. [4] запропонована кінетична схема процесу дифузійного зварювання (рис. 1.2).

Використання кінетичного підходу дозволяє з урахуванням природи матеріалів, що зварюються, вибирати технологічні методи впливу, які інтенсифікують ті або інші фізико-технологічні процеси в зоні контакту на кожній зі стадій.

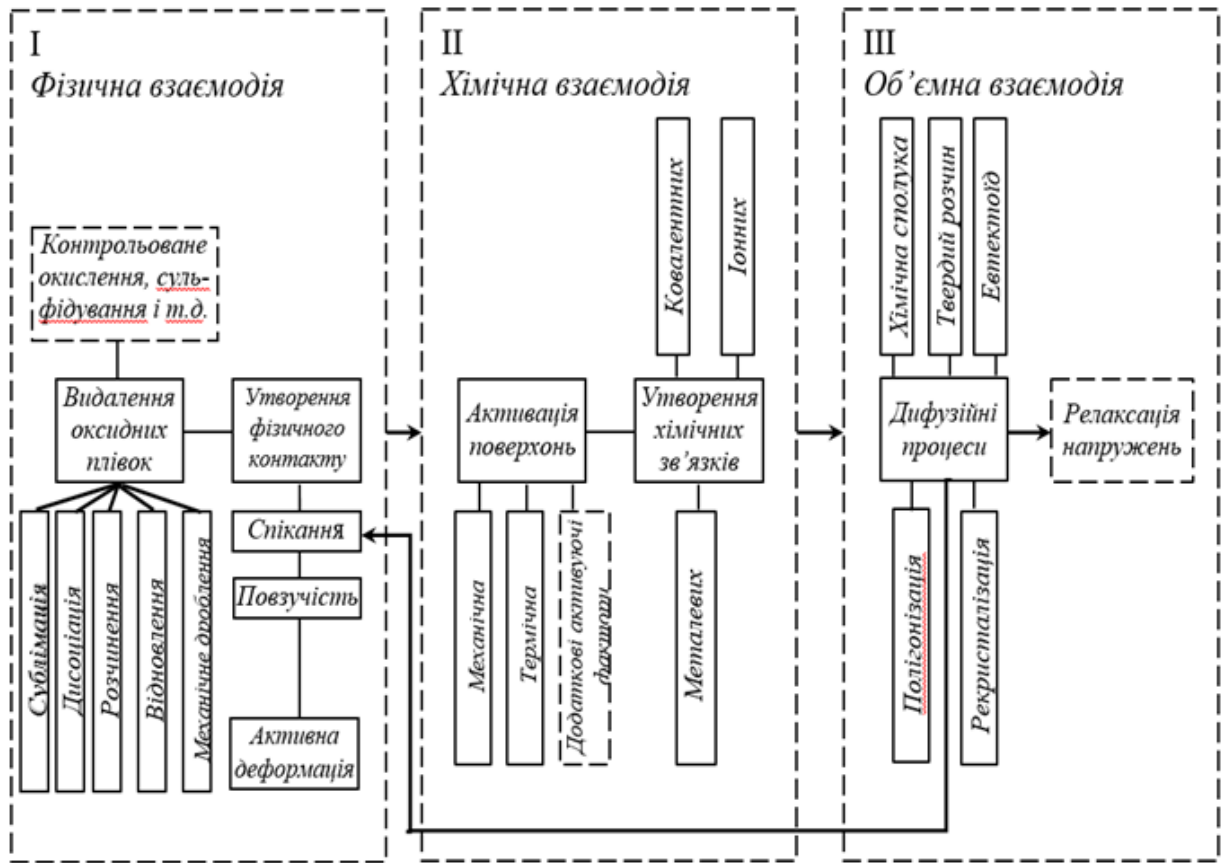


Рисунок 1.2 – Кінетична схема процесу дифузійного зварювання [4]

На першій стадії ДЗВ поверхні, що з'єднуються, звільняються від адсорбованих і оксидних плівок, і формується фізичний контакт між ними. Поняття фізичного контакту означає, що атоми двох взаємодіючих фаз перебувають на такій відстані, при якій може відбутися (але не відбувається) валентна міжатомна взаємодія. При нагріванні поверхонь, що зварюються, у вакуумі поступово розкладаються та сублімують жири й молекули газів. Найбільші труднощі представляє видалення з поверхні хімічно адсорбованих газів і оксидних плівок. Сублімація, дисоціація, розчинення, відновлення й механічне дроблення є можливими шляхами очищення від оксидних плівок металевих поверхонь. До видалення оксиду може приводити й випаровування металу з його поверхні.

При зварюванні приведених у контакт деталей, видалення оксидних плівок іде переважно за рахунок розчинення їх в основному металі або

відновлення елементами, що входять до металу (сплаву). Кінетика процесу розчинення оксидів визначається швидкістю дифузії кисню в метал при температурі зварювання, а межі насичення металу киснем – розчинністю в ньому останнього.

Процес механічного видалення плівки оксидів із зони контакту може відігравати визначальну роль при ДЗВ у випадках, коли мають місце особливо великі розходження в пластичних характеристиках, твердості, термічному розширенні металу і його оксиду.

Необхідно відзначити, що видалення оксидів найчастіше не призводить до одержання ювенільних металевих поверхонь, тому що на них може зберігатися моноатомний шар хемосорбованих газів [7].

Фізичний контакт, при всіх способах зварювання тиском, утворюється в результаті мікропластичної деформації. У загальному випадку, ріст площі фактичного контакту поверхонь відбувається протягом кількох послідовних етапів: активна деформація, повзучість й усунення нещільностей, що збереглися в площині контактування [4], [8].

На початкових етапах зварювання у твердій фазі фізичний контакт утворюється не по всій поверхні та значною мірою визначається мікрорельєфом поверхонь, що зварюються. У початковий момент прикладання навантаження коли поверхні контактують по окремих виступах із сумарною площею не більше 1-2 % від площі всієї поверхні, напруження, що діють у контакті, значно перевищують границю текучості й розвивається активна пружна-пластична деформація мікровиступів. Надалі, відповідно до співвідношення [9]:

$$P = \sigma \cdot S_{\phi}, \quad (1.1)$$

де P – прикладене зовнішнє навантаження,

σ – діючі напруження в контакті,

S_{ϕ} – площа фактичного контакту.

збільшення площі фактичного контакту супроводжується релаксацією діючих напружень. У результаті швидкість деформації через кілька секунд різко падає й процес переходить у стадію неусталеної повзучості (рис. 1.3). На цьому етапі пластична деформація розвивається переважно в приконтатній зоні й залежить від температури процесу і прикладеного тиску. При цьому площа контакту може досягати 40-75 % усієї поверхні з'єднання. Подальший розвиток фактичного контакту поверхонь пов'язаний із процесом усталеної повзучості матеріалу [10].

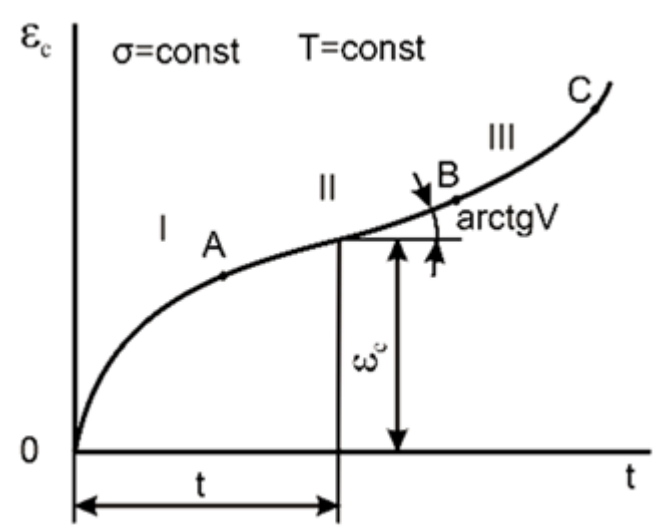


Рисунок 1.3 – Крива повзучості [10]: I – стадія неусталеної повзучості; II – стадія усталеної повзучості; III – стадія руйнування

Автори роботи [4], розглядаючи повзучість із позиції представлень про термічно активований рух дислокацій у силовому полі зовнішніх сил, відзначають визначальний вплив на швидкість цього процесу питомого тиску, температури, концентрації дефектів кристалічної будови, атомів домішок і легуючих елементів.

Як правило, на етапі повзучості відбувається макропластична деформація деталей, що на думку авторів роботи [11] є критерієм завершення першої стадії процесу.

В умовах дифузійного зварювання швидкість усталеної повзучості змінюється в межах 0,01...5 % у хвилину. Тривалість етапу формування

фізичного контакту залежно від температури процесу й тиску становить від одиниць до десятка хвилин. При певних значеннях параметрів процесу (тиску, температурі) швидкість усталеної повзучості може наближатися до нульового значення. У цьому випадку формування контакту відбувається тільки на етапі активного деформування й, отже, тривала ізотермічна витримка не приведе до приросту площі контактування по розглянутому механізмі повзучості. На стадії повзучості площа контакту звичайно не перевищує 90-95% площі з'єднання. Наявність мікронесуцільностей на етапі формування контакту навіть при значній макропластичній деформації по даним [4] слід визнати закономірним. Зарощування мікронесуцільностей і пор у контакті однорідних і різнорідних матеріалів відбувається по механізмі дифузійного спікання в основному на стадії об'ємної взаємодії.

З ростом температури процесу зварювання, тобто в міру збільшення швидкості мікропластичної деформації, повний фізичний контакт утворюється при меншій пластичній деформації. Підвищення температури зварювання інтенсифікує термічно активуємий процес мікропластичної деформації металу, утворення фізичного контакту і дифузії кисню з приповерхневого шару в глиб металу. Завдяки дифузії зменшується опір пластичної деформації металу в зоні з'єднання, збільшується швидкість мікропластичної деформації і створюються сприятливі умови для розвитку деформаційного рельєфу. Тому при підвищенні температури зварювання фізичний контакт утворюється з більшою інтенсивністю.

Зварювальний тиск також відіграє важливу роль у розвитку фізичного контакту. Експериментальні дослідження показують, що при ізотермічному нагріванні зразків без прикладання зовнішнього тиску формування фізичного контакту відбувається в результаті пластичної течії металу під дією сил поверхневого натягу або дифузійного масообміну. Збільшення зварювального тиску сприяє мікропластичній деформації мікровиступів і розвитку деформаційного рельєфу.

Таким чином, утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні пов'язано з протіканням сукупності складних (взаємопов'язаних та конкуруючих один з одним) процесів [5].

Сили зчеплення, які виникають при формуванні фізичного контакту поверхонь (дисперсійні, електростатичні), не можуть забезпечити міцного з'єднання поверхневих атомів. Тому на другій стадії процесу, виходячи з кінетичної схеми (рис. 1.2) після утворення фізичного контакту потрібна активація контактних поверхонь, що є необхідною та достатньою умовою утворення зварного з'єднання у твердій фазі.

У результаті активації поверхонь, що утворили фізичний контакт, відбувається міжатомна взаємодія, при якій між атомами поверхонь, що з'єднують, утворюються металеві, ковалентні або іонні зв'язки (залежно від кристалічної будови й хімічного складу матеріалів, що з'єднуються), тобто відбувається схоплювання.

Механізми активації можуть бути різні: *термічна* (відбувається вкрай рідко); *деформаційна* (пластична деформація й повзучість приповерхніх шарів матеріалів, що з'єднують, призводять до генерування дефектів кристалічної решітки (дислокацій, вакансій), переміщенню й виходу їх на поверхню); *механічна* (механічний вплив здатний частково або повністю зруйнувати шари оксиду або хімічно адсорбованого кисню); *хімічна* (взаємодія шару оксиду або хімічно адсорбованого кисню з якою-небудь речовиною за механізмом відновлювальної реакції, у результаті якої оксиди металів відновлюються до чистого металу) [12], [13].

При зварюванні однорідних металів перша й друга стадії практично зливаються в одну, тому що активація обох контактних поверхонь починається вже в процесі їх зближення при зминанні окремих мікровиступів за рахунок спільної пластичної деформації. При зварюванні різнорідних металів на цій стадії відбувається утворення активних центрів на поверхні більш твердого з металів, що з'єднуються. Наявність цього періоду і його тривалість обумовлені особливістю пластичної деформації більш твердого з

матеріалів, що зварюються. У роботі [14] показано, що фактичний контакт у цьому випадку формується в процесі деформування більш м'якого з матеріалів, що з'єднують, а можливість хімічної взаємодії поверхонь визначається умовами активації більш твердого з них. Таким чином, чим нижче пластичність одного з матеріалів, що з'єднують, тим інтенсивніше повинен бути напружений стан у контакті або вище гомологічна температура процесу ($T_{зв}/T_{пл}$) за умови, що для м'якого металу вона залишається менше одиниці.

Аналізуючи можливі механізми активації, стає ясно, що провідна роль у реалізації другої стадії утворення з'єднання, як і при утворенні фізичного контакту, віддається пластичній деформації приконттактних об'ємів матеріалів, що зварюються. Однак активація шляхом пластичного деформування не є єдиною можливою при зварюванні в твердій фазі. Оскільки активний центр – це атом (іон), що має вільні зв'язки, той будь-який вплив, що призводить до розриву зв'язків поверхневих атомів з атомами (молекулами) навколишнього середовища, приводить до активації поверхні. Прикладом можуть служити роботи А.В. Люшинського [5] по застосуванню легко відновлюваних ультрадисперсних порошкових прошарків з форміатів нікелю, міді, кобальту. Різні види опромінення поверхонь твердого тіла (нейтронами, α – частками, γ – променями, бомбардування електронами) приводить до утворення парних дефектів Френкеля, скупченню крапкових дефектів, петель дислокацій і інших викривлень кристалічних решіток.

У результаті активації поверхонь, що зварюються, відбувається валентна міжатомна взаємодія, внаслідок чого між атомами утворюються хімічні зв'язки. Цей процес називається схоплюванням. Схоплювання – бездифузійний процес. При схоплюванні міжатомна взаємодія може поширюватися від площини контактування на глибину порядку декількох параметрів кристалічних решіток.

Стадія об'ємної взаємодії настає з моменту утворення активних центрів на поверхнях, що з'єднуються. Протягом цієї стадії відбувається

розвиток взаємодії матеріалів, що з'єднуються, як у площині контакту з утворенням міцних хімічних зв'язків, так і в об'ємі зони контакту. Цей процес протікає на активних центрах, зокрема дислокаціях. У площині контакту він закінчується злиттям дискретних центрів взаємодії, а в об'ємі – релаксацією напружень. Однак для забезпечення необхідної міцності з'єднання в цілому часто необхідно подальший розвиток релаксаційних процесів типу рекристалізації, а іноді гетеродифузії.

При зварюванні однорідних металів критерієм закінчення третьої стадії процесу може служити рекристалізація, що приводить до утворення загальних зерен у зоні з'єднання. При зварюванні різнорідних металів необхідність розвитку або обмеження гетеродифузії визначається діаграмою стану, тобто властивостями дифузійної зони фаз, які утворюються при цьому.

Залежно від температури зварювання дифузійні процеси впливають на рекристалізацію й утворення перехідної зони. При значній відмінності фізичних і хімічних властивостей матеріалів, що зварюють, ця зона може бути зоною перебудови хімічних зв'язків і з'єднання [15].

Таким чином утворення з'єднання при зварюванні тиском відбувається в результаті розвитку складних і взаємозалежних фізико-хімічних процесів. Загальним для всіх способів зварювання тиском є те, що з'єднання утворюється в результаті пластичної деформації приконттактних об'ємів, яку супроводжує накопичення макропластичної деформації деталей, що зварюються. Зрозуміло, що умови протікання деформації приконттактних об'ємів мають визначати особливості процесу утворення з'єднання й властивості зварного з'єднання в цілому.

За умови коли інтенсивність дифузійних процесів мала, то утворення зварного з'єднання закінчується тільки схопленням контактних поверхонь (низька температура, малий час зварювання).

У випадку, коли тривалість і температура процесу, достатні для інтенсивного розвитку дифузійних процесів, у зоні з'єднання утворюються загальні зерна або нові фази. При зварюванні однорідних металів такі

з'єднання можуть мати в'язкість, пластичність і високотемпературну міцність на рівні цих показників для основного металу. При зварюванні різнорідних металів властивості зварних з'єднань при цьому будуть визначатися властивостями дифузійних зон.

Таким чином, природа утворення з'єднання однакова незалежно від характеру й інтенсивності деформаційного або термо-деформаційного впливу. Відмінності полягають у кінетиці окремих стадій процесу зварювання, на яку впливають температура, характер і інтенсивність деформування матеріалів, ступінь локалізації теплової та механічної енергії в стику, а також особливості розвитку релаксаційних процесів у зоні з'єднання.

Отже, для отримання з'єднання в твердій фазі як однорідних так і різнорідних матеріалів визначальною є активація поверхонь матеріалів протягом кожної стадії процесу [15], [16].

Виходячи з кінетичної схеми (рис. 1.2) процесу дифузійного зварювання можна визначити технологічні прийоми, застосування яких може активувати поверхні та інтенсифікувати фізико-хімічні процеси при одержанні прецизійних зварних з'єднань різних матеріалів.

Важливість вибору таких технологічних прийомів визначається тим, що при прецизійному зварюванні окремих груп різних матеріалів (які важко деформуються, які мають на поверхні термодинамічно міцні оксидні плівки, які суттєво відрізняються за своїми фізико-хімічними властивостями, мають обмежену розчинність, низьку дифузійну рухливість атомів, високу пластичність тощо) їх властивості ускладнюють установлення фізичного контакту поверхонь, що з'єднуються, утворення міжатомних зв'язків між поверхневими атомами, а також суттєво сповільнюють розвиток об'ємних процесів дифузії й рекристалізації, необхідних для формування монолітного з'єднання.

1.1.2 Аналіз процесів, які відбуваються у поверхневому шарі металу при нагріванні у вакуумі

Відомо, що атомній взаємодії перешкоджає оксидний шар, що перебуває на поверхні контактуючих металевих поверхонь. В умовах вакууму ($1,33 \cdot 10^{-6}$ - $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па) і нагрівання ($0,3$ - $0,7 T_{пл}$) пари води, газові молекули й жирові плівки зникають із металевої поверхні. Таким чином, від того, що буде відбуватися при нагріванні у вакуумі із шаром оксидів буде залежати зварюваність металів у твердій фазі як в однорідній, так і в різнорідній комбінаціях [17].

При нагріванні у вакуумі багато металів мають блискучий вигляд поверхні. Однак, це не свідчить про те, що поверхня повністю звільняється від оксидів, тому що, по-перше, при товщині менше 5 нм плівка оксидів стає безбарвною й прозорою, а по-друге, у процесі поверхневої рекристалізації утворюються грані, які відбивають світло, що й створює враження повного очищення поверхні. Оксидні плівки при товщині більше 5 нм починають набувати колір через інтерференцію світла в них [7].

Тонкий оксидний шар на поверхні металу сам по собі має дуже складну будову, яка визначається складом металу і навколишнім середовищем. Так у ніобію є три оксиди (NbO , NbO_2 , Nb_2O_5), а окалина на залізі має шарувату будову й може складатися залежно від умов із трьох шарів (FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3), двох шарів (FeO , Fe_3O_4 або Fe_2O_3) або одного шару (FeO або Fe_3O_4) [18]. Оксиди тугоплавких металів мають відносно невисокий питомий об'єм у порівнянні з питомим об'ємом основного металу (особливо W і Mo). Це викликає відшаровування й розтріскування оксидів, що сприяє більш швидкому очищенню поверхонь при нагріванні у вакуумі. Структура оксидів і міцність зчеплення мають різний характер для металів. Найбільш міцно пов'язані з металом оксиди Ti , Zr , Hf , Nb , Ta [19], [20].

Розглянемо процеси, які відбуваються у поверхневому шарі металу при нагріванні у вакуумі: *дисоціація оксиду; сублімація оксиду; розчинення оксидів; відновлення оксидів; механічний вплив.*

Найбільш імовірним процесом *термічної дисоціації* при дифузійному зварюванні у вакуумі є розкладання водяної пари й металу на нагрітій поверхні металу за реакціями: $2\text{H}_2\text{O}=2\text{H}_2+\text{O}_2$; $\text{CH}_4=2\text{H}_2+\text{C}$. Утворені в результаті реакції, водень, вуглець і кисень, реагуючи з нагрітою поверхнею металу, сприяють протіканню процесів, які ми розглянемо нижче.

Дисоціація оксиду може мати місце, якщо парціальний тиск кисню середовища менше пружності дисоціації оксиду. Розрахунки для жароміцних сплавів на Ni основі показують, що у вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3}$ - $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па дисоціація не можлива [21]. У роботах [22], [23] стверджується, що є ймовірність дисоціації оксидів тільки таких елементів як: Pt, Ir, Rh, Ru, Os, Cu, Re, Ni, Co, Ge, Sn, Mo, W, Fe. Дисоціація інших елементів не може мати місце при будь-якому практично досяжному вакуумі.

Умовою сублімації є перевищення тиску насиченого пару оксиду над парціальним тиском парів того ж оксиду в газовій фазі. За даними робіт [21], [24] при нагріванні у вакуумі до $0,7 T_{\text{пл}}$ найбільш імовірна сублімація оксидів молібдену, ванадію й нікелю за реакцією: $\text{MeO}_{(\text{твердий стан})} = \text{MeO}_{(\text{газоподібний стан})}$. Якщо для ніобію така реакція можлива тільки при 2048 К [25], то для молібдену й вольфраму вона вже відчутна при 873 К і 1073 К. Оксид нікелю товщиною 3 нм при 1473 К випаровується за 13 секунд [21].

У роботі [26] встановлено, що швидкість випаровування багатьох оксидів може бути на кілька порядків вище або нижче швидкості випаровування самих металів. Так, наприклад, сам молібден починає помітно випаровуватися тільки при температурах вище 2000 К, а оксид MoO_3 з такою ж швидкістю випаровується вже при 650 К. У той же час нікель випаровується при температурі 1273 К, при якій його оксид NiO не випаровується.

Цікаво відзначити, що в космічному вакуумі з поверхні металів відбувається сублімація навіть дислокацій [19].

Розчинення оксидів проходить у дві стадії. Спочатку відбувається розрив хімічного зв'язку між атомами кисню й металу, а потім атоми кисню дифундують у глиб металу, тобто дифузія є вторинним процесом [27]. Розчинення оксидів шляхом дифузії кисню є характерним способом розкладання поверхневих оксидів для металів, що мають велику спорідненість до кисню (Ti, Zr, V, Nb). Так при нагріванні титану у вакуумі, вже починаючи з 973 К, оксидна плівка починає інтенсивно розчинятися в основному металі.

При взаємодії оксидів з деякими речовинами, які дають продукти реакції в газоподібному стані, може відбуватися *відновлення оксидів*. До таких речовин відносять вуглець і його хімічні сполуки типу вуглеводнів, водень, а також хлористий алюміній, фтористий амоній тощо. Розглянемо окремо кожний з можливих процесів відновлення.

Відновлення вуглецем. Процес відновлення плівки оксиду при нагріванні у вакуумі є основним для вуглецевмісних і низьколегованих сталей. При відновленні оксиду заліза (FeO) у газову фазу виділяються оксид вуглецю CO і діоксид вуглецю CO₂, а залізо відновлюється. Дуже важливим є висновок про те, що звільнені від кисню атоми компонентів, що входять до складу оксидів, є матеріалом для прискореного утворення загальних зерен у зоні контакту [24]. Реакція відновлення вуглецем з виділенням CO така: $m\text{Me}_{n/m}\text{O}_{2/m} + 2\text{C} = m\text{Me} + 2\text{CO}$. Реакція буде протікати вправо, якщо спорідненість вуглецю до кисню більша, ніж до металу. Діоксид вуглецю (CO₂) є результатом реакції взаємодії CO і оксиду: $2n\text{CO}_{(\text{газ})} + \text{MeO}_{2n(\text{тв})} = 2n\text{CO}_{(\text{газ})} + m\text{Me}_{(\text{тв})}$ [28].

Відновна здатність вуглецю при високих температурах пояснюється тим, що пружність дисоціації CO дуже мала й несуттєво змінюється з температурою. В таблиці 1.1 показано, що відновлення різних оксидів вуглецем найчастіше протікає в певному температурному інтервалі [29].

Згідно з роботою [28] температура відновлення вуглецем FeO визначена як 1329-1273 K і якщо вона знижується хоча б на 323 K, то відновлення йде дуже повільно.

Таблиця 1.1 – Температура початку й кінця відновлення різних оксидів вуглецем

Оксиди	Початок відновлення, K	Кінець відновлення, K
FeO	1073	1373
MnO	1273	1473
SiO ₂	1373	1773
Al ₂ O ₃	1573	1873
Cr ₂ O ₃	-	1473
MoO ₃	-	1473
V ₂ O ₅	1073	1473
ZrO ₂	1473	1773
TiO ₂	1273	1673
B ₂ O ₃	1273	1673

Як видно з таблиці 1.1, в умовах зварювання у твердій фазі процеси відновлення оксидних плівок на Fe, Mn, Cr, Mo, V можуть носити визначальний характер.

Таким чином, знаючи особливості газовиділення у вакуумі металів, ми можемо орієнтовно оцінювати механізм очищення поверхні від оксидних плівок. Інтенсивне виділення оксиду вуглецю повинно свідчити про інтенсивне очищення поверхні за механізмом відновлення оксиду вуглецем. У таблиці 8.2 на підставі ряду робіт наведені експериментальні відомості про газовиділення деяких металів при нагріванні у вакуумі.

Аналізуючи таблицю 1.2, можна зробити припущення про те, що для багатьох металів процес відновлення плівки оксидів вуглецем є найбільш імовірним. Однак, ніобій, тантал, титан і аустенітні сталі (18% Cr і 8% Ni)

явно не характеризуються процесом відновлення оксидної плівки вуглецем. Виділення CO із ніобію, найімовірніше, є наслідком реакції типу $[C]+[O]\rightarrow[CO_2]$, тобто реакція може слугувати як для видалення вуглецю, так і кисню, розчиненого в металі. У роботі [30] було знайдено, що вміст кисню після відпалу сплавів ВН-1 і ВН-2 при 2073 К протягом 10 годин знижувався з 0,05 до 0,005%. Таким чином, реакція з виділенням CO іде в ніобії не за шляхом відновлення оксиду вуглецем. Відзначимо, що водень із ніобію видаляється при 1173-1673 К і у вакуумі вище $1,33\cdot 10^{-1}$ Па продукти реакції Nb-H втрачають стабільність [25], [31].

Таблиця 1.2 – Газовиділення металів при нагріванні у вакуумі

Метал (сплав)	Гази, що виділяються	Основне газовиділення		Література
		газ	температура, К	
Mo*, W, Ni, Ст, V		CO	1273	[24], [31]
Сталь Ст.3	CO, CO ₂	CO	1473	[32]
Нікель	CO, CO ₂ , H ₂ , N ₂	CO ₂	1373-1473	[28]
Нікель	CO, CO ₂	CO	1073	[33]
Сталь X18H10T	CO, H ₂ , N ₂ , H ₂ O	H ₂	673	[34]
Ніобій	CO, H ₂ , N ₂	H ₂	1173-1523	[25], [19]
Титан	H ₂ , H ₂ O, CO+H ₂	H ₂	973-1073	[29]

* – Мо при $T \geq 1000$ виділяє CO, а при $T > 1200$ – N₂, при $T < 1000$ – H₂.

За даними роботи [31] при температурі 1273 К у вакуумі оксид вуглецю виділяється в основному з наступних металів: Fe, вуглецева сталь, Ni, ковар, Mo, W. Причому Ni виділяє менше CO порівняно з Fe і вуглецевою сталлю. Цікаво підкреслити той факт, що Fe покриті Ni виділяє CO не як Fe, а як Ni. Остання обставина може мати велике практичне значення при виборі проміжних прошарків у випадку зварювання у твердій фазі різнорідних металів.

Відновлення оксидом вуглецю. Відновлення відбувається з виділенням вуглекислого газу CO_2 . Оксид вуглецю, що виділився з металу, (див. таблицю 1.2) додатково призводить до часткового відновлення оксидів. Залежно від матеріалу, температури нагрівання й глибини вакууму спостерігається присутність у газовій фазі переважно або CO або CO_2 .

Однак, оксид вуглецю поряд з відновленням може призводити до утворення карбідів й оксидів. При $T > 773-873 \text{ K}$ можлива реакція [28]:
 $3\text{Fe} + 2\text{CO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2$; $\text{Ni} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{NiO} + \text{CO}$; $\text{TiO} + \text{CO} \leftrightarrow \text{Ti} + \text{CO}_2$;
 $\text{Ti} + 2\text{CO} \leftrightarrow \text{TiC} + \text{CO}_2$ і т.д. Присутній при вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3} - 1,33 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ метан (CH_4) розкладається на нагрітій поверхні металу за реакцією $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$, що може призвести до відновлення оксиду як за рахунок вуглецю, так і водню.

Відновлення воднем. Присутні в атмосфері газової фази пари води при взаємодії з нагрітим металом розкладаються із виділенням атомарного водню, який є сильним відновлювачем оксидів. Ідуть реакції дисоціації $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ і відновлення $2n\text{H}_{2(\text{газ})} + m\text{M}_{\text{н}}\text{O}_{2n(\text{тв})} = 2n\text{H}_{2(\text{газ})} + m\text{M}_{(\text{тв})}$. Відновлення оксиду воднем іде безупинно, тому що після відновлення оксиду знову утворюються пари води, тобто цикл повторюється. Відновлення оксиду відбувається також воднем, що виділяється з металу, при цьому швидкість відновлення визначається адсорбцією H_2 на поверхні оксиду. Відзначимо, що в металі водяна пара не розчиняється [28]. Водень відновлює оксидну плівку міді вже при нагріванні понад 1073 K : $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 = 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$. За даними роботи [28] водень може відновлювати оксиди таких металів, як хром, молібден, вольфрам, титан, нікель. Відзначається, що особливо легко відновлюються воднем оксиди нікелю.

Відновлення фтористим амонієм починається з моменту його дисоціації при $200 \text{ }^\circ\text{C}$ в вакуумі. Ідуть процеси утворення летучих фторидів металу: $2\text{NH}_4\text{F} = \text{N}_2 + 3\text{H}_2 + 2\text{HF}$ та відновлення оксидів воднем: $m\text{Me}_{n/m}\text{O}_{2/m} + x\text{HF} = c\text{Me}_{n/c}\text{F}_{x/c + x/c}\text{H}_2\text{O}$; $m\text{Me}_{n/m}\text{O}_{2/m} + 2\text{H}_2 = n\text{Me} + \text{H}_2\text{O}$.

Розроблено спосіб зварювання [35], який полягає в тому, що в стик поміщається матеріал, який в результаті хімічної реакції з основним металом утворює газоподібні продукти й поверхня очищається від оксидів. Після видалення оксидів можна здійснювати процес зварювання. У роботі розглядається приклад видалення оксидних плівок хрому й титану з деталей за допомогою фтористого амонію (NH_4F). Фтористий амоній відновлює плівки оксиду на Cr і Ti за 15 хвилин при 1373 К.

Механічний вплив. В процесі пластичної деформації відбувається механічне пошкодження або руйнування оксидної плівки на металі. Тріщини в плівці й місця розриву полегшують вихід глибинних газів на поверхню, тобто інтенсивність очищення металу зростає. В роботі [33] прямими експериментами показане зростання газовиділення при деформації сплавів ніобію або нікелю. Додаткове виділення газів на ніобієвому сплаві (H_2 , CO , N_2) пояснюється утворенням додаткових шляхів більш легкої дифузії газів. При деформації в металі виникають напруження, площини ковзання, нові границі й блоки, руйнується поверхнева оксидна плівка. Зі збільшенням ступеня деформації при одній температурі нагрівання газовиділення зростає [33]. Процеси рекристалізації можуть вплинути на оксидну плівку. По-перше, при рекристалізації прискорюються процеси пластичної деформації й дифузійна рухливість атомів, а, по-друге, може відбуватися виламування плівки зростаючим кристалом [36], [37].

Фізичний стан є фактором, що впливає на зварюваність у твердому стані у вакуумі. Тому поряд зі знанням того, що ж відбувається з оксидами в контакті, необхідно знати й ті зміни в поверхневому шарі металу, які відбуваються в процесі випаровування самого металу або легуючих елементів, а також ураховувати небезпеку забруднення поверхні продуктами реакцій та залишковими газами.

Випаровування металів і сплавів. Найбільшу випаровуваність мають хром, марганець, нікель, кобальт, а найменшу – титан, мідь, цирконій, алюміній тощо [22], [26]. У вакуумі при температурі 1473 К швидкість

випаровування (оцінка по зменшенню ваги) збільшується для ряду деяких металів у наступній послідовності: W, Mo, Pd, Ni, Fe, Cu [38]. Також в роботі [38] представлені результати дослідження складу поверхні хромомарганцевої і хромонікельмолібденової сталі після різних витримок ($5 \div 120$ хв.) в інтервалі температур від 973 К до 1473 К при вакуумі порядку $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Спектроаналітичне обстеження поверхні показало, що загальна глибина поверхневого шару, що брав участь у сублімації, досягає $0,3 \div 0,4$ мм.

Відомо, що випаровування твердих тіл є ступінчатим процесом. Спочатку атоми металу переходять в адсорбований на поверхні шар, а потім випаровуються після деякого блукання по поверхні. Ріст числа поверхневих дефектів і перерозподіл легуючих елементів у ході пластичної деформації сприяє збільшенню швидкості випаровування. Наявність поверхневих дефектів полегшує перехід атомів в адсорбований стан і зменшує роботу випаровування елементів [27].

Слід зазначити, що тривала витримка у вакуумі при високій температурі обумовлює появу своєрідного мікрорельєфу на поверхні металу. Нерівна терасоподібна поверхня з висотою сходів до 10^{-4} мм, ямки й канавки термічного травлення є наслідком вибіркового випаровування металу й протікання процесів поверхневої дифузії [27]. Термічне травлення має місце переважно з областей з найбільшими викривленнями кристалічних решіток і підвищеної вільної енергії (границі зерна, місця виходу дислокацій).

Поглинання газів. Склад газової фази при вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3} - 1,33 \cdot 10^{-1}$ Па різко відрізняється від розрахункового, який відповідає прийнятому ступеню розрядження. У робочій вакуумній камері при зазначеному розрядженні міститься H_2O , H_2 , CH_4 (метан). При нагріванні метан взаємодіє із цими залишковими газами, наприклад, метан розкладається на гарячому ніобії за реакцією $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$ і обумовлює насичення поверхні вуглецем [25]. У такий спосіб навіть вакуум $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па не є нейтральним середовищем при нагріванні, особливо таких хімічноактивних металів, як ніобій, молібден, титан тощо.

Можна вважати доведеним необхідність застосування максимально можливого розрядження, якщо температура нагрівання перевищує $0,4 T_{пл}$. Відзначимо, що дані спектроскопії доводять про те, що на поверхнях свіжого зламу вуглець і кисень можуть бути присутніми навіть у надвисокому вакуумі $1,33 \cdot 10^{-7}$ Па [39].

При низьких тисках і високих температурах поглинання газів металами визначається трьома процесами: хемосорбцією газу на поверхні металу і його наступною дифузією в глиб зразка, а також десорбцією газу з поверхні металу в газову фазу. Поглинання газів супроводжується окисленням поверхні металів, наприклад, на ніобії у вакуумі утворюються продукти окислення у вигляді окремих ізольованих ділянок на поверхні [25].

В роботі [40] стверджується, що зазор між деталями, які при зварюванні тиском перед нагріванням попередньо стискаються на повітрі, можна розглядати як суму герметичних мікрооб'ємів, що заповнені повітрям. В період нагрівання в цих мікрооб'ємах відбуваються процеси самоочищення від оксидних плівок і утворення вакууму, а процеси автовакуумного зварювання тиском, гарячої прокатки герметичних пакетів, пресового зварювання, дифузійного зварювання у вакуумі та контактного зварювання характеризуються спільністю фізико-хімічних процесів, які протікають в герметичному зазорі.

У світлі вищевикладеного, становить інтерес результат досліджень попередньо окислених зразків зі сталі Ст3 і сталі 12Х18Н10Т [41]. Встановлено, що на затиснутих поверхнях спостерігається різке зниження швидкості очищення, а вільна поверхня металу очищається більш інтенсивно, коли вона контактує з газовою фазою (вакуумом). На сталі Ст3 плівка товщиною 50-60 нм при 1173 К видалається за 5-10 хвилин одночасно як на затиснутих, так і на вільних поверхнях. На сталі 12Х18Н10Т товсту оксидну плівку на затиснутих поверхнях вилучити при нагріванні до 1273 К не вдалося, а на вільній поверхні товщина плівки зменшилась. Тобто істотне значення має відновлення оксидів за рахунок їх взаємодії з елементами-

відновлювачами, що є в газовій фазі. Відзначимо, що наявність цих елементів у вакуумі залежить від глибини вакууму, величини натікання у вакуумну камеру, інтенсивності газовиділення.

Імовірно, для кожного металу й сплаву є характерна величина вакууму й натікання, обумовлені фізико-хімічними властивостями матеріалів, що зварюються, і температурою нагрівання. У такий спосіб ми можемо зробити висновок, що при нагріванні металу у вакуумі він може як очищатися від оксидів, так і окислюватися одночасно.

1.2 Способи інтенсифікації процесу зварювання тиском

Казаковим Н.Ф. [42] існуючі методи інтенсифікації процесу дифузійного зварювання запропоновано розбити на чотири групи: 1 – регулюючі основні параметри зварювання (тиск, температура); 2 – накладення додаткових впливів; 3 – попередня обробка контактних поверхонь; 4 – застосування проміжних прошарків.

1.2.1 Інтенсифікація за рахунок регулювання основних параметрів зварювання

В роботі [16] показано, що при *циклічному прикладанні тиску* кожний новий цикл ініціює інтенсивний розвиток пластичної деформації й ріст міцності. У підсумку скорочується час зварювання й підвищується якість з'єднання. Такий спосіб дозволяє легко використовувати ресурс пластичності деяких сплавів для інтенсифікації утворення з'єднання. При цьому цикл зварювання можна чітко обмежити малопружною стадією або припинити на будь-якій стадії пластичного деформування, і так само на стадії витримки в режимі однократної релаксації напруження [43]. При кожному новому навантаженні повторно спостерігається період активної деформації й

несталості повзучості, що пов'язано з розвитком процесів повернення при проміжному знятті навантаження. В остаточному підсумку такий вплив дозволяє підвищити міцність з'єднань або зменшити температурний вплив для досягнення рівномірного з'єднання.

Ідея використання при дифузійному зварюванні *вібраційних коливань ультразвукової частоти* належить М. Ф. Казакову [44]. Прискорення розвитку фізичного контакту при накладенні поздовжніх (перпендикулярно до площини зварювання) ультразвукових коливань відбувається внаслідок збільшення швидкості повзучості матеріалу. Дія змінних напружень збільшує рухливість існуючих дислокацій, приводить до генерування й переміщенню нових, інтенсифікуючи дифузійну взаємодію [45]. Порухення суцільності та диспергування оксидних плівок відбувається по механізму "мікрозсувів" у процесі деформування дотичних мікронерівностей без порушення їхнього контакту. В остаточному підсумку в зоні контакту зростає число ювенільних ділянок поверхні. Накладення вібраційних коливань ультразвукової частоти дозволяє одержати більш міцні з'єднання й знизити температуру й тиск зварювання [46].

Ефективним технологічним рішенням, що дозволяє інтенсифікувати процес взаємодії при зварюванні і локалізувати пластичну деформацію в поверхневому шарі, є *прикладання ударного навантаження* до деталей, що зварюються. По цьому способу здійснюють локальне нагрівання з'єднання електронно-променевим нагрівачем, а навантаження прикладають ударником, що рухається зі швидкістю 20 м/с. Це дозволяє нагрівати різні метали в зоні контакту до різних температур з метою вирівнювання їх пластичності [47].

Основними параметрами ударного зварювання у вакуумі є температура й енергія удару, що забезпечують високошвидкісну деформацію металу в контактній зоні. Дослідження показують, що при ударному зварюванні час деформування металу в контакті становить 10^{-2} с, швидкість деформації – більше 0,1 м/с. У зоні зварювання встановлена наявність

аномального масоперенесення, яке викликане високою рухливістю дефектів кристалічних решіток, що утворюються при імпульсному навантаженні [48]. Ефект аномального масоперенесення при зварюванні тиском активує контактні поверхні за рахунок росту рухливості атомів і їх зрушення в глибину металу, приводить до утворення розвиненої об'ємної зони взаємодії й формування якісних з'єднань за частки секунд при пластичній деформації порядку 2-3%.

Ефект дислокаційного ковзання можливо також одержати при зварюванні матеріалів з мікрокристалічною структурою в режимі *надпластичності* [49]. Зварювання в режимі надпластичності значно скорочує час зварювання, заліковування дефектів відбувається в результаті взаємного зсуву зерен і їх розвороту при інтенсивному зернограничному проковзуванні.

Активация шляхом інтенсивного деформування поверхневих шарів матеріалів, що з'єднуються, не є єдиною можливим напрямком технологічної інтенсифікації за рахунок механічного впливу. Досить простим для реалізації методом інтенсифікації дифузійних процесів у контакті може служити різновид дифузійного зварювання коли до однієї з деталей, що зварюються, прикладають *зусилля розтягу, перпендикулярне дії зварювального тиску*. Зусилля розтягу навіть у пружній області інтенсифікує дифузійні процеси. При зварюванні багатьох металів з неметалами з'єднання здійснюється, як правило, за рахунок розчинення елементів оксидного матеріалу в металі. Тому при реалізації способу зусилля розтягу прикладається в металевій деталі. Виникаючи при цьому статичні викривлення кристалічних решіток металу не тільки прискорюють дифузію, але й полегшують утворення областей атом-вакансійних станів, інтенсифікуючи взаємодію [45].

Циклічна зміна температури в процесі зварювання по своїй дії аналогічна циклічному прикладанню тиску. Дифузійне зварювання з термоцикуванням підвищує рівномірність розподілу і локалізації пластичних деформацій в стику, що забезпечує якість з'єднань при зниженні

температури зварювання. При нагріві та охолодженні у металі також відбуваються процеси релаксації й зменшення напружень деформації, що приводить до збільшення пластичності матеріалів і, як наслідок, збільшенню пластичної деформації [44],[50]. У деяких випадках цей прийом використовують як спосіб підготовки поверхонь під зварювання. Багаторазове нагрівання до температури зварювання і охолодження призводить до руйнування й видалення оксидної плівки. Однак, цей метод складніше в технологічному плані й менш ефективний, чим, наприклад, циклічний додаток тиску.

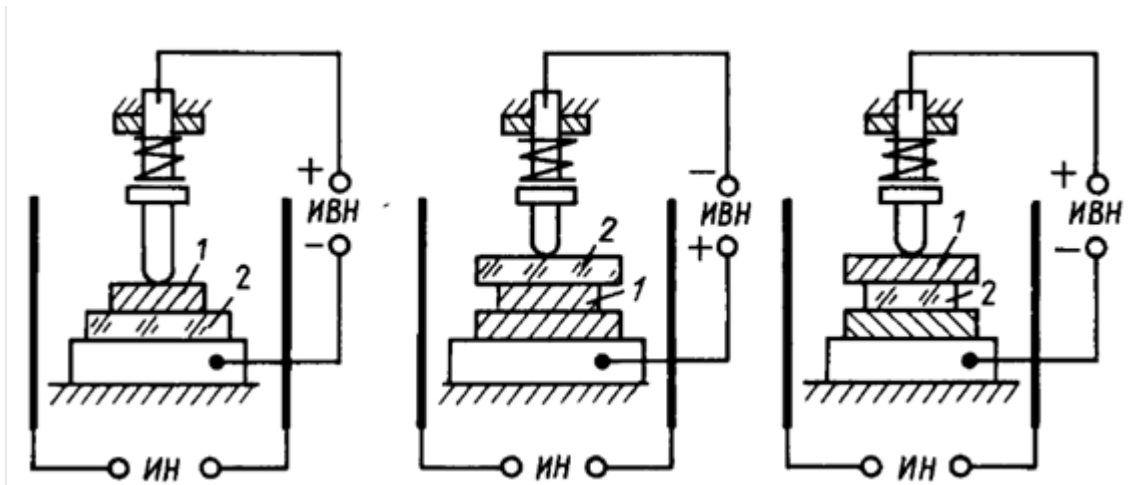
1.2.2 Накладення додаткових впливів

Ефективним технологічним способом інтенсифікації масоперенесення при з'єднанні металів з неметалевими матеріалами є використання електростатичного поля високої напруги [51],[52]. У цьому випадку матеріали, що з'єднуються, приводять у контакт один з одним, нагрівають будь-яким відомим способом до температури, суттєво меншої, ніж температура розм'якшення й плавлення діелектрика, прикладають напругу певної величини й полярності й витримують у цих умовах певний час (рисунок 1.4).

Електрична напруга поляризує скло, що зменшує енергію в системі напівпровідник-кисень і підвищує реакційну здатність іонів кисню, які вступають у хімічну взаємодію з атомами металу, що з'єднується. Крім того, поле прискорює спрямовану дифузію атомів.

Напругу, що прикладається до деталей, які з'єднуються, вибирають залежно від властивостей матеріалів, що зварюються у межах від десятків до декількох тисяч вольт. Полярність напруги вибирають на основі аналізу розподілу потенціалу в діелектрику, що з'єднується, так, щоб добитися найбільшої напруженості електростатичного поля в контакті. Наприклад, для зварювання скла із кремнієм і коваром застосовують напруга 200-2000 В.

Позитивний потенціал прикладають до кремнію, а негативний – до скла. Тиск при з'єднанні значно менше, ніж при дифузійному зварюванні без електростатичного поля.



1 – метал; 2 — скло; ИН – джерело нагрівання; ИВН — джерело високої напруги

Рисунок 1.4 – Схеми з'єднання різнорідних матеріалів в електростатичному полі [52]

При зварюванні в електростатичному полі виникає електроадгезійний ефект, що забезпечує одержання з'єднань різнорідних матеріалів при більш низьких температурах, а також збереження точних розмірів і оптичних властивостей скла, зменшення залишкових напружень у зварних вузлах [51].

1.2.3 Попередня обробка контактних поверхонь

Для інтенсифікації процесу утворення з'єднання при дифузійному зварюванні застосовують різні способи обробки контактних поверхонь та приконтактних об'ємів деталей, що зварюються, основна мета яких – створення в приконтактній області умов для прискорення всіх стадій процесу: від формування фізичного контакту до об'ємної взаємодії.

В роботах [53], [54], [55] запропоновано способи створення пластичного приповерхневого шару, що полегшує утворення фізичного

контакту та активацію контактних поверхонь. При зварюванні титанових α -сплавів це досягається легуванням зони з'єднання β -стабілізаторами [53]. При зварюванні сталей пластичний шар створюють за рахунок зневуглицювання при високих температурах [54]. При зварюванні нікелевих жароміцних сплавів контактні поверхні обробляють в суміші газів – 10-30 % HCl та 90-70 % H₂. При цьому відбувається збіднення контактних поверхонь титаном та алюмінієм, а також вмістом зміцнюючих фаз та карбидів [55].

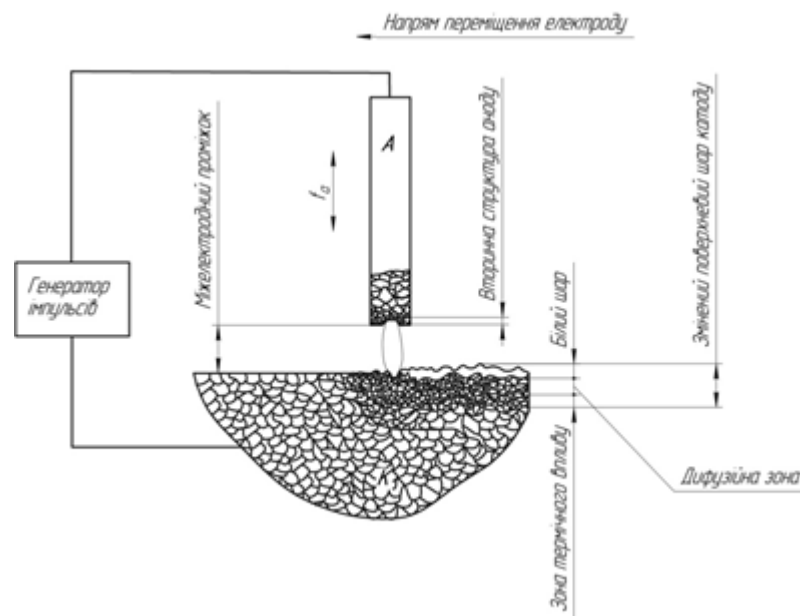
В роботі [56] досліджено роль наклепу, що одержують шляхом обробки поверхонь перед зварюванням. Встановлено, що наклеп сприятливо впливає на утворення з'єднання. Залежно від способу підготовки контактуючих поверхонь границя розділу або розчиняється внаслідок зародження й росту загальних зерен, або її окремі ділянки зрушуються в результаті міграції границі зерен. При наклепі глибина дифузії атомів досягає до ~25 мкм [57]. При ідентичних умовах зварювання з мінімальним питомим навантаженням на полірованих поверхнях схоплювання відбувається за 1 хвилину, у той час як зразки з наклепаною поверхнею не схоплювалися навіть через 15 хвилин. Зі збільшенням питомого навантаження при залишковій деформації 5 % ця відмінність зникає.

В роботі [58] запропоновано зварювання тугоплавких та різнорідних металів виконувати після попередньої електроерозійної обробки поверхонь з енергією імпульсу 10^{-4} - 10^{-2} Дж при тривалості 10^{-6} - 10^{-3} с, в результаті чого утворюється приповерхневий шар глибиною 2-15 мкм з підвищеною дифузійною проникненістю. Такий спосіб дозволяє знизити температуру зварювання та виключити утворення інтерметалідів при зварюванні різнорідних матеріалів.

Спосіб електроіскрового легування металів, що може застосовуватися для обробки та модифікації поверхонь, які зварюються, заснований на явищі електричної ерозії матеріалів при іскровому розряді в газовому середовищі, полярного перенесення продуктів ерозії на катод (деталь), на поверхні якого формується шар зміненої структури і складу. У

результаті електричного пробую міжелектродного проміжку виникає іскровий розряд, в якому потік електронів призводить до локального розігріву електрода (анода). На поверхні катода під дією значних теплових навантажень відбуваються мікрOMETалургійні і супутні їм процеси (термомеханічні, гідродинамічні, дифузійні), які здійснюють перемішування матеріалу катода і анода, при взаємодії з компонентами газового середовища, що сприяє утворенню високої адгезії між основою і формованим шаром [59].

На рисунку 1.5 наведена загальна схема процесу електроіскрового легування металів.



A – анод (компактний електрод), К – катод (деталь), f_a – частота вібрації аноду

Рисунок 1.5 – Загальна схема процесу електроіскрового легування металів [59]

Фізична модель процесу полягає в наступному: при зближенні електродів напруженість електричного поля між ними збільшується і, досягнувши певної величини, викликає пробій проміжку між електродами. Через що пучок електронів вдаряється об металеву поверхню анода. Енергія електронів виділяється в поверхневих шарах анода. Внаслідок цього метал анода локально розігрівається, розплавляється і частково випаровується. Крапля розплавленого металу відділяється від анода і,

випереджаючи його, рухається до катода. У процесі переміщення крапля встигає нагрітися до високої температури, закипає і вибухає. Ланцюг струму переривається, фокусуюча дія електромагнітного поля зникає, і утворені частинки летять широким фронтом.

Досягнувши катода, розплавлені частинки анода зварюються з ним і частково впроваджуються в його поверхню. Рухомий за частками електрод-анод механічно вдаряє об катод, перемішуючи частки анода. При цьому протікають процеси дифузії і хімічні реакції. Механічний удар по розпеченій масі металу проковує отримане покриття, збільшуючи його однорідність і щільність. Після цього електрод-анод відходить від катода, а на поверхні останнього залишається міцно з'єднаний з ним шар матеріалу анода [60].

Електроіскрове легування металів має такі переваги:

- висока міцність зчеплення нанесеного матеріалу з матеріалом основи (за рахунок механічного перемішування і взаємного дифузійного проникнення легувальних матеріалів у шар, що формується);
- деталь не нагрівається (зазвичай не більше 573 К) в процесі легування, що не приводить до зміни її фізико-механічних властивостей і геометрії;
- можливість місцевої модифікації окремих ділянок деталі;
- екологічно чистий і простий технологічний процес;
- оброблювані поверхні не потребують попередньої підготовки.

Останнім часом розроблені нові способи модифікування поверхневих шарів. На сьогоднішній день можливо одержувати лазерні й електронні пучки з енергією, достатньої для розігріву й оплавлення великих ділянок поверхні за досить короткий час. Швидкості нагрівання й охолодження при використанні імпульсних лазерів достатні для утворення нових метастабільних сплавів. З'явилися методи іонної імплантації, іонного перемішування, що дозволяють вводити сторонні атоми безпосередньо в поверхневі шари твердих тіл. Важливою перевагою імплантації є відсутність

звичайних термодинамічних обмежень на можливість легування. Унікальними є можливості іонної імплантації щодо відтворюваності структури й складу зовнішнього шару товщиною до 1 мкм із надзвичайно високою точністю [61], [62].

В роботі [50], [63] показано, що модифікація поверхонь з'єднання електронними пучками сприяє формуванню якісних з'єднань, а легування поверхні дозволяє зменшити температуру зварювання. Застосування легування поверхневого шару цирконієм, гафнієм або іншими елементами із застосуванням низькоенергетичних електронних пучків дозволяє отримати рідкі прошарки, що забезпечують міцність з'єднань жароміцних сплавів, не нижче 90% міцності основного металу.

Метод іонної імплантації полягає в бомбардуванні пучками прискорених іонів з енергією від 10 кеВ до 1 МеВ твердих тіл з метою зміни властивостей і структури їх поверхневих областей. Прискорені іони проникають у кристалічну решітку, переборюючи відштовхуючу протидію позитивних зарядів ядер атомів. Глибина проникнення іонів зростає зі збільшенням їхньої енергії. Легкі іони проникають більш глибоко, ніж важкі. Атоми, що перебувають у поверхневому шарі, одержавши енергію від іона, можуть відриватися від кристала, утворюючи вакансію в поверхневій області кристала. Енергія первинно зміщеного атома, що зветься атомом віддачі, порівняно велика, тому на шляху свого руху атом віддачі утворює каскад зсувів, внаслідок чого в кристалі виникають окремі разупорядковані зони розміром 3...10 нм [64].

Одним з основних параметрів іонної імплантації є глибина проникнення іона в речовину, що характеризується пробігом. Величина пробігу визначається як енергією іона, так і співвідношенням мас елемента, що імплантується й матеріалу мішені. Зокрема для іонів алюмінію, що імплантуються у кремній при енергії іонів від 20 до 200 кеВ, пробіг становить 29...297 нм.

Робочі речовини для одержання іонів можуть перебувати в

газоподібному, рідкому й твердому стані. Так, при імплантації іонів алюмінію використовується летучий трьоххлористий алюміній $AlCl_3$, при імплантації ряду інших металів використовують тверді матеріали в елементарному виді. Ці речовини вимагають нагрівання, щоб одержати достатній тиск парів: $Zn, Se, i Te - 823\text{ K}, Mg i Sb - 853\text{ K}$ [65].

Створення металевих композицій у поверхневих шарах найбільше широко використовується для підвищення корозійної стійкості сталей. У роботі [66] вивчався розподіл концентрації нікелю й хрому, що імплантуються окремо в м'яку сталь при дозах іонів $5 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-2}$ і енергії 150 кеВ. Більша глибина проникнення, отримана в експериментах, пояснюється активацією дифузії при опроміненні. У розрахунках можливого ефекту активації, наведених у роботі, отримане значення коефіцієнта дифузії $10^{-15}\text{ м}^2/\text{с}$, що приблизно відповідає коефіцієнту термічної дифузії для температури 873 К, тоді як при імплантації температура зразка не перевищувала 453 К.

Важливо відзначити, що на остаточний розподіл речовини, що імплантується, великий вплив робить склад зразка, що піддається обробці [67].

Іонно-променеве перемішування використовується для одержання модифікованих іонним пучком матеріалів з високою концентрацією розчинених домішок при низьких дозах іонного опромінення [68]. Принцип іонно-променевого перемішування полягає в нанесенні шару матеріалу на підкладку й потім у бомбардуванні зразка іонами, що мають таку енергію, що їхній пробіг перевищує товщину плівки. Іони, зіштовхуючись із атомами плівки, передають їм енергію і імпульс у напрямку від поверхні. У результаті, атоми плівки впроваджуються в матеріал зразка.

У кожному каскаді зіткнень запасена енергія віддачі йде на утворення великої кількості зміщених атомів. Процес зсувів, обумовлений рухом атомів віддачі, називається каскадним перемішуванням. У межах окремого каскаду середня відстань, на яку зміщується атом, завжди невелика. У роботі [69]

показано, що кожна пара Френкеля розділена в середньому відстанню 6...10 нм. Однак, слід зазначити, що в ході розвитку каскаду уздовж сліду кожного вибитого атома утвориться зона, збагачена вакансіями. І після того, як закінчилося поширення каскаду, можливі помітні дифузійні процеси, обумовлені високою концентрацією точкових дефектів, що виникли в об'ємі каскаду. Ці процеси сильно залежать від таких факторів, як температура мішені й потік часток. У системах із взаємною розчинністю іонне перемішування протікає ефективніше [70], чим у системах, що не змішуються.

Таким чином, порівняльний аналіз розглянутих способів зміни складу й структури поверхневих шарів металів і сплавів показує, що найбільш доцільним, очевидно, є застосування такого способу поверхневого легування, що може бути реалізований на самій зварювальній установці, аналогічно процесу зварювання в тліючому розряді, що включає виконання в єдиному циклі послідовно технологічних операцій іонного очищення поверхонь, що з'єднують, зварювання й послідууючої термічної або хіміко-термічної обробки.

1.2.4 Застосування проміжних прошарків

Одним із широко застосовуваних способів інтенсифікації утворення фізичного контакту й активації поверхонь, що зварюють, є застосування проміжних *"м'яких прошарків"*. Підвищена м'якість матеріалу прошарку обумовлює локалізацію в ній пластичної деформації зсуву. Контакт між матеріалами, що зварюють, здійснюється в цьому випадку переважно за рахунок активної деформації й повзучості матеріалу прошарку, що заповнює мікронерівності поверхонь, що істотно знижує мінімально необхідний рівень тиску й зменшує ступінь зміни форми деталей [4].

При дифузійному зварюванні в якості м'яких прошарків застосовують сплави або частіше чисті метали, які наносяться на обидві або одну з поверхонь, що зварюють, гальванічним або хімічним осадженням, термічним випаровуванням у вакуумі або у вигляді фольги, порошку та ін.

Слід зазначити, що умови деформування матеріалу прошарку, укладеної між "твердими", що не деформуються при зварюванні матеріалами, істотно відрізняються від умов деформування такого ж матеріалу у вільному стані. Це визначається, насамперед, локалізацією в прошарку пластичних деформацій і стримуючою дією сусідніх ділянок матеріалу з більш високим опором деформуванню. Зі зменшенням відносної товщини м'якої прокладки границя текучості й границя міцності її матеріалу зростає за гіперболічним законом, що є проявом контактного зміцнення [71].

Тому при зварюванні через тонкий прошарок не завжди досягається її деформування на всій контактуючій поверхні. З метою інтенсифікації пластичної деформації матеріалу проміжного прошарку застосовуються такі ж технологічні прийоми, що й для інтенсифікації пластичної деформації поверхонь, що з'єднуються, які згадувалися вище. В роботі [72] був запропонований новий спосіб інтенсифікації пластичної деформації матеріалу прошарку. Сутність способу полягає у використанні при дифузійному зварюванні прошарків несучільного перетину – металеві сітки, перфорованої фольги й т.п.

Застосування перфорованих прошарків при дифузійному зварюванні хрому з міддю дозволяє підвищити міцність виготовлених вузлів [73].

За допомогою проміжних прошарків можна одержати зварні з'єднання без утворення крихких інтерметалідних фаз між різнорідними матеріалами, знизити температуру зварювання однорідних матеріалів і т.п. Проміжний шар наноситься на поверхні шляхом електролізу, напилюванням у вакуумі, вводиться в стик у вигляді фольги або іншими способами. Хімічний склад прошарку вибирають залежно від роду матеріалів, які зварюються, і вимог до зварного з'єднання. Товщина проміжного шару може бути різною. При цьому

прошарок може повністю змінити свій склад за рахунок дифузії або зберігатися в стику, що необхідно при зварюванні матеріалів з різними властивостями або металів, що утворюють крихкі з'єднання. Так, наприклад, для утворення міцних з'єднань алюмінію з міддю при дифузійному зварюванні рекомендується покривати мідь цинком, сріблом або нікелем [74].

В роботі [75] були досягнуті результати по досить міцному з'єднанню алюмінієвих сплавів за рахунок застосування проміжних прошарків з Zn і Mg, які отримували іонно-плазмовим вакуумним напиленням. Якість з'єднань залежить від товщини проміжних шарів. При товщині прошарків більше 3 мкм кількість евтектики достатньо велика і спостерігається ерозія поверхневих шарів алюмінієвих сплавів. Зменшення товщини напиленого шару до 1-2 мкм дозволяє отримати з'єднання з міцністю 0,85-0,95 від міцності основного матеріалу. Після дифузійного зварювання евтектичний прошарок не виявляється за допомогою оптичного мікроскопу при збільшенні 800.

Дифузійне зварювання виконують також із застосуванням прошарків, які розплавляються, активують поверхні й витісняються, а їх залишки дифундують в основний метал. Склад металу в зоні зварювання за рахунок дифузійних процесів наближається до складу основного металу. Цей процес широко застосовується при з'єднанні матеріалів, які погано зварюються плавленням і призначені для роботи при високих температурах і навантаженнях. У ньому поєднуються особливості дифузійного зварювання й пайки у вакуумі. Залежно від параметрів режиму, процес може давати з'єднання, відповідні до з'єднань при дифузійному зварюванні, і з'єднання з окремими ділянками різної довжини, характерними для паяння [76], [77].

Ефект зниження температури досягається застосуванням спеціальних проміжних шарів на основі високоактивних енергонасичених *ультрадисперсних порошків* металів і їх сумішей [5]. Розроблена технологія одержання таких порошків нікелю, міді, кобальту, заліза і їх подвійних

сумішей методом термічного розкладання форміатів і оксалатів цих металів. Застосування ультрадисперсних металевих порошкових шарів забезпечує:

- зниження термодформаційного впливу на матеріали, що зварюються, (температури, зварювального тиску);
- виключення макропластичної деформації виробів;
- зниження напружень у зварному шві при зварюванні матеріалів з різними коефіцієнтами лінійного термічного розширення;
- виключення утворення інтерметалідів у зварному шві при з'єднанні металургійно несумісних матеріалів;
- зварні шви стійкі до радіації, впливу агресивних середовищ, термоциклуванню.

Однак дифузійне зварювання через порошкові проміжні шари має ряд недоліків, один з яких – складність і трудомісткість операції нанесення рівномірного шару порошку на поверхні деталей, що з'єднуються. Для цього використовують різні прийоми. Так, наприклад, на одну з поверхонь, що з'єднуються, поміщають сітку і у її гнізда насипають порошок. Спеціальним шкребком зайвий порошок видаляють із поверхні сітки, а саму сітку забирають безпосередньо перед складанням деталей під зварювання [5].

Також для отримання пластичного прошарку в поверхневих шарах металів можна використати особливості фізико-хімічної взаємодії між певними матеріалами, а саме, здатність утворювати при підвищених температурах евтектики з температурою плавлення нижчою, ніж температура плавлення найбільш легкоплавкого матеріалу.

Перевагами використання *евтектичних прошарків* для зварювання різнорідних матеріалів є: зменшення величини зварювального навантаження; зниження необхідної якості механічної обробки поверхонь, що з'єднуються; покращення механічних параметрів з'єднання. Отримання рідкого прошарку ґрунтується на явищі спільного плавлення матеріалів при температурах вище температури плавлення їх евтектики, але нижче температури плавлення найбільш легкоплавкого металу.

Евтектика не являється простою механічною сумішшю фаз, на що вказує найменша температура її плавлення і кристалізації у порівнянні зі сплавами, достатньо близькими по складу. Особливий енергетичний стан фаз у евтектиці у місці їх контакту підтверджується також експериментальними даними про більш високу корозійну стійкість евтектики, ніж у близьких по складу сплавів [15]. Відповідно, електрохімічний потенціал в місці контакту фаз в евтектиці не можна ототожнювати з електрохімічним потенціалом контакту, що створюється механічним шляхом.

Так в результаті плавлення твердих кристалічних тіл у місці їх контакту утворюється сплав з новими властивостями, відмінними від властивостей розміщених поряд сплавів тієї ж системи. Було запропоновано такий вид контактного плавлення називати контактено-реактивним [78].

Процес контактено-реактивного плавлення відбувається у вакуумі для забезпечення захисту поверхонь металів від шкідливого впливу газів атмосфери.

В роботі [79] процес контактено-реактивного плавлення розглядається у вигляді двох стадій:

- 1) утворення на поверхнях контактуючих кристалічних тіл твердих розчинів і їх плавлення;
- 2) розчинення твердих тіл у створеній рідині, склад якої близький до евтектики.

В пізніших роботах більшості авторів ця модель процесу була покладена в основу розрахунків, які зводилися до визначення швидкості дифузії в твердій чи рідкій фазі спочатку в стаціонарних, а потім і в нестаціонарних умовах. В роботі [80] контактено-реактивне плавлення розглядали як процес, що складається із трьох стадій:

- 1) підготовчої стадії утворення на поверхнях речовин, що контактують, твердих розчинів чи прошарків хімічних з'єднань;
- 2) виникнення по місцю контакту твердих речовин рідкої фази;
- 3) плавлення контактуючих твердих речовин в утвореній рідкій фазі.

Слід вважати, що контактено-реактивному плавленню твердих речовин як фазовому переходу першого роду передують активація атомів (іонів) фаз, що контактують, на міжфазній границі. На початковій стадії процесу енергія активації твердих металів, що контактують, поступово підвищується за рахунок накопичення потенціальної енергії системи і досягає максимуму на гребні стабільного стану. Найменше підвищення потенціальної енергії системи, що складається із тіл, що контактують, вище необхідної енергії активації, призводить до переходу її в більш стабільний стан – метастабільну рівновагу трьох фаз (двох твердих і рідкої), тобто до плавлення.

При цьому склад рідкої фази при евтектичній температурі контакту буде відповідати евтектичному. При безперервному видаленні рідкої евтектики із зазору і відновленні локального контакту твердих тіл знову буде відбуватись їх контактне плавлення. Якщо ж рідка фаза буде порушувати безпосередній контакт твердих тіл, то при температурі евтектики контактено-реактивне плавлення може припинитись внаслідок переходу системи в метастабільний рівноважний стан.

При контактено-реактивному плавленні вище температури плавлення евтектики, але нижче температури автономного плавлення речовин, що контактують, після появи рідкої фази настає третя стадія процесу – стадія контактеного твердо-рідкого плавлення твердих речовин в рідкій фазі, яка утворилася на другій стадії. Контактне твердо-рідке плавлення в даному випадку має свої особливості, так як з рідиною контактують дві тверді речовини, які здатні до контактено-реактивного плавлення. В цих умовах рідка фаза поблизу кожної з них збагачена атомами речовини, з якою має границю.

Ця особливість третього етапу контактено-реактивного плавлення при температурі вище евтектичної являється по-суті результатом розвитку дифузійних процесів між приграничними ділянками рідкої фази і іншим її об'ємом. Внаслідок цього в процесі наступного переходу системи до локальної метастабільної рівноваги і наступного відводу атомів надлишкової

речовини в глибину рідкої фази і наближенні її складу до евтектичного, вздовж кожної з міжфазних границь в прилеглому шарі рідкої фази безперервно поновлюється контактне твердо-рідке плавлення речовин, що контактують.

Для евтектики у порівнянні з іншими сплавами характерна складність процесу перемішування компонентів в твердому стані і відносна легкість змішування їх в рідкому стані. Тому в рідкій евтектиці переважає взаємодія між різнорідними атомами, а в твердій – між однорідними атомами, що обумовлює утворення структури евтектики у відповідності з трьома принципами: однорідності, контактності фаз і рівної можливості виникнення зародків фаз евтектики в рідкому евтектичному сплаві.

Контактно-реактивне плавлення звичайно починається з місць контакту нерівностей і виступів на поверхнях металів, що контактують, і утворює спочатку фронт плавлення, який складається з окремих сегментів, які потім вирівнюються.

Процес контактно-реактивного плавлення починає розвиватися переважно по границям зерен твердих металів чи кристалічних матеріалів, що контактують.

Для активації процесу контактно-реактивного плавлення поверхні, що контактують, нагрівають до температури, яка є вищою за температуру плавлення евтектики цих матеріалів. Ще однією необхідною умовою активації процесу є прикладення стискаючого зусилля певної величини, яке забезпечить контакт поверхонь матеріалів і сприятиме їх взаємодії [81], [82].

Додаткову активацію поверхонь, що зварюються, можливо, одержати при використанні *наноструктурованих прошарків*, що складаються із декількох різних елементів [83].

Нанокристалічні матеріали (з розміром зерна порядку 10 нм) мають незвичайні механічні властивості у порівнянні із традиційними матеріалами. Це обумовлене масштабними ефектами, викликаними малим розміром зерна й значною часткою зміцнення матеріалу, пов'язаного із границями зерен.

Електронно-мікроскопічні дослідження наноматеріалів вказують на відсутність дислокацій в об'ємі зерен або на мізерно малу їхню щільність. Коли розмір зерна наноматеріалів менше деякого граничного значення (10...20 нм), дислокації не виявляються на всіх стадіях деформації й руйнувань зразка. Пластична деформація в таких матеріалах відбувається по границях зерен за рахунок утворення безлічі елементарних зсувів [84].

В роботі [85] показано, що застосування багат шарових прошарків перспективне для з'єднання важкодеформуємих матеріалів.

1.3 Способи обмеження деформації деталей при зварюванні тиском

В роботі [86] розглянуто фізичні основи прецизійного зварювання тиском. Вказується, що зварне з'єднання з залишкової пластичної деформацією, що не перевищує 2 % від товщини (діаметра) деталі, можна назвати прецизійним, якщо виконується умова геометричної точності:

$$- 1 \leq T \leq + 1, \quad (1.1)$$

де T – безрозмірний критерій геометричної точності з'єднання, який визначається співвідношенням:

$$T = (\Delta_0 - \varepsilon_0 \pm j) j, \quad (1.2)$$

де Δ_0 – відносна залишкова деформація (осаду) зварного з'єднання; ε_0 – врахована в припуску заготовки відносна вимушена деформація, при якій завершується процес утворення зварного з'єднання; j – відносний допуск на номінальний розмір зварного з'єднання для даного класу точності його виготовлення.

Для забезпечення прецизійності (1.1) необхідно виконання умови:

$$(\Delta_0 - \varepsilon_g) \rightarrow 0. \quad (1.3)$$

Відносну вимушену деформацію можна виразити у безрозмірній формі:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_k \cdot K_y \cdot L_n \cdot C^{-1}, \quad (1.4)$$

де ε_k – показник повного зближення приконтактних шорстких поверхонь, при якому щільність в контактi прагне до одиниці; практично для реальних поверхонь $\varepsilon_k = 0,3 \dots 0,6$; K_y і C – відповідно показники зміцнення і напруження в шорсткому шарі контакту; для реальних умов $K_y = 1 \dots 10$; $C = 4,6 \dots 9,2$; L_n – показник локальності нагріву, $L_n = 1 \dots 0,1$.

Формула (1.4) дозволяє оцінювати вимушену деформацію з урахуванням крайових граничних умов при різних способах зварювання тиском [86].

Наприклад, при зварюванні тиском з загальним рівномірним нагріванням всієї деталі ($L_n = 1$) і стисненні деталей без деформаційного зміцнення шорсткого шару в контактi ($K_y \leq 1$), а також за умови $\varepsilon_k = 0,5$ (механічна обробка поверхонь) і $C = 5$ (повільне стиснення деталей):

$$\varepsilon_g = 0,5 \cdot 1 \cdot 1/0,5 = 0,1 \text{ (10 \%)}.$$

Якщо стиснення деталей проводять при кімнатній температурі ($L_n = 1$) з максимальним зміцненням шорсткого шару в контактi, тобто при $C = 10$; $K_y = 10$, то ε_g досягає свого максимального значення (холодне зварювання):

$$\varepsilon_g = 0,5 \cdot 10 \cdot 1/10 = 0,5 \text{ (50 \%)}.$$

Формула (1.3) показує, що локалізувати осадку деталей при зварюванні тиском можна чотирма основними прийомами:

- зменшенням деформаційного зміцнення шорсткого шару в контакті ($K_y \rightarrow 1$) шляхом уповільненого стиснення деталей при високих температурах нагріву – це контактне зварювання за способом А. М. Ігнат'єва, дифузійне зварювання у вакуумі, газопресове зварювання. У цих випадках $\varepsilon_s < 8 \%$;

- різким збільшенням напруженого стану в шорсткому шарі контакту ($C \gg 10$) шляхом створення чисто контактного напруження. Це зварювання вибухом, зварювання імпульсом магнітної енергії. В цьому випадку $\varepsilon_s \rightarrow 1 \%$;

- створенням чистого контактного локального нагріву деталей;
- контактуванням деталей з критичною швидкістю деформування, при якій завдяки дії механізму порогової і непорогової (дифузійної) повзучості знеміцнення в шорсткому шарі матеріалу контакту переважає перед його деформаційних зміцненням [86].

Таким чином, виходячи з даної методики, можна зробити припущення, що технічно і технологічно ефекту прецизійності при зварюванні тиском можна досягнути шляхом використання додаткових засобів активації поверхонь, які дозволять перетворити приповерхневий шар матеріалів, що зварюються, в пластичний, активований стан або рідину.

Серед існуючих способів зварювання тиском необхідно виділити дифузійне зварювання у вакуумі, яке є універсальним способом отримання нероз'ємних з'єднань для різних однорідних та різнорідних матеріалів, а також електроконтактне зварювання, яке є найбільш розповсюдженим з усіх способів зварювання тиском, на яке припадає понад 30 % всіх зварних з'єднань, які виконуються на сьогоднішній день. Тому розглянемо існуючі способи обмеження деформації основних матеріалів саме для цих способів зварювання.

Способи зниження рівня деформації при дифузійному зварюванні. В основному всі способи зниження рівня деформації при дифузійному зварюванні направлені на локалізацію в стику мікротреформації, що дозволяє обмежити макротреформацію основних матеріалів. Це можуть бути, в залежності від кожного окремого випадку, всі способи, які були розглянуті нами в розділі 1.2: регулювання основних параметри зварювання, накладення додаткових впливів, попередня обробка контактних поверхонь та застосування проміжних прошарків.

Нижче розглянемо основні способи дифузійного зварювання у вакуумі, які можуть бути використані для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань.

Автори роботи [87] запропонували спосіб дифузійного зварювання у вакуумі деталей через проміжні напилені прошарки, коли і напилювання, і зварювання ведуться в одній робочій камері. На одну з деталей напилюють проміжний прошарок випарником електричного типу, а друга в цей час закрита екраном. Після напилювання екран і випарник відводять із зони зварювання, деталі зближують, нагрівають і прикладають тиск. Застосування способу підвищує якість зварних з'єднань і зменшує час зварювання.

В роботі [88] описується розроблений Г.В. Конюшковим спосіб зварювання з використанням електричного вибуху шарів у вакуумі. Зварювання основане на використанні явища електричного вибуху, яке полягає в тому, що при проходженні потужного імпульсу струму через провідник, який за час 0,2-10 мкс перетворюється у високотемпературну плазму, конденсуючись потім у прошарок на поверхнях, що зварюються.

Автор роботи [89] для отримання бездеформаційних нероз'ємних з'єднань міді дифузійним зварюванням запропонував підготовку поверхонь з дуже низькою шорсткістю. Утворення при цьому якісного з'єднання автор пояснює хімічною активацією через відновлення оксидів міді воднем, який дифундує з об'єму на поверхню.

В роботі [90] запропоновано спосіб зварювання матеріалів з низьким електричним опором тепловим ударом. Цей спосіб полягає в тому, що в проміжний порошок прошарок близький за складом до зварних матеріалів додають матеріали, які представляють собою з'єднання вуглецю. Потім між деталями пропускають струм, що викликає виділення джоулевого тепла у порошок і між деталями, що з'єднуються, і порошком, в результаті чого додатково локалізується тепла енергія в стику та відбувається зварювання спіканням. Міцність з'єднання висока, тріщин та дефектів не виникає. Спосіб застосовується для зварювання вольфрамокобальтових твердих сплавів та інших металевих матеріалів.

Відомий спосіб зварювання тиском сталевих деталей, що полягає в тому, що при зварюванні попередньо на поверхню з'єднання подається вуглець (0,2-0,4 мг/мм²); потім деталі нагрівають і зварюють. Вуглець, який знаходиться на поверхнях з'єднується з залізом і температура солідусу на поверхні знижується й поверхня легко розплавляється. Одночасно вуглець з'єднується з адсорбованим киснем і утворюються СО та СО₂, що сприяє отриманню високоміцного з'єднання [91].

При зварюванні важкодеформуємих жароміцних сплавів, алюмінієвих або складнолегованих сплавів і сталей, які мають термодинамічно стійкі оксиди, а також при деяких різномірних сполученнях (наприклад мідь-алюміній, сталь-мідь і т.д.) застосовують процеси, при яких в контакті утворюється рідка фаза. З цією метою в одних випадках використовують проміжні прошарки, що мають температуру плавлення нижче, ніж у основного металу [92] - [98], в інших рідку фазу створюють в результаті протікання евтектичної реакції між матеріалами, що зварюються, і матеріалом прошарку або безпосередньо між матеріалами, що зварюються [99].

Так в роботі [92] пропонується спосіб виготовлення біметалевих контактів, коли мідні та срібні заготовки нагрівають до температури утворення евтектики й забезпечують їх контактування, що призводить до

утворення якісного зварного з'єднання за рахунок виникнення рідкої фази в зоні з'єднання.

В роботі [93] запропоновано спосіб з'єднання деталей з магнію або його сплавів з деталями з матеріалів з високою температурою плавлення (Mo, Nb, Ta, Ti, Zr) через проміжний матеріал, що утворює евтектику з магнієм. Спосіб відрізняється тим, що температура, тиск і тривалість нагріву до моменту з'єднання деталей регулюється так, що евтектика в рідкому стані дифундує в приграничні шари поверхонь, які з'єднуються. В якості проміжного матеріалу застосовують нікель або його сплав.

В роботі [94] запропоновано спосіб зварювання деталей з жароміцних нікелевих сплавів, що забезпечує високу міцність з'єднання при відсутності необхідності у ретельній підготовці та прикладанні великих зусиль. Спосіб оснований на застосуванні спеціального проміжного прошарку, який вміщує хром, кобальт, молібден, алюміній, титан, вольфрам, цирконій, а також кремній та бор, що знижує температуру плавлення. З'єднання проводять у вакуумній печі при температурі 1333-1503 К, при якій матеріал проміжного прошарку плавиться, змочує деталі та заповнює зазори між ними. Величина зазорів може бути 0,02-0,13 мм. Після термообробки міцність з'єднання наближається до міцності основного металу.

Автори роботи [95] запропонували з'єднувати мідь з алюмінієм без проміжних шарів з використанням евтектичної реакції. Поверхні зачищали наждачним папером та знежирювали ацетоном, потім проводили зварювання в три етапи: 1) утворення контакту між поверхнями і стискання з незначним тиском (5 МПа); 2) нагрів елементів з високою швидкістю (323 К/с) індукційним методом до температури евтектичної реакції алюмінію з міддю (821 К); 3) після утворення необхідного об'єму евтектики ($0,04 \text{ см}^3/\text{см}^2$) нагрів зупиняють, а деталі стискають з більшим зусиллям (30 МПа) необхідним для видавлювання евтектики і оксидних

плівок із зони з'єднання. Аналогічна технологія зварювання різнорідних металів запропонована і в роботі [96].

В роботі [97] запропоновано спосіб зварювання тиском алюмінію і його сплавів через проміжний прошарок з матеріалу, який при взаємодії з алюмінієм утворює рідку евтектику (мідь, цинк, срібло, кремній). Деталі нагрівають до температури вище утворення евтектики, але нижче температури плавлення алюмінію, а потім прикладають тиск для видалення рідкої евтектики із зони з'єднання.

Автори роботи [98] запропонували метод з'єднання металевих виробів через борований поверхневий шар. Запропонованим методом можна з'єднувати всі метали, які утворюють з бором евтектику з температурою плавлення менше ніж температура плавлення основного металу (чорні метали, включаючи низьколеговані та нержавіючі сталі, сплави на основі нікелю та кобальту).

Авторами роботи [99] розроблено процес активованого дифузійного зварювання для сплавів на нікелевій основі, які мають обмежену зварюваність. Зварювання ведеться через проміжний прошарок титану, який розплавляється при нагріванні і тим самим забезпечує очищення контактуючих поверхонь від оксидних плівок й дозволяє значно зменшити питомий тиск зварювання. Після зварювання проводять дифузійний відпал тривалістю 4-16 годин.

Таким чином, застосування рідкої фази дозволяє знизити тиск зварювання, скоротити час його дії і зменшити пластичні деформації у порівнянні із зварюванням тиском без рідкого прошарку. Крім цього, рідка фаза відіграє й іншу не менш важливу роль – активує поверхні, що з'єднуються. Вона сприяє відділенню, диспергації та розчиненню оксидних плівок. Активуюча дія підсилюється, якщо в прошарку є незначний вплив вуглецю, бору, основних елементів, які сприяють відновленню або переведенню оксидів в легкоплавкі сполуки. При змочуванні основного металу рідкою фазою руйнуються зв'язки його

атомів з атомами адсорбованих речовин, що поряд з температурною та деформаційною активацією забезпечують так звану активацію рідкою фазою. Однак, у зв'язку з тим, що за механічними властивостями прошарки значно поступаються основному металу, то рекомендується повне видалення рідкої фази, а це не завжди можливо.

Способи зниження рівня деформації при електроконтактному зварюванні. Прецизійне електроконтактне зварювання – це різновид електроконтактного зварювання, коли з'єднання утворюється із залишковою пластичною деформацією, що не перевищує 2 % товщини (діаметру) деталі.

Класичне контактне зварювання супроводжується деформацією в стику або вм'ятинами в точці, що досягають 20 % товщини або діаметру деталі [100], [101].

За стандартом [102] при контактному зварюванні допускається широкий інтервал проплавлення деталі: $h_{пр} = (0,2-0,8)\delta$, де δ – товщина деталі, мм. За цим стандартом допустима вм'ятина при точковому або осадка при стиковому зварюванні не повинні перевищувати 20 % товщини або діаметру деталі, при цьому мінімальний рівень деформації стандарт не лімітує.

Технічно і технологічно ефекту прецизійності при контактному зварюванні досягають при зменшенні об'єму розплавленого металу в площині контактування; зниженні зусилля стискування в 3.5 разів і короткоімпульсному дозованому вкладенні енергії для гарантії мінімально необхідного проплавлення. Основне призначення тиску при цьому – забезпечення надійного електричного контакту між електродом і деталлю. За критерієм Хольма питомий тиск для забезпечення надійного електричного контакту складає 2-6 МПа [86].

Якість прецизійного електроконтактного зварювання при малому проплавленні значно підвищується за рахунок стабільного об'єму розплавленого металу в тонкому приконтактному шарі і за рахунок утворення в ядрі дрібнокристалічного зерна. Дрібнокристалічне зерно

утворюється за рахунок двох чинників – великої швидкості охолодження, що досягає 20000 К/с, і зниження питомого тиску зварювання нижче критичного порогу рекристалізації, після якого відбуваються процеси укрупнення зерна. При малому об'ємі розплавленого металу різко скорочується теплове розширення в контактi деталь-деталь і зникає головна причина утворення проміжку між деталями. При малому об'ємі литого ядра різко зменшуються усадочні явища.

Так, щоб вм'ятини від електродів при точковому зварюванні або осадки при стиковому зварюванні не перевищувала 2% необхідні три умови [86]:

- процес стискання деталей вести з критичною швидкістю – без деформаційного зміцнення приконтного шорсткого шару, в ідеалі, з його розплавленням;

- зварювання вести з мінімальним проплавленням, що забезпечує локальність нагріву не вище 0,25 товщини (для цього необхідно локалізувати тепловиділення тільки на опорі контакту між деталями);

- для збереження високої швидкості зварювання середня гомологічна температура в контактi має бути не менше 0,9.

Відповідно до вказаних умов забезпечення прецизійності, найбільш проблемним є прецизійне електроконтактне зварювання металів та сплавів, які мають високу тепло та електропровідність, а також низькій опір пластичній деформації (алюміній та його сплави).

Існує багато способів зниження зварювальних деформацій при електроконтактному точковому зварюванні [86]-[106].

Для запобігання виплеску внаслідок зниження зусилля стискання і збільшення тепловиділення в контактi необхідно подавати енергію дозованими імпульсами, при цьому їх число має бути достатнім для того, щоб отримати надійне мінімальне допустиме проплавлення (рис. 1.6).

При необхідності зменшення вм'ятин від електродів з одної сторони зварного виробу використовується один із прийомів безслідного зварювання: збільшенням робочої поверхні одного з електродів, зварюванням на пласкому

електроді, введенням проміжної пластини з мідних сплавів між одним з електродів та деталлю та інші способи. При цьому необхідна щільність струму для забезпечення концентрованого нагріву створюється другим електродом з робочою поверхнею нормального розміру.

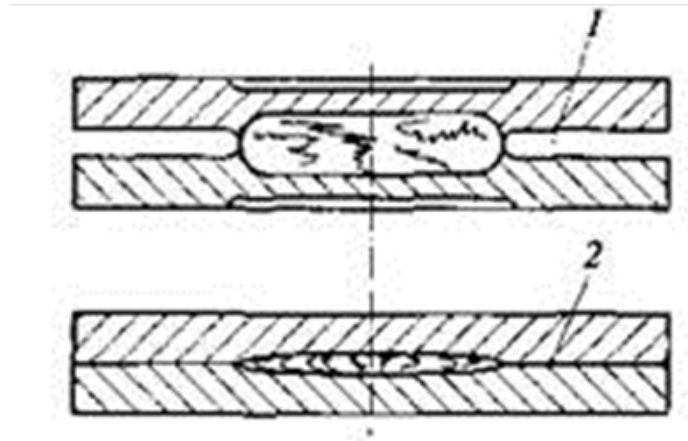


Рисунок 1.6 – Схема формування проміжку між деталями і розміру ядра точки від ступеню деформації при класичному (1) і прецизійному (2) контактному зварюванні

Додаткове кільцеве обтискання деталей (рисунок 1.7) навколо електродів сприяє перешкоджанню деформації металу в зазор між двома деталями.

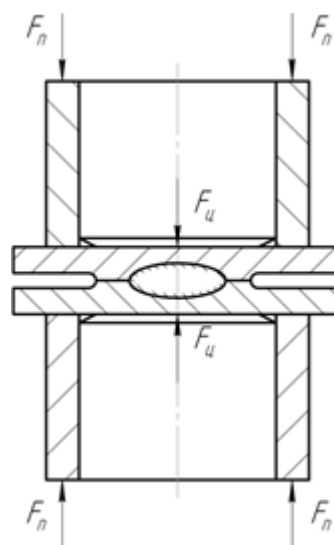


Рисунок 1.7 – Схема обтискання деталей при прецизійному електроконтактному точковому зварюванні

Цей метод являється досить ефективним. Обтиснення ущільнюючого поясу змінює електротермодеформаційний процес. Загальне зусилля стискання $F_{зв}$ спеціальним електродним пристроєм розділяють на два зусилля: F_u , яке прикладається в центрі, і F_n , що стискає периферійну ділянку зварної точки. Цей спосіб майже повністю виключає появу виплесків і може застосовуватись як на м'яких режимах, так і на жорстких. При зварюванні на жорстких режимах глибина проплавлення значно зростає через можливість значного підвищення густини струму на стадії нагріву і плавлення, а на м'якому режимі – через можливість суттєвого зниження відводу теплоти від деталей в електрод шляхом різкого скорочення центрального зусилля F_u в порівнянні зі звичайним зварюванням. Однак такий спосіб потребує удосконалення з метою підвищення стійкості електрода до забруднення, а також у створенні надійних і компактних універсальних електродних пристроїв для кільцевого обтиснення точок.

Як уже було сказано, процес пластичної деформації нерозривно пов'язаний з процесом нагріву. Тому, щоб обмежити вплив нагріву, можна використати тепловий екран (рисунок 1.8), який забезпечить зменшення тепловідводу в зоні електрод – деталь.

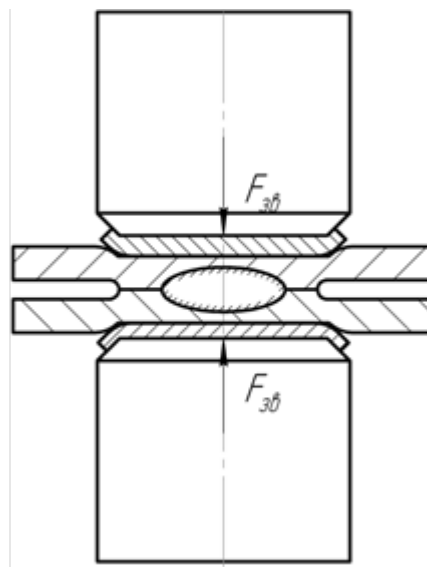


Рисунок 1.8 – Схема електродного контактного точкового зварювання з використанням теплового екрану

За рахунок цього в контактi електрод-деталь видiлятиметься бiльша кiлькiсть теплоти i в подальшому це позитивно впливатиме на процес оплавлення. Таким чином, екран слугить додатковим джерелом тепла. А за рахунок бiльшої площi теплового екрану, в порiвняннi з площею поверхнi електроду, навантаження на деталi зменшиться, зменшуючи при цьому деформацiї. Однак використання теплових екранiв знижує продуктивнiсть зварювання та пiдвищує енерговитрати.

В роботах [104] для локалiзацiї тепловидiлення в контактi при зварюваннi алюмiнiєвих пластин товщиною 3-12 мм, мiж ними розташовують сталеву маловуглецеву фольгу товщиною 0,05-0,2 мм (рис. 1.9). Протягом одного циклу зварювання при тиску до 150 МПа пропускають вiд 1 до 9 iмпульсiв зварювального струму щiльнiстю до 1600 А/мм² тривалiстю 0,1-0,25 с з нагрiванням сталевiй фольги до температури 1200 К. Здiйснення декiлькох циклiв нагрiвання-охолодження забезпечує дифузiю розплавленого алюмiнiю в сталь на повну глибину, що за рахунок фазових перетворень дозволяє отримати зварне з'єднання двох алюмiнiєвих пластин пiдвищеної мiцностi з низьким питомим опором контакту.

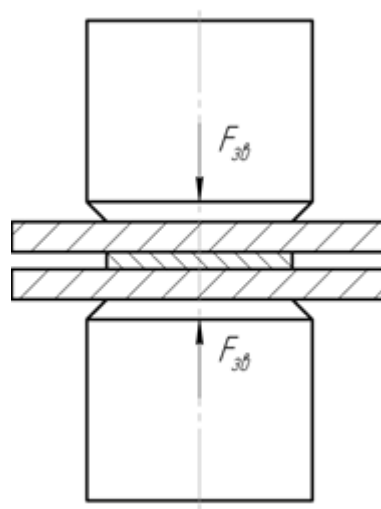


Рисунок 1.9 – Схема електроконтактного точкового зварювання з використанням промiжного прошарку

Авторами роботи [105] запропоновано використання обмежуючих пристосувань для зниження рівня деформації основних металів. Суть цього методу полягає у використанні пристосування (рисунок 1.10) з не електропровідного матеріалу, який буде утримувати деталі так, що деформації, які виникають при зварюванні деталей, будуть неможливі.

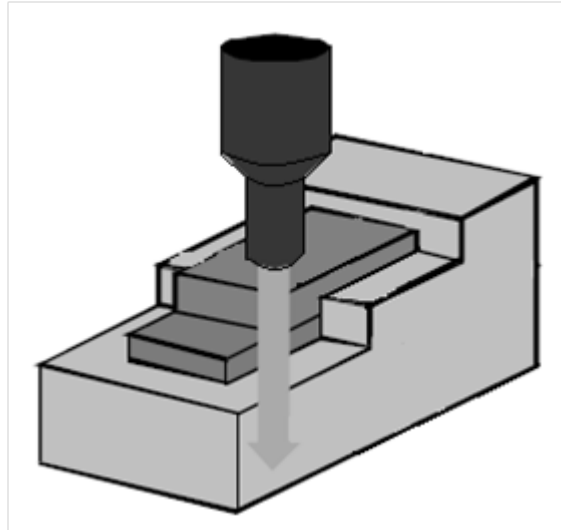


Рисунок 1.10 – Схема пристосування, обмежуючого деформацію основного металу

Таке пристосування дозволяє зменшити витік рідкого металу із зони зварювання і тим самим зменшить залишкові деформації. Недоліком цього пристосування є можливість витіку або виплеску рідкого металу із контакту електрод-деталь.

Авторами роботи [106] розроблено нову технологію контактного зварювання алюмінію зі сталлю стосовно до виготовлення біметалевих перехідників струмопровідних шин великого перерізу. В розробленому способі активація контактних поверхонь відбувається рідкою фазою, що дозволяє зменшити температуру, час зварювання, а також пластичну деформацію. Для цього застосовуються дрібнодисперсні активатори (порошки кремнію, міді або цинку), які додаються до зварювального флюсу з метою утворення евтектики при температурі нижче температури плавлення алюмінію.

Хімічний склад такого прошарку можна вибирати залежно від роду матеріалів, що зварюються. Товщина прошарку може бути різною, але достатньою для проведення нагріву, з частковим або повним розплавленням, як деталі, так і прошарку та утворення зварної точки. При цьому прошарок може цілком змінювати свій хімічний склад за рахунок хімічної взаємодії або зберігатися в стику.

Також проміжний прошарок може бути використаний в якості прошарку, який активує поверхні за рахунок утворення тонкого шару евтектики при температурі нижче температури плавлення основного металу, що обумовлює диспергування оксидної плівки, а прикладання незначного тиску приводить до витиснення шару евтектики зі стику разом з оксидною плівкою та утворення з'єднання, в тому числі і в твердій фазі.

Таким чином, аналіз літературних даних щодо існуючих способів отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань, показав, що існують роботи, в яких для прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі різних матеріалів можуть використовуватися проміжні рідкі прошарки, вібраційні коливання ультразвукової частоти, циклічне прикладання тиску, циклічна зміна температури в процесі зварювання, попереднє напилювання, введення в стик м'яких прошарків; а для електроконтактного прецизійного зварювання спеціальні цикли зварювання, які сприяють локалізації в стику механічної та теплової енергії. Але ці роботи носять безсистемний характер і на сьогоднішній день відсутня інформація щодо основ, принципів та засобів отримання таких прецизійних з'єднань зварюванням тиском

1.4 Аналіз основних процесів та факторів, які можуть впливати на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском різних матеріалів

Основними конструкційними матеріалами є [107]:

1. Металеві матеріали, до яких відносяться:

- сплави на основі заліза - чисте залізо, сталі, чавуни;
- сталі і сплави з особливими фізичними властивостями (магнітні і немагнітні сталі і сплави, сплави з ефектом пам'яті форми, тверді сплави і т.д.);
- кольорові метали і сплави – алюміній, мідь, титан та їх сплави і інші;
- композиційні матеріали з металевою матрицею.

2. Неметалеві матеріали:

- полімерні органічні матеріали - пластмаси, гуми;
- композиційні матеріали з неметалевою матрицею;
- неорганічні матеріали (скло, ситали, кераміка);

3. Матеріали із спеціальними властивостями – електронні матеріали, матеріали з особливими оптичними властивостями (волоконна оптика, люмінофори), напівпровідникові матеріали.

Для більшості конструкційних матеріалів при виготовленні певних виробів виникає необхідність прецизійного зварювання тиском. Тому нами, на основі літературних даних щодо фізико-хімічних і механічних властивостей основних конструкційних матеріалів був проведений аналіз основних процесів та факторів, які можуть впливати на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском різних конструкційних матеріалів.

Особливі труднощі виникають при прецизійному зварюванні тиском матеріалів, які мають:

1 – при дифузійному зварюванні у вакуумі:

- тверді тугоплавкі оксидні плівки (наприклад, алюміній та його сплави);
- обмежену розчинність та суттєву різницю у фізико-хімічних і механічних властивостях при зварюванні різнорідних матеріалів (наприклад, мідь з тугоплавкими матеріалами, метали з неметалами);

- низьку деформаційну здатність (наприклад, композиційні, інтерметалідні матеріали, тверді сплави, жаростійкі сплави, а також фольги з різних матеріалів);

2 – при електроконтактному зварюванні:

- високу тепло та електропровідність, а також низькій опір пластичній деформації (наприклад, алюміній та його сплави).

З аналізу процесів відповідальних за утворення зварного з'єднання, існуючих способів інтенсифікації процесу зварювання та способів обмеження деформації деталей при зварюванні, описаних в розділах 1.1-1.3 можна зробити висновок, що основним технологічним прийомом для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском має бути застосування додаткових засобів активації поверхонь та вибір оптимальних параметрів режиму зварювання (температура, тиск та час зварювання).

Як показав літературний аналіз при прецизійному зварюванні металів, що мають обмежену розчинність та суттєву різницю у фізико-хімічних і механічних властивостях перспективним засобом активації може бути використання попередньої іонної обробки, яка змінює структуру та властивості поверхні та поверхневого шару.

Для металевих матеріалів з високою тепло і електропровідністю використання локалізації теплової та механічної енергії в стику може бути ефективним для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань.

Для матеріалів, які мають на своїй поверхні тугоплавкі оксидні плівки, при обмеженні деформаційного впливу хімічна активація, яка полягає у відновленні оксидної плівки до чистого металу за рахунок взаємодії з певною речовиною, може бути домінуючою для утворення якісного зварного з'єднання.

Для прецизійного зварювання матеріалів з низькою деформаційною здатністю ефективним має бути використання проміжних прошарків з м'яких матеріалів, перфорованих або наноструктурованих прошарків.

Крім цього, на нашу думку, для прецизійного зварювання тиском різномірних матеріалів, один з яких здатний до сублімації, ефективним

засобом активації поверхонь може бути використання поверхневих фізико-хімічних процесів, які відбуваються в стикі самовільно.

Відомо, що у початковий момент прикладання тиску при зварюванні у твердій фазі сумарна площа контакту становить не більше 1-2% всієї поверхні. Тобто, протягом усього часу нагрівання й утворення фізичного контакту, у стикі перебувають мікроб'єми заповнені повітрям. При нагріванні зразків, що з'єднуються, у зоні контакту йдуть процеси розчинення газів повітря в металі й відбувається автовакуумування, тобто утворюється розрідження [108],[40].

У роботі [109] при дослідженні закономірностей розвитку фізичного контакту між сталлю й титаном виявлено, що процес високотемпературної деформації сплаву ВТ6 здійснюється не за механізмом в'язкого плинину, характерного для сплавів із глобулярною структурою, а за рахунок переповзання дислокацій, що контролюється само- або гетеродифузією. Зміну механізму в'язкого плинину на дислокаційний, автори роботи зв'язують із розвитком у контактному зазорі процесів сублімації компонентів сталі з наступною їхньою конденсацією на поверхні титану й дифузією вглибину металу.

В роботі [110] автори показали, що після нагріву контакту нікелю з нержавіючою сталлю (10X18H10T) до температури 1423 К і витримки впродовж 1 години спостерігається утворення на поверхні сталі адсорбованого прошарку нікелю внаслідок його сублімації. Причому, на поверхні нержавіючої сталі товщина адсорбованого шару нікелю більша, ніж на поверхні Ст3, що автори пояснюють впливом легуючих елементів хрому й нікелю, які збільшують теплоту адсорбції нікелю на поверхні.

У роботі [111] встановлено, що в умовах автовакуумування, у результаті сублімації легуючих елементів, змінюється хімічний склад поверхонь сталей 09M2C и X22H6M, які перебувають у замкнутому просторі на відстані 0,5 мм. Температура нагріву становила 1373 К протягом 20 с.

В роботах [112], [73] встановлено, що в умовах автовакуумування в

замкнених герметичних об'ємах при нагріві до температури 1223 К і витримці впродовж 20-ти хвилин відбувається сублімація міді з утворенням конденсату на поверхнях зразків з молібдену, хрому, ніобію і нержавіючої сталі.

Тож аналіз основних процесів та факторів, які можуть впливати на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском різних матеріалів, показав, що для кожної окремої групи матеріалів, властивості яких утруднюють отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань, існує ймовірність, що застосування певних технологічних прийомів з активації поверхонь (інтенсифікації процесу зварювання), які дозволять отримати якісні прецизійні нероз'ємні з'єднання (див. таблицю 1.3).

Таблиця 1.3 – Засоби активації поверхонь та інтенсифікації процесу зварювання, які можуть використовуватися при зварюванні тиском різних матеріалів з обмеженим рівнем їх деформування

<i>Матеріали, що зварюються</i>	<i>Фактори, які перешкоджають отриманню прецизійних нероз'ємних з'єднань</i>	<i>Можливі засоби додаткової активації при прецизійному зварюванні тиском</i>
<i>Дифузійне зварювання у вакуумі</i>		
мідь+тугоплавкі матеріали, метали з неметалами	обмежена розчинність, суттєва різниця у властивостях	модифікація поверхневих шарів, проміжні прошарки, поверхневі фізико-хімічні процеси
алюміній та його сплави	тверді тугоплавкі оксидні плівки	використання проміжних рідких евтектичних шарів, хімічна активація
різнорідні, які утворюють крихкі інтерметалідні сполуки	обмеження температури зварювання, необхідність використання бар'єрних шарів	проміжні м'які прошарки
композиційні, інтерметалідні матеріали, тверді та жаростійкі сплави	низька деформаційна здатність, тугоплавкі оксидні плівки	проміжні наноструктуровані, перфоровані, м'які прошарки
тонколистові матеріали	низька деформаційну здатність	прошарки

<i>Матеріали, що зварюються</i>	<i>Фактори, які перешкоджають отриманню прецизійних нероз'ємних з'єднань</i>	<i>Можливі засоби додаткової активації при прецизійному зварюванні тиском</i>
матеріали зі спеціальними властивостями, що мають обмеження по температурі нагріву	обмеження температури зварювання	проміжні м'які, перфоровані прошарки, локалізації теплової та механічної енергії в стику
Електроконтактне зварювання		
алюміній та його сплави	висока тепло-, електропровідність, тверді тугоплавкі оксидні плівки, низький опір пластичній деформації	локалізація теплової енергії в стику

Для підтвердження ефективності запропонованих засобів додаткової активації для прецизійного зварювання тиском різних матеріалів та з метою визначення наукових та технологічних основ отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском нами був проведений комплекс експериментальних та теоретичних досліджень, які представлені в наступних розділах.

Відповідно до проведеного аналізу літератури метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей формування прецизійних нероз'ємних з'єднань із різних однорідних та різнорідних матеріалів і розробка на цій основі технологій прецизійного зварювання тиском.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

1. Дослідити вплив термомеханічного циклу на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань та розробити методику розрахунку параметрів процесу зварювання тиском в залежності від допустимого рівня деформації основних матеріалів.

2. Вивчити здатність до прецизійного зварювання тиском металевих матеріалів з модифікацією поверхневих шарів та локалізацією теплової і механічної енергії в стику.

3. Дослідити можливість використання хімічної активації, багатошарових, пористих та м'яких прошарків для прецизійного зварювання тиском.

4. Вивчити здатність до прецизійного зварювання тиском різнорідних металевих матеріалів з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів, які відбуваються в стику.

5. Дослідити перехідну зону зварних з'єднань та вивчити основні закономірності формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском.

6. Розробити технологічні основи отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань та нові технології прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів.

При цьому, основною практичною задачею досліджень є саме розробка сучасної ефективної типової загальної технології отримання якісних прецизійних нероз'ємних з'єднань металевих матеріалів.

Висновки по розділу 1

1. Показано, що деформаційний вплив на матеріали, що зварюються, є вирішальним для утворення нероз'ємних з'єднань при всіх способах зварювання тиском. Створенню зсувних деформацій в стику сприяє додаткова активація поверхонь, що зварюються, за рахунок: регулювання основних параметрів зварювання; накладення додаткових впливів; попередньої обробки поверхонь та застосування проміжних прошарків.

2. Показано, що прецизійним є зварне з'єднання з залишковою пластичною деформацією, що не перевищує 2 % від товщини (діаметра) деталі. Умовами для забезпечення прецизійності зварних з'єднань на сьогоднішній день є: зменшення деформаційного зміцнення контактних поверхонь; збільшення напруженого стану в поверхневих шарах контактуючих матеріалів; забезпечення локального нагріву деталей;

деформування з критичною швидкістю коли знеміцнення поверхневого шару переважає перед його деформаційним зміцненням.

3. Показано, що основним технологічним прийомом для прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів може бути застосування додаткових засобів активації поверхонь та вибір оптимальних параметрів режиму зварювання, що забезпечить при цьому допустимий рівень деформації основних матеріалів. Обмеження деформації основних матеріалів обумовлює необхідність застосування додаткових засобів для активації поверхонь: використання рідкої фази, використання поверхневих фізико-хімічних процесів, хімічної активації, модифікації поверхонь, проміжних прошарків та локалізації теплової енергії в стику.

4. З літературних даних невідомо:

- безпосередні критерії технологій зварювання з мінімальним рівнем пластичної деформації;
- відсутня методика розрахунку параметрів процесу зварювання тиском в залежності від допустимого рівня деформації основних матеріалів;
- не вивчено вплив модифікації поверхневих шарів, локалізації енергії в стику, використання хімічної активації, проміжних прошарків та поверхневих фізико-хімічних процесів на прецизійне зварювання тиском.

5. Науково-технічною проблемою на вирішення якої направлено виконання роботи є вдосконалення існуючих та розробка нових засобів активації поверхонь, що зварюються, для утворення якісних нероз'ємних з'єднань при мінімально можливому рівні деформації основних матеріалів.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ, АПАРАТУРА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали, що досліджуються

В роботі для встановлення закономірностей формування прецизійних нероз'ємних з'єднань досліджувалося широке коло конструкційних матеріалів як в однорідному так і в різнорідному сполученні:

1 – при дифузійному зварюванні у вакуумі:

- *тугоплавкі матеріали*: молібден (МЧ)+мідь (М1); хром (ВХ-2К)+мідь (М1);
- *кольорові метали і сплави* – алюміній (АД00, АМцМ, АМГ5) + алюміній (АД00, АМцМ, АМГ5); алюміній (АМГ6)+титан (ВТ6), мідь (М1)+титан (ВТ1)
- *сплави на основі заліза*: сталь 45+сталь45;
- *композиційні матеріали*: вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ)+алюмінід титану (γ -TiAl)
- *жароміцні сплави*: нікелевий порошковий сплав (Ni-Cr) + нікелевий порошковий сплав (Ni-Cr); ЖС6К+ЖС6К;
- *матеріали із спеціальними властивостями*: напівпровідниковий матеріал (Bi_2Te_3)+мідь (М1);

2 – при електроконтактному зварюванні:

- *тверді сплави*: ВК10+ВК10; ВК15+ВК15; алмазно-твердосплавні пластини+ВК10(ВК15);
- *алюміній та його сплави*: АД00+АД00; АМц+АМц, АД31+АД31.

В таблицях 2.1-2.3 представлені основні фізико-хімічні, механічні властивості та хімічний склад матеріалів, які використовувалися в роботі.

Таблиця 2.1 – Основні фізико-хімічні властивості матеріалів, які використовувалися в роботі

Матеріали	$T_{пл}$, К	ρ , г/см ³	c , Дж/кг·К	λ , Вт/м·К	$\alpha \times 10^6$, град ⁻¹	$\rho \times 10^{-8}$, Ом·м	Джерело
АД00	930	2,7	904	220	24	2,92	[113], [114], [115], [116]
АМц	927		1090	180	23,2	3,45	
АМцМ	927		-	-			
АМг5	910		922	126	24,7	6,73	
АМг6	910			122			
АД31	928		921	188	23,4	3,44	
М1	1356	8,94	390	387	16,7	1,78	[117], [118]
ВТ1	1941	4,51	525	21,6	8,5	54	[119], [120]
ВТ6							
ВХ-2К	2148	7,19	462	671	6,2	12,8	[121]
МЧ	2893	10,22	260	142,5	5,44	5,2	[122]
ВВКМ	3823	1,4-1,5	-	50-70	0,2	-	[123], [124]
γ -TiAl	1733	4,8	-	115	9	-	[125], [126]
ВК10	1673	14,2-14,6	162,8	67	5,3	16,4	[127], [128]
ВК15	$T_{пл}$ (Co)	13,8-14,1	132,1	74	5,8	16,1	
Bi_2Te_3	858	7,7	0,25	1,6	8,4	6-16	[129], [130], [131]
сплав Ni-Cr (дослідний)	1673	7,5-7,8	440	-	-	-	[132]
ЖС6К	1775	8,15	-	90	-	-	[133]
Сталь 45	1723	7,82	473	48	11,9	17,1	[134]

Таблиця 2.2 – Основні механічні властивості матеріалів, які використовувалися в роботі

Матеріали	Е, ГПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	Джерело
АД00	68-71	80	40	35	50-90	[114], [115], [116], [135]
АМц		110	60	20		
АМцМ		-	-	25		
АМг5		300	150	10-15		
АМг6		355	190			
АД31		190-260	145-160	10-15		
М1	128	216-235	95-110	60	75	[117], [118], [135]
ВТ1	108	393-539	245-375	20	50-63,8	[119], [120], [136]
ВТ6		962-972	884-904	10-11	24-27	
ВХ-2К	245	550	385	22	30	[121]
МЧ	317	460	-	8	2	[122]
ВВКМ	-	50-120	-	-	-	[123], [124]
γ -TiAl	180	950	380	1-2		[125], [126]
ВК10	574	1800	-	-	-	[127], [128]
ВК15	559	1900	-	-	-	
Bi_2Te_3	320-340	10	-	-	-	[131]
сплав Ni-Cr (дослідний)	139,8	258-1000	-	-	-	[137], [132]
ЖС6К	-	882	784	2,5	3	[133]
Сталь 45	200	600	355	16	40	[134], [135]

Таблиця 2.3 – Хімічний склад матеріалів, які використовувалися в роботі

Матеріал	Масовий вміст елементів, %									Джере ло					
	Al	Fe	Si	Ti	Mn	Mg	Zn	Cu							
АД00	99,5	до 0,3	до 0,3	до 0,1	до 0,025	до 0,05	до 0,1	до 0,02		[115]					
АМц	96.35–99	до 0,7	до 0,6	-	1,0-1,5	до 0,2	до 0,1	до 0,2							
АМг5	91.9–94.68	до 0,5	до 0,5	до 0,1	0,3-0,8	4,8-5,8	до 0,2	0,1							
АМг6	91,1–93,68	до 0,4	до 0,4	до 0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	до 0,2	до 0,1							
АД31	97,6-99,35	до 0,5	до 0,6	до 0,15	до 0,1	до 0,9	до 0,2	до 0,1							
М1	Cu	Pb	Bi	Sn	Sb	As	S	O ₂		[118]					
	99,90	0,005	0,006	0,002	0,002	0,002	0,004	0,05							
ВТ1	Ti	O ₂	Fe	N ₂	Si	H ₂	C	Al	V	[119]					
	осн.	0,15	0,3	0,04	0,15	0,015	0,1	-	-						
ВТ6	осн.	0,15	0,3	0,05	0,15	0,015	0,1	5,3- 6,8	3,5- 5,3						
ВХ-2К	Cr	La	Ta	V	Fe	Ni	N	O ₂	C	[121]					
	99,05- 98,65	0,35- 0,5	0,15- 0,25	0,4- 0,5	0,01	0,005	0,003- 0,03	0,005- -0,05	0,004- -0,03						
МЧ	чистий молібден без добавок									[122]					
ВВКМ	вуглець									[124]					
γ-TiAl	Ti	Al	Nb	Mn						[125]					
	основа	48	2	2											
ВК10	WC				Co						[127]				
	90				10										
ВК15	85				15										
Bi ₂ Te ₃	Bi ₂ Te ₃	Ag	Au	Cd	Hg	Ga	Ge	Sn	Pb	Sb	Se	Cl	Br	I	[131]
	основа	0.32	0.2	0.2	0.3	0.56	0.51	0.82	0.81	1.1	1.25	1.2	1	0.86	
сплав Ni-Cr (досл-ий)	Ni	Cr	Fe	Al	Ti	Y									[137]
	основа	20	3–4	0,40–0,6	0,25–0,35	0,5									
ЖС6К	Ni	Cr	Al	W	Co	Mo	Ti	Fe			[133]				
	основа	11	5,5	5	4,5	4	2,75	до 2							
Сталь 45	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	[134]					
	0.42 - 0.5	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.3	до 0.08						

Одним з основних матеріалів для проведення досліджень при дифузійному зварюванні у вакуумі та електроконтактному зварюванні був обраний *алюміній та його сплави*, що є одним з найперспективнішим конструкційним матеріалом, але при цьому має властивості, які ускладнюють прецизійне зварювання: висока хімічна активність, схильність до інтенсивного окислення, висока теплопровідність, висока пластичність, схильність до пористості та інше. *Алюміній марки АД00* відноситься до технічного алюмінію та використовується для виготовлення полуфабрикатів (листів, плит, профілей, панелей, прутків, труб, проволони, штамповок) методом гарячого або холодного деформування. Сплав типу *АМц* відноситься до системи Al – Mn. Він відрізняється високою пластичністю, доброю здатністю до зварювання і високою корозійною стійкістю. Питомий електричний опір алюмінію суттєво зростає при малих концентраціях марганцю ~0.2%. Сплав добре деформується в холодному стані і в гарячому, термообробкою не зміцнюється. Сплави *АМг6, АМг5* відносяться до системи Al - Mg - Mn. Вони мають високі пластичні властивості та механічні характеристики як при кімнатній, так і при підвищених температурах. Магній утворює з алюмінієм α -твердий розчин, концентрація якого при підвищенні температури збільшується від 1.4 % до 17.4% в результаті розчинення фази Mg_2Al_3 . Однак сплави, які містять до 7% Mg, дають досить незначне зміцнення при термічній обробці. Внаслідок цього, сплави типу АМг і АМц, зміцнюють за допомогою пластичної деформації і використовують в нагартваному і в напівнагартваному стані. Однак застосування наклепу обмежене через різке зниження пластичності сплавів, тому їх використовують також і у відпаленому м'якому стані (*АМцМ*). Недоліком сплавів Al-Mg з високим вмістом магнію являється схильність до міжкристалічної корозії і корозії під напруженням після загартування або високотемпературних відпалів та старіння. Алюмінієвий деформуємий сплав *АД31* відноситься до системи Al-Mg-Si. Він характеризується високими пластичними властивостями в температурно-швидкісних умовах обробки

тиском і підвищеною корозійною стійкістю. Сплав АД31 інтенсивно зміцнюється при термічній обробці [114], [115], [116].

У зв'язку з тим, що *мідь* широко використовується у з'єднаннях різномірних матеріалів при виготовленні різноманітних електротехнічних виробів, які часто потребують прецизійності при їх виготовленні, а також враховуючи її порівняно високу пластичність, вона також була обрана для проведення досліджень при дифузійному зварюванні у вакуумі.

Властивості міді залежать від її чистоти й ступеня пластичної деформації. Чиста мідь має невелику міцність і високу пластичність. З підвищенням температури міцність міді зменшується. Відносне подовження й поперечне звуження практично не змінюються до температури 473 К. В інтервалі температур 473-873 К пластичні характеристики міді різко падають. При нагріванні вище 873 К пластичність металу відновлюється, обумовлено особливостями взаємодії атомів домішок з дислокаціями, що рухаються. Пластична деформація міді приводить до її нагартування. При ступені деформації більше 45-50 % межа міцності міді досягає 390-440 МПа, а відносне подовження падає до 2-4 %. Крім того, пластична деформація на 3-5 % підвищує електроопір міді. Рекристалізаційні процеси в деформованій міді починаються при нагріванні до 473 К. Знеміцнення міді починається при температурі вище 423 К. Відпал міді проводять при 773-873 К. При більш високій температурі пластичні властивості помітно знижуються в результаті росту зерен і утворення текстури рекристалізації [118].

Використання для досліджень титану (BT1, BT6), продиктовано, перш за все, широким практичним застосуванням саме такого типу матеріалів в різномірних і композиційних з'єднаннях при виготовленні багатьох вузлів і конструкцій в різних галузях машино- і приладобудування.

Марка титану BT1 вважається технічним титаном. Металургійна промисловість поставляє напівфабрикати технічного титану двох марок BT1-00 і BT1-0, які відрізняються від інших марок титану вмістом домішок (кисню, азоту, вуглецю, заліза, кремнію та ін.). Ці матеріали малої міцності,

основною перевагою яких є висока технологічна пластичність, що дозволяє отримувати з нього тонку фольгу. Міцність титану може бути підвищена нагартуванням, але при цьому суттєво знижуються пластичні властивості.

Титан також схильний до водневої крихкості, в зв'язку з чим вміст водню в титані VT1 не має перевищувати 0,01%.

Титан VT1 застосовується для виготовлення: напівфабрикатів (листів, стрічок, фольги, смуг, плит, прутків, профілів, труб, поковок і штампованих заготовок) методом деформації, а також злитків; виробів з високою міцністю при достатній пластичності і в'язкості, високим опором малим пластичним деформаціям, крихкому і втомному руйнуванню, які застосовуються в машинобудуванні, приладобудуванні та інструментальній промисловості; зварних конструкцій, що працюють в умовах радіаційного впливу.

Сплав VT6 відноситься до сплавів мартенситного класу та входить до великої групи титанових сплавів на основі α - і β -твердих розчинів, що містять в стабільному стані від 5 до 25 мас. % β -фази, і при різкому охолодженні з β -області отримують структуру мартенситного типу α' - або α'' -фаз. Легування сплаву алюмінієм зміцнює і стабілізує α -фазу, підвищує температуру A_{c3} , а також знижує питому вагу сплаву.

Домішки елементів впровадження – кисень, азот і вуглець аналогічно алюмінію зміцнюють α -фазу і підвищують температуру $\alpha + \beta \leftrightarrow \beta$ -переходу. Домішки заміщення, зокрема залізо, знижує температуру $\alpha + \beta \leftrightarrow \beta$ -переходу. Домішки заліза (до 0,6 мас.%) і кремнію (до 0,20 мас.%) не впливають на структуру сплаву VT6.

Слід зазначити, що простий відпал при 873-1073 K не змінює мікроструктуру сплаву, характер якої визначається режимом деформації і габаритами виробів. При рекристалізаційному відпалі поблизу температури A_{c3} відбувається коагуляція α -фази, частинки її укрупнюються і при тривалих витримках структура має глобулярний характер [120], [136].

З'єднання міді з тугоплавкими металами (хром, молібден) використовуються для виготовлення вузлів електротехнічних виробів.

Хром не має поліморфних перетворень і кристалізується в кубічній об'ємній центрованій решітці, що зберігається аж до температури плавлення. Висока окислостійкість при підвищених температурах, менша щільність, ніж в інших тугоплавких металів (Nb, Ta, Mo, W) і високий модуль пружності сприяє застосуванню хрому для одержання жароміцних конструкційних сплавів. Однак, низький опір механічним і тепловим ударам і висока схильність до холодноламкості ускладнюють його обробку.

Найгірше на властивості хрому впливають вуглець і азот, що утворюють із ним тверді розчини впровадження. Розміри атомів цих елементів більше, ніж відстань між вузлами кристалічної решітки у хромі, тому, впроваджуючись, вони спотворюють кристалічну решітку, що й викликає схильність хрому до холодноламкості. Водень не утворює із хромом стійких твердих розчинів і не впливає на його властивості, тому його широко використовують для захисту хрому при його деформуванні й при термічній обробці. Крім газових домішок, важливим фактором, що впливає на пластичність хрому, як при кімнатної, так і при високих температурах, є стан поверхні. Всі методи обробки й очищення поверхні, що спрямовані на видалення механічних і хімічних дефектів, сприятливо впливають на пластичність хрому. Найбільш висока пластичність при кімнатній температурі досягається після електрополірування й хімічного травлення. Очищення поверхні на шліфувальному папері також збільшує пластичність хрому. Висока чутливість хрому до стану поверхні проявляється й при високих температурах деформації [121], [138].

Молібден марки МЧ – це чистий молібден без присадок. Молібден займає друге місце після вольфраму і його сплавів за механічними властивостями. Однак, при температурі нижче 1623 К молібден має більшу питому міцність в порівнянні з танталом, вольфрамом і сплавами на їх основі. При кімнатній температурі на повітрі молібден стійкий, він починає окислюватися при 673 К. Вище 873 К швидко окислюється до оксиду MoO_3 [122].

Основні властивості вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу, що зумовлюють його застосування в таких областях як авіація і космонавтика, металургія, машинобудування, реакторобудування, медицина, є термічна стійкість і ударна міцність. Міцність ВВКМ може бути в 5-10 разів вище, ніж у графіту, їх висока температуростійкість поєднується з малою щільністю. Властивості ВВКМ змінюються в широкому діапазоні, так як визначається багатьма факторами: властивістю армуючого наповнювача і природою матриці, ступенем наповнення, взаємодією на кордоні розділу наповнювач - матриця, умовами просочення, затвердіння, карбонізації, графітизації, геометрією армування та ін. Для ВВКМ на відміну від інших матеріалів характерно поліпшення деяких механічних характеристик з підвищенням температури. Це обумовлено релаксацією внутрішніх напружень за рахунок поліпшення пластичних властивостей при підвищених температурах і «заліковуванням» дефектів внаслідок термічного розширення матеріалу при повторному нагріванні до температури виготовлення [123], [124].

Інтерметалідні матеріали алюмініди титану (γ -TiAl) мають гарні властивості конструкційного матеріалу: висока температура плавлення, низька щільність, високі значення модуля пружності, стійкість до окиснення, високе відношення міцності до щільності, жароміцність. Це визначає область їх застосування: компоненти двигунів, реактивні сопла, елементи обшивки космічних апаратів, стільникові конструкції надзвукових літальних апаратів і елементи їх теплозахисних систем [126].

Необхідність з'єднання твердих сплавів між собою та твердих сплавів з алмазно-твердосплавними пластинами виникає в інструментальній промисловості та в ряді машинобудівних галузей при виготовленні твердосплавних штамсів, ріжучого та бурового інструментів. Тому в дослідженнях використовувалися тверді сплави марок ВК10 та ВК15, а також алмазно-твердосплавні пластини надані Інститутом надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. Вольфрамові сплави групи ВК складаються з

карбидів вольфраму і кобальту. Промислові марки сплавів цієї групи розрізняються по вмісту кобальту 3-25% (ВК3-ВК25). За розміром зерна карбідної фази всередині групи сплави розділяються на особливо дрібнозернисті (ОМ), дрібнозернисті (М), середньозернисті, грубозернисті (В), особливо крупнозернисті (К, КС, С). В залежності від вмісту кобальту сплави цієї групи можна умовно розділити на три підгрупи: малокобальтові (3-8% Со), середньокобальтові (10-15% Со), висококобальтові (20-25% Со). Зі збільшенням вмісту кобальту підвищуються теплопровідність сплавів і їхній коефіцієнт термічного розширення, при одночасному зниженні питомого електричного опору [128].

Одним із перспективних альтернативних джерел енергії є термоелектричні перетворювачі, які працюють на основі взаємоперетворення теплової і електричної енергії. Найбільше застосування для термоелектричного охолодження та перетворення теплової енергії в електричну при низьких температурах отримали такі матеріали, як телурид вісмуту (Bi_2Te_3) та тверді розчини цього з'єднання з такими ізоморфними матеріалами, як селенід вісмуту (Bi_2Se_3) та телурид стибію (Sb_2Te_3). Телурид вісмуту (Bi_2Te_3) – хімічне з'єднання вісмуту та телуру, що кристалізується в ромбоєдричній структурі та являє собою вузькозонний напівпровідник. В цьому з'єднанні утворюються пластинчаті слюдо подібні кристали, які легко розшаровуються. Легкість розшарування обумовлена тим, що кристалічна решітка цього з'єднання складається з елементарних комірок тип $Te^{(1)} - Bi - Te^{(2)} - Bi - Te^{(3)}$, що з'єднані між собою лише силами Ван-дер-Ваальсу [139], [140].

Нікелеві сплави завдяки своїм високотемпературним властивостям можуть експлуатуватися при температурах, близьких до температури плавлення. *Жароміцний сплав* на нікелевій основі ЖС6К має високі характеристики міцності при підвищених температурах, так довготривала міцність сплаву складає 320 МПа при 1173 К та 169 МПа при 1273 К. Основне зміцнення в сплаві створюється частинками γ' -фази на основі

Ni_3 (Al, Ti) – 52,7%, додаткове – карбідами і борідами – 2,6 % [141]. Сплав застосовується при виготовленні соплових та робочих лопаток газотурбінних двигунів та є важкозварювальним дисперснозміцненим суперсплавом, що містить значну кількість титану і алюмінію, схильний до утворення тріщин в шві та зоні термічного впливу [142]. Також в роботі досліджували можливість отримання з'єднань з дослідного сплаву Ni-Cr отриманого методом порошкової металургії, який за своїми властивостями подібний до сплаву X20H80, але має нижчу щільність за рахунок пористості (близько 7-10 %), а також схильний до утворення інтерметалідів при нагріванні за рахунок вмісту алюмінію та титану, що унеможливує його зварювання плавленням.

При виготовленні сучасних деталей машин, конструкцій та виробів з вуглецевої сталі для різних галузей виникає необхідність отримання зварних з'єднань з обмеженим рівнем деформації основних матеріалів. Тому в роботі досліджували здатність до прецизійного зварювання сталі 45. Сталь 45 відноситься до конструкційних вуглецевих якісних сталей, яка відрізняється підвищеними характеристиками міцності, твердості, витривалості, добре обробляється. Головним недоліком цієї сталі є те, що вона дуже важко зварюється зварюванням плавленням, а також має високу схильність до корозії. Сталь 45 знайшла застосування практично у всіх галузях промисловості, де мають місце постійні механічні навантаження, складні температурні умови. Вироби зі сталі 45 витримують перепади в діапазоні від 473 К до 873 К. У машинобудуванні сталь 45 перед механічною обробкою спочатку піддають нормалізації [134].

Під час зварювання застосовували прошарки суцільного та перфорованого перетину з титану ВТ1, сталі Ст3, нікелю марки НПЗ, алюмінію АД00, АД1, прошарки евтектичного складу системи Al-Si, багат шарові прошарки Al/Ti, Al/Ni, Al/Cu, пористі прошарки з Cu, Co, Ni, а також конденсовані мідні та титанові шари.

Перфоровані прошарки (рис. 2.1) для електроконтактного зварювання твердих сплавів виготовляли із суцільних шляхом висвердлювання отворів по попередньо нанесеній прямокутній сітці. Застосування оптимальних режимів зварювання забезпечувало умови для заповнення отворів у прошарку. Розрахунок коефіцієнтів перфорації проводили згідно формули [143], [144]:

$$K_{\text{п}} = (n \cdot S_{\text{отв}}) / S_{\text{пр}}, \quad (2.1)$$

де n – кількість отворів; $S_{\text{отв}}$ – площа отвору; $S_{\text{пр}}$ – площа прошарку.

При зварюванні *композиційних матеріалів, жароміцних сплавів, напівпровідникових матеріалів* застосовували вакуумні конденсати, у вигляді фольги, які мали багат шарову або пористу структуру. Такі фольги отримували в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України методом електронно-променевого випаровування і конденсації в вакуумі.

Для виготовлення евтектичних прошарків для зварювання алюмінію та його сплавів використовували кремній (табл. 2.4), який знаходить застосування у виробництві сплавів для збільшення міцності алюмінію, міді й магнію.

Таблиця 2.4 – Властивості кремнію

Температура плавлення, К	Густина, г/см ³	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Атомний радіус, нм	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	τ , МПа	Модуль пружності, МПа
1683	2,33	95,5	0,133	176	–	$1,13 \cdot 10^5$

При дифузійному зварюванні у вакуумі міді з тугоплавкими матеріалами використовували модифікацію поверхневих шарів за рахунок іонної обробки.

Для активації поверхонь при зварюванні міді з тугоплавкими матеріалами та титаном також застосовували вакуумні конденсати, які отримували під час дифузійного зварювання за рахунок поверхневих фізико-хімічних процесів, що протікали самовільно.

При електроконтактному зварюванні алюмінію та його сплавів для локалізації теплової енергії використовували модифіковані шари, отримані електроіскровою обробкою різними матеріалами, а також застосовували проміжні суцільні шари з алюмінієвої фольги.

2.2 Зварювальне обладнання

Дослідження електроконтактного зварювання алюмінію та його сплавів здійснювалось на машинах для точкового зварювання загального використання типу МТ-1216 та стикового зварювання МС-802У.

Машина МТ-1216 (рисунок 2.1) складається з корпусу (1), зварювального трансформатора (2) з перемикачем ступенів (3), контактора тиристорного типу (4), регулятора циклу зварювання РЦС-502-1 (5), струмопідводів верхнього і нижнього (6) та приводу зварного зусилля (7).

Регулятор циклу зварювання дозволяє змінювати час витримки в межах 0,1...2,0 секунди на 5-ти позиціях: попереднє стискання; стискання; зварювання; проковування; пауза.

Найбільший вторинний короткочасний струм машини МТ1216 складає 12 кА. Максимальне зварювальне зусилля становить порядку 6 кН, а мінімальне 500-600 Н. Зусилля проковування на даній машині дорівнює зусиллю зварювання.

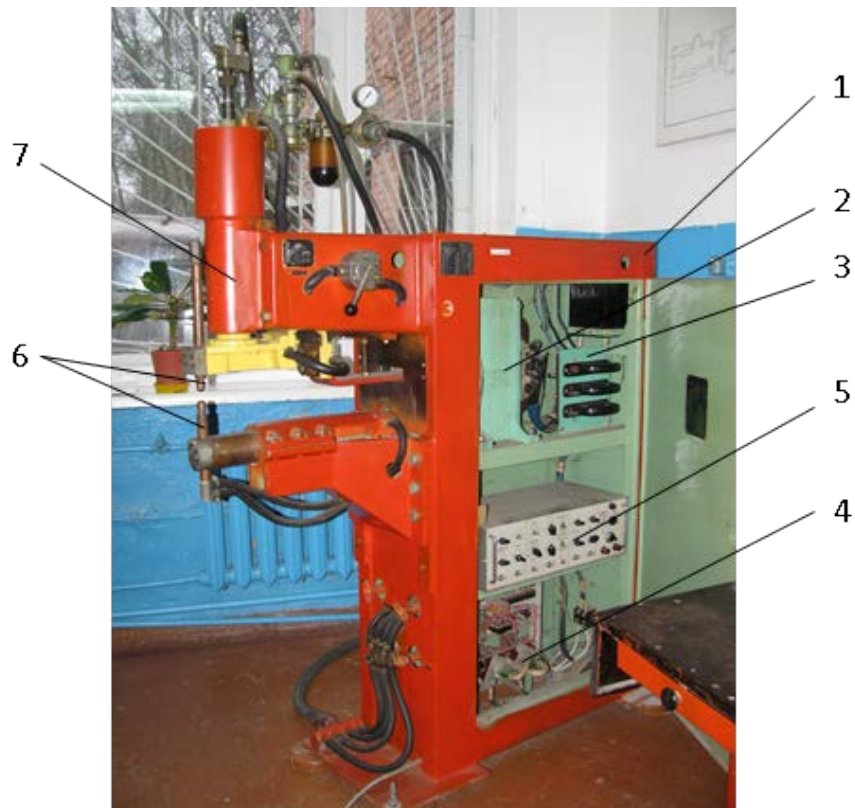


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд машини для електроконтактного точкового зварювання МТ-1216

На рисунку 2.2 зображена циклограма режиму при точковому зварюванні, яка характеризується попереднім стисненням, зусиллям зварювання та проковування, зварювальним струмом, тривалістю імпульсу струму зварювання.

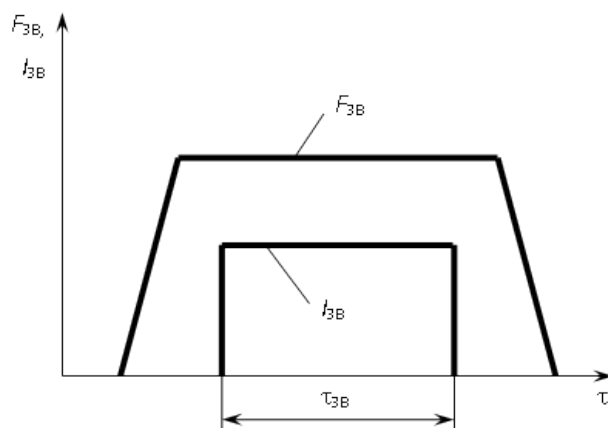


Рисунок 2.2 – Циклограма електроконтактного точкового зварювання на машині МТ-1216

Машина для стикового зварювання МС-802У, загальний вигляд якої представлений на рисунку 2.3 складається із: корпусу (1), всередині якого вбудований зварювальний трансформатор (2) перемикач ступенів (3), електромагнітний контактор (4). Зверху на корпусі машини змонтовано нерухомий зажимний пристрій (5), призначений для закріплення і центрування зварювальних деталей в електродах (губках) машини, а також підводу до них зварювального струму. Справа на плиті встановлено механізм подачі і осадки (6), призначений для зближення зварювальних деталей і створення необхідного зусилля в момент зварювання і осадки.

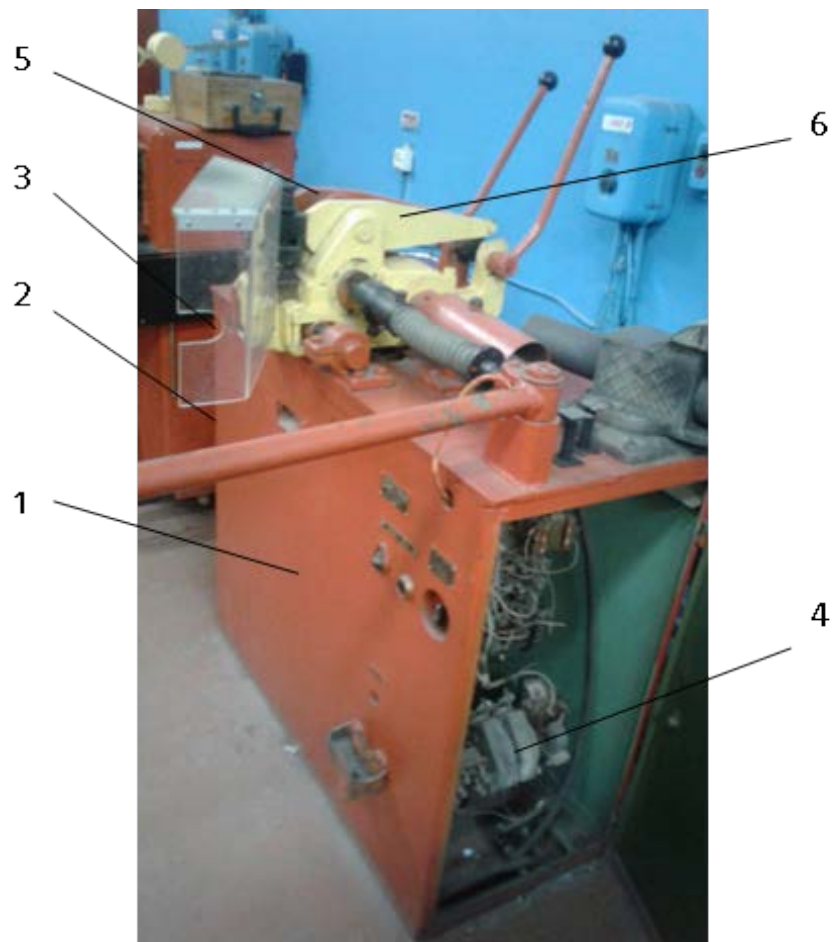
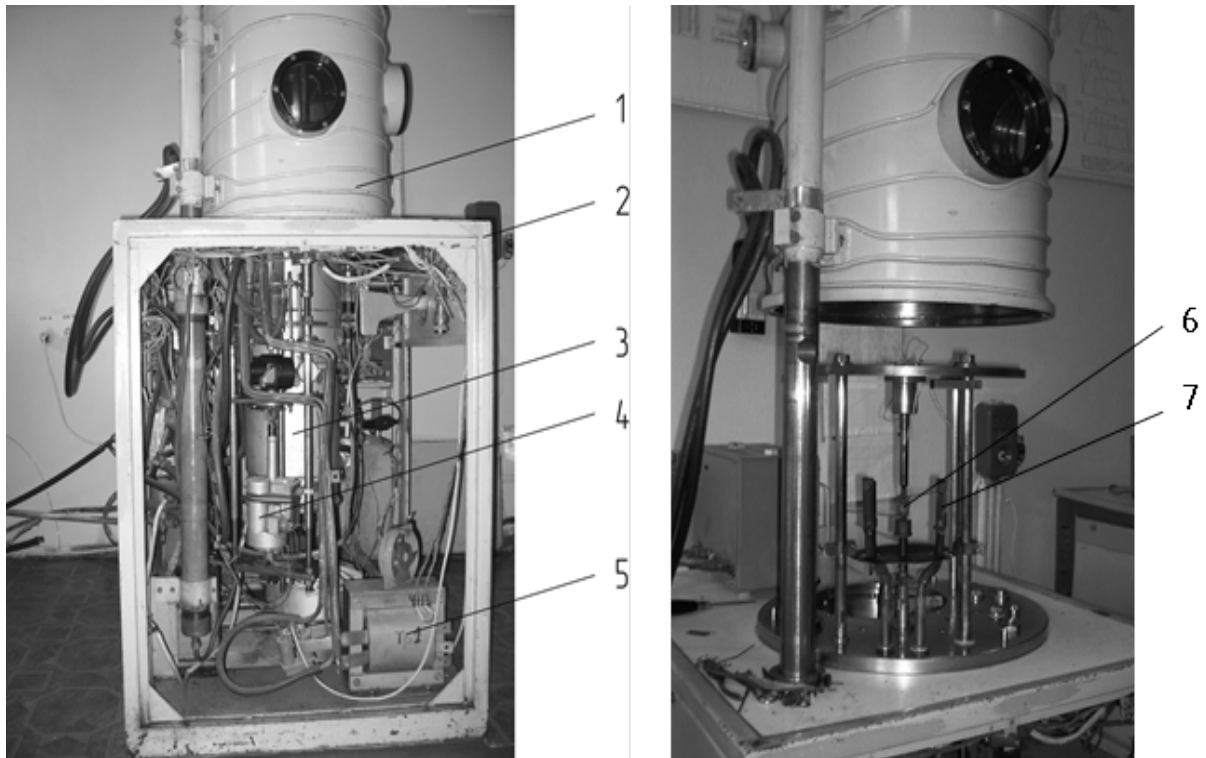


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд машини для електроконтактного стикового зварювання МС-802У

Дифузійне зварювання у вакуумі виконували на установках типу УВН і П-115 з радіаційною системою нагріву та У-394М з електронно-променевим джерелом нагріву зразків.

Установка типу УВН (рис. 2.4) складається з робочої вакуумної камери під ковпаком, механізму статичного навантаження, зварювального трансформатора, вакуумної системи й системи охолодження. Установка оснащена механізмом статичного навантаження й молібденовим нагрівачем.



а

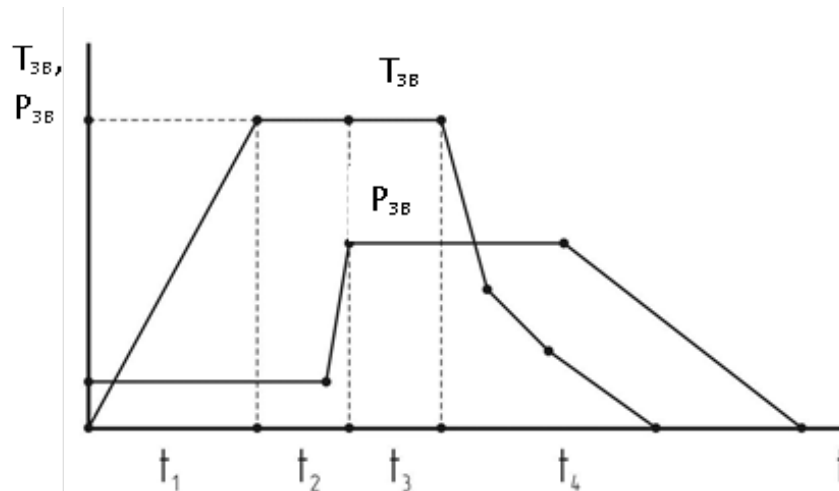
б

1 – ковпак; 2 – каркас; 3 – паромасляний насос; 4 – механізм статичного навантаження; 5 – трансформатор; 6 – деталі, що зварюються; 7 – нагрівач

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд установки (а) та вакуумної камери (б) типу УВН для дифузійного зварювання у вакуумі

Циклограма процесу дифузійного зварювання у вакуумі представлена на рисунку 2.5.

Механізм статичного навантаження (рисунок 2.6) представляє собою механізм переміщення штоку 5, сила від якого через вимірювальну скобу 3, за допомогою якої вимірюється прикладене зусилля, передається на пуансон, що, у свою чергу, передає зварювальне зусилля на зразок.

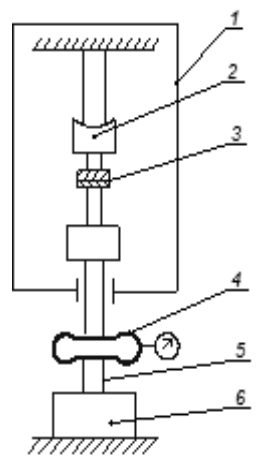


$T_{зв}$ – температура зварювання; $P_{зв}$ – зусилля зварювання;

t_1 – час нагрівання до $T_{зв}$; t_2 – час витримки при $T_{зв}$;

t_3 – час зварювання; t_4 – час охолодження

Рисунок 2.5 – Циклограма процесу дифузійного зварювання у вакуумі



1 – вакуумна камера; 2 – шайба для центрування; 3 – зварні зразки;

4 – вимірювальна скоба; 5 – шток; 6 – механізм переміщення штока

Рисунок 2.6 – Механізм статичного навантаження

Установка для дифузійного зварювання у вакуумі П-115 розроблена та виготовлена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (рис. 2.7). Конструктивно вакуумна камера (1) установки П-115 складається з корпусу і двох дверей (2) на яких закріплені струмопідведення (3). У нижній частині камери встановлено рухливий шток, упаяний в сильфон. Тиск від преса через клин (4) передається на виріб.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд установки П-115

У вакуумній камері (рис. 2.8) заготовки, що зварюються (1) встановлюються між верхнім (2) і нижнім (3) штоком. Нагрівання здійснюється молібденовими нагрівачами (4), зафіксованими на водоохолоджуючих струмопідводах (5) на дверях вакуумної камери (6).

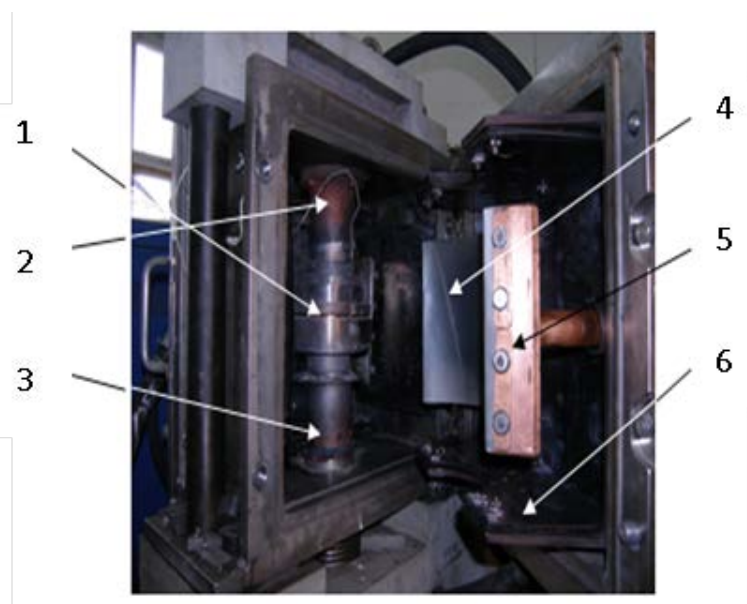


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд вакуумної камери установки П-115

При досягненні необхідної температури і витримці на визначеному режимі протягом 5-10 хвилин для вирівнювання температурного поля (тривалість визначається розмірами оснащення і деталей) до деталей прикладається зварювальний тиск. Максимально можлива величина осадження виробу (15 мм) визначається ходом поршня, що знаходиться в нижній частині камери.

Дифузійне зварювання нікелевих жароміцних сплавів проводили на установці У-394М, яка також розроблена та виготовлена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Загальний вигляд установки У-394М і схема вакуумної камери наведені на рис. 2.9 та 2.10, відповідно.

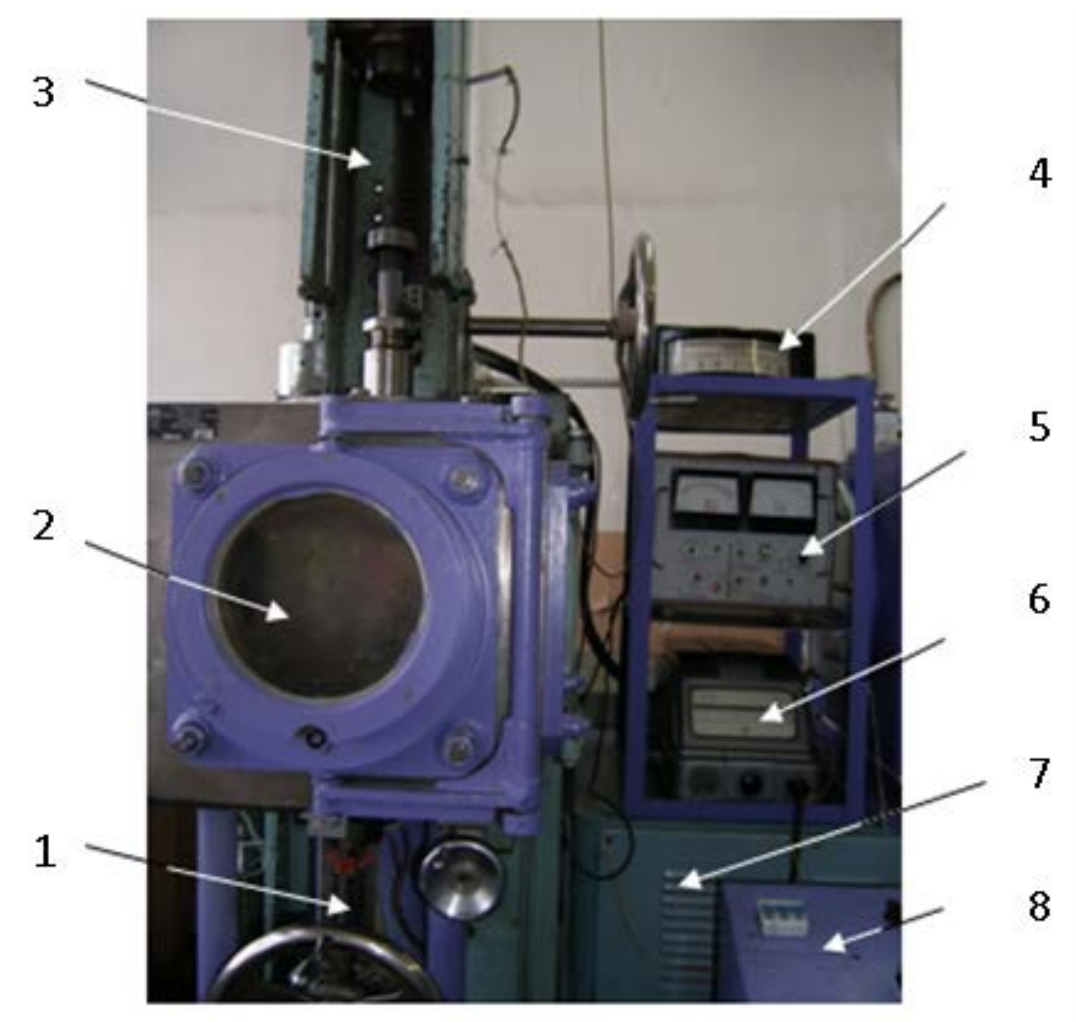


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд установки У-394М

Конструктивно установка У-394М обладнана механізмами для

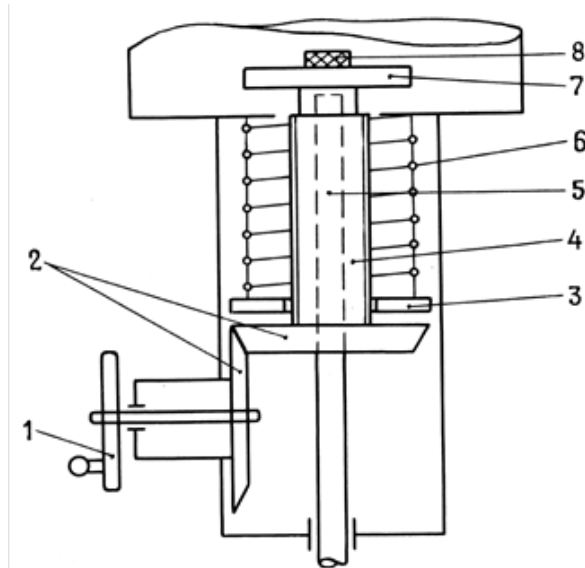
статичного (1) (див. рис. 2.11) і динамічного (3) навантаження, що конструктивно перебувають відповідно знизу і зверху від вакуумної камери (2). Механізм динамічного прикладання навантаження установки включає в себе направляючу колону висотою 2 метри, вантаж вагою до 20 кг і механізм фіксації вантажу у верхньому положенні. Контроль процесу зварювання проводили за допомогою потенціометра (4), вакуумметра (5) і кіловольтметра (6). Температуру нагрівання зразків регулювали за допомогою зміни прискорювальної напруги і струму розжарення гармати через джерело живлення (7) з органів управління, встановлених на пульті (8).

У вакуумній камері (1) установки У-394М (рис. 2.10) заготовки, що зварюються (2) встановлювали між верхнім (3) та нижнім (4) штоками. Нагрівання здійснювали за допомогою кільцевої електронно-променевої гармати (5) щілинного типу. Конструкція установки передбачає можливість нагрівання деталей, що зварюються, як в розведеному стані, так і приведеними в контакт.



Рисунок 2.10 – Вакуумна камера установки У-394М

Основні робочі параметри установок для дифузійного зварювання у вакуумі наведено у табл. 2.5.



1 – штурвал; 2 – шестірни; 3 – фланець; 4 – втулка; 5 – вал; 6 – пружина; 7 – плита; 8 – зразки, що зварюються

Рисунок 2.11 – Механізм статичного навантаження установки У-394М

Таблиця 2.5 – Параметри установок для дифузійного зварювання

№ п/п	Параметр процесу	Значення параметру		
		УВН	П-115	У-394М
1.	Об'єм робочої камери, м ³	0,12	0,07	0,05
2.	Температура нагрівання, К	293-1400	293...1173	293-3273
3.	Швидкість нагрівання, К/хв	373-423	293-323	473...573
4.	Зусилля зварювання, кН	0-5	0-180	0-10
5.	Швидкість деформації, с ⁻¹	10 ⁻⁵		10 ²
6.	Вакуум у робочій камері, Па	1,33×10 ⁻³		
7.	Джерело нагрівання	радіаційний		електронний промінь

Температуру нагрівання деталей, що з'єднуються, вимірювали термопарами хромель-копель (ХК), хромель-алюмель (ХА). Контроль ступеня розрідження у вакуумній камері здійснювали вакуумметром іонізаційно-термопарним ВИТ-2. Прилад призначений для вимірювання тиску сухого

повітря в діапазоні $2 \cdot 10^1 \div 10^{-5}$ Па. У комплект входять: іонізаційний монометричний перетворювач ПМИ-2 (для вимірювання тиску в діапазоні $2 \cdot 10^1 \div 10^{-1}$ Па) і термодарний монометричний перетворювач ПМТ-2 (для вимірювання тисків в діапазоні від $2 \cdot 10^{-1} \div 10^{-5}$ Па).

Всі дослідження з вивчення автовакуумування й сублімації проводили у вакуумі за допомогою установки типу УВН та на повітрі за допомогою муфельної печі марки СНОЛ-1,6.2,5.1/ 11-3.

2.3 Методика підготовки зразків до зварювання, досліджень та випробувань

Весь етап дослідження можна розділити на такі основні етапи:

- 1 – отримання дослідних зразків для зварювання шляхом їх різання;
- 2 – підготовка отриманих деталей під зварювання (шліфування, полірування, знежирювання та шабрування безпосередньо перед зварюванням);
- 3 – виготовлення (нанесення) проміжних прошарків, модифікованих шарів;
- 4 – зварювання; 5 – механічні випробування отриманих з'єднань;
- 6 – дослідження структури та фазового складу отриманих нероз'ємних з'єднань (мікроструктурні дослідження, вивчення дифузійних процесів, вимірювання твердості).

Зразки для зварювання відповідного розміру, що визначався способом зварювання та проведенням наступних необхідних етапів дослідження, вирізали, в залежності від матеріалу, на електроерозійному верстаті, циркулярними пилами за допомогою алмазного круга, на металорізальних верстатах та ручною ножівкою.

Враховуючи проведений аналіз літературних даних, основним способом підготовки поверхонь перед зварюванням або перед попередньою обробкою (нанесенням покриття, модифікацією) було обрано саме шліфування та полірування абразивним матеріалом в т.ч. й на алмазній чашці, для отримання плоско-паралельних поверхонь, без деформаційного

зміцнення шорсткого шару, з параметрами шорсткості, що відповідає 7-му класу, коли середній розмір мікровиступів R_{\max} не перевищує 0,4-8 мкм.

Для активації поверхонь при дифузійному зварюванні міді з тугоплавкими металами, термічне напилення шару і іонну обробку поверхонь проводили на модифікованій установці для вакуумного напилення УРМ-3 (рис. 2.12), призначеної для роздільного нанесення при серійному виробництві плівкових елементів і схем.



Рисунок 2.12 – Загальний вигляд модернізованої установки УРМ-3

Установка складається з наступних основних компонентів: вакуумний агрегат ВД2-3; паромасляний насос Н-2; механічний насос 2НВР-5ДМ; вакуумметр ВТ-2А-П. Живлення установки здійснюється трьохфазним змінним струмом напругою 380 В ± 10 %, частотою 50 Гц. Установка дозволяє виготовляти тонкі плівки у високому вакуумі методом резистивного випаровування матеріалу. Для проведення іонної обробки установка додатково оснащена джерелом живлення тліючого розряду та газовим устаткуванням, для подачі у камеру інертного газу (аргону). Основні робочі параметри установки наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Основні робочі параметри установки УРМ-3

Параметри установки	Числові значення параметрів
Тиск залишкових газів, Па	$5 \cdot 10^{-5}$
Тиск робочого газу, Па	$2,6 \cdot 10^3 \div 2,6 \cdot 10^1$
Швидкість відкачування, л/с	500
Температура підігріву підложки, К	373 ÷ 673
Напруга на аноді, В	0 ÷ 2500
Сила струму в розряді, А	0,05 ÷ 0,1
Споживана потужність, кВт	7,2
Об'єм робочої камери, м ³	0,12

Модифікацію поверхонь при електроконтактному зварюванні алюмінію та його сплавів проводили на установці для електроіскрової обробки (рис. 2.13), яка була розроблена та виготовлена на основі промислової установки Елітрон-22А, що призначена для електроерозійної обробки робочих поверхонь ріжучого інструменту і штампової оснастки, сріблення контактів і нанесення інших металів. Установка складається з генератора імпульсів (1), робочої камери для обробки в середовищі захисних газів (2), збуджувача вібрацій (3), в якому закріплюються легуючі матеріали.

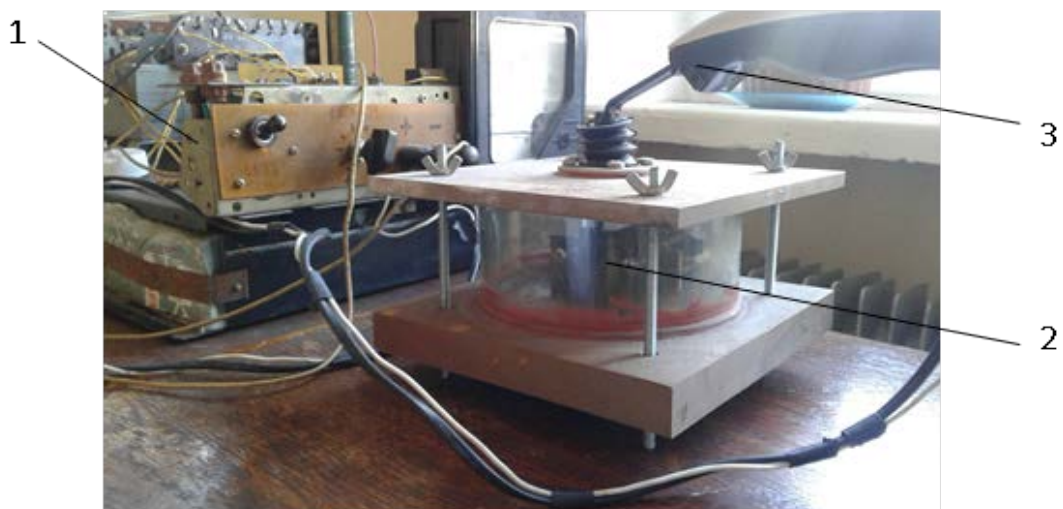
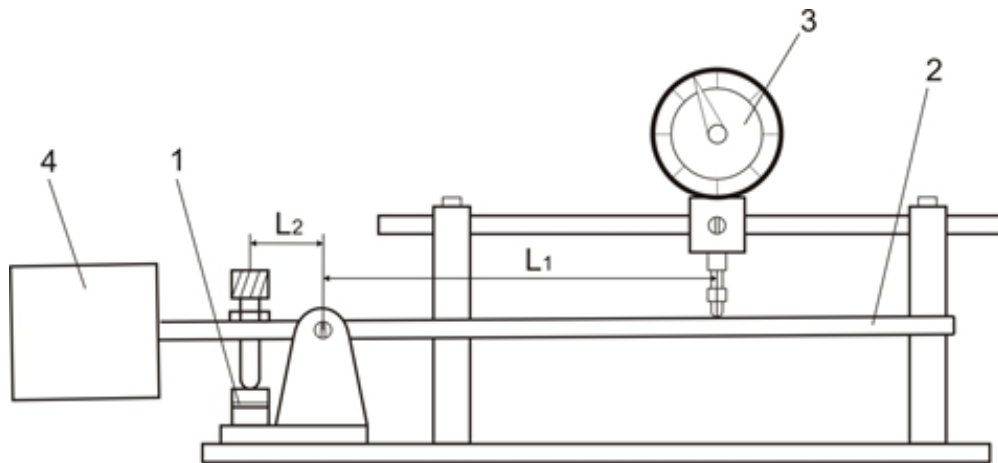


Рисунок 2.13 – Загальний вигляд установки для електроіскрової обробки

Принцип роботи установки оснований на періодичному зарядженні конденсаторів через транзисторний ключ, що керується пороговим пристроєм, до напруги, яка задається за допомогою набору резисторів і визначаючих режим обробки, та розрядженні ємності накопичуючих конденсаторів через розрядний тиристор при дотику вібруючим електродом оброблюємої поверхні. При розрядженні ємностей накопичуючих конденсаторів через електрод-інструмент на електрод-заготовку відбувається перенос матеріалу з електрода-інструмента і дифундування його в приповерхневу зону деталі, яка обробляється.

Для вимірювання товщини напиленого шару було розроблено та виготовлено пристосування, представлене на рисунку 2.14.



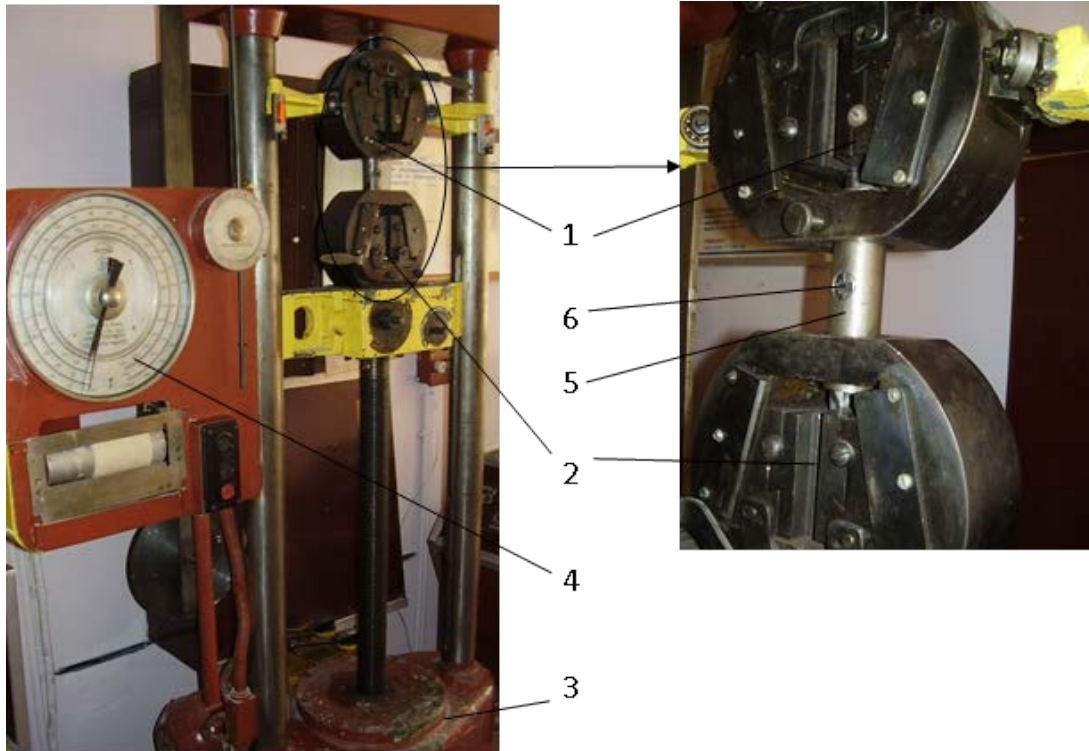
1 – напилений шар; 2 – ричаг; 3 – індикатор; 4 – вантаж

Рисунок 2.14 – Схема пристосування для вимірювання товщини напиленого шару

Товщина напиленого шару визначалась шляхом вимірювання та порівняння товщини зразків до напилювання та після з врахуванням відношення довжин L_1/L_2 .

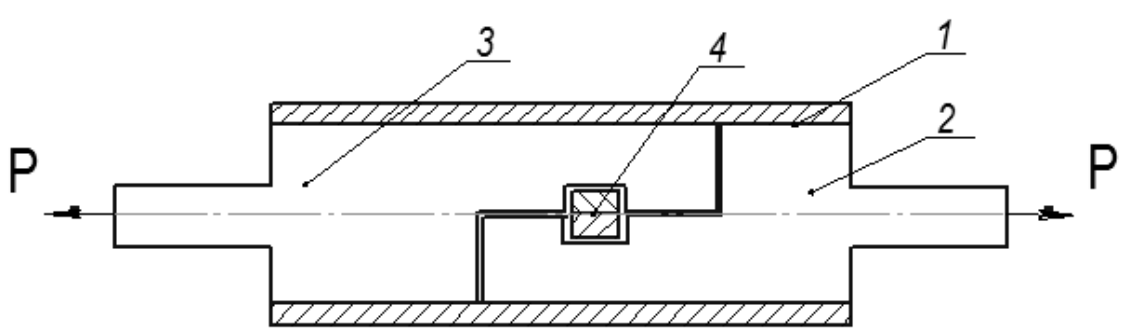
Якість зварних з'єднань оцінювали за результатами механічних випробувань на розрив та на зріз, які проводили на розривній машині УМ-5 (рис. 2.15). Механічні випробування зварних з'єднань на розтяг проводили при кімнатній температурі на стандартних зразках.

Дослідження міцності зварних з'єднань на зріз проводили на зразках розміром $5 \times 5 \times 10$ мм за допомогою спеціально розроблених та виготовлених пристосувань (рис. 2.16 та рис. 2.17).



1 – нерухомий затискний пристрій; 2 – рухомий затискний пристрій;
3 – електропривод; 4 – індикатор зусилля розриву;
5 – спеціальне пристосування; 6 – зварний зразок

Рисунок 2.15 – Загальний вигляд розривної машини УМ-5



1 – обмежуюча труба; 2, 3 – затискні губки; 4 – зварний зразок

Рисунок 2.16 – Схема випробування на зріз з використанням зусилля розтягу розривної машини



а

б

1 – шток; 2 – фіксуючий болт; 3 – основа; 4 – упорне кільце; 5 – зварний зразок
 Рисунок 2.17 – Схема випробування на зріз (а) та оснастка для проведення випробувань (б) з використанням зусилля стискання розривної машини

Зварні зразки за представленою схемою затискаються між упорним кільцем (4) та фіксуючим болтом (2) з невеликим зусиллям, що обмежує його деформацію при випробуваннях. Після цього в отвір фіксуючого болта вставляється шток, на який передає зусилля стискання від розривної машини. При цьому зразки розташовані відносно стику таким чином, щоб зріз відбувався по лінії стику.

Визначення деформації основних матеріалів проводилось згідно схем та формул, представлених на рис. 2.18. Розміри зразків визначали за допомогою штангенциркулю та мікрометра.

Для дослідження структури і фазового складу отриманих з'єднань використовували металографічний аналіз, рентгеноспектральний мікроаналіз, електронно-растрову мікроскопію.

Зразки для металографічних досліджень готували стандартними методами полірування і травлення [145].

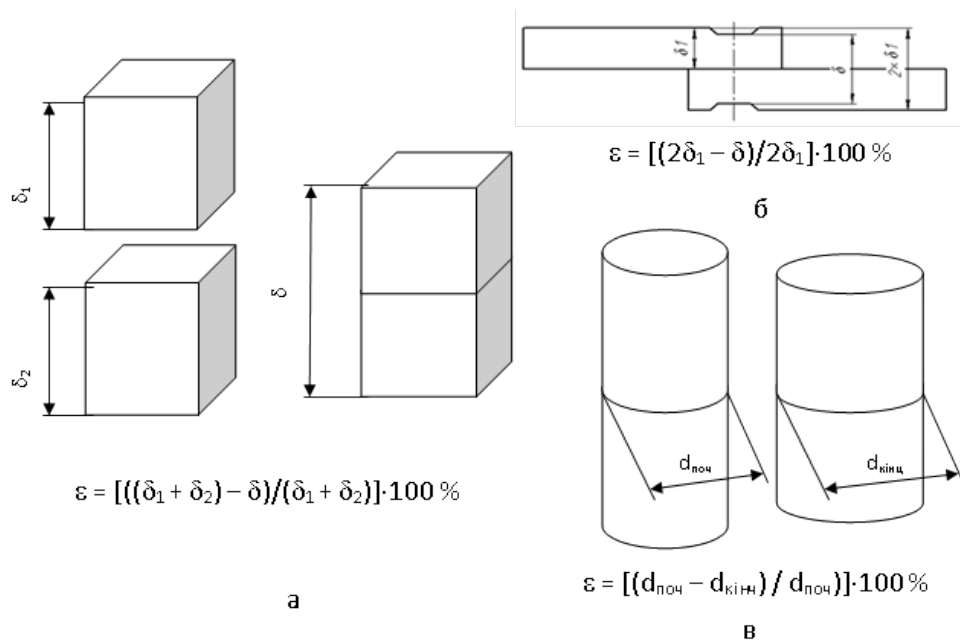


Рисунок 2.18 – Схема визначення відносної деформації основних матеріалів при дифузійному зварюванні у вакуумі (а), електроконтактному точковому (б) та стиковому зварюванні (в)

Реактиви для виявлення макро- і мікроструктур представлені в таблиці 2.7. Іонне травлення проводили за допомогою установки Fine coat ion sputter JFC-1100 фірми JEOL (Японія).

Таблиця 2.7 – Реактиви для виявлення мікроструктури зварних з'єднань

Склад реактиву	Спосіб травлення	Примітка
0,5 %-ний розчин плавикової кислоти (1 мл плавикової кислоти HF (48 %) на 200 мл води)	Хімічне травлення зануренням протягом 5-10 с	Виявлення мікроструктури алюмінію та його сплавів
"Чеський розчин": Cr ₃ – 2 гр., H ₂ SO ₄ – 3 мл., H ₂ O – 100 мл., р-н NaCl у воді – 4 мл.	Хімічне травлення: шліф протирають ватним тампоном, змоченим у розчині	Виявлення мікроструктури міді
50 % розчин HNO ₃	Хімічне травлення зануренням протягом 10-20 с	Виявлення мікроструктури молібдену
1 - 2 % розчин HNO ₃	Хімічне травлення зануренням протягом 10-20 с	Виявлення мікроструктури титану

Металографічний аналіз проводили за допомогою світлових мікроскопів, МІМ-8 и Неофот-32 та растрового електронного мікроскопа JSM-840, фірми “JEOL” (Японія) при збільшеннях до 5000 разів. Мікрорентгеноспектральний аналіз (МРСА) розподілу елементів проводили на установці «Сомебах» SX50, (Франція).

Елементний склад окремих ділянок поверхні зварних зразків вивчали методом енергодисперсійного аналізу на електронному мікроскопі JSM-35CF «JEOL», (Японія) з приставкою «INCA-350», (Великобританія).

Дослідження мікротвердості проводили на мікротвердомірі М400 фірми LECO (США)

Для дослідження дифузійних процесів у зоні з'єднання, спільно з Інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, використовували метод авторадіографії та радіоактивні ізотопи ^{60}Co , ^{63}Ni , які наносили гальванічним шляхом на поверхні, що підлягають зварюванню.

Мічений атом, в хімічному сенсі, не відрізняється від звичайного, але випускає радіоактивне випромінювання, що дозволяє фіксувати реальну картину переміщення елементів в зоні об'ємної взаємодії матеріалів, які зварюються. Для визначення коефіцієнтів розподілу радіоактивних ізотопів в зварному з'єднанні до шліфованої поверхні зразка за допомогою пружинної струбцини притискали рентгенівську плівку РФ-3. Час експозиції залежить від типу плівки і інтенсивності випромінювання зразка. За авторадіограмами на мікрофотометрі МФ-4 визначали залежність щільності почорніння (S) від розподілу ізотопу в зразку. Ступінь почорніння визначали логарифмом відношення інтенсивності видимого світла до інтенсивності світла, який пройшов крізь емульсію [146]. Збір і обробку даних проводили на спеціалізованому програмному забезпеченні за допомогою персонального комп'ютера, який здійснював знімання даних з мікрофотометра в автоматичному режимі. Розрахунок коефіцієнта дифузії і залежності інтенсивності випромінювання від глибини проникнення ізотопу ($I = f(x)$) також був проведений на ЕОМ.

Моделювання процесу нагріву та аналіз напруженого стану з'єднань здійснювали за допомогою комплексного програмного пакету ANSYS 11.0, створеного фірмою Westinghouse Electric та сертифікованого відповідно до серії стандартів ISO 9000, 9001 (підстава для використання: договір про передачу ліцензованого програмного забезпечення між Чернігівським національним технологічним університетом та ЗАТ «Кадфем Си-Ай-Ес» від 2010 року). Цей пакет є одним з надпотужних комплексів МСЕ (метод скінченних елементів) і відноситься до категорії CAE (Computer Aided Engineering) програмного забезпечення, що використовується при проектуванні машинобудівних, будівельних та інших конструкцій, при дослідженні питань динаміки, міцності, теплового аналізу. Засоби МСЕ ANSYS дозволяють проводити розрахунки як стаціонарних, так і нестаціонарних перехідних процесів.

Моделювання процесів пружно-пластичного деформування матеріалів при зварюванні тиском та розробку методики розрахунку параметрів процесу прецизійного зварювання тиском проводили спільно з інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Weldpredictions, яке розроблено в інституті електрозварювання.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ

Відомо застосування двох технологічних схем зварювання тиском, що відрізняються головним чином характером прикладання навантаження або напружень, що діють протягом циклу. Найчастіше використовують постійне навантаження, що створює напруження нижче межі текучості. При цьому процеси, які розвиваються в матеріалах, що зварюються, аналогічні повзучості. Такий процес називається вільним деформуванням [147]. Така схема проста та широко розповсюджена, але пов'язана з порівняно значною деформацією основних матеріалів (рис. 3.1).

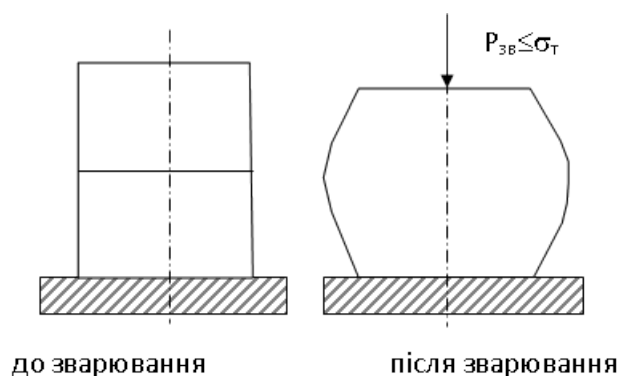


Рисунок 3.1 – Схема процесу зварювання тиском з вільним деформуванням

Технологічний процес, при якому навантаження та пластична деформація забезпечується спеціальною оснасткою (формуючим пристроєм або матрицею), яка переміщується при зварюванні з контрольованою швидкістю, називається зварюванням з примусовим деформуванням [147], [148]. Дифузійне зварювання з примусовим деформуванням здійснюють, як правило, при напруженні, які перевищують межу текучості матеріалу.

В роботі [149] відзначається, що створення в зоні з'єднання нерівномірного об'ємного стиснення за допомогою формуючих пристроїв, дозволяє посилити роль тиску і знизити температуру зварювання. Зона термічного впливу при зварюванні в формуючих пристроях, за своїми розмірами виходить значно менше, ніж при традиційному способі. «Витікання» металу із зони з'єднання гальмується на поверхнях формуючих пристроїв, що створює нерівномірне об'ємне стискання, яке попереджає утворення мікродефектів.

У зв'язку з тим, що в більшості випадках вимога до прецизійності зварних з'єднань встановлюється до виробів складної форми, коли не має можливості використовувати формуючі пристрої, то далі будемо розглядати зварювання тиском в умовах вільного деформування.

Вплив основних параметрів при зварюванні тиском на рівень деформації основних матеріалів, що досліджуються на сьогоднішній день вивчено достатньо [6], [8], [47], [48], [100], [150]-[154]. Однак, інформація, що стосується впливу термомеханічного циклу на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань, в літературі, окрім роботи [86] (див. розділ 1.3), відсутня.

У зв'язку з цим, нами спільно з інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України були проведені експериментально-теоретичні дослідження направлені на розробку методики, яка б дозволила розраховувати параметри процесу зварювання тиском в залежності від допустимого рівня деформації основних матеріалів.

3.1 Дослідження впливу основних параметрів зварювання тиском на деформацію матеріалів, що зварюються

Для визначення впливу термомеханічного циклу на формування прецизійних нероз'ємних з'єднань були проведені експериментальні дослідження по деформації металевих матеріалів. дослідження проводили в

умовах вакууму. В якості матеріалу для дослідження був взятий сплав АМц. Площа перерізу зразків складала 70 мм^2 ($a=8 \text{ мм}$, $b=8.75 \text{ мм}$, $h=16 \text{ мм}$)

Вплив на деформування зразка визначали на таких параметрах: температура нагрівання складала 773 К, 823 К, 873 К; тиск – 1 МПа, 4 МПа, 8 МПа; час витримки – 5 хв, 10 хв, 20 хв. Отримані результати приведені в таблиці 3.1. За отриманими даними були побудовані графіки залежностей, представлені на рисунках 3.2 - 3.4.

Таблиця 3.1 – Результати експериментів по вивченню впливу основних параметрів зварювання на деформацію зразків зі сплаву алюмінію АМц

№ п/п	T, К	P, МПа	t, хв	ε , %
1	773	1	5	0
2	823	1	5	0
3	873	1	5	3,5
4	823	4	5	8,2
5	773	8	5	5,1
6	823	8	5	19,4
7	873	8	5	26,8
8	773	1	20	0
9	873	1	20	28,8
10	773	8	20	25
11	873	8	20	50,8
12	823	8	10	27,4
13	823	8	20	41,7

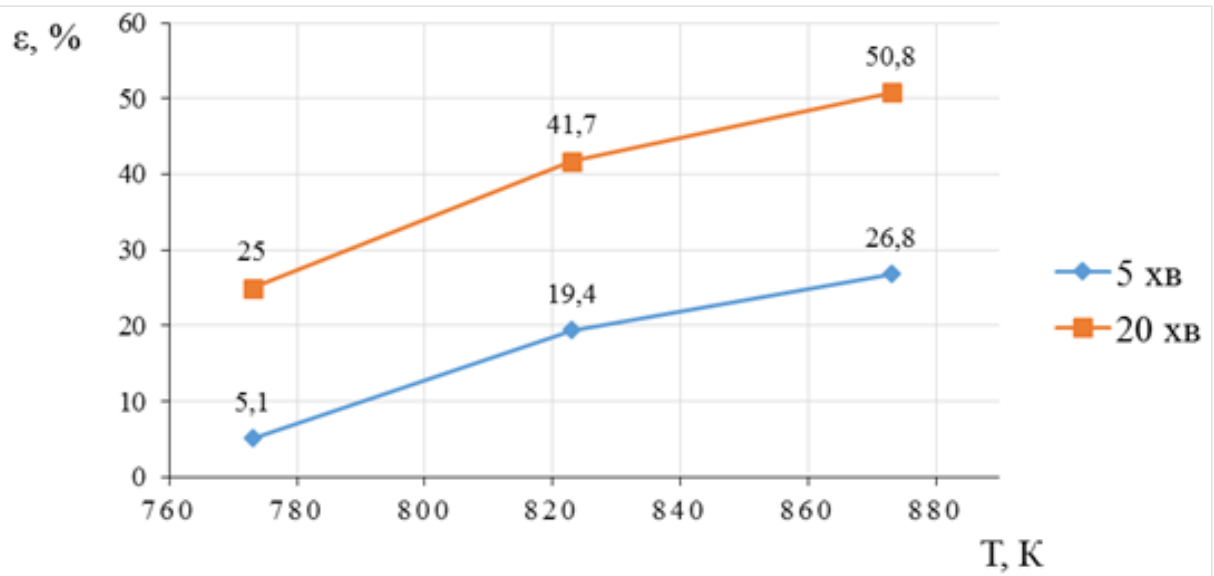


Рисунок 3.2 – Графік залежності деформації зразка зі сплаву АМц від температури нагрівання при значенні тиску 8 МПа

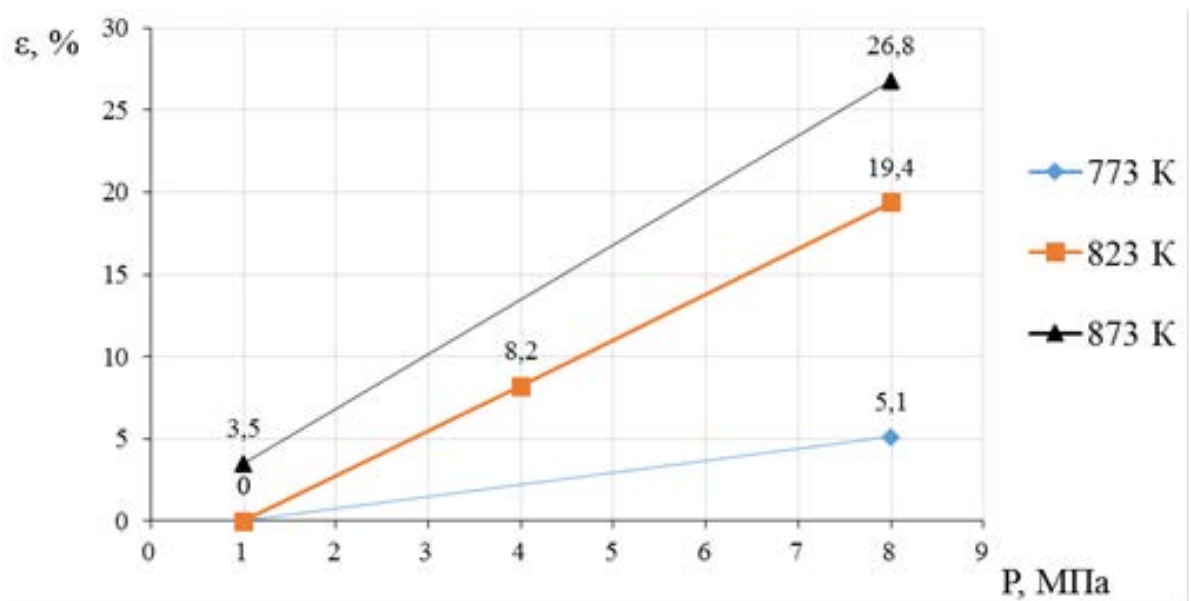


Рисунок 3.3 – Графік залежності деформації зразка зі сплаву АМц від тиску при часі витримки 5 хвилин

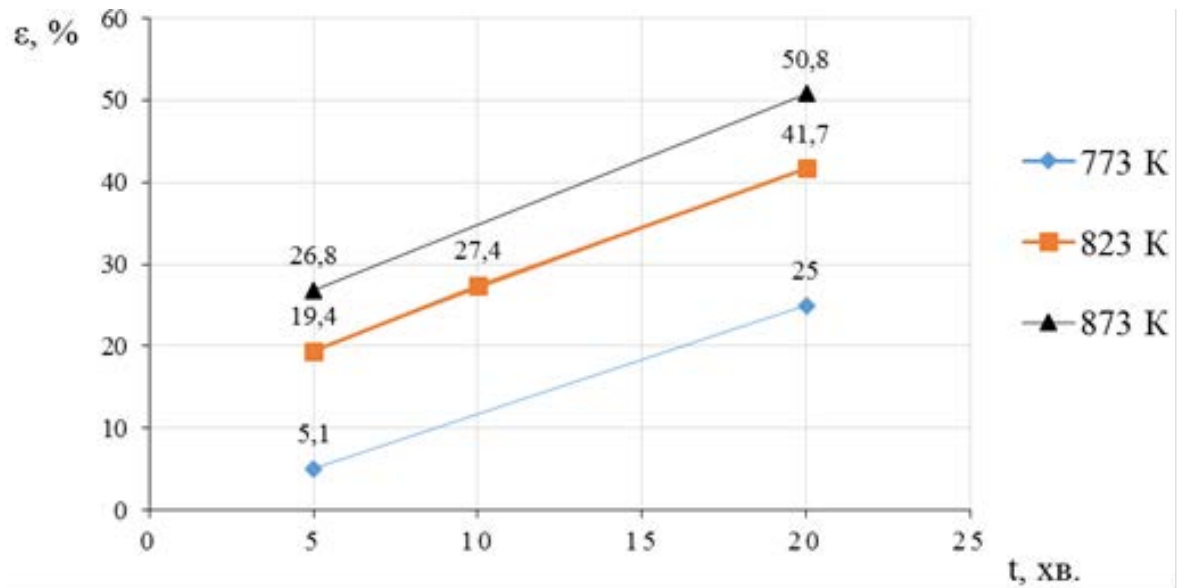


Рисунок 3.4 – Графік залежності деформації зразка зі сплаву АМц від часу витримки при тиску 8 МПа

Припустимо, що $x_1 = T$, $x_2 = P$, $x_3 = t$. В безвимірній системі координат верхній рівень відповідає +1, нижній рівень – 1, координати центра плану однакові і збігається з початком координат.

Таблиця 3.2 – Рівні повного факторного експерименту

Рівні	x_1	x_2	x_3
верхній	873	8	20
нульовий	823	4,5	12
нижній	773	1	5

Повні факторні плани дозволяють виявити вплив на функцію відгуку y не тільки кожного фактору окремо, але і спільні впливи на комбінації, тобто дослідити так званий ефект взаємодії. При визначенні коефіцієнтів рівняння регресії експериментально знаходять значення y в N точках факторного простору.

Таблиця 3.3 – Матриця планування повного факторного експерименту типу 2^k

№ п/п	x_1	x_2	x_3	y
1	-1	-1	-1	0
2	+1	-1	-1	0,03
3	-1	+1	-1	0,05
4	+1	+1	-1	0,27
5	-1	-1	+1	0
6	+1	-1	+1	0,29
7	-1	+1	+1	0,25
8	+1	+1	+1	0,51

Коефіцієнти рівняння регресії по методу найменших квадратів визначаються наступним чином:

$$\beta = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_\zeta \end{pmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (3.1)$$

Отже, будь-який коефіцієнт рівняння регресії b_1 визначається скалярним добутком стовпчика y відповідний стовпчик x_1 , що ділиться на кількість дослідів в матриці планування N :

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} y_i. \quad (3.2)$$

Розрахуємо коефіцієнти:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i;$$

$$b_0 = \frac{1}{8}(0 + 0,03 + 0,05 + 0,27 + 0 + 0,29 + 0,25 + 0,51); \quad (3.3)$$

$$b_0 = 0,175.$$

Коефіцієнти b_1, b_2, b_3 знаходяться за формулою (3.2).

$$b_1 = 0,1; b_2 = 0,095; b_3 = 0,0875.$$

Отримали лінійну модель

$$y = 0,175 + 0,1x_1 + 0,095x_2 + 0,088x_3.$$

Із отриманих даних побудували номограму, представлену на рисунку 3.5.

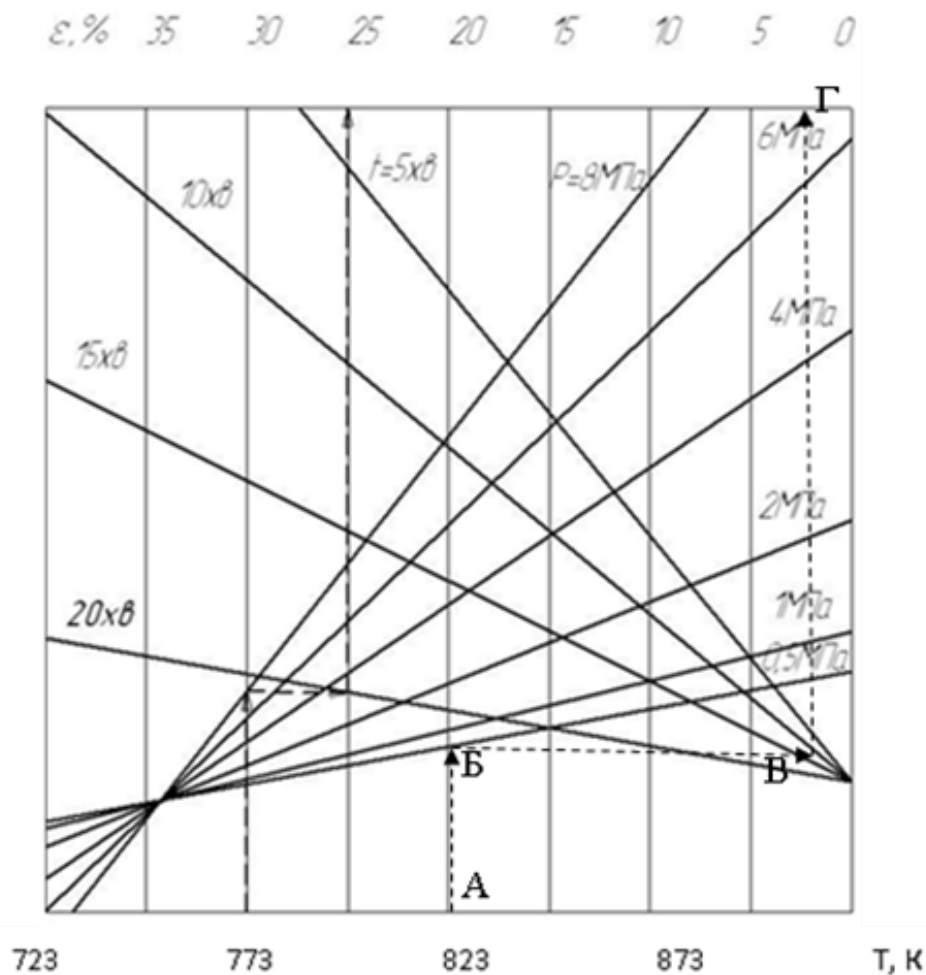


Рисунок 3.5 – Номограма визначення деформації зразка зі сплаву АМц
($T \rightarrow P \rightarrow t \rightarrow \varepsilon$)

За допомогою номограми ми можемо визначити оптимальний режим для прецизійного дифузійного зварювання сплаву АМц, співставивши всі параметри, наприклад: при температурі зварювання 823 К прикладання тиску 0,5 МПа протягом 10 хвилин дозволить отримати з'єднання з рівнем пластичної деформації основного матеріалу не більше 2 % (див. відрізок А-Б-В-Г, рис. 3.5.)

3.2 Розробка методики розрахунку параметрів процесу прецизійного зварювання тиском

Результати визначення впливу основних технологічних параметрів дифузійного зварювання (тиск, температура, час витримки) на деформацію елементів, що з'єднуються, отримані в п. 3.1, показали, що вибір оптимальних параметрів вимагає проведення досить великого обсягу експериментальних досліджень.

У зв'язку з цим, з метою зниження трудомісткості зазначеного процесу була розроблена математична модель для прогнозування термодформаційних процесів при дифузійному зварюванні металевих матеріалів [155]. Зазначена модель знайшла застосування в спеціалізованому програмному забезпеченні «Weldpredictions» (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України).

Спільний вплив високих температур і тиску на елементи, що зварюються, зумовлює появу і розвиток пружно-пластичних деформацій. Для моделі, яка використовується, прийнято, що приріст тензора деформацій у довільній точці з координатами x , y , z в момент часу t представляється у вигляді суми:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^c, \quad (3.4)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e$ – пружна складова тензора, $d\varepsilon_{ij}$, $d\varepsilon_{ij}^p$ – складова від миттєвої пластичності та $d\varepsilon_{ij}^c$ – складова деформації повзучості.

Тензор $d\varepsilon_{ij}^e$ пов'язаний з тензором напружень σ_{ij} законом Гука:

$$d\varepsilon_{ij}^e = d \left[\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij} (K\sigma + \varphi) \right], \quad (3.5)$$

де G – модуль зсуву, $G = \frac{E}{1+2\nu}$, K – модуль об'ємного стискання, $K = \frac{1-2\nu}{E}$, E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона, φ – функція вільної об'ємної зміни, яка пов'язана з нагріванням, структурними змінами і т.п., у найпростішому випадку $\varphi = \alpha(T - T_0)$, δ_{ij} – одиничний тензор, σ – середнє значення нормальних компонент тензора σ_{ij} .

Величина тензора $d\varepsilon_{ij}^p$ характеризує появу і розвиток непружних деформацій "миттєвої" пластичності. В рамках сучасних теорій пластичної течії складова деформації повзучості $d\varepsilon_{ij}^p$ пов'язана з тензором напружень σ_{ij} залежністю:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad (3.6)$$

де $d\lambda$ – скалярна функція, яка визначається умовою текучості Мізеса, тобто:

$$\text{при } f = \frac{1}{2} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) - \sigma_s^2(T) < 0 \quad (3.7)$$

та $f = 0$, але $df < 0$ величина $d\lambda \equiv 0$;

при $f = 0$ та $df > 0$ величина $d\lambda > 0$;

стан $f > 0$ недопустимо,

де $\sigma(T)$ – напруження деформування (межа текучості матеріалу) при температурі T .

Для деформацій повзучості $d\varepsilon_{ij}^c$ використовується рівняння зв'язку у вигляді [155]:

$$d\varepsilon_{ij}^c = \Omega(\sigma_i, T)(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)dt, \quad (3.8)$$

де $\Omega(\sigma_i, T)$ – скалярна функція повзучості матеріалу при температурі T та рівні напруженості, що визначається інтенсивністю напружень σ_i :

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)}. \quad (3.9)$$

Для даної задачі, коли при дифузійному зварюванні найбільш важливо враховувати деформації повзучості $d\varepsilon_{ij}^c$, оскільки від них істотно залежить процес деформування елементів, що зварюються, функцію $\Omega(\sigma_i, T)$ раціонально вибирати на основі експериментів по деформуванню при підвищеній температурі зразків з даного матеріалу, наприклад, з даних, представлених в п. 3.1.

В процесі одномірного навантаження вздовж осі x при $\sigma_{xx} < \sigma_s(T)$ $T = \text{const}$ з (3.4), (3.5), (3.6) витікає якщо $\frac{d\varepsilon_{xx}}{dt} = 0$

$$\frac{d\varepsilon_{xx}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\sigma_{xx}}{E} \right) + \Omega(\sigma_i, T) \frac{2\sigma_{xx}}{3} = 0, \quad (3.10)$$

$$\sigma_i = |\sigma_{xx}|.$$

Якщо $\Omega(\sigma_i, T) = \Omega_1(\sigma_i) \Omega_2(T)$, то з (3.8) витікає:

$$\frac{d\sigma_{xx}}{\Omega_1(\sigma_i)\sigma_{xx}} = -\frac{2}{3}E \cdot \Omega_2(T)dt. \quad (3.11)$$

При простому розтягуванні в ізотермічних умовах $\sigma_i = \sigma_{xx}$, відповідно

при $\Omega_1(\sigma_i) = \sigma_{xx}^n$, отримаємо після інтегрування від $t = 0$ до t :

$$\Omega_2(T) = \frac{3}{2E(T)t \cdot n} \left[\frac{1}{\sigma_{xx}^n(t)} - \frac{1}{\sigma_{xx}^n(0)} \right]. \quad (3.12)$$

Цю залежність можна апроксимувати типовою залежністю [9]:

$$\Omega_2(T) = A \exp\left(\frac{G}{T + 273}\right), \text{ МПа}^{-(n+1)} \cdot \text{час}^{-1} \quad (3.13)$$

або

$$\Omega_2(T) = \exp\left(B + \frac{G}{T + 273}\right), \text{ МПа}^{-(n+1)} \cdot \text{час}^{-1} \quad (3.14)$$

де A , $B = \ln(A)$, G_c – постійні.

Відповідно до вищесказаного було розроблено схему побудови математичної моделі спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності і повзучості для умов високотемпературного стиснення зразків з конкретного металу при їх дифузійному зварюванні, яку представлено на рис. 3.6 [156].

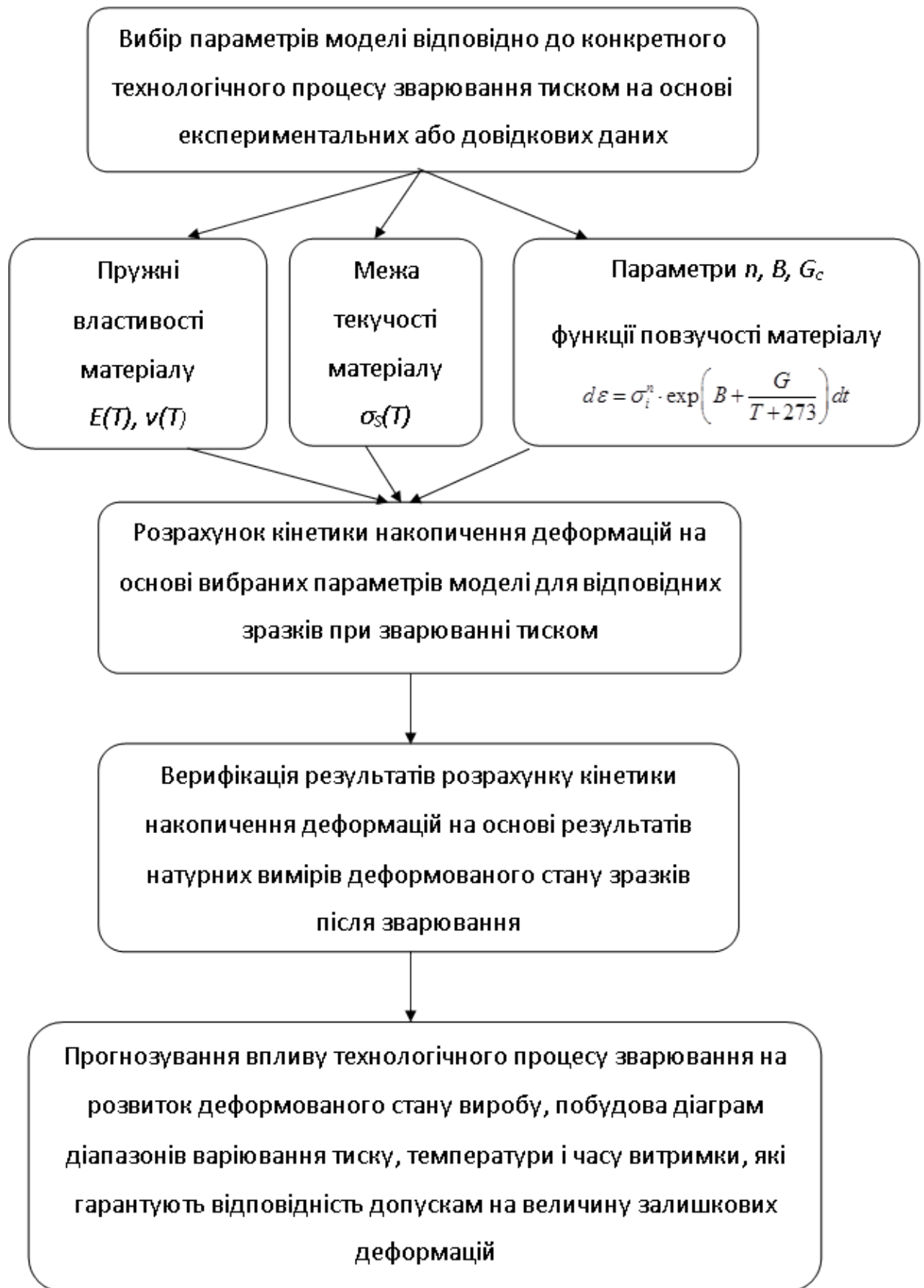


Рисунок 3.6 – Схема методики розрахунку параметрів процесу прецизійного зварювання тиском

3.3 Прогнозування впливу технологічних параметрів зварювання тиском на залишковий деформований стан виробів з різних матеріалів

В рамках цієї роботи розроблені та описані вище моделі були використані для прогнозування впливу параметрів дифузійного зварювання (температура, час витримки, а також тиск зварювання) виробів з наступних основних матеріалів, які були обрані для дослідження (див. розділ 2.1): алюмінієві сплави АМц і АД00, мідь М1 та сталь 45. Температурні залежності модуля Юнга для зазначених матеріалів наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Залежність модуля пружності Е, ГПа від температури

T, K Матеріал	293	373	473	573	673	773	873
АМц	68	65	62	60	56	50	40
АД00	71	70	66	61	56	50	44
Сталь 45	200	201	193,2	190,4	171,7	158	158
М1	128	125	115,2	110	103	100	89,7

Основним параметром матеріалу, що визначає залишкову формозміну конструкції, що зварюється, є схильність до деформацій високотемпературної повзучості (3.13), яка пов'язує величину необоротних деформацій з часом і математично виражається коефіцієнтами функції повзучості:

$$d\varepsilon = \sigma_i^m \cdot \exp\left(B + \frac{G}{T + 273}\right) dt \quad (3.15)$$

Для кожного із запропонованих матеріалів ці коефіцієнти визначалися або на основі експериментальних досліджень, або за допомогою наявних в

літературі кривих деформування при різних умовах високотемпературного силового впливу.

Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків з вказаних матеріалів були побудовані для температур $0,8-0,9 T_{пл}$, які зазвичай використовуються при дифузійному зварюванні.

Сплав алюмінію АМц. За допомогою описаної вище математичної моделі (розділ 3.2) термодформаційних процесів при дифузійному зварюванні металевих елементів і отриманої функції повзучості для матеріалу АМц (коефіцієнти функції повзучості: $n = 1,4388$; $B = 9,1$; $G_c = -11000$) в діапазоні робочих температур був проведений комплекс чисельних експериментів по визначенню максимального рівня деформацій елементів, що зварюються, в залежності від основних технологічних параметрів дифузійного зварювання (тиск, температура, час). За результатами проведених чисельних експериментів побудовані діаграми (рис. 3.7 – 3.10), що дозволяють при різних температурах нагріву досить оперативно визначати оптимальне співвідношення тиску і часу витримки для досягнення необхідного рівня деформації матеріалів, що з'єднуються.

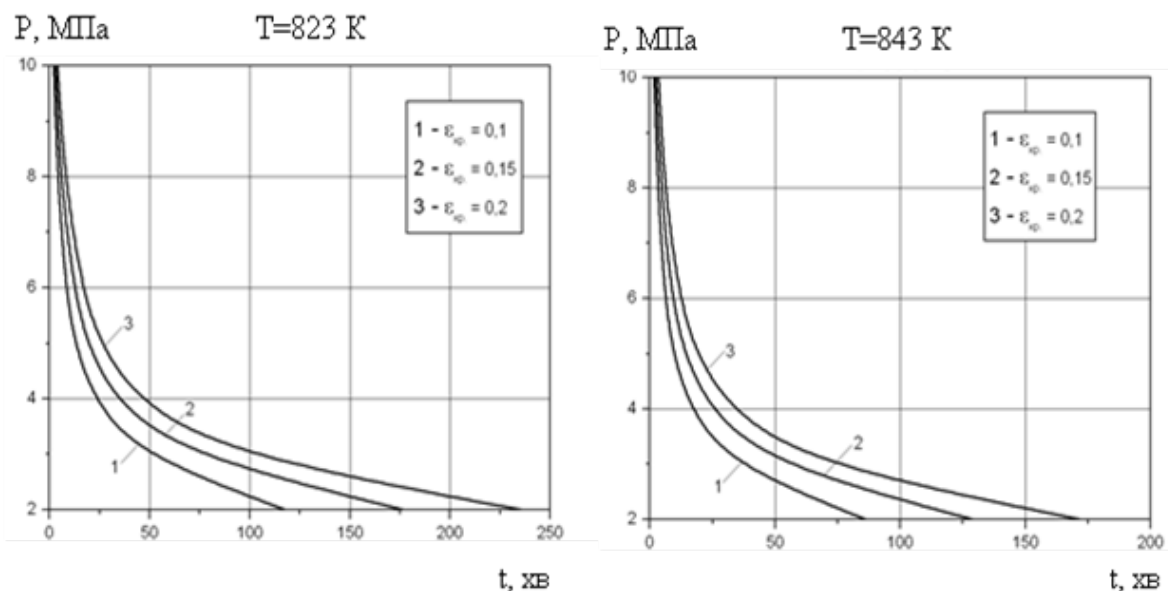


Рисунок 3.7 – Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків зі сплаву АМц ($\epsilon = 10-20\%$) при температурі 823К та 843К

Як видно з наведених даних, незворотні деформації повзучості розвиваються в часі істотно нелінійно і можуть досягати значних величин за період часу 100-200 хвилин (при температурах зварювання понад 800 К), що є неприпустимим з точки зору прецизійності зварних з'єднань. Практично важливими є залежності величини витримки при дифузійному зварюванні від прикладеного тиску, при якому для конкретної температури досягаються граничні залишкові деформації $\varepsilon_{кр} = 0,01-0,02$ (1-2%).

Згідно з результатами розрахунків, наведених на рисунках 3.8-3.10, в залежності від обраної температури зварювання максимально допустимий час витримки варіюється від декількох хвилин до 2 годин. Остаточне рішення про вибір конкретних параметрів режиму прецизійного зварювання необхідно приймати, з одного боку, на наведених вимогах по максимально допустимій залишковій деформації зварного виробу, з іншого боку, з врахуванням додаткових засобів активації, що використовуються для достатньої розвиненості дифузійних процесів.

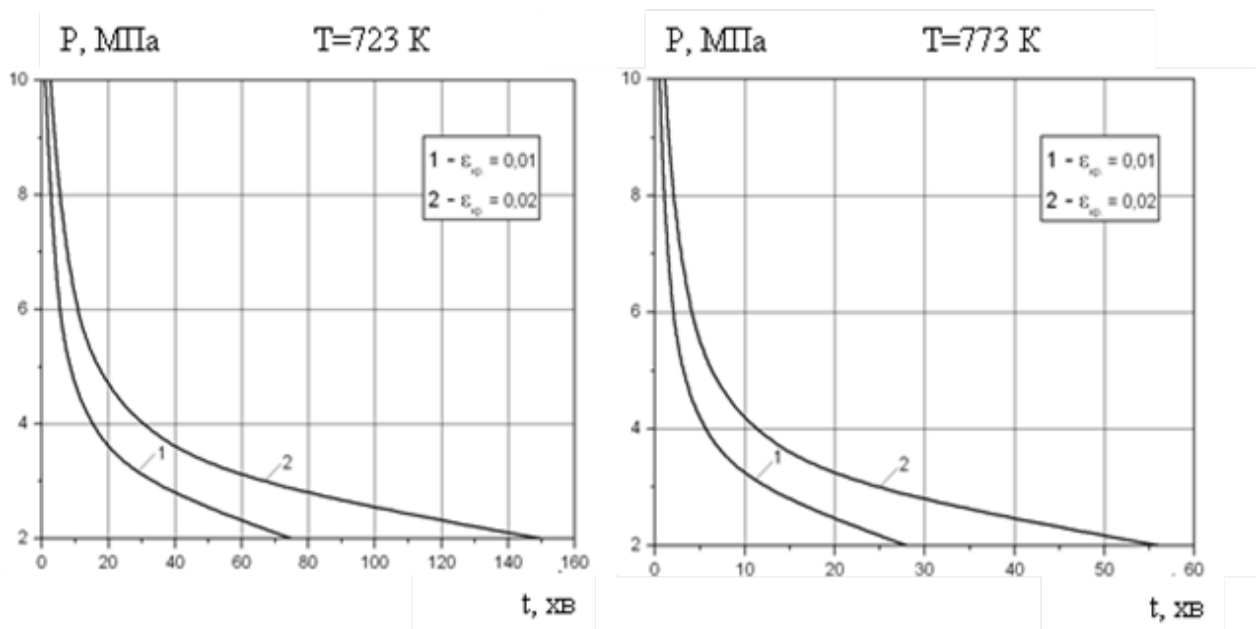


Рисунок 3.8 – Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків зі сплаву АМц ($\varepsilon = 1-2\%$) при температурі 723 К та 773 К

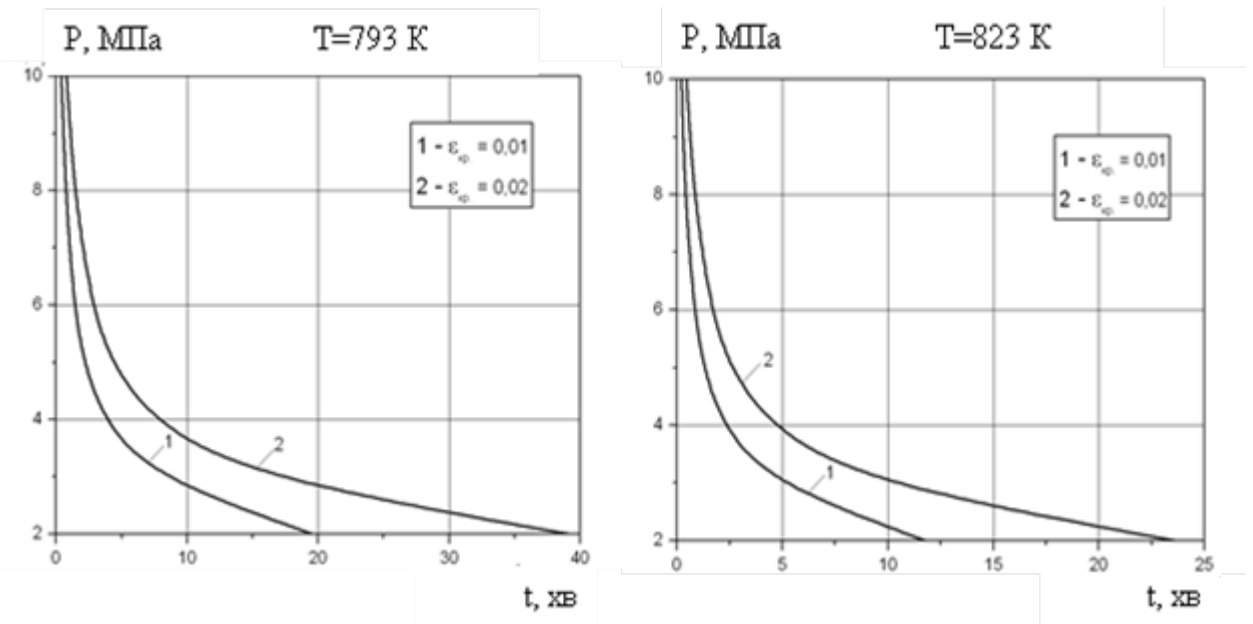


Рисунок 3.9 – Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків зі сплаву АМц ($\epsilon = 1-2\%$) при температурі 793 К та 823 К

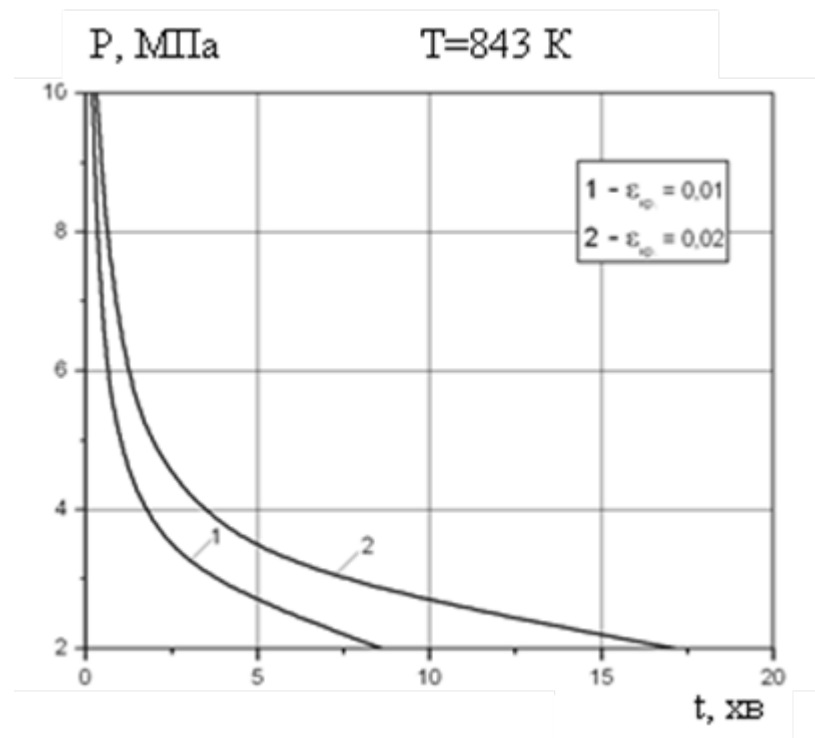


Рисунок 3.10 – Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків зі сплаву АМц ($\epsilon = 1-2\%$) при температурі 843 К

Алюміній АД00. Стосовно до технічно чистого алюмінію (сплав АД00), обробка експериментальних даних отриманих нами в роботі [156] дозволила

отримати наступні значення коефіцієнтів функції повзучості: $G_c = -9320$, $B = 9,1$, $n = 1,4388$, що близько до розглянутого вище сплаву АМц. Криві граничного допустимого деформування мають аналогічну форму (рис. 3.11).

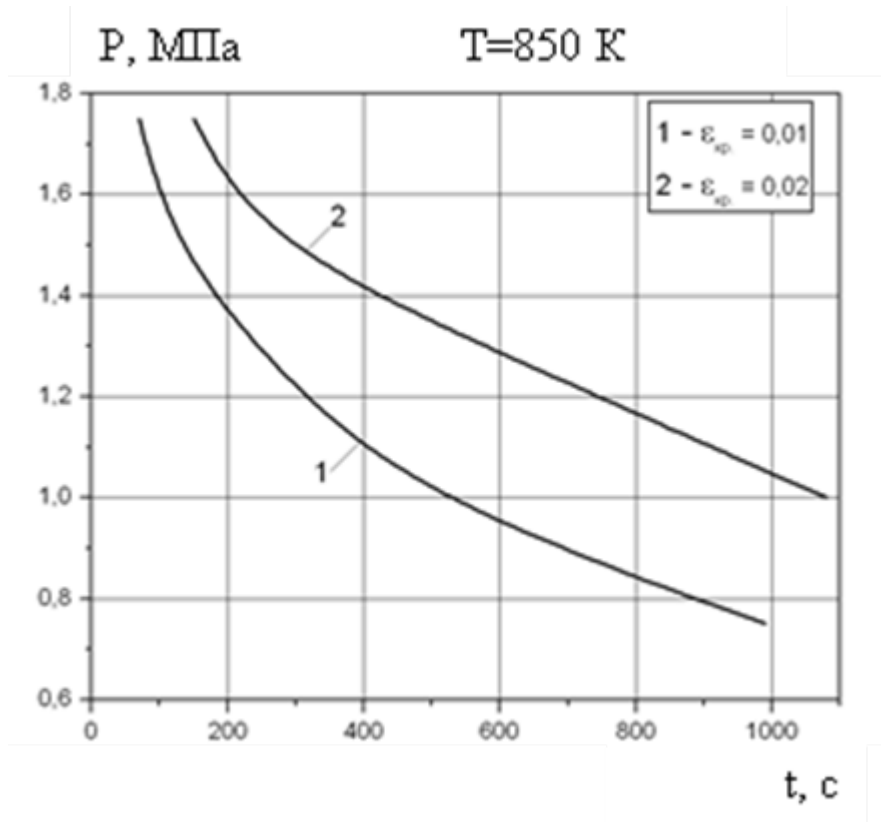


Рисунок 3.11 – Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків з алюмінію АД00 ($\varepsilon = 1-2\%$) при температурі 850 К

Мідь М1. Обробка експериментальних та літературних даних [158] дозволила отримати наступні значення коефіцієнтів функції повзучості для міді М1: $B = -2,604$, $n = 0,7$. Параметр G_c було запропоновано до використання в залежності від прикладених навантажень (табл. 3.5). Криві граничного допустимого деформування зразків з міді М1 представлені на рисунку 3.12.

Таблиця 3.5 – Залежність параметру G_c від тиску

P, МПа	2	3	5	8	10	13	15
G_c	-6150	-6300	-6600	-7150	-7400	-7840	-8200

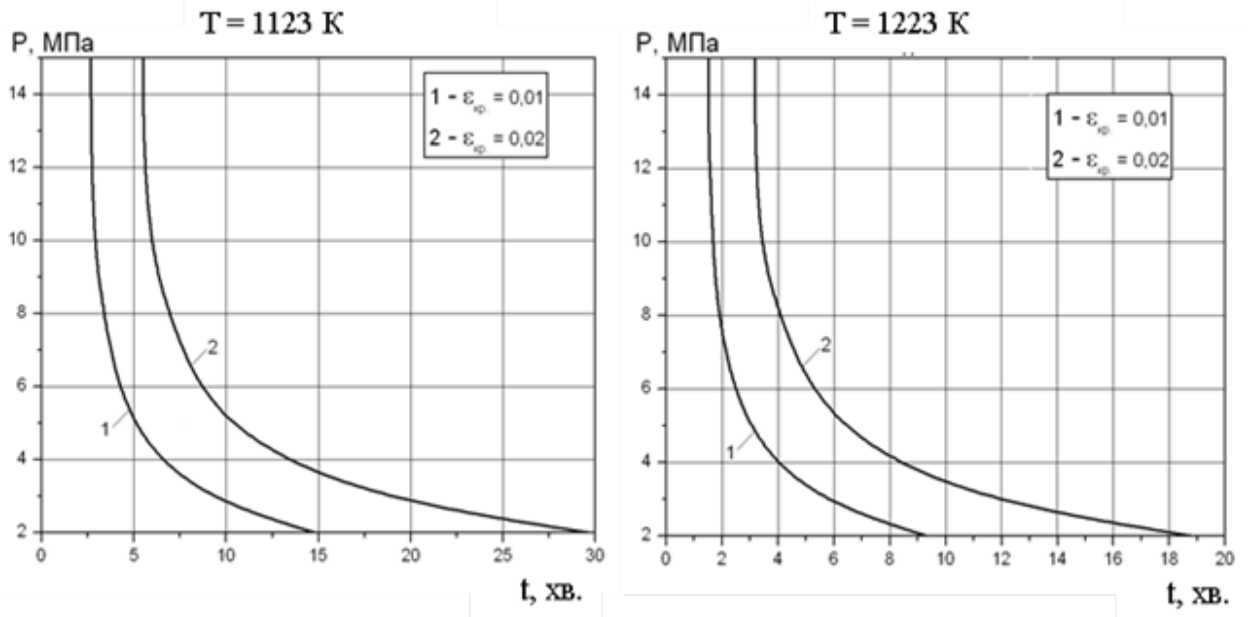


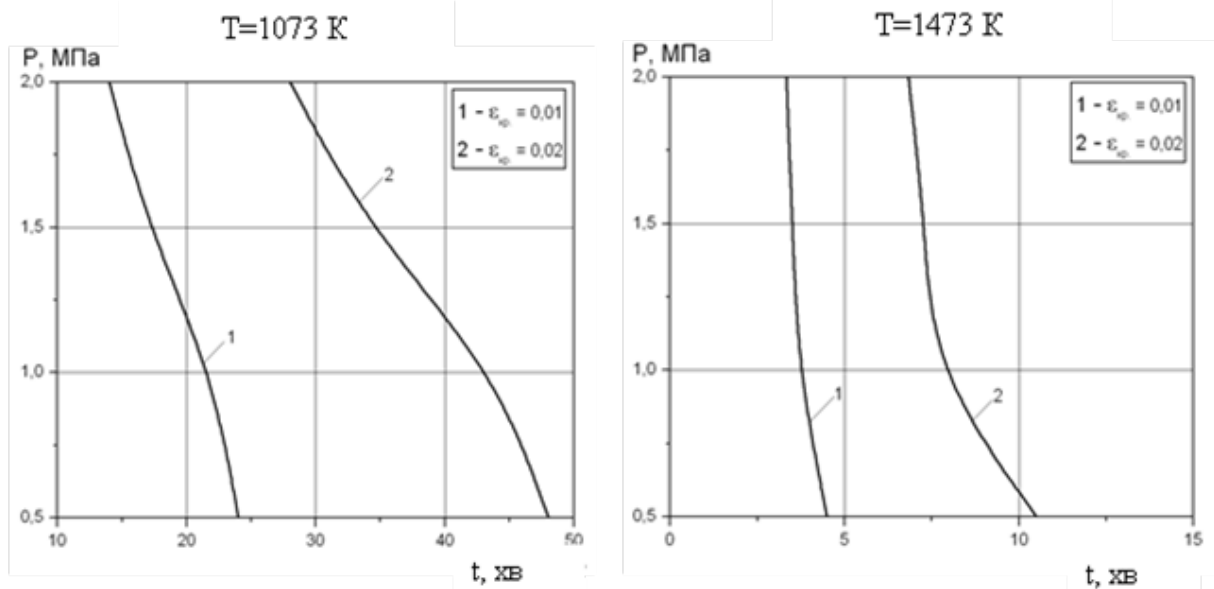
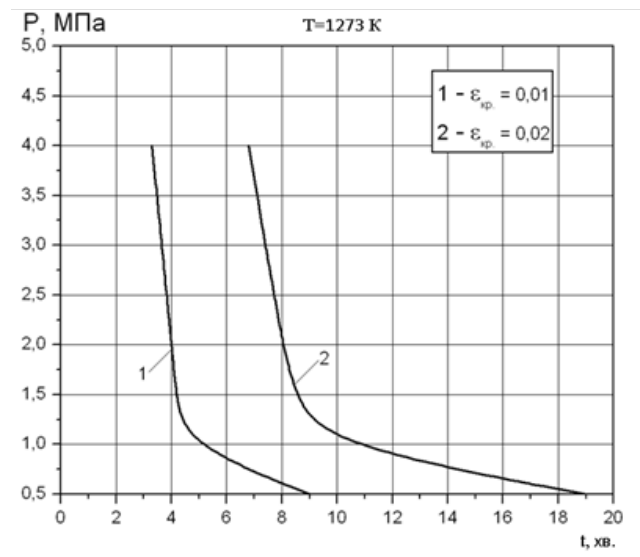
Рисунок 3.12 – Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків з міді М1 ($\varepsilon = 1-2\%$) при температурі 1123 К та 1223 К

На відміну від розглянутих вище алюмінієвих сплавів, мідь і її сплави мають меншу схильність до повзучості, тому для досягнення критичних значень залишкових деформації можна застосовувати більші тиски. При цьому, функціональна залежність максимально допустимого навантаження при зварюванні від часу витримки має аналогічну форму, що пояснюється аналогічними процесами деформування як сплавів на основі міді, так і алюмінієвих сплавів.

Сталь 45. Згідно з експериментальними даними, отриманими нами в роботі [159], поведінка сталі 45 не достатньо точно описується функцією повзучості, що використовується: вплив температури витримки має істотно нелінійну залежність, яку складно описати аналітично. Тому на основі результатів аналізу наявних експериментальних даних було запропоновано до використання параметру G_c , що залежить від температури і прикладених навантажень, як це показано в таблиці 3.6. Значення решти параметрів наступні: $n = 0,765$, $B = 1,178$. Криві граничного допустимого деформування зразків зі сталі 45 представлені на рисунках 3.13-3.14.

Таблиця 3.6 – Залежність параметру G_c від тиску та температури

T, K	1073				1273				1473			
P, MPa	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
G_c	-3500	-4700	-5200	-5550	-3000	-3700	-4400	-5050	-2700	-3900	-4900	-5550

Рисунок 3.13 – Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків зі сталі 45 ($\epsilon = 1-2\%$) при температурі 1073 К та 1473 КРисунок 3.14 – Діаграми впливу тиску та часу зварювання на ступінь деформації зразків зі сталі 45 ($\epsilon = 1-2\%$) при температурі 1273 К

Розроблена методика розрахунку дозволяє на основі вихідних даних про матеріал деталі, що зварюється; температуру нагріву; допустимий рівень деформації основного матеріалу; отримувати: максимально можливий тиск та час зварювання для забезпечення допустимого рівня деформації.

При цьому порівняльний аналіз параметрів режиму для алюмінієвого сплаву АМц, отриманих експериментально за допомогою номограми (див. рис. 3.5) та розрахованих за допомогою розробленої методики (див. рис. 3.7-3.11) показує співпадіння результатів на 90 %, що свідчить про ефективність застосування даної методики та можливість її використання при розробці конкретних технологій прецизійного зварювання тиском різних матеріалів.

3.4 Математичне моделювання напруженого стану в нероз'ємних з'єднаннях з обмеженням пластичної деформації основних матеріалів

Під час виготовлення зварних вузлів, внаслідок термомеханічної дії, в елементах конструкції виникають власні напруження та деформації, що зменшують вихід годних вузлів та строк експлуатації конструкцій. Суттєвий вплив на напружений стан, згідно літературних джерел спричиняє швидкість охолодження зварного вузла після процесу зварювання, масштабний фактор, різниця властивостей матеріалів, тощо. Тому нами, на прикладі зварювання тиском алюмінію АД0, був проведений аналіз напружено-деформованого стану процесу зварювання деталей з обмеженням деформації та без обмеження деформації.

Для моделювання напруженого стану у вузлах зварного з'єднання застосували метод скінченних елементів, який реалізований за допомогою програмного комплексу ANSYS.

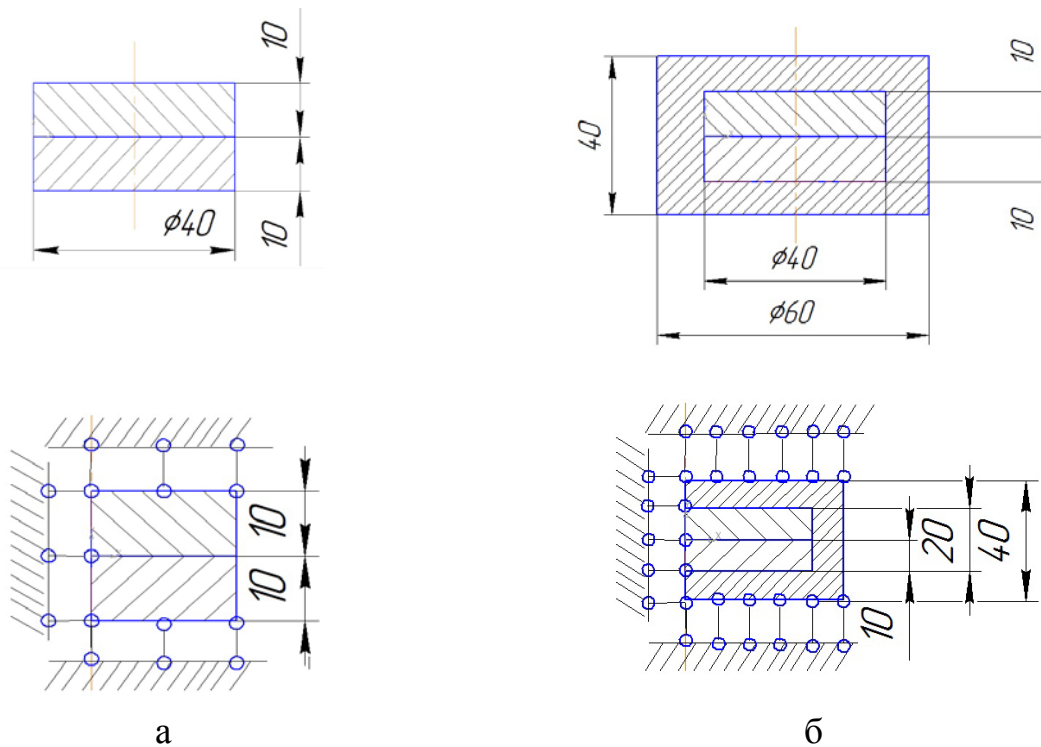
Вхідні дані. Вхідними даними для проведення числового експерименту є: модулі пружності (E), коефіцієнти Пуассона (μ), коефіцієнти температурного розширення (α) матеріалів, що зварюються. Основні фізико-

механічні властивості матеріалу, що досліджуються, наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Властивості матеріалу [160]

Матеріал	Коефіцієнт температурного розширення, $\alpha \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	Модуль пружності, $E \times 10^{11} \text{ Па}$	Коефіцієнт Пуассона, μ
АД0	25	0.7	0,3

Аналіз процесу прецизійного зварювання та зварювання без обмеження пластичної деформації дозволив розробити розрахункові схеми з'єднань, що представлені на рисунку 3.15, які враховують осьову симетрію вузлів [161], [162].



а – зварювання без обмеження деформації;

б – зварювання з обмеженням деформації

Рисунок 3.15 – Схеми зварних з'єднань та їхні розрахункові схеми

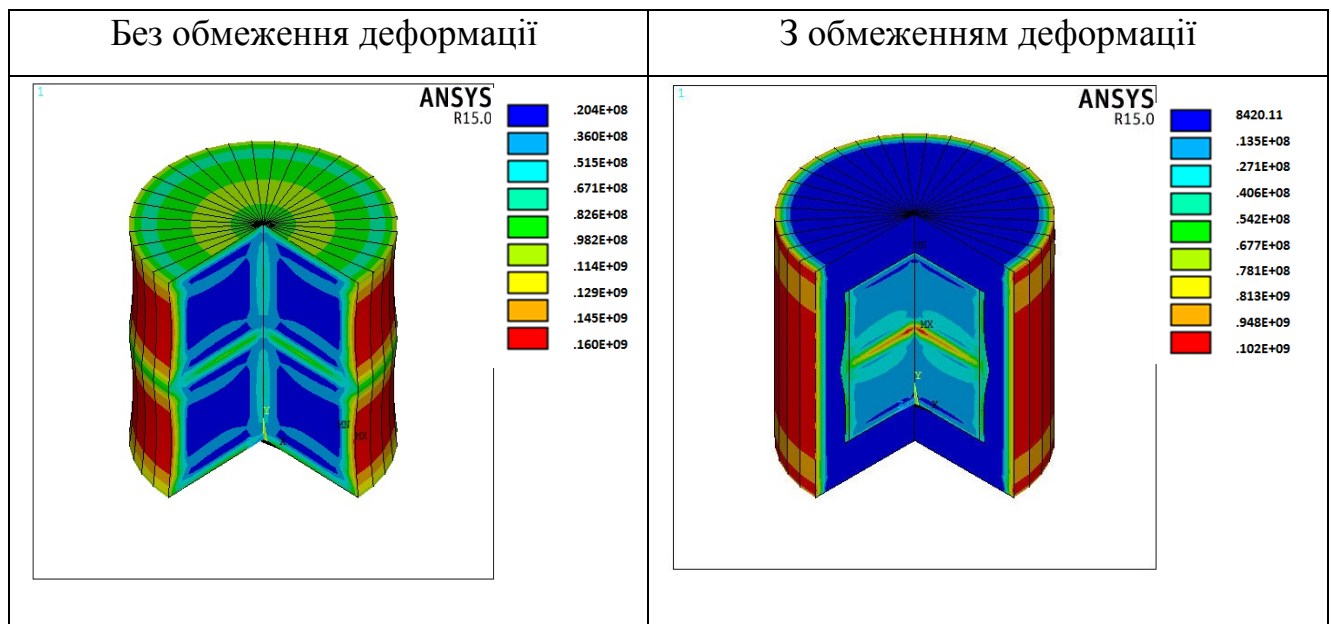
Враховуючи можливий характер розподілу напружень у вузлі, що зварюється, згущення сітки скінченних елементів проводили поблизу місць зварного з'єднання [162]. Моделювання утворення дифузійного з'єднання

виконувалося за допомогою зв'язування переміщень вузлів скінченно-елементної моделі конструкції, які розташовані в зоні контакту.

Моделювання полів напружень проводили для дифузійного зварювання алюмінієвих вузлів при температурах 823-843 К. Порівняння прецизійного зварювання та зварювання без обмеження деформації проводили за еквівалентними напруженнями [161], [162], [163]. Результати розрахунків у вигляді карт напруженого стану для еквівалентних напружень, отриманих після зварювання без обмеження деформації та з обмеженням (шляхом зварювання в оправці), наведено в таблиці 3.8.

Характер розподілу свідчить про зменшення величини еквівалентного напруження на 20-26% в середньому у випадку використання обмеження деформації алюмінієвого сплаву АД0.

Таблиця 3.8 – Напружений стан вузла з алюмінію АД0 після дифузійного зварювання без обмеження деформацій та з обмеженням деформації



Результати числового експерименту показують, що місцями зосередження еквівалентних напружень залишаються периферійні ділянки вузла, а також зони контакту елементів (особливо зона з'єднання).

Максимальний рівень напружень спостерігається на зовнішній, периферійній поверхні у випадку зварювання без обмеження деформаційних процесів алюмінієвих вузлів, та в центральній зоні поблизу зварного шва – при зварюванні з обмеженням пластичної деформації.

Таким чином, обмеження вільної деформації при виконання дифузійного зварювання призводить до зменшення на 20-26 % рівня виникаючого напружено-деформованого стану вузла з алюмінієвого сплаву АД0.

Висновки до розділу 3

1. Вперше розроблено математичну модель спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності і повзучості для умов високотемпературного стиснення зразків з конкретного металу при їх зварюванні тиском, яка дозволяє оцінити вплив основних факторів на прецизійність зварних з'єднань та обрати оптимальний режим зварювання ($T_{зв}$, $P_{зв}$ та $t_{зв}$).

2. Розроблено методику розрахунку, що дозволяє на основі вихідних даних про матеріал деталі, що зварюється; температуру нагріву; допустимий рівень деформації основного матеріалу; отримувати: максимально можливий тиск та час зварювання для забезпечення допустимого рівня деформації.

3. За результатами проведених численних експериментів побудовані діаграми, що дозволяють при різних температурах зварювання визначити оптимальне співвідношення тиску і часу витримки для досягнення необхідного рівня деформації матеріалів, що з'єднуються.

4. Порівняльний аналіз експериментальних даних та даних, отриманих за допомогою розробленої методики показав співпадіння результатів на 90 %, що свідчить про ефективність застосування даної методики та можливість її використання при розробці конкретних технологій прецизійного зварювання тиском різних матеріалів.

5. Встановлено, що при прецизійному зварюванні тиском рівень виникаючих у зварному вузлі напружень на 20-26 % менше у порівнянні зі зварюванням без обмеження пластичної деформації.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ З МОДИФІКАЦІЄЮ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ

4.1 Дифузійне зварювання у вакуумі через шари модифіковані іонною обробкою

4.1.1 Дослідження іонної обробки на процесу модифікації поверхневих шарів

Як показав літературний аналіз (розділ 1) при прецизійному зварюванні металів, що мають обмежену розчинність, перспективним засобом активації може бути використання попередньої іонної обробки, яка змінює структуру та властивості поверхні та поверхневого шару. Тому в роботі, на прикладі дифузійного зварювання у вакуумі міді з молібденом та хромом, з'єднання яких широко використовуються при виготовленні різноманітних виробів у електротехнічній промисловості, проведено дослідження впливу примусового насичення іонною модифікацією поверхневого шару одного із металів, що зварюється, іншим, на властивості поверхневого шару та здатність до зварювання.

Від механічних характеристик поверхневого шару більш твердого металу в значній мірі залежить повнота проходження процесу зварювання різноманітних матеріалів. Збільшення пластичності поверхневого шару після іонної обробки збільшило б повноту деформування поверхневих об'єктів, що зварюються в твердій фазі, та створило б умови для активації контактної поверхні твердого металу.

В роботі [164] показано, що після низькоенергетичного опромінення

армко-заліза, нікелю та металокерамічного твердого сплаву виникають зміни механічних характеристик поверхневих шарів.

Відомо, що процес іонної обробки характеризується декількома основними параметрами: напругою прискорювання іонів, щільністю струму розряду й тривалістю обробки. Тому нами було визначено оптимальний режим обробки у плазмі тліючого розряду поверхні молібдену та хрому, вкритих шаром міді, для підвищення пластичності поверхневого шару тугоплавких матеріалів. Для цього попередньо термічним напиленням на поліровану поверхню молібдену (хрому) наносили шар міді товщиною 1-2 мкм. Після цього пластини поміщали у вакуумну камеру, створювали розрідження до 10^{-5} Па й заповнювали газовим середовищем (аргоном) до тиску 12 Па. Напруга між анодом і катодом, що визначає енергію іонів, становила від 0,5 до 2 кВ. Тривалість бомбардування в тліючому розряді змінювали від 5 до 20 хвилин. Після іонної обробки, за допомогою автоматичного індентування алмазною пірамідою Берковича з автоматичним записом діаграми навантаження, визначали мікротвердість зразків та порівнювали їх з властивостями поверхні тугоплавких матеріалів без обробки.

Встановлено, що для забезпечення необхідних механічних характеристик модифікованого іонною обробкою шару молібдену (хрому), необхідно застосувати прискорюючу напругу в межах 500 – 1000 В, щільність іонного струму 1 mA/cm^2 , тиск залишкових газів 12 Па та час обробки 10 – 20 хвилин. За таких режимів обробки мікротвердість, відповідно і пластичність модифікованого шару глибиною 5-10 мкм займають проміжні значення між міддю та тугоплавким матеріалом і створюються сприятливі умови для проходження деформаційних процесів. При застосуванні прискорюючої напруги більшої за 1500 В пластичність поверхневих шарів молібдену значно зменшується внаслідок збільшення їх мікротвердості, що пояснюється збільшенням щільності дефектів, створених іонною обробкою та зниження їх рухливості.

4.1.2 Дослідження дифузійного зварювання металевих матеріалів через поверхневі шари модифіковані іонною обробкою

Особливістю дифузійної пари молібден-мідь являється відсутність розчинності Мо в Cu [165], що, як відомо, перешкоджає отриманню якісного з'єднання цих металів методом дифузійного зварювання.

Відомо, що коефіцієнт дифузії є структурно-чутливою величиною і його ефективне значення може суттєво перевищувати рівноважне при наявності макроскопічних дефектів і розвинутої системою границь розділу [166].

У зв'язку з цим, спільно з інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України за допомогою методу авторадіографії нами було вивчено вплив іонної обробки на дифузійну взаємодію при дифузійному зварювання міді з молібденом у порівнянні зі зварюванням без обробки [167].

На поверхню молібдену іонно-плазмовим методом наносили шар міді товщиною до 1 мкм, після чого зразки молібдену з шаром міді підлягали обробці іонами аргону для створення зони атомної взаємодії Мо з Cu. Потім зразки підлягали дифузійному зварюванню у вакуумі. Режими підготовки і дифузійного зварювання зразків представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Режими підготовки і дифузійного зварювання зразків

№ режиму	$\tau_{\text{обр.}}^{\text{Ar}}$, хв.	$U_{\text{приск.}}$, В	$T_{\text{зв.}}$, К	$P_{\text{зв.}}$, МПа	$T_{\text{зв.}}$, хв
I	-	-	1223	15	20
II	10	1200			
III	20	1200			
IV	20	2000			

Режим № 1 у даному випадку являється базовим (тобто без модифікованого шару), який був обраний згідно літературних даних [44].

Інші режими відрізняються від базового і один від одного тривалістю обробки аргоном ($\tau_{\text{обр.}}^{\text{Ar}}$) та прискорюючою напругою ($U_{\text{приск.}}$) такої обробки.

Дифузійні процеси в зоні контакту при зварюванні зразків вивчали методом радіоактивних ізотопів. В роботі використовували радіоактивний ізотоп нікелю ^{63}Ni , який попередньо наносили електролітичним методом на Мо. Товщина шару ^{63}Ni складала $\sim 0,3$ мкм, активність $5 \cdot 10^3$ імп/хв. Після зварювання зразки розрізались і розміщувались на рентгенівській плівці. Витримка на плівці складала порядку 100 годин. Після проявлення плівку фотометрували та отримували концентраційний розподіл радіоактивного ізотопу нікелю як в Мо так і в Cu (рис. 4.1).

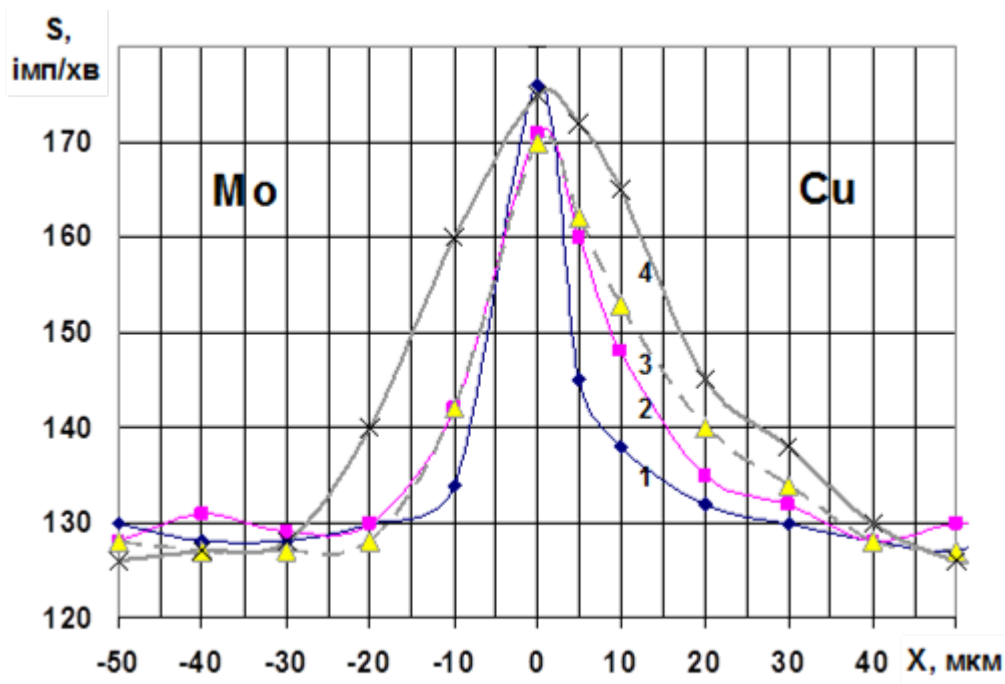


Рисунок 4.1 – Концентраційний розподіл ^{63}Ni в Мо та Cu після зварювання напряму (1) та через модифіковані шари молібдену на різних режимах (2-4) (див. табл. 4.1)

Як слідує з аналізу представлених кривих в процесі зварювання ^{63}Ni проникає на десятки мікрометрів як в Мо, так і в Cu.

Слід також відмітити чітко виражену асиметричність кривих, що полягає в тому, що у всіх випадках глибина проникнення ^{63}Ni в Cu помітно більша в порівнянні з Мо, що пов'язано з необмеженою розчинністю в парі

нікель-мідь. В той же час розчинність Ni в Mo та Mo в Ni відповідно до діаграми стану суттєво обмежена. Крім того, слід врахувати і велику різницю в температурах плавлення Mo та Cu, 2883 K і 1356 K відповідно. Отже, температура, при якій відбувається дифузійне зварювання (1223 K) була для Cu значно вище в порівнянні з Mo. Таким чином, зведена температура ($T_{зв}/T_{пл}$) для Cu у цьому випадку складає 0,88, а для Mo – 0,37.

Експериментальні дані, отримані в результаті обробки концентраційних кривих, представлені на рисунках 4.2-4.4. На рисунку 4.2 представлена залежність глибини проникнення ^{63}Ni в Cu і Mo в залежності від режиму обробки. Видно, що при всіх режимах обробки глибина проникнення ^{63}Ni в Cu вища, в порівнянні з Mo.

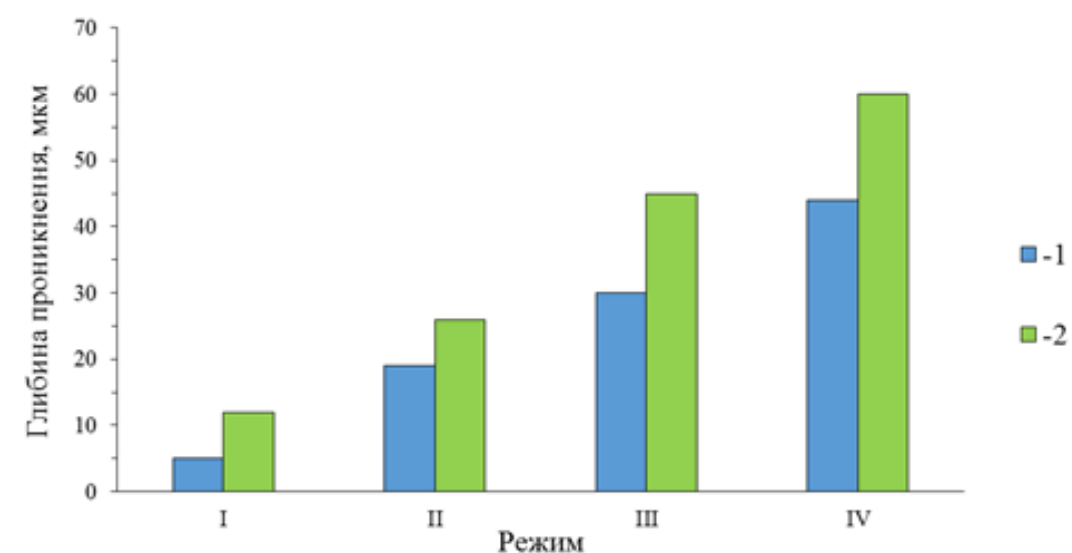


Рисунок 4.2 – Зміна глибини проникнення ^{63}Ni в Mo (1) і Cu (2) в залежності від режиму обробки

На рисунку 4.3 представлена залежність глибини проникнення ^{63}Ni в Mo від тривалості обробки іонами аргону.

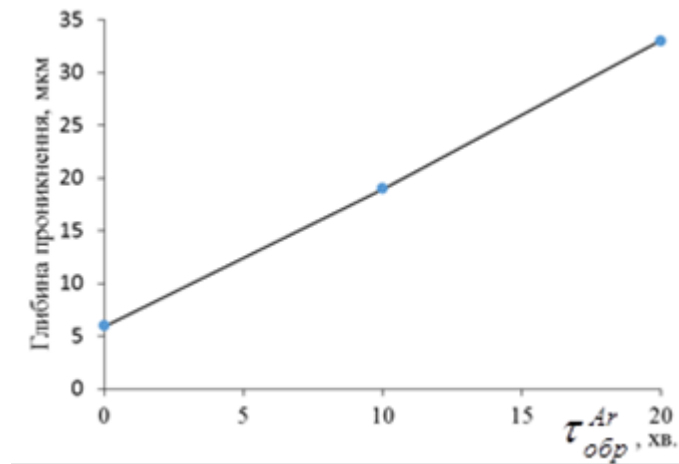


Рисунок 4.3 – Залежність глибини проникнення ^{63}Ni в Мо від часу обробки іонами аргону

Як слідує з рисунку 4.3 збільшення тривалості обробки Мо з нанесеним на нього шаром міді іонами аргону приводить до суттєвого зростання глибини проникнення в нього ^{63}Ni , а саме від 6 мкм до 33 мкм. Виходячи з цього факту, можна зробити висновок, що змінюючи час обробки Мо іонами аргону можна суттєво впливати на розміри зони взаємодії міді з молібденом і тим самим керувати величиною адгезії Cu на Мо. Аналогічний висновок можна зробити з даних, представлених на рис. 4.4.

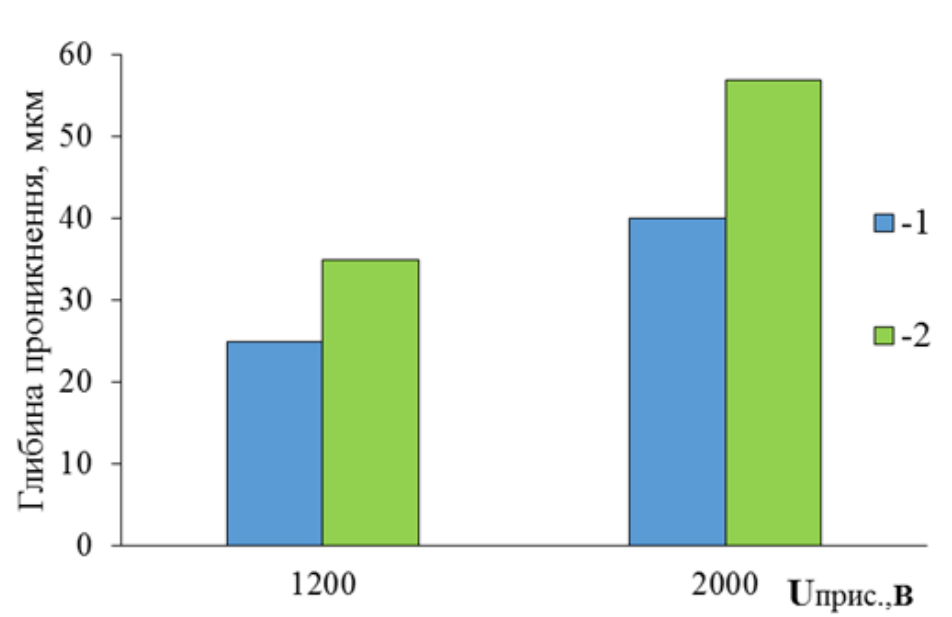


Рисунок 4.4 – Залежність глибини проникнення ^{63}Ni в Мо (1) і Cu (2) від величини прискорюючої напруги при обробці іонами аргону ($\tau_{обр} = 20$ хв.)

Як видно з представленого рисунку глибина проникнення ^{63}Ni в мідь і молібден суттєво залежить від величини прискорюючої напруги при обробці молібдену іонами аргону.

В таблиці 4.2 представлені кількісні характеристики дифузійних процесів при зварюванні міді з молібденом.

З аналізу даних, представлених в таблиці 4.2 слідує, що рухливість ^{63}Ni в міді майже в 3,5 рази вище в порівнянні з молібденом, що, як вже було зазначено вище, пов'язано з різницею в розчинності та температур плавлення міді та молібдену.

Таблиця 4.2 – Характеристики дифузійних процесів при зварювання міді з молібденом

№ режиму	$D_{eff}, \text{sm}^2/\text{s}$		$D_{eff}^{Cu} / D_{eff}^{Mo}$	$\lg(D_{eff})$	
	Cu	Mo		Cu	Mo
I	$5,1 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	3,4	-9,3	-9,8
II	$3,22 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	3,22	-8,6	-9,0
III	$8,44 \cdot 10^{-9}$	$2,26 \cdot 10^{-9}$	3,7	-8,1	-8,7
IV	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-9}$	3,5	-7,8	-8,4

Таким чином, на основі аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що іонна обробка мідного покриття на молібдені дозволяє у 4-5 разів розширити зону дифузійної взаємодії (нікелю з міддю та молібденом) при дифузійному зварювання міді з молібденом у порівнянні зі зварюванням напряму [167]. Мікрорентгеноспектральний аналіз зварних з'єднань також показав, що ширина дифузійної зони з'єднань міді з молібденом з модифікованим шаром збільшується на 15 % у порівнянні зі з'єднанням отриманим без обробки [168].

Механічні випробування на розрив отриманих з'єднань показали, що в залежності від режиму іонної обробки міцність зварного з'єднання також змінюється (див. рис. 4.5).

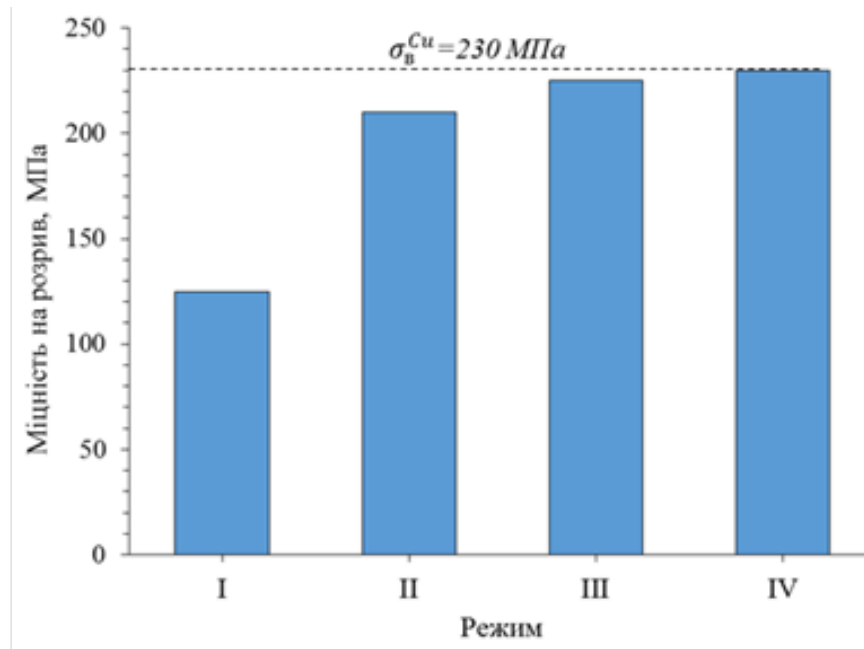


Рисунок 4.5 – Залежність міцності зварного з'єднання міді з молібденом від режиму іонної обробки

Як видно з представленого рисунку механічні характеристики з'єднань на розрив, при зварюванні на режимі 4 (див. табл. 4.1) досягають міцності основного металу (міді), що на 70 % більше міцності зварного з'єднання отриманого напряму.

Результати механічних випробувань на зріз також показали, що міцність зварного з'єднання, отриманого на оптимальних режимах через модифікований шар ($\tau_{обр., Ar}^{Ar} = 20$ хв.; $U_{приск.} = 2$ кВ; $T_{зв} = 1223$ К; $t_{зв} = 20$ хв; $P_{зв} = 15$ МПа та тиск у камері $10^{-2} \div 10^{-3}$ Па) досягає міцності міді М1у відпаленому стані – 110 МПа.

При зварюванні за цією технологією міді з хромом через модифікований міддю шар хрому ($\tau_{обр., Ar}^{Ar} = 30$ хв.; $U_{приск.} = 600$ В; $T_{зв} = 1193$ К; $t_{зв} = 20$ хв; $P_{зв} = 16$ МПа та тиск у камері $10^{-2} \div 10^{-3}$ Па) міцність зварного з'єднання на зріз досягає 160 МПа [169]. Необхідно відмітити, що це на 15 % вище, ніж при дифузійному зварюванні у вакуумі з використанням перфорованого прошарку [73].

При цьому деформація основних матеріалів (за рахунок міді) складала більше 8 %. Тому для забезпечення прецизійності були проведені аналогічні

експерименти при зменшенні тиску зварювання до 1-2 МПа, який був обраний за допомогою розробленої методики (розділ 3) з метою мінімізації пластичної деформації – не більше 1 %. Механічні випробування зварних з'єднань на зріз показали, що міцність міді з молібденом складає 100-105 МПа, що становить 91-95 % від міцності основного матеріалу (міді), а міцність міді з хромом – 120-125 МПа або 110-113 % міцності міді. Встановлено, що деформація основних матеріалів при зварюванні на вказаних режимах, не перевищує 1%, що відповідає вимогам прецизійності.

Таким чином, результати проведених досліджень показали ефективність використання модифікації поверхонь як засобу активації при обмеженні рівня пластичної деформації при зварюванні різнорідних металів, які суттєво відрізняються за своїми фізико-хімічними та механічними властивостями.

4.2 Електроконтактне зварювання через шари модифіковані електроіскровою обробкою

Як було показано в розділі 4.1 іонна модифікація є ефективним засобом активації поверхонь при прецизійному зварюванні металів, що мають обмежену розчинність. Однак складність устаткування та обробки стримує широке використання іонної модифікації.

На сьогоднішній день для модифікації поверхневого шару виробів з різних матеріалів широко використовується метод електроіскрового легування, який дозволяє значно підвищити зносостійкість і твердість металічних поверхонь деталей машин; змінити електричні властивості струмопровідних поверхонь, зменшити перехідні опори електричних контактів, їх зношення; збільшити шорсткість металічних поверхонь, наносити проміжні та перехідні шари для полегшення лудіння і процесу пайки та інше. Глибина модифікованого шару при цьому складає порядку

0,2-0,8 мм в залежності від режиму обробки. Нанесений шар покриття має міцний зв'язок з основним металом підкладки, оскільки супроводжується високо реакційними та дифузійними процесами [170]. Нажаль на сьогодні інформація щодо можливості використання електроіскрового легування для модифікації поверхонь для зварювання в літературі відсутня.

Тому нами були проведені дослідження здатності до прецизійного електроконтактного точкового зварювання через модифіковані електроіскровим легуванням поверхневі шари. На нашу думку, перспективним при електроконтактному зварюванні може бути використання модифікованого шару, який би виконував дві функції: локалізатора теплової енергії в стику та утворення рідкого евтектичного шару з основним матеріалом.

У якості матеріалу для дослідження використовували алюміній марки АД00 у вигляді пластин розміром 2x20x100 мм. Для модифікації поверхневих шарів алюмінію в захисному середовищі (аргон) використовували матеріали з високим питомим електричним опором (більшим за питомий електричний опір алюмінію) та матеріали, з якими алюміній утворює рідку фазу евтектичного складу при температурі менше температури плавлення алюмінію: титан, цинк, хром, марганець, магній, вуглець, галій, кремній та залізо, у вигляді порошку та прутків. При використанні легуючого елемента у вигляді порошку, в якості аноду використовувався пруток з алюмінію АД00.

Підготовка деталей під зварювання здійснюється в два етапи: 1 – механічне очищення поверхневих шарів від забруднень шляхом шабрування (рис. 4.6, а); 2 – модифікація поверхневих шарів алюмінію вищевказаними матеріалами (рис. 4.6, б).

Після електроіскрового легування проводилося електроконтактне точкове зварювання на машині МТ1216 на найбільш жорсткому режимі, який дозволяє машина: сила струму – 12 кА, час імпульсу – 0,1 с, зусилля зварювання – 500-600 Н (мінімально можливе для даного типу машин). Для

зварювання використовували мідні електроди з діаметром робочої частини 6 мм. Необхідно відмітити, що на вказаних режимах з'єднання алюмінію без прошарку взагалі не утворюється.

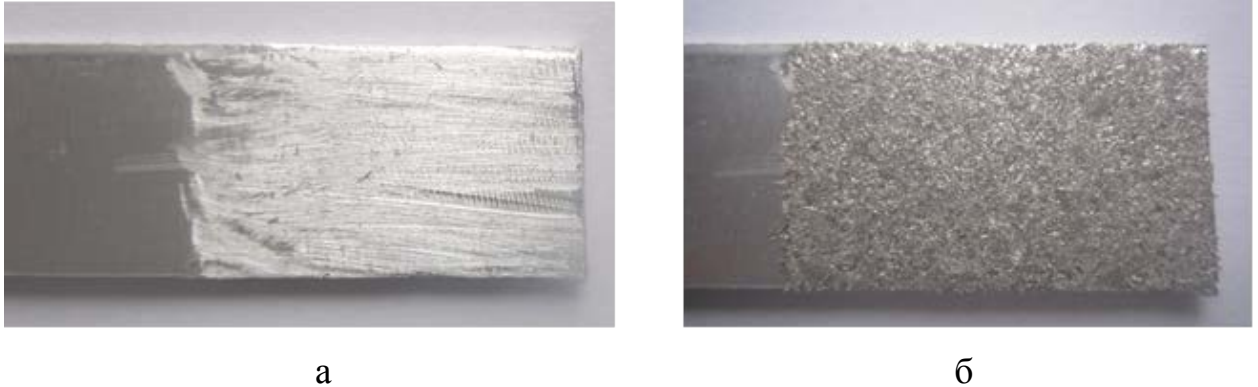


Рисунок 4.6 – Типова топографія поверхні алюмінію після шабрування (а) та електроіскрової обробки (б)

Відомо, що до одного із головних параметрів режиму електроіскрової обробки відноситься сила струму ($I_{обр}$) [170]. Тому нами був визначений вплив струму обробки для кожного з матеріалів на міцність та деформацію основних матеріалів. Відповідні результати випробувань представлені в таблиці 4.3. та на рисунках 4.7 та 4.8. Необхідно відмітити, що при використанні вуглецю, кремнію та галію отримати зварне з'єднання на вказаних режимах не вдалося.

Таблиця 4.3 – Результати експерименту по визначенню впливу сили струму електроіскрової обробки на рівень деформації та міцність зварного з'єднання з алюмінію АД00

Властивості матеріалу для модифікації			Сила струму обробки $I_{обр}$, А	Розривне зусилля на зріз, $F_{зр}$, Н	Відносна деформація, δ , %
Матеріал	Питомий електричний опір, Ом·мм ² /м	Температура плавлення, К			
цинк	0.059	692	0,5	140	7,4
			1	210	6,7
			1,5	250	5,9

Властивості матеріалу для модифікації			Сила струму обробки $I_{обр.}, A$	Розривне зусилля на зріз, $F_{зр}, H$	Відносна деформація, $\delta, \%$
Матеріал	Питомий електричний опір, $\text{Om}\cdot\text{mm}^2/\text{m}$	Температура плавлення, K			
титан	0.470	1943	0.5	550	4,3
			1	600	3,8
			1,5	660	2,5
хром	0.130	2173	0,5	270	7,0
			1	330	6,5
			1,5	370	5,5
марганець	0,43	1517	0,5	520	5,3
			1	580	4,5
			1,5	630	3,2
магній	0,045	923	0,5	110	8,0
			1	150	7,2
			1,5	200	6,8
залізо	0,098	1812	0,5	240	7,2
			1	300	6,3
			1,5	350	5,4

Встановлено, що глибина модифікованого шару збільшується при підвищенні сили струму електроіскрової обробки та складає порядку 80-100 мкм.

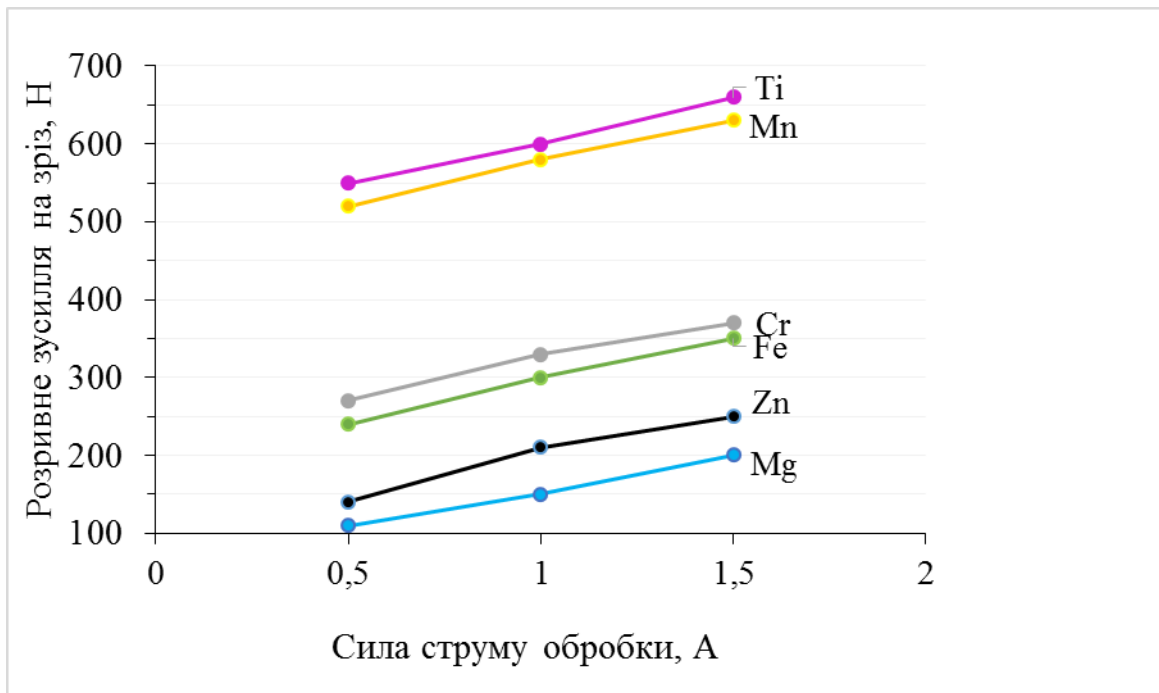


Рисунок 4.7 – Графіки залежності міцності зварних з'єднань з АД00, отриманих через різні модифіковані шари, від сили струму електроіскрової обробки

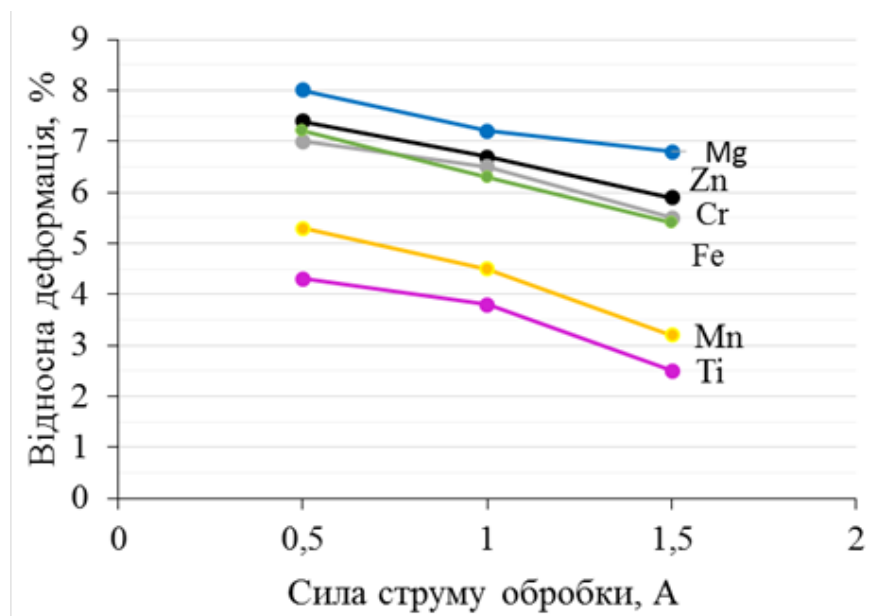


Рисунок 4.8 – Графіки залежності величини відносної деформації зварних з'єднань з АД00, отриманих через різні модифіковані шари, від сили струму електроіскрової обробки

Аналізуючи представлені графіки видно, що максимальна міцність зварних з'єднань з використанням різних матеріалів для модифікації розподілилась в наступному порядку титан, марганець, хром, армко-залізо, цинк, магній, що на пряму залежить від питомого електричного опору матеріалів – чим більше опір модифікованого шару, тим більше тепловиділення і, відповідно, міцність з'єднання. Максимальна міцність досягається при використанні титану та марганцю. Видно, що у всіх випадках деформація основного матеріалу залежить як від матеріалу, що використовувався для модифікації поверхневого шару алюмінію, так і від сили струму електроіскрової обробки. З підвищенням сили струму обробки, а також з підвищенням питомого електричного опору матеріалу, рівень деформації зменшується. На нашу думку це пов'язано з тим, що зі збільшенням опору матеріалу, як й з підвищенням концентрації матеріалу прошарку на поверхні та в поверхневому шарі алюмінію при підвищенні сили струму обробки, підвищується електричний опір та, відповідно, зростає рівень локалізації теплової енергії в контакті деталь-деталь.

На рисунку 4.9. представлена мікроструктура зварного з'єднання АД00, отриманого через модифікований титаном шар.



Рисунок 4.9 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву АД00, отриманого через модифікований титаном шар (оптична мікроскопія, x20)

З представленого рисунку видно, що з'єднання утворюється за рахунок взаємного розплавлення. Однак спостерігається пористість литого ядра. При цьому глибина проплавлення складає приблизно 20-25 % товщини основного металу, а діаметр ядра складає 4-4,5 мм (57-64 % від норми, відповідно до

стандарту ГОСТ 15878-79). Відповідно до встановленого діаметру ядра та розривного зусилля (див. табл. 4.3), міцність зварного з'єднання алюмінію АД00, отриманого електроконтактним точковим зварюванням через модифікований титаном шар, складає 51-54 МПа, що становить 85-90 % міцності основного матеріалу [171].

Таким чином можна зробити висновок, що модифікація поверхневих шарів алюмінію матеріалом з високим питомим електричним опором дозволяє додатково локалізувати теплову енергію в стику, але при цьому виникає пористість литої зони, а діаметр ядра не достатній для отримання якісних прецизійних нероз'ємних з'єднань при електроконтактному точковому зварюванні. Однією з причин цього, ймовірно, є те що зважаючи на глибину модифікованого шару (80-100 мкм) при електроіскровій обробці, при зварюванні не вдається локалізувати достатню кількість теплової енергії безпосередньо в контактi деталь-деталь.

Тому нами була проведена серія експериментів по електроконтактному зварюванню алюмінію АД00 через порошкові прошарки товщиною порядку 100 мкм з матеріалів, які використовувалися для модифікації електроіскровою обробкою [172],[173]. Зварювання проводили на тому ж режимі, що й у попередніх експериментах. Після зварювання також проводилися механічні випробування на зріз, результати яких представлені на рисунку 4.10.

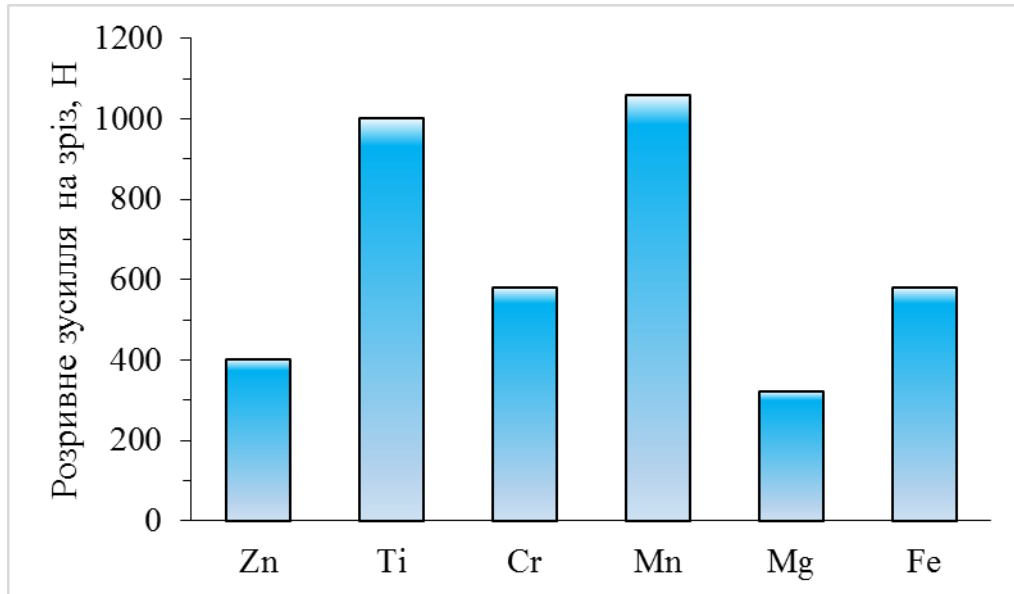


Рисунок 4.10 – Залежність міцності зварних з'єднань з АД00, отриманих через різні порошкові прошарки

Порівнюючи отримані результати з даними таблиці 4.3 можна зробити висновок, що розривні зусилля на зріз зварних з'єднань, отриманих через порошкові прошарки, на 55-70 % більші ніж розривні зусилля на зріз з'єднань, отриманих через модифіковані електроіскровою обробкою шари, що нашу думку пов'язано з підвищенням локалізації теплової енергії в контактній деталі-деталі. Як видно з представленого рисунку 4.10 найбільша міцність зварного з'єднання спостерігається при використанні порошкового прошарку з марганцю. При цьому деформація основного матеріалу складає менше 2%. На рисунку 4.11 представлено мікроструктуру зварного з'єднання АД00 через прошарок з порошку марганцю, а на рисунку 4.12 – топографія поверхні зламу.

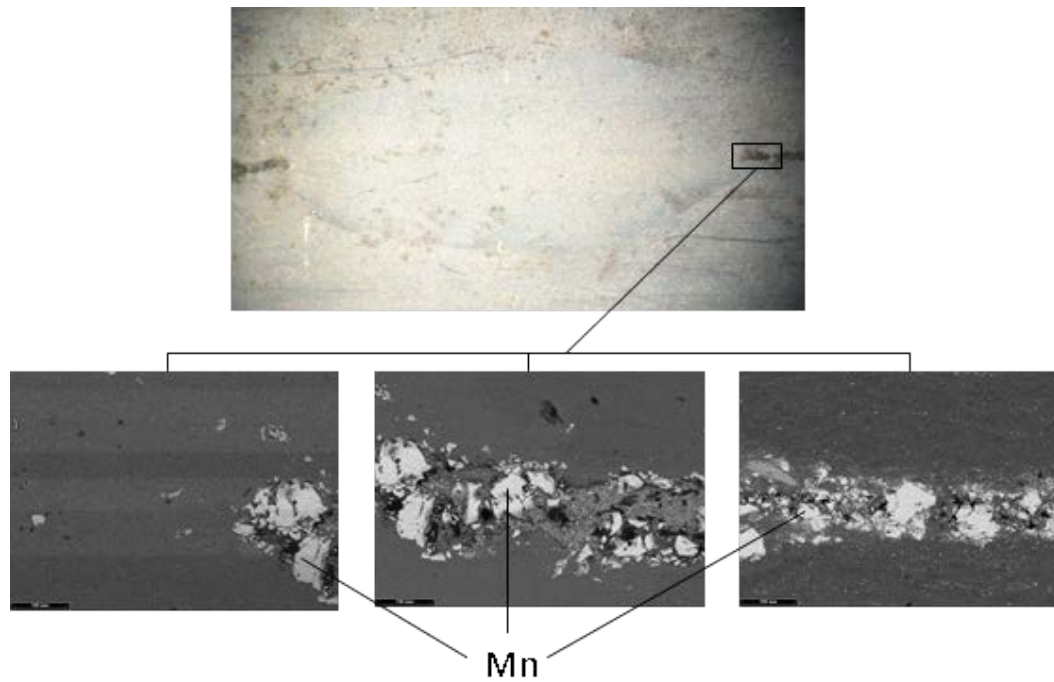


Рисунок 4.11 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву АД00, отриманого через прошарок з порошку марганцю (оптична x10; електронна мікроскопія)

Мікрорентгеноспектральний аналіз показав, що в зоні з'єднання спостерігається досить велике скупчення нерозплавленого марганцю (частково й в зоні литого ядра), що свідчить про те, що він не вступає в хімічну взаємодію з алюмінієм, а служить лише в якості локалізатора теплової енергії, що обмежує використання таких з'єднань для виготовлення електротехнічних виробів у зв'язку зі зменшенням електропровідності зони контакту. Діаметр ядра при цьому складає порядку 5 мм (70 % від норми, відповідно до стандарту) і відповідно до розривного зусилля (див. рис. 4.10), міцність зварного з'єднання становить 55 МПа або порядку 90 % міцності основного матеріалу [172], [173].

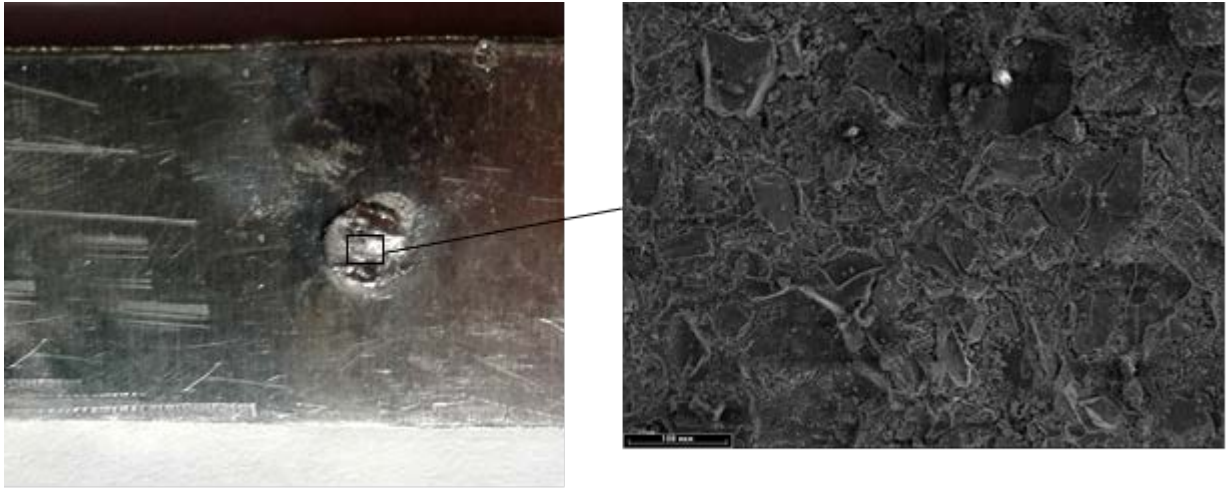


Рисунок 4.12 – Топографія поверхні зламу зварного з'єднання сплаву АД00, отриманого через прошарок з порошку марганцю (оптична x8; електронна мікроскопія)

Висновки до розділу 4

1. Набуло подальшого розвитку питання модифікації поверхневих шарів металів низько енергетичною іонною обробкою в плазмі тліючого розряду. Встановлено, що збільшення тривалості оброблення та прискорюючої напруги під час оброблення Мо з нанесеним на нього шаром міді іонами аргону дозволяє суттєво розширити розміри зони взаємодії міді з молібденом. Показано, що іонна обробка мідного покриття на молібдені дозволяє у 4–5 разів розширити зону дифузійної взаємодії та у 2 рази підвищити міцність зварного з'єднання міді з молібденом, у порівнянні зі зварюванням без обробки.

2. Вдосконалено технологію зварювання тиском міді з молібденом та хромом з використанням модифікованих іонною обробкою прошарків. Встановлено доцільність для прецизійного зварювання тиском модифікації поверхневих шарів металів низько енергетичною іонною обробкою в плазмі тліючого розряду. Показано, що іонна обробка дозволяє в процесі зварювання зменшувати зусилля стискання деталей і підвищувати

прецизійність отриманих зварних з'єднань. Встановлено, що міцність зварних з'єднань міді з молібденом, отриманих на оптимальних режимах складає 100-105 МПа або 91-95 % від міцності основного матеріалу (міді), а міцність міді з хромом – 120-125 МПа або 110-113 % міцності міді. Деформація основних матеріалів при зварюванні на вказаних режимах, не перевищує 1%, що відповідає вимогам прецизійності.

3. Встановлено, що модифікація поверхневих шарів алюмінію електроіскровим легуванням матеріалом з високим питомим електричним опором дозволяє додатково локалізувати теплову енергію в стику та отримати прецизійні нероз'ємні з'єднання при електроконтактному точковому зварюванні. Однак при цьому в литому ядрі спостерігається пористість, що не дозволяє отримати рівномірні основному матеріалу з'єднання.

4. Встановлено, що використання порошкового прошарку з матеріалу з високим електричним опором дозволяє локалізувати теплову енергію в стику та зменшити рівень деформації основного матеріалу. При цьому матеріал порошку не вступає в хімічну взаємодію з алюмінієм, а служить лише в якості локалізатора теплової енергії. Показано, що застосування при електроконтактному точковому зварюванні алюмінію АД00 прошарку з порошку марганцю, дозволяє отримати міцність зварних з'єднань на рівні 90 % міцності основного матеріалу при відносній деформації менше 2%.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ З ЛОКАЛІЗАЦІЄЮ ТЕПЛОВОЇ ТА МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СТИКУ

Відомо, що при дифузійному зварюванні ключову роль в утворенні нероз'ємного з'єднання відіграє активація поверхонь за рахунок нагріву та зсувних деформацій у стику, а ширина зони взаємної взаємодії при цьому складає 10-100 мкм [174]. Тобто, для отримання якісних з'єднань немає необхідності піддавати температурному і деформаційному впливу зварні деталі в цілому.

Одним із найпростіших засобів локалізації температурного поля в стику є застосування імпульсу струму у якості джерела нагріву. Необхідно відмітити, що крім способів електроконтактного зварювання нагрів струмом, що проходить, використовується й при дифузійному зварюванні також.

Як показав аналіз літературних даних, використання локалізації теплової та механічної енергії в стику може бути ефективним для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань з металевих матеріалів з високою тепло і електропровідністю та матеріалів з низькою деформаційною здатністю, які потребують ще й обмеження температури по довжині (висоті) зразків, що зварюються (див. розділ 1).

У зв'язку з цим нами були проведені дослідження здатності до прецизійного зварювання тиском твердих сплавів та кольорових металів з локалізацією теплової та механічної енергії в стику.

На сьогодні необхідність з'єднання твердих сплавів між собою та твердих сплавів з металами виникає в інструментальній промисловості та в ряді машинобудівних галузей при виготовленні твердосплавних штампів, ріжучого та бурового інструментів, а застосування при цьому надтвердих полікристалічних матеріалів на основі алмазно-твердосплавних пластин (АТП) потребує обмеження температури.

Кольорові метали, в першу чергу алюміній та його сплави, широко застосовуються у різноманітних конструкціях авіа-, ракето- та суднобудування, автотранспорту, атомної енергетики, хімічної, електротехнічної та електронної техніки. При цьому електроконтактне зварювання є одним з основних методів створення конструкцій з алюмінієвих сплавів. Однак значна тепло- та електропровідність, наявність тугоплавкої оксидної плівки створює ряд проблем для забезпечення прецизійності виробів.

5.1 Використання локалізації теплової та механічної енергії для прецизійного зварювання тиском твердих сплавів

В роботі на прикладі з'єднання алмазно-твердосплавних пластин з твердим сплавом (рис. 5.1), що широко використовується при виготовленні ріжучого та бурового інструменту (на сьогоднішній день доля алмазного породоруйнівного інструменту в загальному об'ємі буріння складає 80 %), було досліджено можливість використання локалізації теплової енергії для прецизійного зварювання матеріалів, що мають низьку деформаційну здатність.

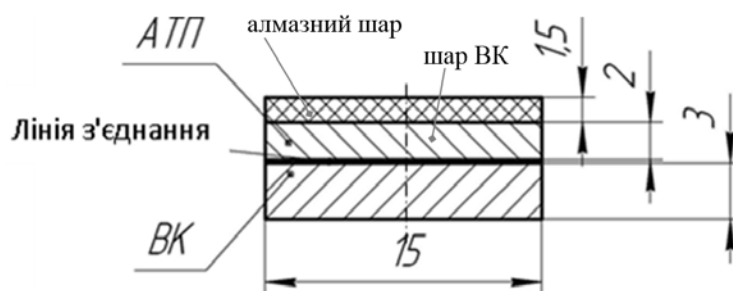


Рисунок 5.1 – Ескіз типового вузла АТП збільшеної висоти, шляхом з'єднання з твердим сплавом

Основна проблема при виготовленні ріжучого та бурового інструменту із застосуванням АТП пов'язана з тим, що при температурах вище 943...973 К внаслідок дифузійної взаємодії між алмазними частками та кобальтом, що

входить до складу твердого сплаву, відбувається різке падіння рівня фізико-механічних властивостей алмазного шару, що проявляється у зниженні міцності його кріплення до твердосплавної підложки та підвищеному викришуванні при експлуатації. Це вимагає розробки засобів з'єднання ріжучої частини із державкою у вузлі інструменту при температурах, нижче 943 К [175].

На даний час з'єднання вольфрамокобальтових твердих сплавів із АТП у вузлах ріжучого інструменту здійснюється засобами паяння припоями на основі срібла (ПСр-40, ПСр-45 та ін.) із температурою плавлення 873...923 К. Однак, недостатня міцність кріплення АТП до державки у корпусі інструмента методом паяння (міцність на зріз 150-200 МПа), токсичність при його проведенні, використання дефіцитних припоїв на основі срібла та інші фактори стримують серійне виробництво ріжучого та бурового інструмента. Також процес виготовлення є трудомістким через складність одночасного виконання паяння декількох АТП. За допомогою засобів паяння забезпечується міцність кріплення АТП до корпусу на зріз від 300 до 380 МПа [176].

З'єднання зварюванням тиском твердосплавних деталей між собою вкрай ускладнене внаслідок того, що такий сплав навіть при підвищених температурах має значну твердість та малу пластичність і для згладжування мікронерівностей потребує прикладання значних зусиль із одночасним підвищенням температури зварювання. Наявність у складі твердих сплавів стабільних хімічних з'єднань (карбідів) призводить до слабкої дифузійної активності цих матеріалів в процесі зварювання.

Якісні нероз'ємні з'єднання зі сплавів ВК6, ВК8, ВК15, ВК20 в однорідному і різнорідному сполученнях отримують через проміжні прошарки з нікелю при досить високих температурах зварювання – 1373–1523 К при тиску зварювання – 10–20 МПа та часі 7–30 хвилин [177], [178].

Нажаль, інформація щодо зварювання АТП з твердим сплавом або сталлю в літературі майже відсутня. Тільки в одній з робіт [179] відмічається,

що розроблено технологію дифузійного зварювання стисненням АТП до сталі та твердосплавних підкладок при температурі до $0,5 T_{пл}$ матеріалів, що зварюються, що складає близько 1173 К та є більше допустимої температури для алмазного шару АТП.

Відомо також про можливість виготовлення твердосплавного інструменту шляхом електроконтактного зварювання твердого сплаву (ВК6, ВК8, Т5К10) зі сталлю з отриманням міцності зварних з'єднань на зріз на рівні 300-350 МПа. При цьому термоудар при зварюванні не приводить до негативних внутрішньоструктурних змін, а внутрішні напруження на поверхні твердого сплаву після зварювання приблизно в два рази менше ніж в паяних з'єднаннях та складають 80-90 МПа. Необхідно відмітити, що при цьому шар сталі, який при зварюванні прогрівається вище температури 1173 К складає лише 1,5-1,8 мм [180]. Тобто при нагріві імпульсом струму відбувається локалізація температурного поля в стику, за рахунок порівняно високого електричного опору контакту деталь-деталь.

Можна припустити, що локалізувавши таким чином достатній рівень теплової енергії в стику можна активувати поверхні твердого сплаву й АТП та отримати достатню міцність зварного з'єднання і одночасно при цьому обмежити нагрів алмазного шару вище температури 973 К.

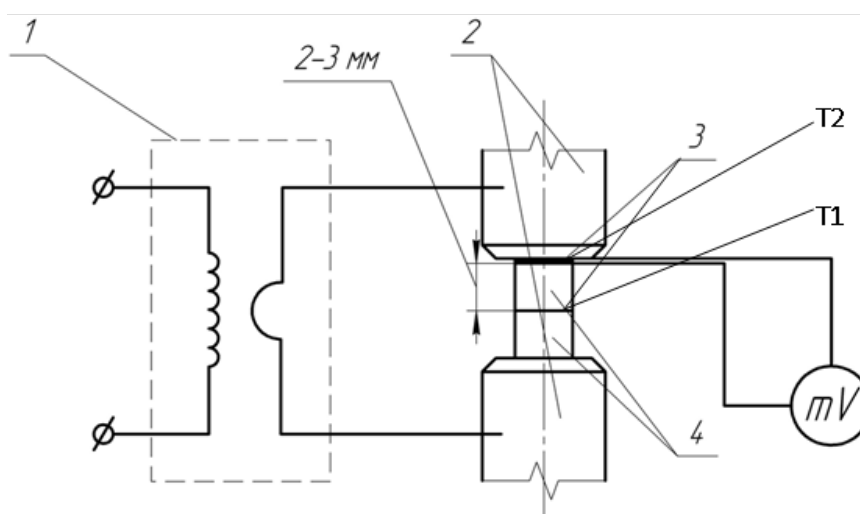
5.1.1 Дослідження формування зварних з'єднань твердих сплавів при зварюванні в твердій фазі

5.1.1.1 Дослідження температурних полів при зварюванні твердих сплавів з імпульсним нагрівом струмом

Для визначення оптимальних режимів зварювання в твердій фазі було досліджено вплив основних параметрів зварювання ($I_{зв}$, $t_{зв}$, $F_{зв}$) на розподіл температури по висоті зразків. Температуру вимірювали за допомогою термопари.

Дослідження з визначення розподілу теплового поля проводили на сплавах марок ВК10, ВК15. Схема експериментів представлена на рисунку 5.2. Необхідно відмітити, що вимірювання температури проводили на відстані 2-3мм від стику, що відповідає розміщенню алмазного шару в АТП (див. рис. 5.1) та безпосередньо в контакті твердих сплавів.

Відомо, що відповідно до закону Джоуля-Ленця кількість теплоти що виділяється у провіднику пропорційна його електричному опору. Тому для додаткової локалізації температурного поля були використані прошарки з титану (ВТ1) та сталі (Ст3), що мають досить високий електричний опір, порівняно з твердим сплавом. Також у якості проміжного прошарку використовували нікель (НП3), який за даними літературних джерел [174], [177] найчастіше використовується для зварювання в твердій фазі вольфрамокобальтових сплавів при температурах 1323-1493 К. Товщину проміжних прошарків змінювали від 50 до 200 мкм.



1 – зварювальний трансформатор; 2 – електроди; 3 – термопара;
4 – зразки з твердих сплавів; T1, T2 – точки вимірювання температури
Рисунок 5.2 – Схема експериментального дослідження теплового поля при зварюванні в твердій фазі вольфрамокобальтових сплавів

У зв'язку з тим, що жорсткість режиму електроконтактного нагріву визначає процес тепловиділення (чим вище жорсткість, тим локальніше буде

нагрів деталей), то вже на початкових стадіях експерименту дотримувалися максимальних значень щільності струму при малому часі проходження імпульсу. Тиск зварювання змінювали від 5 до 12 МПа.

Дослідження температурних полів при електроконтактному нагріві твердих сплавів проводили також за допомогою математичного моделювання (програмний пакет ANSYS, див. розділ 2). В такий спосіб був проведений нестационарний тепловий аналіз процесу електроконтактного нагріву деталей із твердих сплавів з використанням проміжного прошарку з титану. Геометрична модель зварного з'єднання показана на рисунку 5.3.

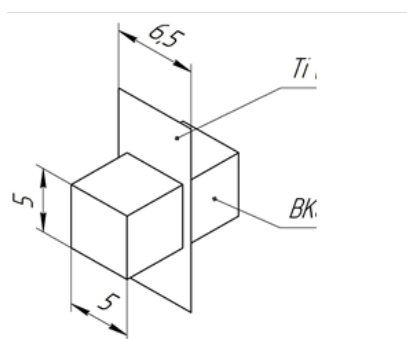


Рисунок 5.3 – Геометрична модель зварного з'єднання, що досліджується

Створення розрахункової моделі. Для нестационарного теплового аналізу в пакеті ANSYS використовуються об'ємні елементи, що призначені для розрахунку об'ємних тіл довільної форми, до яких прикладаються довільно орієнтовані в просторі навантаження. Такі елементи можуть мати форму гексаедра або тетраедра. У особливих випадках елементи-гексаедри можуть також мати форму тригранної призми або піраміди з чотирикутною основою. Елементи мають по 3 ступені свободи в кожному вузлі – переміщення в напрямках осей X, Y і Z вузлової системи координат. Для вирішення задачі був вибраний блок з більшою кількістю вузлів – елемент SOLID90. Властивості матеріалів (теплопровідність, теплоємність) були задані у вигляді таблиці, як функції температури (табл. 5.1). Скінченно-елементна модель була створена накладанням рівномірної сітки на геометричну модель (рисунок 5.4).

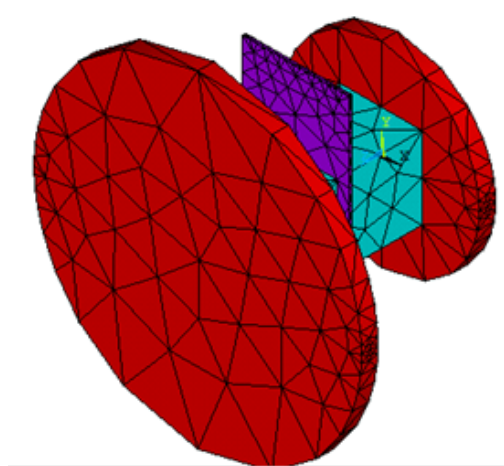


Рисунок 5.4 – Скінченно-елементна модель

Таблиця 5.1 – Теплофізичні властивості матеріалів [181], [182]

Температура Т, К	Матеріал							
	BK		Ti		Fe		Ni	
	λ , Вт/м·К	c , Дж/кг·К	λ , Вт/м·К	c , Дж/кг·К	λ , Вт/м·К	c , Дж/кг·К	λ , Вт/м·К	c , Дж/кг·К
300	162,8	132,1	22,3	530,8	79,9	446	90,4	444
400	155,9	136,0	20,7	555,5	69,4	489	79,7	484
500	145,9	138,3	19,7	576,2	61,8	531	72,1	524
600	137,1	140,2	19,7	604,7	55,1	572	63,3	591
700	130,2	141,9	19,8	626,8	48,7	618	60,9	524
800	124,2	143,7	19,8	637,0	42,7	678	64,3	529
900	120,2	145,7	19,8	647,8	37,2	770	66,2	543
1000	116,6	147,7	19,6	646,9	32	1034	71,5	562
1200	113,5	152,2	21,9	633,9	29	608	75,6	593
1400	111,2	157,1	23,9	663,7	31,5	638	76,7	609
1600	110,1	162,5	27,7	729,1	34	667	77,3	617
1800	109,0	166,0	30,9	799,8	35	760		

Прикладання термічних навантажень і отримання результатів.

Одним з етапів виконання нестационарного аналізу є визначення типу аналізу та початкових умов. Так як процес нестационарний, то був вибраний тип аналізу Transient (перехідний процес). Оскільки в початковий момент часу температура моделі співпадає з температурою довкілля, то за початкову температуру для всіх вузлів моделі використовувалась температура довкілля (Uniform Temperature=293 K). Параметри навантаження: величина імпульсу струму – 12 кА (найбільший вторинний короткочасний струм для машини МТ-1216); час нагріву 0.1 с (обраний за даними роботи [180]).

Проведено порівняльний аналіз температурних полів для різних матеріалів проміжного прошарку та при нагріві контакту твердих сплавів безпосередньо [183],[184]. Результати розрахунку приведені на рисунках 5.5 – 5.9.

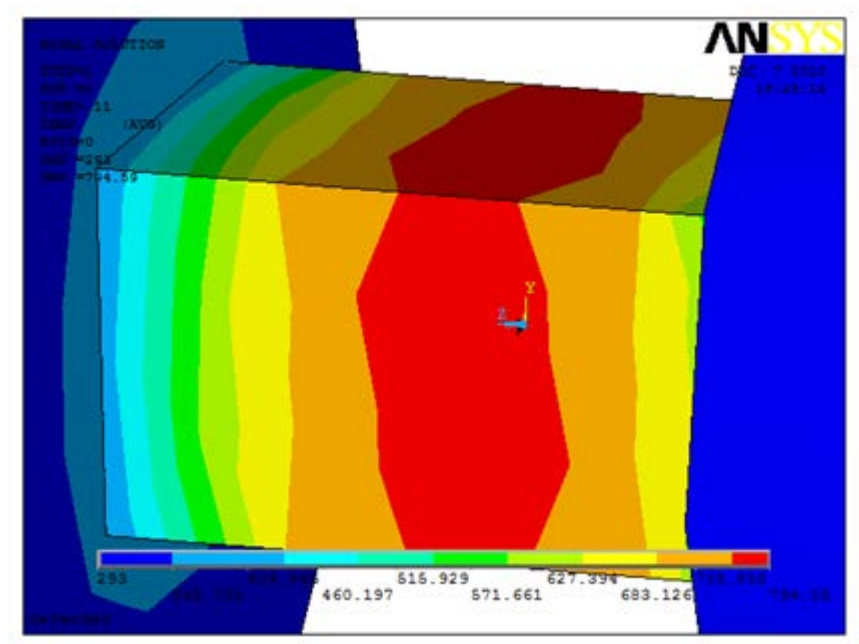


Рисунок 5.5 – Розподіл температури при нагріві імпульсом струму з'єднання твердих сплавів без проміжного прошарку

Видно, що температура не локалізується в стику, а спостерігається досить широка приконтатна зона з температурою нагріву 740-795 К.

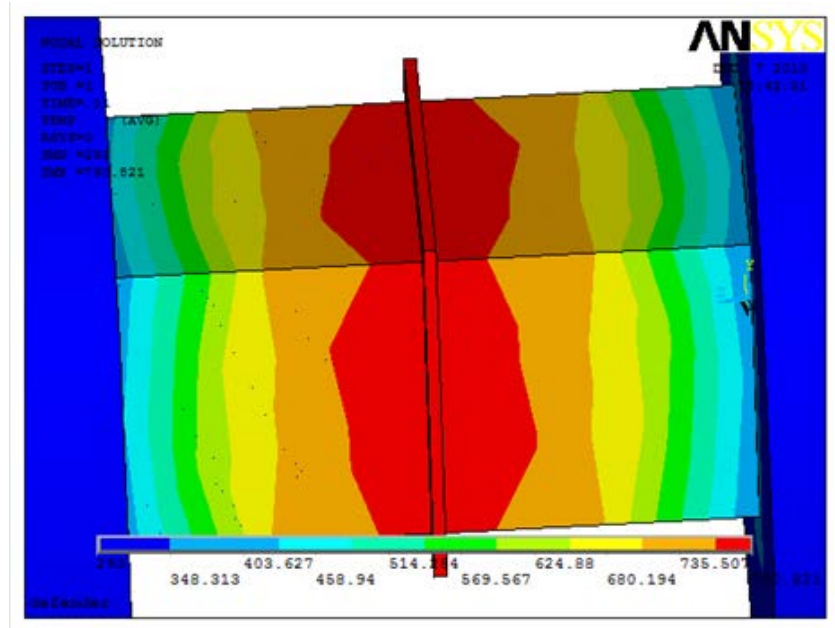


Рисунок 5.6 – Розподіл температури при нагріві імпульсом струму з'єднання твердих сплавів з проміжним прошарком з нікелю

З представленого рисунку видно, що використання прошарку з нікелю також не дозволяє локалізувати температурне поле в стику, і також, як і у випадку нагріву твердих сплавів без прошарку спостерігається порівняно широка приконттактна зона з температурою нагріву 735-790 К.

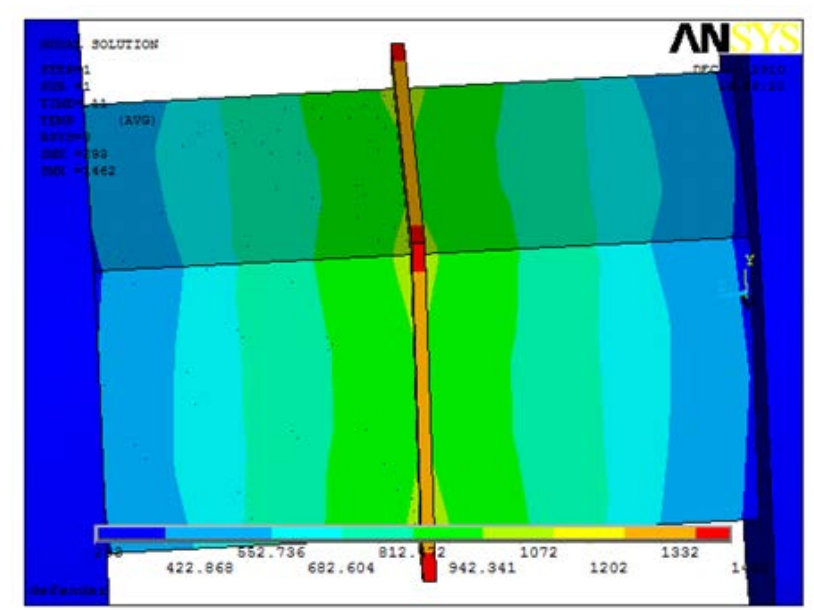


Рисунок 5.7 – Розподіл температури при нагріві імпульсом струму з'єднання твердих сплавів з проміжним прошарком з заліза

Як видно з рисунку 5.7, використання заліза у якості проміжного прошарку дозволяє локалізувати температурне поле в стику з нагрівом до 1330 К. При цьому температура на відстані 2-3 мм від зони з'єднання (зона алмазного шару АТП) не перевищує 550 °К.

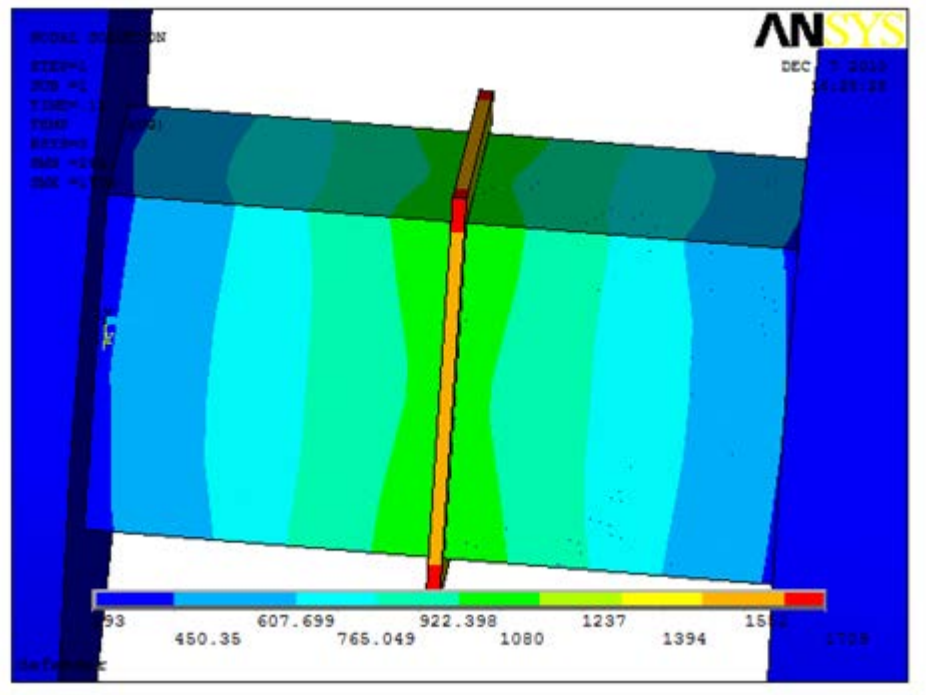
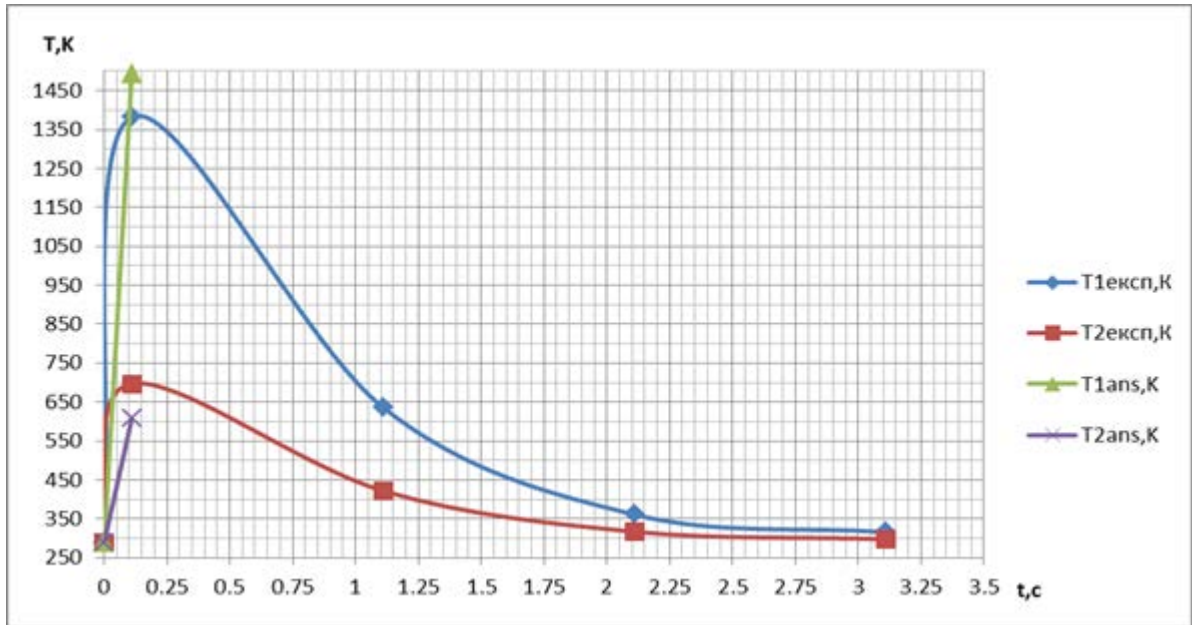


Рисунок 5.8 – Розподіл температури при нагріві імпульсом струму з'єднання твердих сплавів з проміжним прошарком з титану

З представленого рисунку 5.8 видно, що використання проміжного прошарку з титану дозволяє ще більше локалізувати температурне поле в стику у порівнянні з залізом. При цьому температура в зоні контакту складає близько 1550 К, а на відстані 2-3 мм від зони з'єднання (зона алмазного шару АТП) не перевищує 973 К.

Таким чином, встановлено, що локалізація температурного поля у стику підвищується зі збільшенням питомого електричного опору проміжного прошарку.



$T1_{експ}$ – експериментальні значення температури в точці T1 (рис. 5.2);

$T2_{експ}$ – експериментальні значення температури в точці T2 (рис. 5.2);

$T1_{анс}$, $T2_{анс}$ – відповідні значення температур отримані при розрахунку в програмному пакеті ANSYS

Рисунок 5.9 – Графіки залежності температури від часу при нагріві імпульсом струму з'єднання твердих сплавів з проміжним прошарком з титану товщиною 200 мкм (час імпульсу струму силою 12 кА – 0,1 секунди)

Як видно з представленого рисунку 5.9 при використанні прошарку з титану температура в контакті твердих сплавів складає в залежності від способу визначення (експеримент або розрахунок) порядку 1350-1550 К, що майже в 2 рази більше, ніж при електроконтактному нагріві твердих сплавів без прошарку. Фіксацію меншої температури при експериментальних дослідженнях, у порівнянні з розрахунковими даними можна пояснити частково похибкою вимірювання температури за допомогою термопари, внаслідок високої швидкості нагріву, а також складністю врахування в ANSYS контактного опору.

Слід зазначити, що при цьому температура на відстані 2-3 мм від стику (місце розташування алмазного шару в АТП) не перевищує 973 К, як за експериментальними, так і за розрахунковими даними.

Крім цього встановлено, що тепловиділення залежить від усіх

параметрів зварювання, що відповідає літературним даним [101]. При цьому найбільший вплив має сила струму та час його проходження. В таблиці 5.2 представлені попередньо визначені оптимальні параметри режиму зварювання твердих сплавів з імпульсним нагрівом виходячи з умови, що на відстані 2-3 мм від стику (місце розташування алмазного шару в АТП) температура не перевищує 973 К.

Таблиця 5.2 – Оптимальні параметри режиму при зварюванні твердих сплавів з імпульсним нагрівом

Параметри режиму	
$j_{зв}$, А/мм ²	330-350
$\tau_{зв}$, с	0,10-0,12
$P_{зв}$, МПа	8-10

Таким чином, результати проведених експериментів, підтвердили наші припущення про доцільність використання у якості джерела нагріву при зварюванні твердих сплавів імпульсу струму. Показано, що з точки зору локалізації температурного поля в стику при зварюванні в твердій фазі найбільш ефективним є використання у якості проміжного прошарку титану, що має електричний опір більший ніж залізо та нікель.

5.1.1.2 Дослідження зварюваності твердих сплавів з імпульсним нагрівом струмом через проміжні прошарки

Як було зазначено у розділі 1.2 для інтенсифікації мікропластичної деформації в стику при зварюванні в твердій фазі використовують перфоровані прошарки. На сьогоднішній день такі прошарки застосовують при дифузійному зварюванні в вакуумі різномірних металів та неметалів.

На нашу думку використання перфорованих прошарків при зварюванні в твердій фазі вольфрамокобальтових сплавів може дозволити збільшити електричний опір зони зварювання при нагріві імпульсом струму, так як перфоровані прошарки мають меншу площу контакту і, відповідно, більший опір, що призведе до додаткової локалізації температурного поля при зварюванні. Крім того, внаслідок підвищеної деформаційної здатності, перфоровані прошарки дозволяють інтенсифікувати зсувні деформації в стику і активувати поверхні твердих сплавів.

У зв'язку з вищенаведеним були проведені дослідження по зварюванню твердих сплавів через перфоровані прошарки з титану, нікелю та сталі [185], [186] (рис. 5.10).

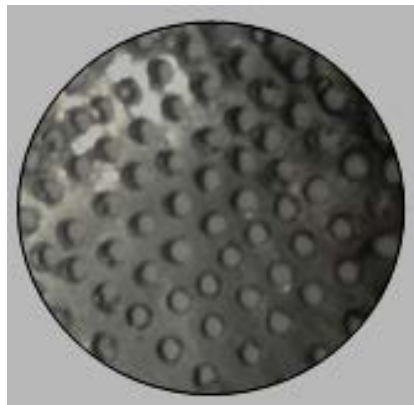
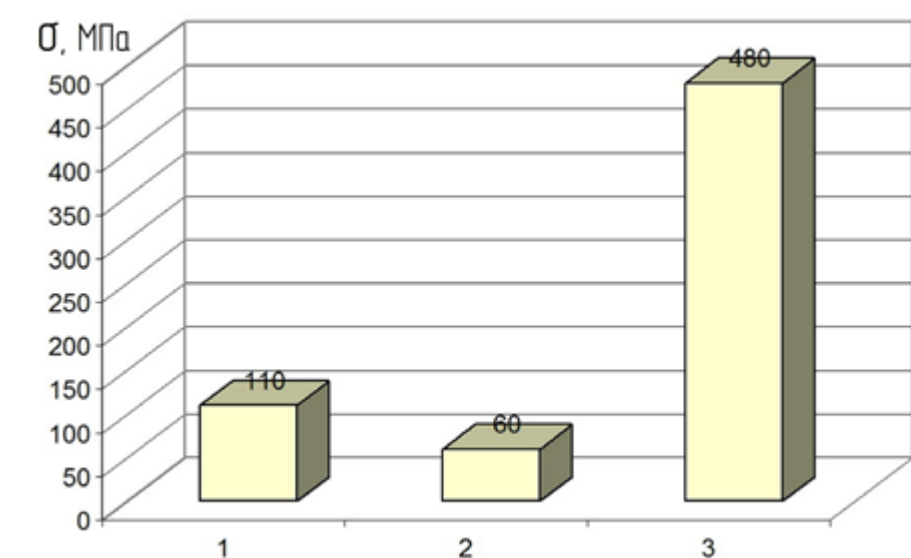


Рисунок 5.10 – Вигляд перфорованих прошарків, які використовувалися при електроконтактному зварюванні твердих сплавів

Методика виготовлення наведена у розділі 2. Коефіцієнт перфорації вибирали за літературними даними – 0,2 [73]. Параметри режимів зварювання представлені в таблиці 5.2. Після зварювання з'єднання випробовували на зріз. результати досліджень представлені на рис. 5.11.



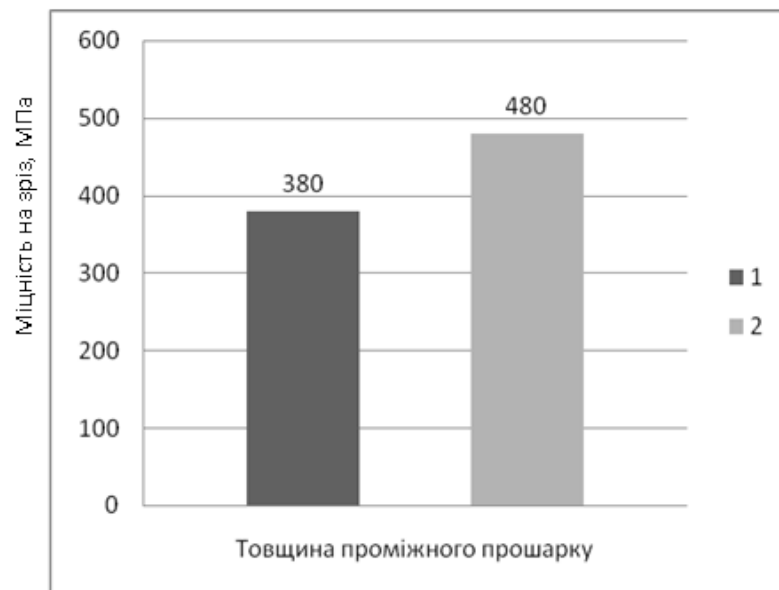
1 – сталь; 2 – нікель; 3 – титан

Рисунок 5.11 – Вплив матеріалу прошарку на міцності зварних з'єднань з сплаву ВК-10 (з'єднання отримано на оптимальних режимах через проміжні перфоровані прошарки товщиною 200 мкм)

Як видно з рисунку 5.11 найбільша міцність з'єднання твердих сплавів спостерігається при використанні перфорованих прошарків з титану, що підтверджує наші твердження про ефективність використання перфорованих прошарків із металів з високим питомим електричним опором. Міцність зварних з'єднань твердих сплавів отриманих через титановий прошарок складає 480 МПа, що за даними роботи [179] перевищує міцність паяних з'єднань більше ніж у 2 рази та на 40-60 % перевищує міцність зварних з'єднань твердого сплаву зі сталлю отриманого контактним зварюванням. Отримана міцність зварного з'єднання на 25-60 % перевищує міцність паяних з'єднань також й за даними роботи [176].

На рисунку 5.12 представлено залежність міцності зварного з'єднання твердих сплавів від товщини проміжного прошарку з титану. Встановлено, що при інших рівних умовах зварювання твердих сплавів через проміжний прошарок титану товщиною 200 мкм забезпечує міцність зварного з'єднання на 25 % більше, ніж через прошарок товщиною 50 мкм. На нашу думку це

пояснюється тим, що зі збільшенням товщини прошарку збільшується його електричний опір, а відповідно й тепловиділення, внаслідок чого більш інтенсивно відбувається його деформація та активація поверхні твердого сплаву. Таким чином більш ефективним при зварювання твердих сплавів з імпульсним нагрівом струмом є використання проміжного прошарку товщиною 200 мкм.



1 - $\delta = 50$ мкм; 2 - $\delta = 200$ мкм

Рисунок 5.12 – Залежність міцності зварних з'єднань сплаву ВК-10 від товщини проміжного прошарку з титану

Дослідження макро - і мікроструктури з'єднань проводили на зразках, які були отримані на оптимальних режимах зварювання [183]. На рисунках 5.13-5.14 представлена мікроструктура зварних з'єднань сплавів ВК-10 та ВК-15, отриманих на оптимальних режимах через прошарок титану товщиною 200 мкм.

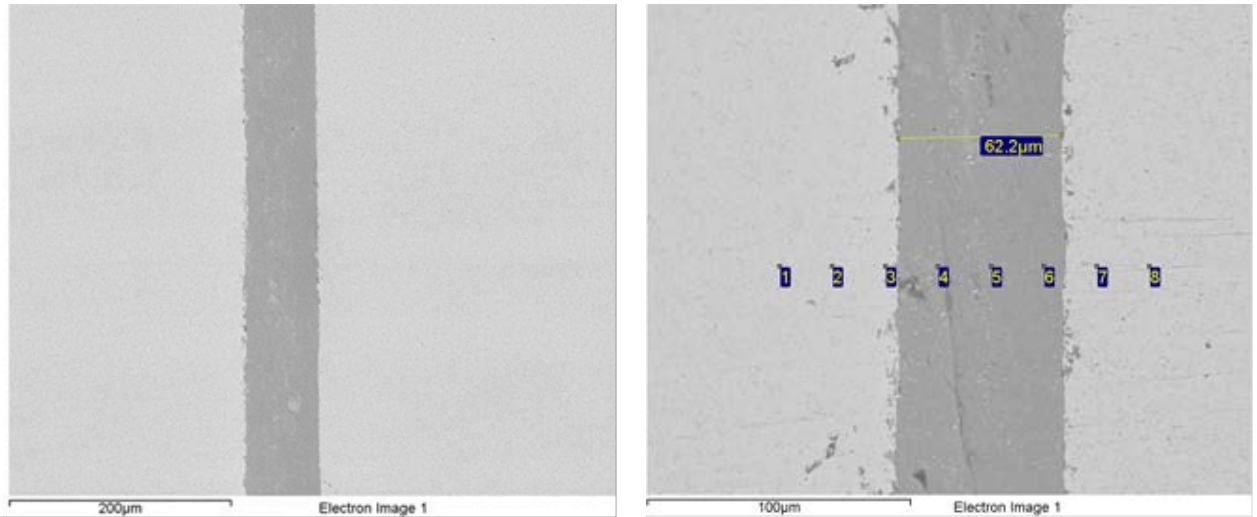


Рисунок 5.13 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ВК10, отриманого на оптимальних режимах через перфорований прошарок з титану товщиною 200мкм (електронна мікроскопія)

Аналізуючи дані спектрального аналізу (табл. 5.3) можна зробити висновок, що в точках 4, 5, 6 (прошарок з титану) спостерігається малий вміст вольфраму, що можна пояснити механічним перенесенням карбиду вольфраму при виготовленні шліфа. В точках 1, 2, 3 концентрація елементів відповідає хімічному складу сплаву ВК10, а в точках 7 та 8 концентрація елементів не відповідає сплаву, що може бути наслідком впливу нерівномірного температурного поля.

Таблиця 5.3 – Результати спектрального аналізу зварного з'єднання (див. рис. 5.13)

№ точки	Вміст елементів по масі, %			
	<i>Ti</i>	<i>Co</i>	<i>W</i>	Разом
1	0.00	8.08	91.92	100.00
2	0.00	9.17	90.83	100.00
3	0.00	7.30	92.70	100.00
4	95.28	0.00	4.72	100.00
5	97.42	0.00	2.58	100.00
6	100.00	0.00	0.00	100.00

№ точки	Вміст елементів по масі, %			
	<i>Ti</i>	<i>Co</i>	<i>W</i>	Разом
7	0.49	21.46	78.05	100.00
8	0.00	15.29	84.71	100.00

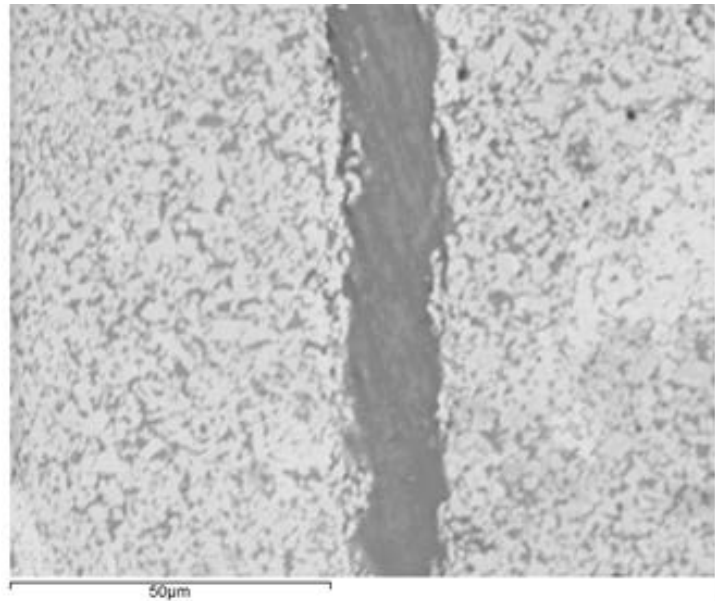


Рисунок 5.14 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ВК15, отриманого на оптимальних режимах через перфорований прошарок з титану товщиною 200мкм (електронна мікроскопія)

Як видно з представленого рисунку лінія контакту зварного з'єднання звивиста, тобто контакт є розвиненим, що свідчить про значний рівень пластичної деформації прошарку.

На рисунку 5.15 представлена мікроструктура зварних з'єднань сплавів ВК-10 та ВК-15, отриманих на оптимальних режимах через прошарок зі сталі.

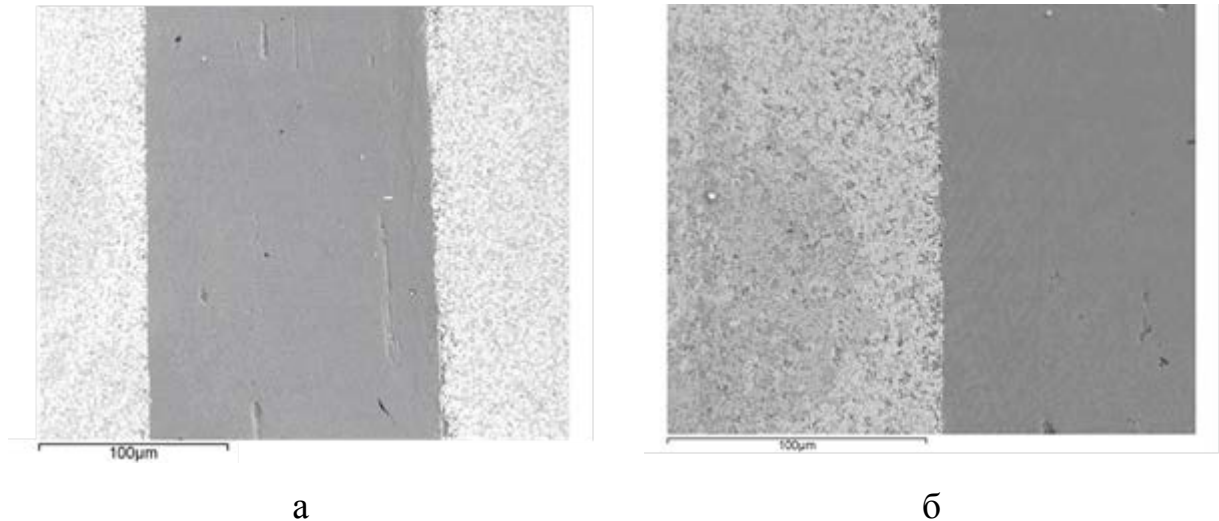


Рисунок 5.15 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ВК10 (а) та ВК15 (б), отриманого на оптимальних режимах через перфорований прошарок зі сталі товщиною 200мкм (електронна мікроскопія)

На рисунках 5.16-5.17 представлена мікроструктура зварних з'єднань сплавів ВК-10 та ВК-15, отриманих на оптимальних режимах через прошарок нікелю.

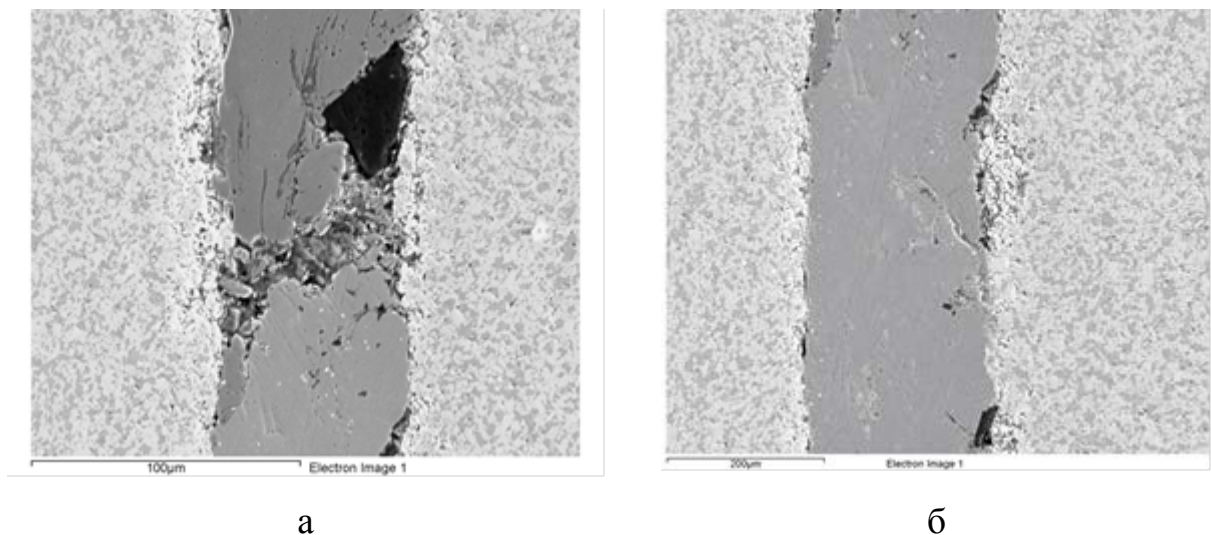


Рисунок 5.16 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ВК10, отриманого на оптимальних режимах через перфорований прошарок з нікелю товщиною 60 мкм (а) та 200 мкм (б) (електронна мікроскопія)

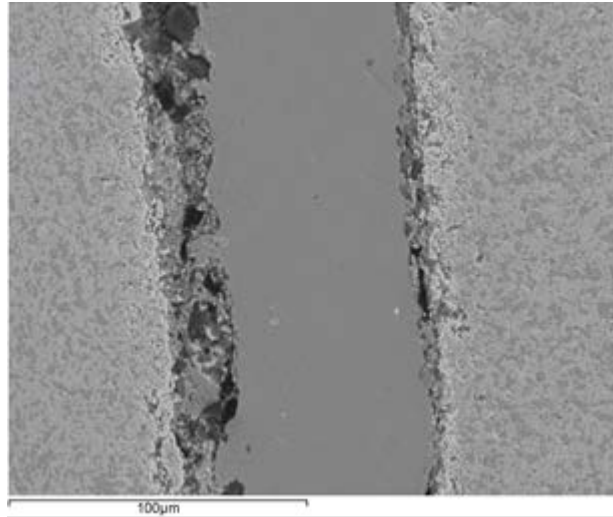


Рисунок 5.17 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву BK15, отриманого на оптимальних режимах через перфорований прошарок з нікелю товщиною 60 мкм (електронна мікроскопія)

Як видно з представлених рисунків 5.13-5.17 деформація прошарку з титану складає більше 60 %, деформація прошарків зі сталі не перевищує 25-30 %, а пластична деформація прошарків з нікелю – менше 5 %. Мікроструктура зварних з'єднань через нікелеві прошарки значно відрізняється від мікроструктури з'єднань через прошарки зі сталі та титану – в стику спостерігаються явно виражені дефекти: часткова (рис. 5.16, б), повна (рис. 5.17) відсутність з'єднання прошарку з твердим сплавом та не заповнення отворів (рис. 5.16, а).

Таким чином, результати металографічних досліджень, підтвердили дані механічних випробувань на зріз щодо ефективності використання в якості проміжних прошарків титану, який маючи високий електричний опір, при імпульсному нагріві відповідно до закону Джоуля-Ленця нагрівається до порівняно високих температур (1350-1550 К, рис. 5.9), що знижує опір пластичній деформації прошарку і призводить до інтенсифікації значних зсувних деформацій в стику.

На рисунку 5.18 представлена поверхня зламу зварного з'єднання сплаву BK10, отриманого через перфоровані прошарки титану товщиною 200 мкм, а в таблиці 5.4 – результати спектрального аналізу поверхні зламу зварного

з'єднання.

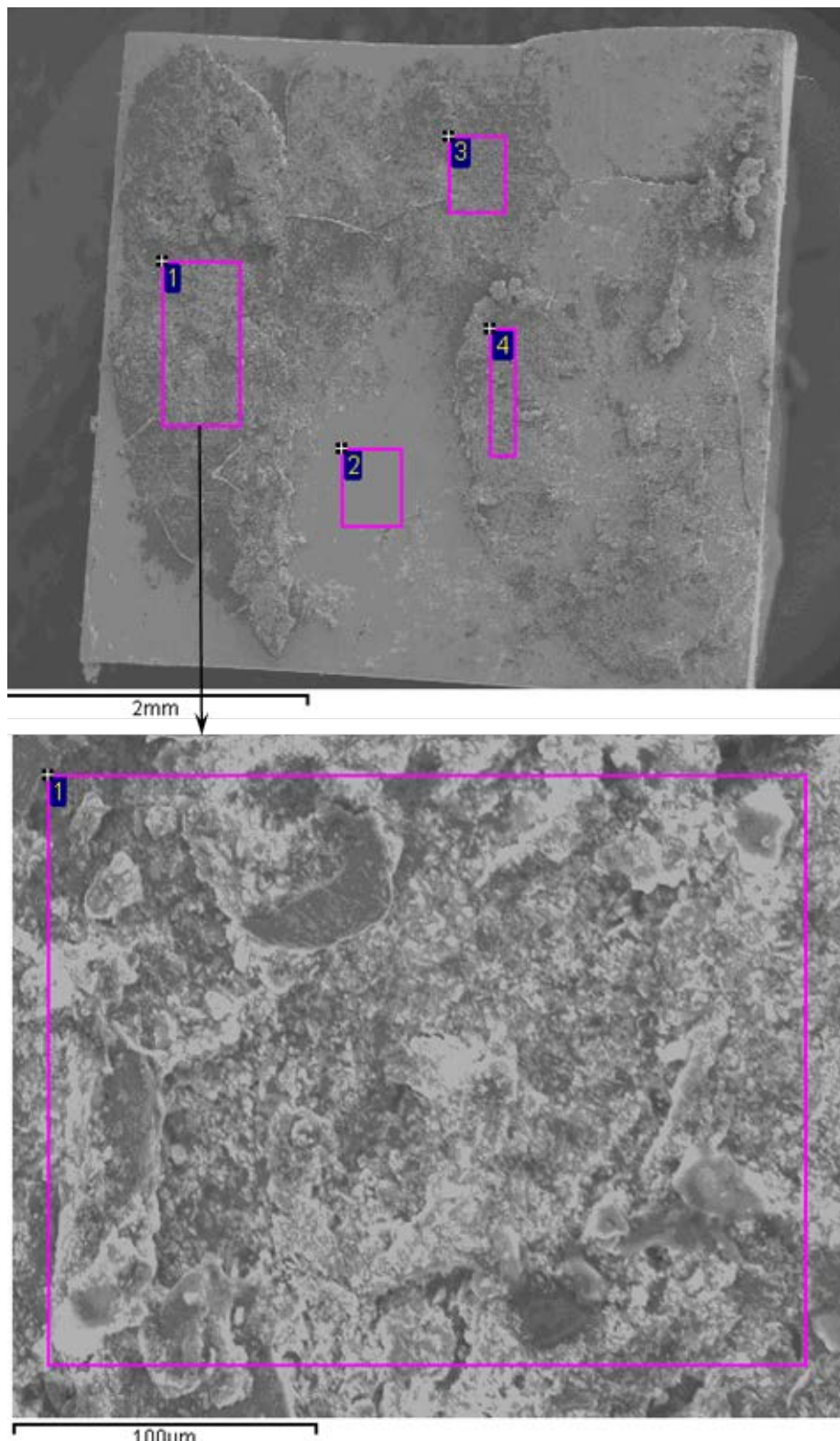


Рисунок 5.18 – Поверхня зламу зварного з'єднання сплаву ВК10, отриманого на оптимальних режимах через перфорований прошарок Ті товщиною 200мкм (електронна мікроскопія)

Таблиця 5.4 – Результати спектрального аналізу поверхні зламу зварного з'єднання (див. рис. 5.18)

Номер точки	Вміст елементів по масі, %			
	Ti	Co	W	Разом
1	49.21	5.43	45.37	100.00
2	0.84	11.32	87.84	100.00
3	31.62	6.51	61.87	100.00
4	34.12	4.83	61.05	100.00

Як видно з представленою рисунку 5.18 та результатів спектрального аналізу, частково матеріал прошарку (титан) залишився на одній поверхні твердого сплаву, а частина на іншій. Це свідчить про те, що міцність зчеплення прошарку з титану місцями більша, ніж міцність титану VT1 на зріз.

5.1.1.3 Дослідження особливостей деформації проміжних прошарків при зварюванні твердих сплавів з імпульсним нагрівом струмом

За результатами металографічних досліджень було запропоновано механізм утворення зварного з'єднання за рахунок пластичного деформування перфорованих прошарків з титану при зварюванні в твердій фазі вольфрамокобальтових сплавів з нагрівом імпульсом струму. Визначено необхідний тиск зварювання за умови повного заповнення отворів та перетворення перфорованого прошарку у суцільний. Схема перфорованих прошарків до та після деформації представлена на рисунку 5.19.

Як видно з представленої схеми деформації, перфорований прошарок при зварюванні однорідних матеріалів деформується в суцільний за рахунок заповнення отворів безпосередньо матеріалом прошарку на відміну від зварювання різнорідних матеріалів, коли частина об'ємів отворів

заповнюється матеріалом більш пластичного із матеріалів, що зварюються [73].

Встановлено, що для повного заповнення отворів перфорованого прошарку з коефіцієнтом перфорації 0,2, який був вибраний на основі аналізу літературних даних, необхідний рівень його пластичної деформації повинен складати не менше 60-70 %.

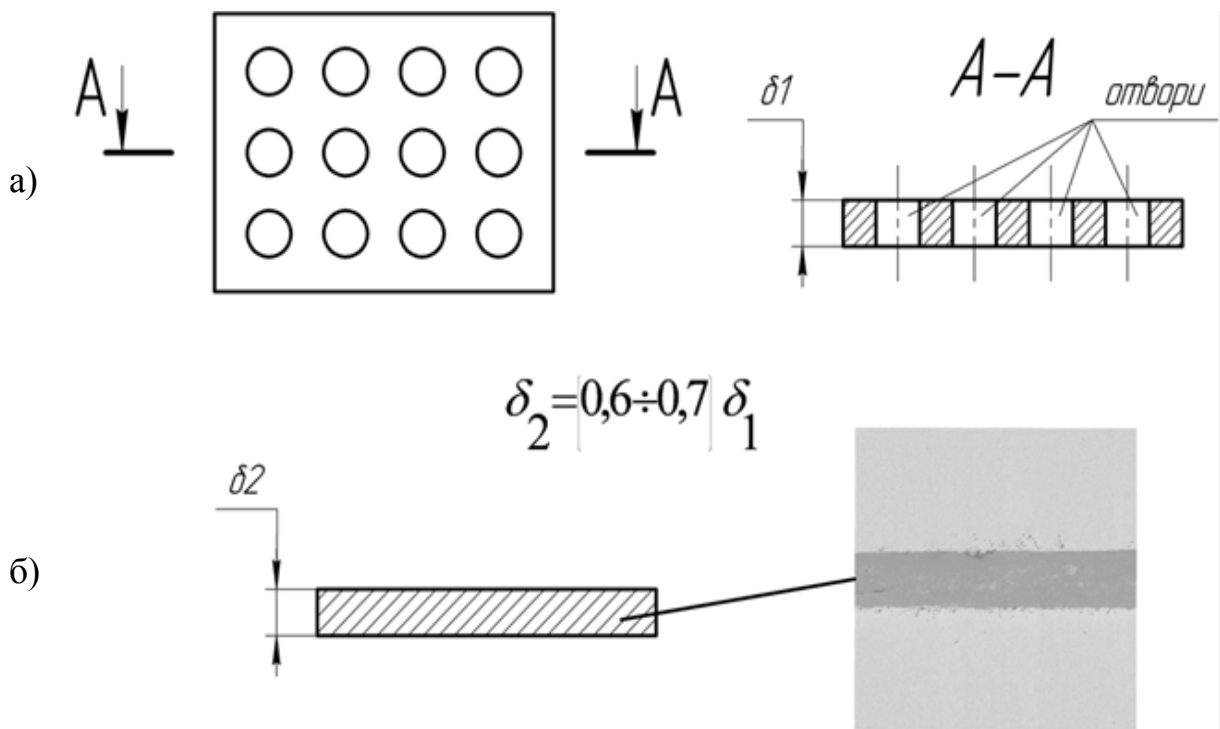


Рисунок 5.19 – Перфоровані прошарки з титану до (а) та після (б) зварювання

Необхідно відмітити залежність рівня пластичної деформації проміжного прошарку від марки твердого сплаву (рис. 5.20).

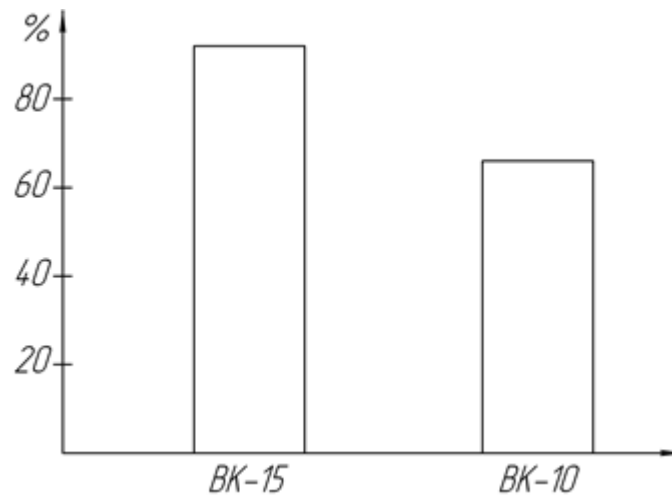


Рисунок 5.20 – Залежність деформації проміжного прошарку з титану товщиною 200 мкм від марки твердого сплаву

Встановлено, що з підвищенням вмісту кобальту у твердому сплаві інтенсифікується пластична деформація проміжного прошарку з титану при інших рівних умовах. При зварюванні сплаву BK15 деформація титанового перфорованого прошарку становить 92 % (див. рис. 5.14), а при зварюванні сплаву BK10 – 66% (див. рис. 5.13). Це пояснюється тим, що при підвищенні вмісту кобальту електричний опір і, відповідно, тепловиділення в твердому сплаві зменшуються (див. табл. 2.1), що призводить до підвищення концентрації теплового поля в контакті і зменшення опору пластичної деформації прошарку титану.

Необхідно відзначити, що деформація твердого сплаву у всіх випадках не перевищувала 1 % по висоті зразка, що відповідає вимогам прецизійності.

На основі проведених досліджень можна констатувати, що оптимальним режимом зварювання твердих сплавів з нагрівом імпульсом струму через проміжний прошарок з титану є наступний: $j_{зв} = 330-350 \text{ А/мм}^2$, $\tau_{зв} = 0,10-0,12 \text{ с}$, $P_{зв} = 8-10 \text{ МПа}$, товщина перфорованого прошарку з титану 200 мкм, коефіцієнт перфорації – 0,2. Зварювання твердих сплавів за таким режимом забезпечує міцність зварного з'єднання на рівні 480 МПа.

5.1.1.4 Дослідження факторів, які впливають на якість зварних з'єднань твердих сплавів

Відомо, що природа утворення зварного з'єднання матеріалів при зварюванні в твердій фазі полягає в утворенні між поверхневими атомами хімічного зв'язку за рахунок реалізації трьох основних стадій: фізична взаємодія, хімічна взаємодія та об'ємна взаємодія. Стадія об'ємної взаємодії вимагає порівняно значного часу та в першу чергу пов'язана з процесами взаємної дифузії, рекристалізації та релаксації напружень. У більшості випадків реалізація цієї стадії при зварюванні в твердій фазі дозволяє збільшити міцність зварного з'єднання.

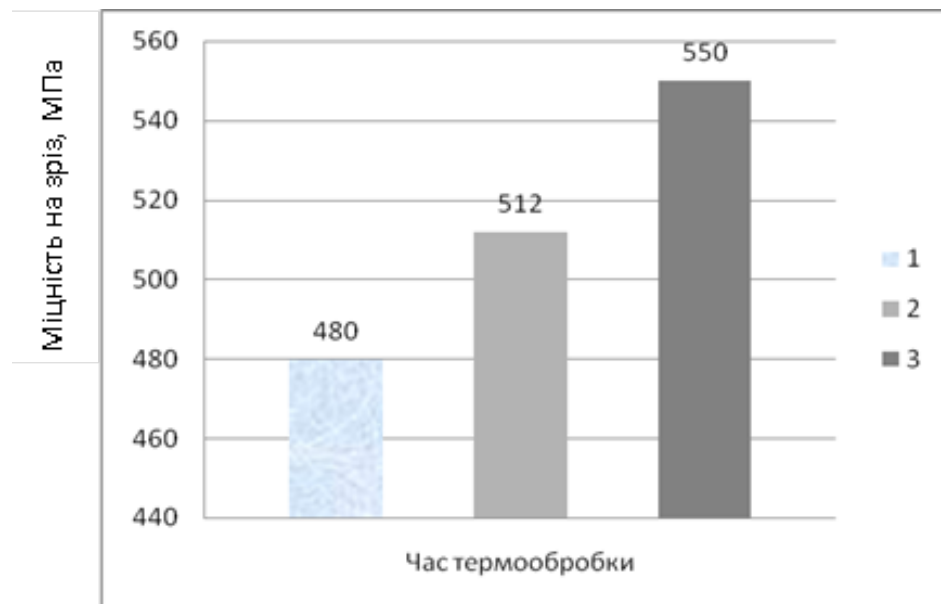
Як було встановлено в ході досліджень, оптимальним режимом зварювання твердих сплавів з нагрівом імпульсом струму є жорсткий режим, коли час зварювання складає порядку 0,1 с. Зважаючи на це, можна зробити припущення, що при електроконтактному зварюванні в твердій фазі вольфрамокобальтових сплавів реалізується стадія фізичної та хімічної взаємодії, тобто утворення з'єднання відбувається за рахунок схоплення. Відомо також, що пластична деформація, яка забезпечується рухом дислокацій приводить до утворення на поверхні рельєфу – слідів ковзання, як по границям зерен, так і в середині зерен. Тому, коли мова йде про контакт, утворений в результаті мікропластичної деформації, такий контакт являє собою разупорядковану область, що містить мікронесуцільності, заростання яких і перетворення разупорядкованої області в упорядковану відбувається тільки за рахунок дифузійних процесів, тобто на стадії об'ємної взаємодії.

Тому для реалізації стадії об'ємної взаємодії в зварних з'єднаннях, отриманих електроконтактним зварюванням, були проведені дослідження з впливу термообробки на якість з'єднань [187].

Як було відмічено вище, для об'ємної взаємодії потрібна порівняно тривала витримка при зварюванні (час ДЗВ складає від 5 хвилин). Зрозуміло, що локалізувати високу температуру в стику такий тривалий час неможливо.

У зв'язку з цим, термообробки зварного з'єднання проводили при температурі 973 К, для запобігання деструкції алмазного шару АТП. Так як титан має високу хімічну спорідненість до кисню, то термообробку проводили у вакуумі. Час термічної обробки змінювали від 30 до 120 хвилин. Тиск при термообробці брали такий же, як і при зварюванні.

На рисунку 5.21 представлені результати механічних випробувань на зріз зварних з'єднань сплаву ВК15, отриманих через перфорований прошарок з титану електроконтактним зварюванням з наступною термообробкою.



1 – без термообробки; 2 – термообробка 60 хв.; 3 – термообробка 120 хв.

Рисунок 5.21 – Залежність міцності зварних з'єднань сплаву ВК15, отриманих електроконтактним зварюванням через перфорований прошарок з титану товщиною 200 мкм від часу термообробки

На рисунку 5.22 показано мікроструктуру зварних з'єднань сплаву ВК15, отриманих через перфорований прошарок з титану на оптимальних режимах після термообробки.

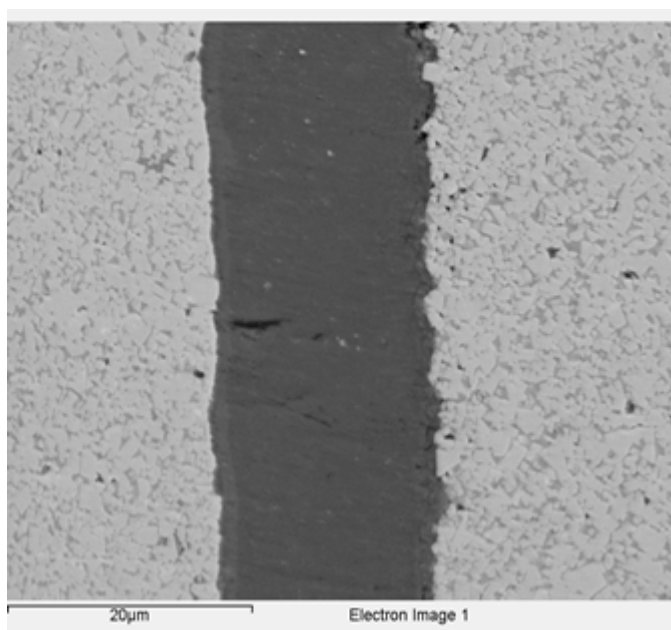


Рисунок 5.22 – Мікроструктура з'єднання сплаву ВК15, отриманого електроконтактним зварюванням на оптимальних режимах через перфорований прошарок з титану товщиною 200мкм після термообробки у вакуумі протягом 60 хвилин при температурі 973 К (електронна мікроскопія)

Встановлено, що при збільшенні часу термообробки (дифузійного відпалу) зварних з'єднань міцність зростає. Після витримки протягом 120 хвилин міцність зварного з'єднання складає 550 МПа, що на 15 % більше міцності зварного з'єднання безпосередньо після електроконтактного зварювання. Можна припустити, що це пов'язано зі збільшенням зони об'ємної взаємодії, релаксацією залишкових напружень та рекристалізацією матеріалу прошарку (температура рекристалізації титану, в залежності від чистоти 673-873 К). Для підтвердження цього припущення був проведений мікрорентгеноспектральний аналіз зварних з'єднань після електроконтактного зварювання та термообробки, а також проведені дослідження напружено-деформованого стану зварних вузлів [187].

На рисунку 5.23 представлено результати мікрорентгеноспектрального аналізу зварних з'єднань.

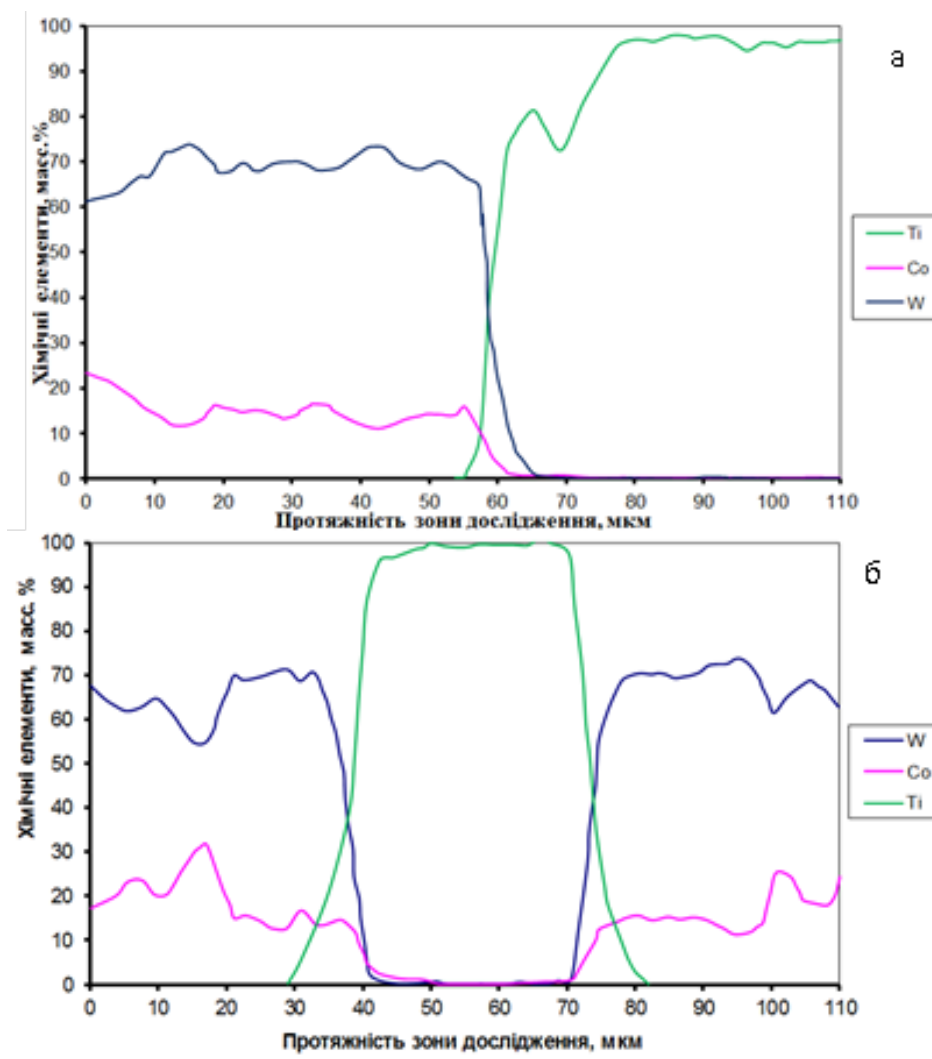


Рисунок 5.23 – Розподіл елементів в перехідній зоні зварного з’єднання сплаву ВК15, отриманого електроконтактним зварюванням на оптимальних режимах через перфорований прошарок Ті товщиною 200 мкм (а) та після термообробки (б) («Сомебах» SX 50)

Як видно з представлених рисунків, термообробка зварних з’єднань на вказаних режимах дозволяє збільшити зону об’ємної взаємодії більше ніж на 60 %, що підтверджує та пояснює дані щодо підвищення міцності з’єднання після відпалу.

Отже, результати проведених досліджень дають можливість стверджувати, що процес утворення зварного з’єднання твердих сплавів при низькотемпературному дифузійному зварюванні необхідно розглядати як двоетапний. На першому етапі (електроконтактного зварювання)

відбувається утворення фізичного контакту та хімічна взаємодія, а на другому (дифузійний відпал під тиском) – реалізуються процеси об'ємної взаємодії. У зв'язку з цим, можливі два варіанти реалізації такої технології:

1 – електроконтактне зварювання на машині для точкового зварювання з наступною термообробкою в установці для дифузійного зварювання у вакуумі (можлива термообробка партії вузлів для зменшення собівартості продукції);

2 – дифузійне зварювання у вакуумі з імпульсним нагрівом струмом з наступною термообробкою (за допомогою, наприклад, радіаційного нагріву) без розгерметизації робочої камери.

Кожен з варіантів реалізації запропонованої технології має свої плюси та мінуси та потребує економічних розрахунків собівартості виготовлення конкретних вузлів.

5.1.2 Дослідження напружено-деформованого стану зварних з'єднань

Під час виготовлення багатокomпонентних вузлів, внаслідок термомеханічної дії, в різнорідних елементах виникають власні напруження та деформації, що зменшують вихід придатних вузлів та строк експлуатації конструкцій. Суттєвий вплив на напружений стан, згідно літературних джерел, спричиняє швидкість охолодження зварного вузла після процесу зварювання, масштабний фактор, різниця властивостей матеріалів та інші. Тож нами досліджено напружений стан різнорідного зварного з'єднання в процесі виконання електроконтактного зварювання та наступної термічної обробки вузла у вакуумі під тиском.

Для моделювання напруженого стану у вузлах зварного з'єднання застосували метод скінченних елементів (МСЕ), який реалізований за допомогою програмного комплексу ANSYS.

Вхідні дані. Вхідними даними для проведення числового експерименту є: модулі пружності (E), коефіцієнти Пуассона (μ), коефіцієнти температурного розширення (α) матеріалів, що зварюються. Основні фізико-механічні властивості наведено в таблиці 5.5. Враховуючи теплофізичні властивості, а також вимоги до даних багатокомпонентних твердосплавних вузлів, поведінку матеріалів, що входять до зварного вузла, розглядали тільки в пружній області.

Таблиця 5.5 – Властивості матеріалів [175],[181],[182]

Матеріал	Коефіцієнт температурного розширення, $\alpha \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	Модуль пружності, $E \cdot 10^{11}$, Па	Коефіцієнт Пуассона, μ
ВК10 (ВК15)	5,3 (5,8)	5,74 (5,59)	0,3
Титан ВТ1 (фольга)	8,6	3,4	0,33
АТП	1,2	8,5	0,3

Аналіз конструктивного оформлення зварного вузла АТП з твердим сплавом (див. рис. 5.1) дозволив розробити розрахункову схему багатокомпонентного з'єднання, що представлена на рисунку 5.24, яка враховує осьову симетрію вузла.

Скінченно-елементна модель конструкції. У зв'язку з тим, що конструкція вузла та навантаження, які до неї прикладаються, є симетричними по відношенню до осі, скінчений елемент для визначення напружено-деформованого стану вузла датчика обирали осесиметричний скінчений елемент PLANE83 (див. рис. 5.25).

Осесиметрична конструкція представляється плоскою (X,Y) моделлю зі скінчених елементів, які моделюють повні 360° дуги кола. Відповідно, всі початкові та розрахункові зусилля, моменти та теплові потоки відносяться до вузлів скінчених елементів.

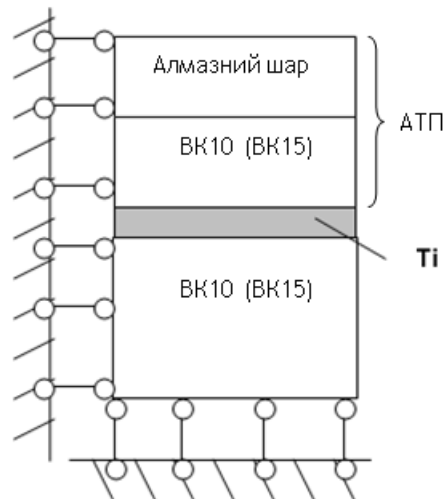


Рисунок 5.24 – Розрахункова схема зварного з'єднання

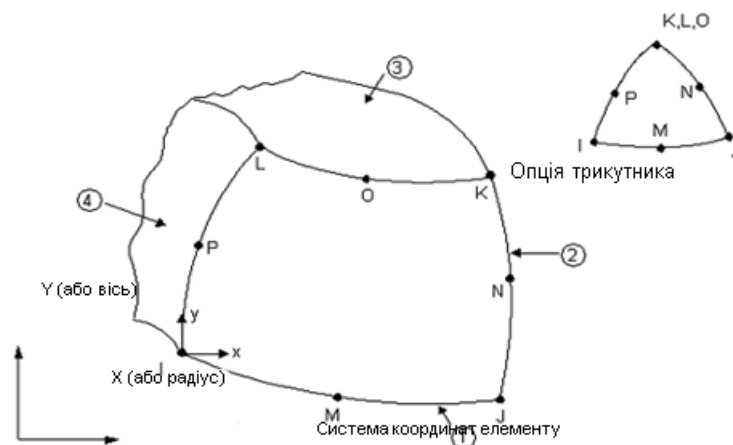


Рисунок 5.25 – Геометрія елемента PLANE83

Елемент визначається вісьмома вузлами, що мають три ступеня вільності у вузлі: переміщення у напрямках осей X , Y та Z вузлової системи координат. Ці напрямки характеризують радіальний, осьовий та дотичний напрямки відповідно.

Напружений стан елемента описується чотирма напруженнями: осьовим σ_y , радіальним σ_x , окружним σ_z та дотичним σ_{xy} . Схеми напрямків дії напружень наведено на рисунку 5.26.

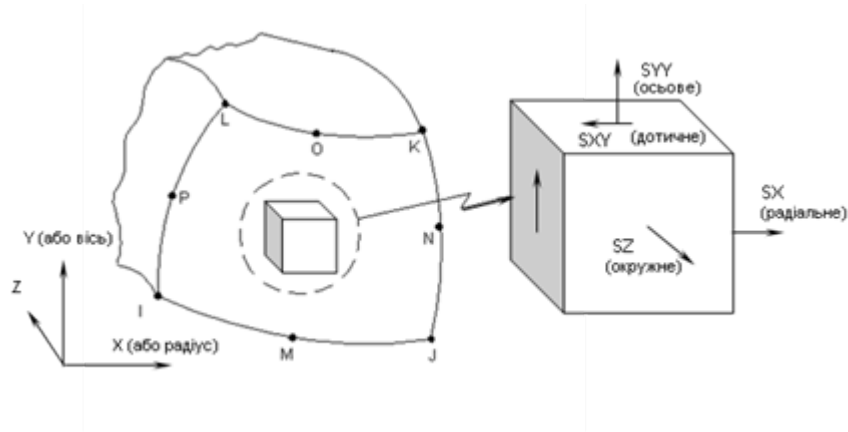


Рисунок 5.26 – Інтерпретація напруженого стану в елементі PLANE83

Для забезпечення достовірності розрахунків напружено-деформованого стану вузлів датчиків під час моделювання конструкції скінченними елементами типу PLANE83 дотримувалися таких вимог: модель будувалася в площині $Z=0$; глобальна декартова вісь Y є віссю симетрії; граничні умови описувалися в термінах механіки деформованого твердого тіла: зусилля та переміщення відносяться до вузлової системи координат; всі вузли, що знаходяться на осі симетрії Y (з $X=0$) повинні мати нульові радіальні переміщення; для запобігання переміщення конструкції як цілого хоча б одне значення UY (переміщення в напрямку осі Y) повинне мати обмеження. Враховуючи можливий характер розподілу напружень у вузлі, згущення сітки скінченних елементів проводили поблизу зварного з'єднання.

Умови закріплення та навантаження елементів конструкції.
 Моделювання створення з'єднання виконувалося за допомогою зв'язування переміщень вузлів скінченно-елементної моделі конструкції, які розташовані в зоні контакту різнорідних елементів (рис. 5.27). На рисунку наведено схему заміщення окремих вузлів різних матеріалів у зв'язані вузли скінченно-елементної моделі.

Ця модель дозволила зімітувати твердофазне з'єднання різнорідних елементів, не втрачаючи даних про їх різні теплофізичні властивості.

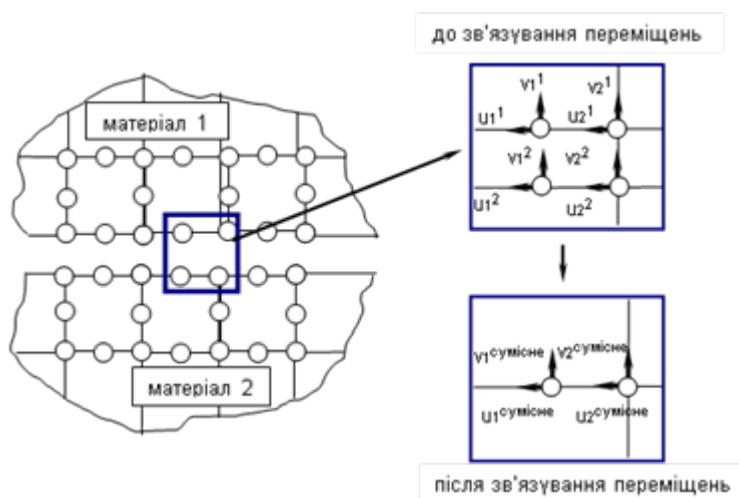


Рисунок 5.27 – Моделювання з'єднання

Моделювання полів напружень проводили для етапу електроконтактного зварювання твердосплавних вузлів при температурі в стику 1350-1550 К, яка була встановлена у розділі 5.1.1.1 експериментальним та розрахунковим шляхом. Крім цього був досліджений вплив на напружено-деформований стан зварних з'єднань АТП з твердим сплавом, дифузійного відпалу при температурі 973 К під тиском.

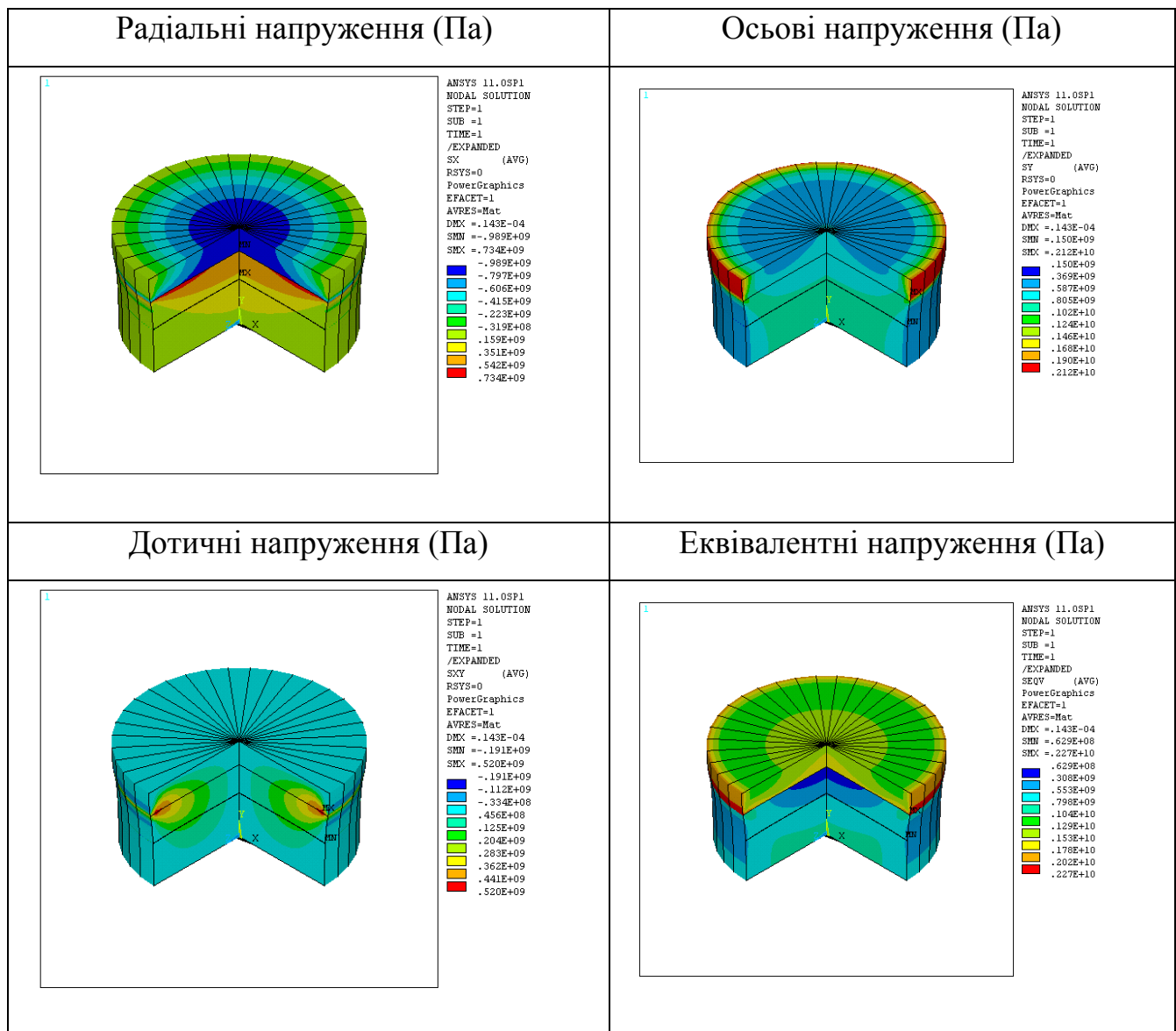
Результати розрахунків у вигляді карт напруженого стану для компонентів радіальних, осьових, дотичних та еквівалентних напружень, отриманих після електроконтактного зварювання АТП з твердим сплавом через титановий проміжний прошарок товщиною 200 мкм, наведено в таблиці 5.6.

Характер розподілу складових напруженого стану після електроконтактного зварювання свідчить про зосередження зон значних напружень поблизу зовнішньої поверхні вузла та по зоні контакту АТП з верхньою твердосплавною пластиною. Максимальний рівень напружень спостерігається на зовнішній поверхні алмазного шару АТП й складає порядку 2000 МПа, що в 2-3 рази менше допустимого рівня [175].

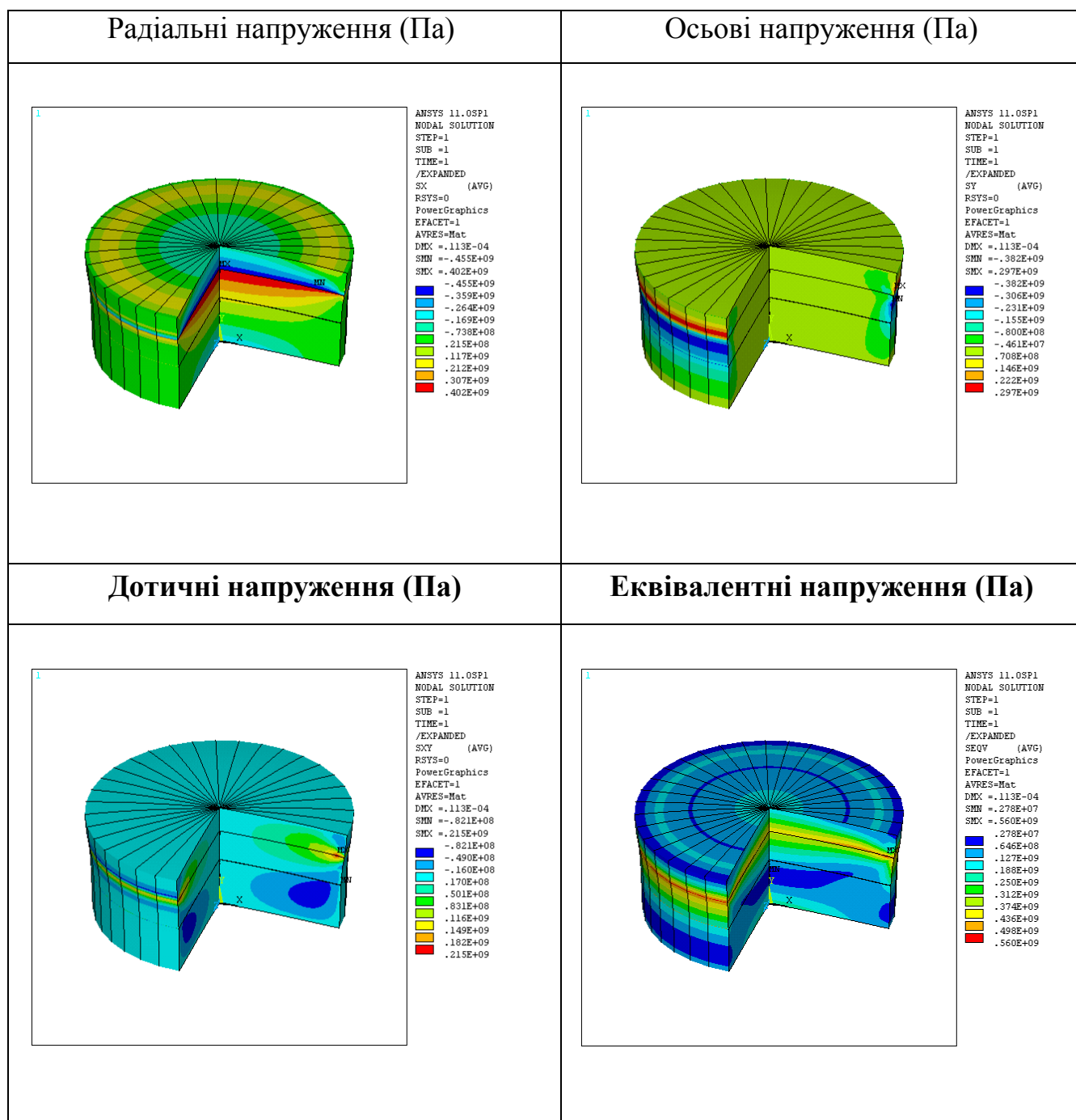
В розділі 5.1.1.4 на основі експериментальних досліджень було встановлено, що при збільшенні часу термообробки (дифузійного відпалу) міцність зварних з'єднань зростає. Було зроблено припущення, що однією з

причин цього явища може бути також релаксацією залишкових напружень в зварному з'єднанні під час його відпалу. З метою підтвердження цього припущення та встановлення характеру розподілу полів напружень після термообробки титанового вузлу у вакуумі при температурі 973 К протягом 2 годин було проведено числовий експеримент, результати якого наведені у таблиці 5.7.

Таблиця 5.6 – Напружений стан в зварному вузлі АТП з твердим сплавом після зварювання імпульсом струму



Таблиця 5.7 – Напружений стан в зварному вузлі АТП з твердим сплавом після зварювання імпульсом струму та після термообробки



Результати числового експерименту показують, що після термообробки місцями зосередження максимальних розтягуючих та стискаючих напружень залишаються периферійні ділянки вузла, а також зони контакту різномірних елементів (особливо зона з'єднання алмазного шару з твердим сплавом).

Однак, проведення після зварювання термообробки у вакуумі, призводить до суттєвого зниження рівня всіх складових напружень в зоні з'єднання АТП з твердим сплавом (у 1,5-2 рази). Зниження еквівалентних

напружень спостерігається вздовж всієї зони контакту алмазного шару з твердим сплавом (рис. 5.28) та в зоні зварного з'єднання АТП з твердим сплавом (рис. 5.29).

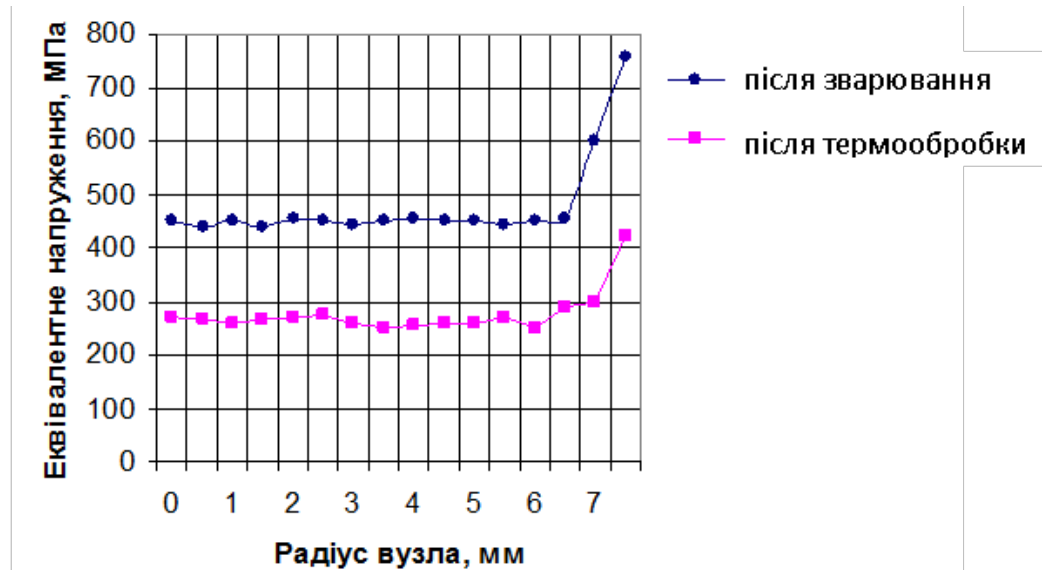


Рисунок 5.28 – Характер розподілу еквівалентного напруження вздовж зони з'єднання алмазного шару з твердим сплавом після зварювання та наступної термообробки при температурі 973 К

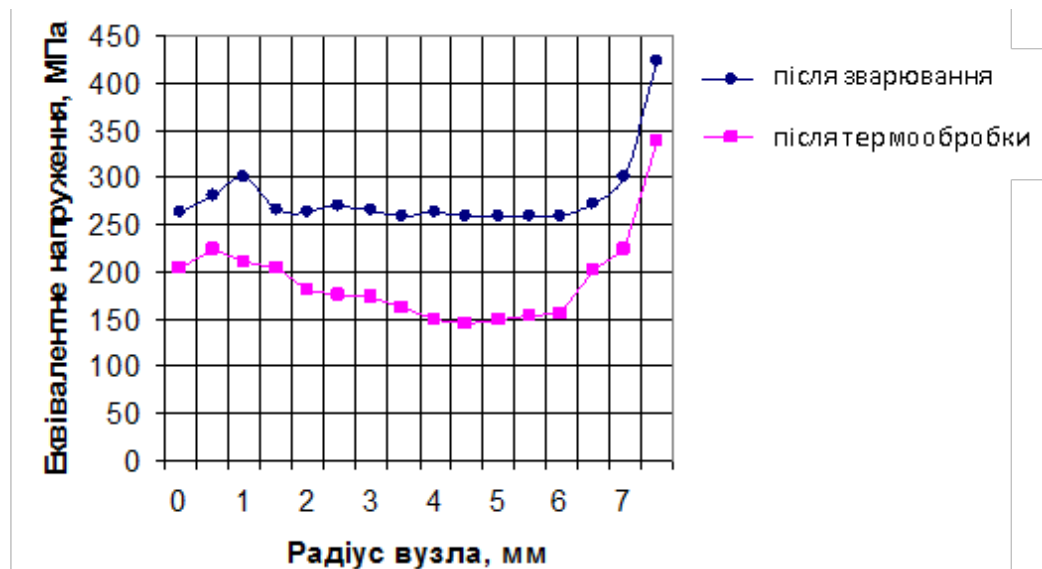


Рисунок 5.29 – Характер розподілу еквівалентного напруження вздовж зони зварного з'єднання АТП з твердим сплавом після зварювання та наступної термообробки при температурі 973 К

Встановлено, що еквівалентні напруження після термообробки в зоні з'єднання алмазного шару з твердим сплавом знижуються на 15-20 %, а в зоні зварного з'єднання АТП з твердим сплавом знижується на 25-45 %, що також підтверджує результати механічних випробувань зварних з'єднань (див. рис. 5.21).

Таким чином, на основі проведених досліджень напружено-деформованого стану зварних з'єднань можна зробити наступні висновки: найбільші значення напружень після зварювання АТП з твердим сплавом через прошарок титану з нагрівом імпульсом струму спостерігається поблизу зовнішньої поверхні вузла та по зоні контакту алмазного шару з верхньою твердосплавною пластиною; після термообробки вузлів при температурі 973 К протягом 2 годин характер розподілення напружень зберігається, але при цьому рівень еквівалентних напружень в зоні з'єднання алмазного шару з твердим сплавом знижуються на 15-20 %, а в зоні зварного з'єднання АТП з твердим сплавом знижується на 25-45 %.

5.1.3 Розробка технології прецизійного зварювання тиском твердих сплавів

На основі отриманих результатів нами було запропоновано модель утворення зварного з'єднання твердих сплавів через перфорований прошарок титану (рис. 5.30):

- після збирання заготовок через перфорований прошарок з $K_{\text{п}}=0.2$ на I-му етапі при електроконтактному нагріві відбувається пластична деформація прошарку на рівня 70-80 %, поверхні схоплюються за рахунок фізичної та хімічної взаємодії;
- на II-му етапі при термообробці відбувається рекристалізація матеріалу прошарку, релаксація залишкових напружень та збільшення зони об'ємної взаємодії.

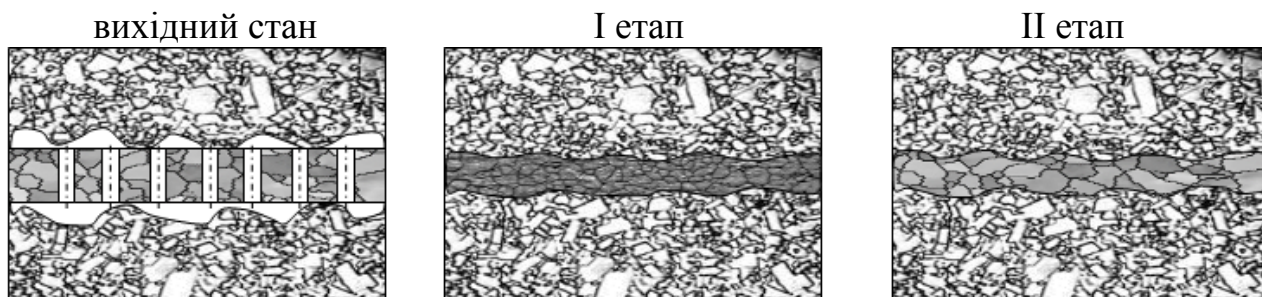


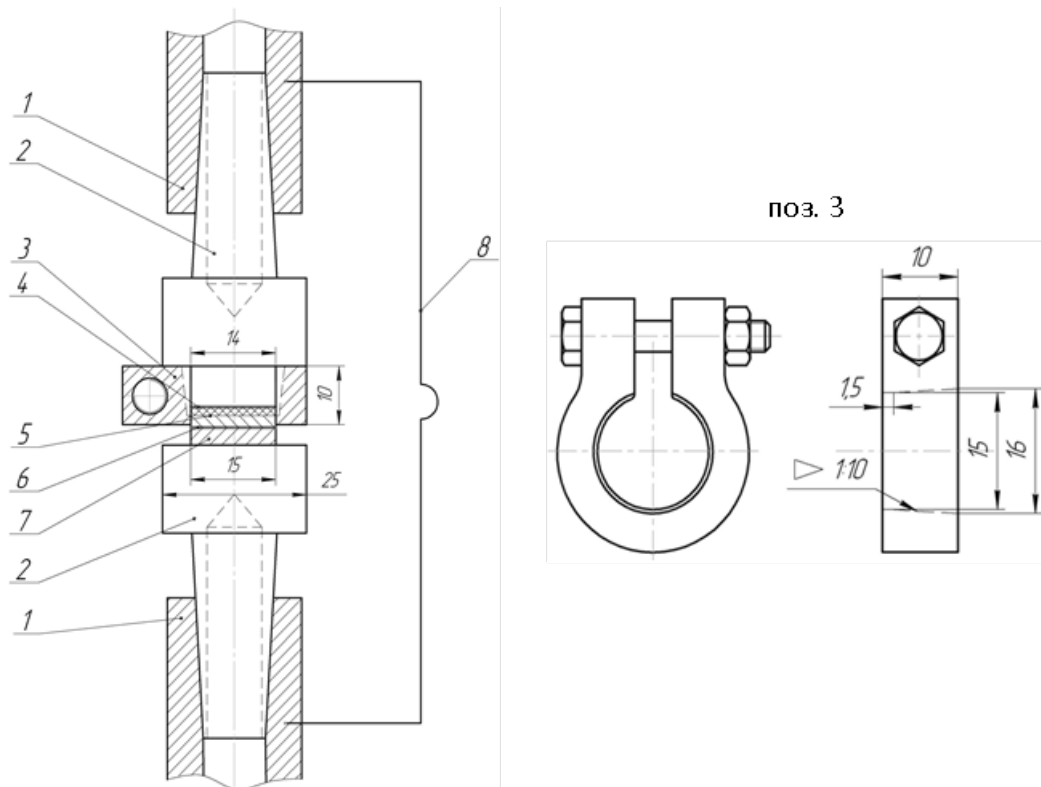
Рисунок 5.30 – Модель утворення зварного з'єднання твердих сплавів через перфорований прошарок титану

На основі запропонованої моделі був розроблений новий спосіб дифузійного зварювання тиском металевих деталей через прошарок [188], а також розроблений технологічний процес з'єднання алмазно-твердосплавних пластин з твердим сплавом за схемою, що представлена на рисунку 5.1, основні етапи якого приведені в таблиці 5.8.

Головною складністю при цьому стало підведення струму до АТП. Всі спроби отримати якісне зварне з'єднання при підведення струму безпосередньо до поверхні алмазного шару АТП не дозволив отримати позитивні результати внаслідок його перегріву та розтріскування АТП. У зв'язку з цим, була розроблена технологічна схема з'єднання АТП з твердим сплавом з підведенням струму до бокової поверхні твердосплавної підкладки АТП (рис. 5.31). Така схема забезпечує проходження зварювального струму повз алмазний шар та напряду не впливає на його нагрів.

Розроблена схема передбачає передачу зусилля зварювання від електроду до заготовок, що зварюються, через електроізоляційний матеріал (слюду) в контакт між електродом та алмазним шаром АТП. Струмopідведення забезпечується через контакт торцевої поверхні верхнього електроду та торцевої поверхні спеціалізованого оснащення (позиція 3, рис. 5.31). Форма нижнього електроду забезпечує його контактування по всій поверхні твердого сплаву, що сприяє рівномірному розподілу електричного поля та зусилля зварювання.

Зусилля необхідне для надійного електричного контакту між оснасткою та АТП забезпечується за рахунок болтового з'єднання. Необхідно відмітити, що електричний контакт оснащення з АТП створюється по всій периферії бокової поверхні твердосплавної підкладки.



1 – електродотримач; 2 – електрод; 3 – спеціалізоване оснащення для підведення струму до АТП; 4 – електроізоляційний матеріал (слюда); 5 – АТП; 6 – проміжний перфорований прошарок з титану; 7 – твердий сплав; 8 – вторинний виток зварювального трансформатора

Рисунок 5.31 – Схема зварювання імпульсом струму АТП з твердим сплавом через проміжний прошарок з титану за допомогою спеціалізованого оснащення

Проведені дослідження зі зварювання АТП з твердим сплавом за представленою схемою на оптимальних режимах зварювання твердих сплавів через проміжний перфорований прошарок з титану показали, що температура алмазного шару при зварюванні не перевищує 973 К.

Таблиця 5.8 – Технологічний процес з'єднання АТП з твердим сплавом

№ п/п	Операція
1	Підготовка під зварювання торцевої та бокової поверхні твердосплавної підложки АТП, а також торцевих поверхонь твердого сплаву шліфуванням на алмазній чашці
2	Виготовлення перфорованих прошарків з титану товщиною 200 мкм з коефіцієнтом перфорації 0,2
3	Збирання заготовок у спеціалізованому оснащенні відповідно до схеми на рисунку 5.31, та установка на машині для електроконтактного контактного точкового зварювання
4	Налагодження машини для електроконтактного зварювання на режими згідно з таблицею 5.2
5	Зварювання заготовок та зняття зварного вузла з контактної машини
6	Завантаження партії зварних вузлів (30-50 шт.) в робочу камеру установки для ДЗВ
7	Створення розрядження в робочій камері ($1,33 \cdot 10^{-3}$ Па) та відпал зварного вузла під тиском 10 МПа при температурі 973 К протягом 2 годин
8	Охолодження зварного вузла у робочій камері, її розгерметизація та зняття виробів

За розробленим технологічним процесом з'єднання АТП з твердим сплавом виготовлено партію вузлів, які успішно пройшли дослідно-виробничу перевірку в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (див. додаток А).

Необхідно відмітити, що наукова розробка «Технологія зварювання твердих сплавів, щодо виготовлення штампів, ріжучого та бурового інструменту», основою якої були дослідження проведені в даній роботі, у 2010 році виборола перше місце у обласному конкурсі «Краща науково-технічна розробка регіону», яка проводилася Чернігівською

облдержадміністрацією спільно з Чернігівським центром науково-технічної і економічної інформації.

5.2 Використання локалізації теплової енергії для прецизійного електроконтактного зварювання

Деформація має вирішальне значення при виробництві виробів найбільш розповсюдженим способом зварювання тиском – електроконтактним точковим зварюванням, яке супроводжується деформацією в стику (вм'ятини у точці), що досягає 20 % товщини деталі. Це призводить до зниження площі перерізу зварного з'єднання та, як наслідок, зменшенню його міцності. Існуючі способи зниження зварювальних деформацій при електроконтактному точковому зварюванні, що були розглянуті в розділі 1.3, не дозволяють забезпечити прецизійне з'єднання без застосування додаткових елементів апаратури управління, допоміжного обладнання, проміжних шарів з інших матеріалів, що негативно може впливати на властивості та структуру перехідного шару.

Локалізації теплової та механічної енергії в стику, на нашу думку, можна досягти за рахунок використання тонкого проміжного прошарку зі зварювального матеріалу. Відомо, що контактний опір між деталями, який залежить від стану поверхні деталей, зварювального тиску і в декілька разів перевищує опір самих деталей, відіграє ключову роль у нагріві деталей при електроконтактному зварюванні.

Передумовою для цього є дослідження, проведені в розділі 5.1 де встановлено, що ефективним способом для локалізації теплової енергії та пластичної деформації в стику, при імпульсному нагріві струмом, є використання проміжного перфорованого прошарку з матеріалу з високим питомим електричним опором, що дозволяє збільшити температуру в контакті деталь-деталь, зменшити час нагріву та зменшити рівень залишкових деформацій в зоні деталь – деталь за рахунок зниження об'єму

розплавленого металу, а також за рахунок взаємодії і утворення зв'язків між матеріалом проміжного шару та основним металом.

В роботі [189] запропоновано спосіб зварювання матеріалів з низьким електричним опором тепловим ударом. Цей спосіб полягає в тому, що в проміжний порошок додають матеріали, які представляють собою з'єднання вуглецю. Потім між деталями пропускають струм, що викликає виділення джоулевого тепла у порошок і між порошком і деталями, що з'єднуються, в результаті чого відбувається зварювання спіканням. Спосіб застосовується для зварювання вольфрамокобальтових твердих сплавів та інших металевих матеріалів.

В роботі [104], де для локалізації тепловиділення в контакті при зварюванні алюмінієвих пластин товщиною 3-12 мм між ними розташовують сталеву низьковуглецеву фольгу товщиною 0,05-0,2 мм. Протягом одного циклу зварювання при тиску до 150 МПа пропускають від 1 до 9 імпульсів зварювального струму щільністю до 1600 А/мм² тривалістю 0,1-0,25 с з нагріванням сталевий фольги до температури 1200 К. Здійснення декількох циклів нагрівання-охолодження забезпечує дифузію розплавленого алюмінію в сталь на повну глибину, що за рахунок фазових перетворень, дозволяє отримати зварне з'єднання двох алюмінієвих пластин підвищеної міцності з низьким питомим опором контакту.

Тож актуальним є розробка технології електроконтактного точкового зварювання з локалізацією тепловиділення у вузькій приконтактній зоні за рахунок розміщення у стику декількох шарів фольги зі зварювального матеріалу. При цьому нагрівання зони з'єднання до температури плавлення деталей буде відбуватися за рахунок генерування джоулевого тепла на контактних опорах між шарами фольги при пропусканні імпульсів струму відповідної щільності та тривалості.

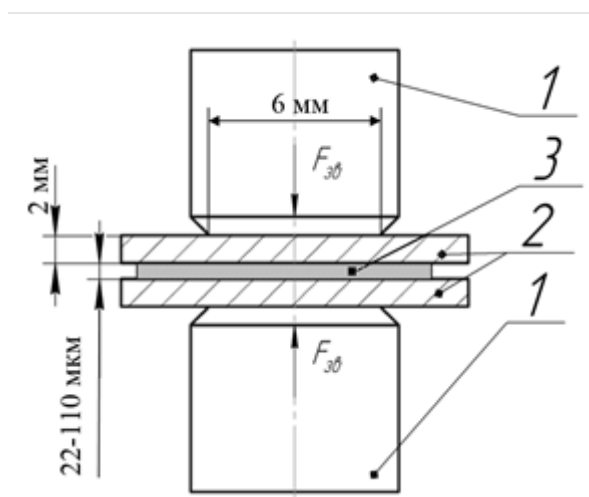
Для підтвердження ефективності запропонованого засобу нами були проведені теоретичні та експериментальні дослідження, які проводили на

кольорових металах, при електроконтактному зварюванні яких, на сьогоднішній день, виникають найбільші проблеми, порівняно з іншими конструкційними матеріалами. Внаслідок високої тепло та електропровідності електроконтактне зварювання кольорових металів потребує застосування потужних джерел тепла, жорстких режимів та високої щільності струму порядку 1000 A/mm^2 [101]. Крім цього, електроконтактне зварювання алюмінію та його сплавів характеризується наступними проблемами [190]: наявність на поверхні алюмінію тугоплавкого оксиду, що перешкоджає сплавленню поверхонь, що зварюються, і сприяє забрудненню металу шва; висока рідкотекучість алюмінію, що може призвести до витікання металу або внутрішнього виплеску; великий коефіцієнт лінійного розширення та низький модуль пружності, що сприяє підвищенню схильності до деформацій (рівень зварювальних деформацій у 1,5 – 2 рази вищий, ніж у сталевих конструкцій); необхідність ретельної підготовки поверхонь матеріалів (хімічне очищення, механічне очищення та знежирення поверхонь, що зварюються); підвищена розчинність газів у нагрітому металі, що призводить до інтенсивної пористості і зниження міцності та пластичності металу; схильність металу шва до утворення тріщин у зв'язку з грубою стовпчастою структурою металу шва та виділенням по межах зерен легкоплавких евтектик, а також розвиток напружень усадки в результаті високої ливарної усадки алюмінію; схильність деформованих сплавів, зміцнених термообробкою, до появи гарячих тріщин; поява усадочних раковин, які утворюються внаслідок того, що розплавлений метал витікає з зони з'єднання під дією зусилля стиску.

5.2.1 Дослідження температурних полів при електроконтактному точковому зварюванні металевих матеріалів через тонкі прошарки із зварювального матеріалу

Для визначення впливу тонких прошарків із зварювального матеріалу на процес тепловиділення при електроконтактному точковому зварюванні були проведені теоретичні дослідження в комплексній системі ANSYS за методикою описаною в п. 5.1.1.1.

Розрахункова схема розповсюдження теплових полів в системі деталь-деталь при електроконтактному точковому зварюванні через тонкі прошарки приведена на рисунку 5.32.



- 1 – електроди (мідь); 2 – деталі (алюміній);
3 – тонкі прошарки (алюміній)

Рисунок 5.32 – Схема електроконтактного точкового зварювання з використанням багатошарового проміжного прошарку

Необхідні дані, яких потребує комплексна система ANSYS наведені в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Властивості матеріалів [181]

Температура, К		300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
с, Дж/(кг·К)	Cu	385	398	408	417	425	433	442	451	464	481	507
	Al	880	951	994	1037	1072	1107	1142	1177			
λ , Вт/(м·К)	Cu	402	492	385	377	370	361	355	349	338	328	322
	Al	237	240	235	230	225	220	215	210	205	200	195

На рисунку 5.33 представлена модель деталі, яка розміщена між двома електродами машини для електроконтактного точкового зварювання. В контакті деталь-деталь розміщені тонкі шари із алюмінієвої фольги товщиною 11 мкм.

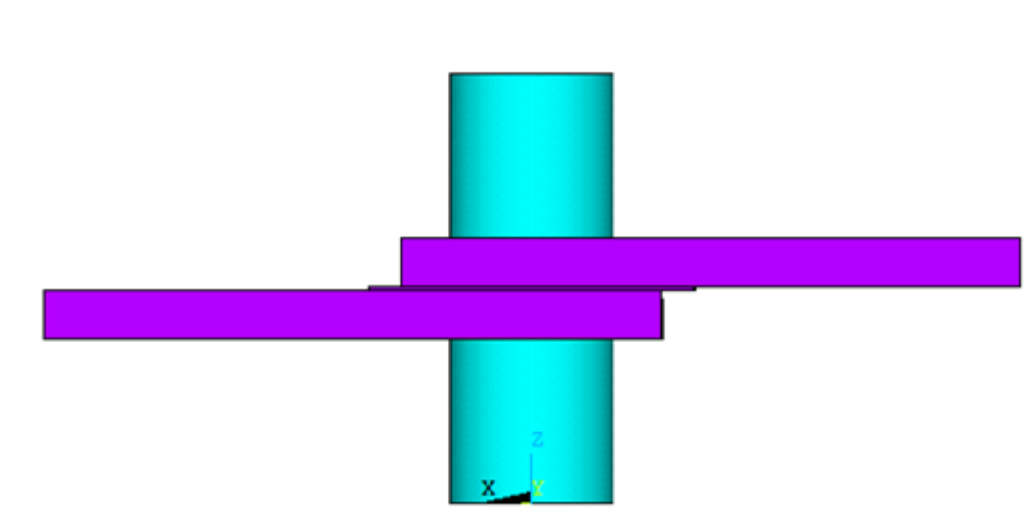


Рисунок 5.33 – Модель електроконтактного точкового зварювання через багат шаровий прошарок в комплексній системі ANSYS

Виходячи з того, що проміжні тонкі прошарки мають більший питомий електричний опір, це дозволить збільшити температуру в контакті деталь-деталь, зменшити час нагріву, при цьому зменшити рівень залишкових деформацій в зоні деталь – деталь за рахунок зниження об'єму розплавленого металу, то при моделюванні електроконтактного точкового зварювання

зусилля *Heat Flux (тепловий потік)* прикладалося безпосередньо до тонких проміжних прошарків. Зусилля *Heat Flux (тепловий потік)* розраховувалося відповідно до закону Джоуля–Ленца.

Параметри навантаження: величина імпульсу струму – 12 кА (найбільший вторинний короткочасний струм для машини МТ-1216 – у перерахунку, згідно діаметру електродів, щільність струму склала $\sim 330 \text{ А/мм}^2$); час нагріву 0.1 с (обраний за даними отриманих результатів досліджень розділу 5.1).

Проведено порівняльний аналіз температурних полів для різної кількості тонких проміжних прошарків [191]. Результати розрахунку приведені на рисунках 5.34 – 5.39

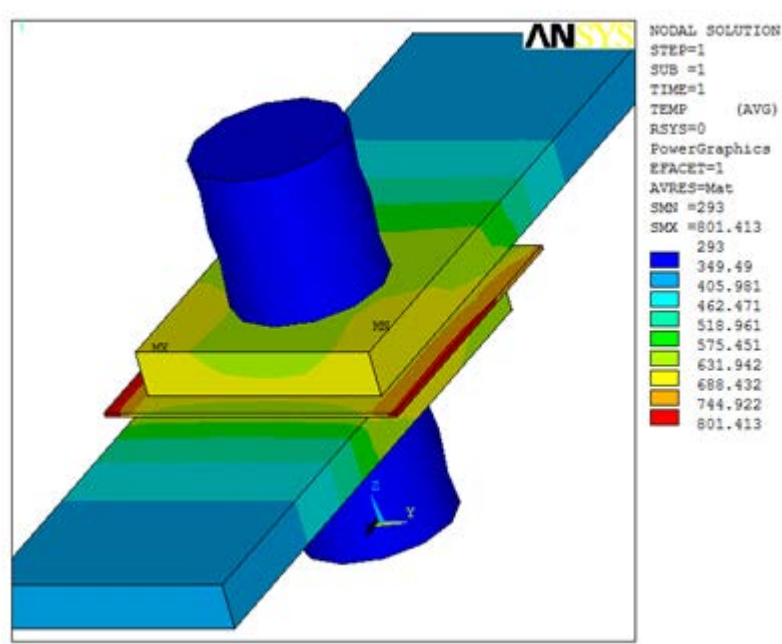


Рисунок 5.34 – Розподілення теплових полів по деталях, що зварюються електроконтактним точковим зварюванням

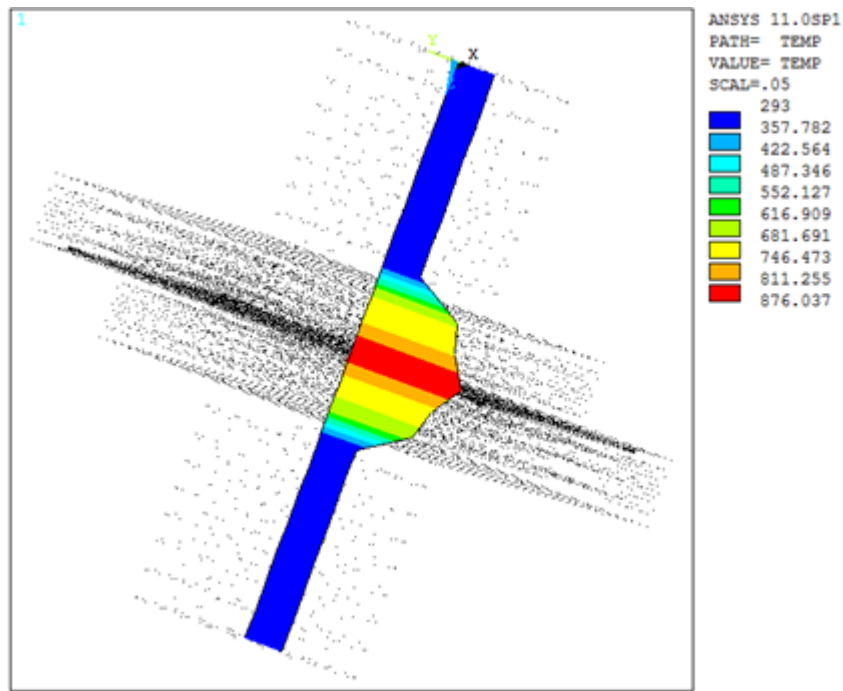


Рисунок 5.35 – Розподілення теплових полів по деталях, що зварюються через 2 шари тонкого прошарку зі зварювального матеріалу

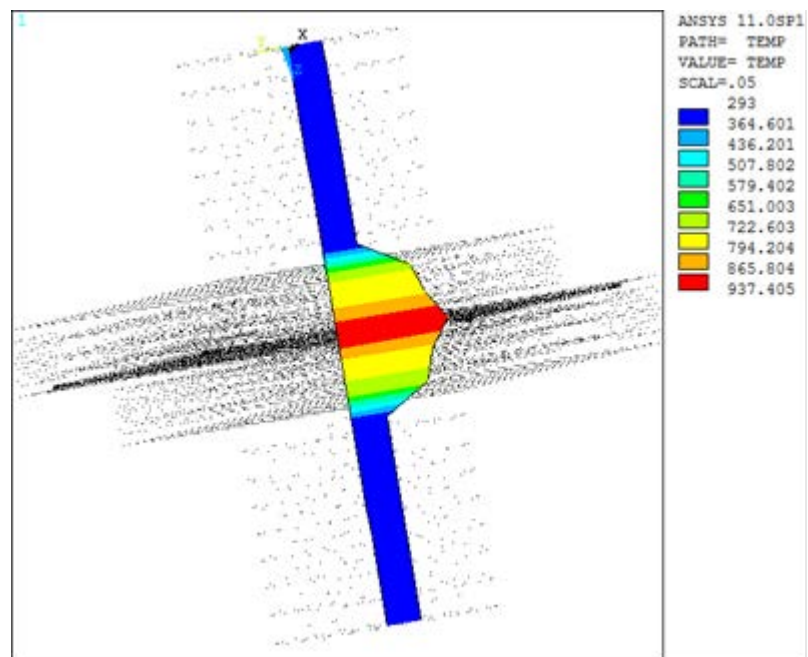


Рисунок 5.36 – Розподілення теплових полів по деталях, що зварюються через 4 шари тонкого прошарку зі зварювального матеріалу

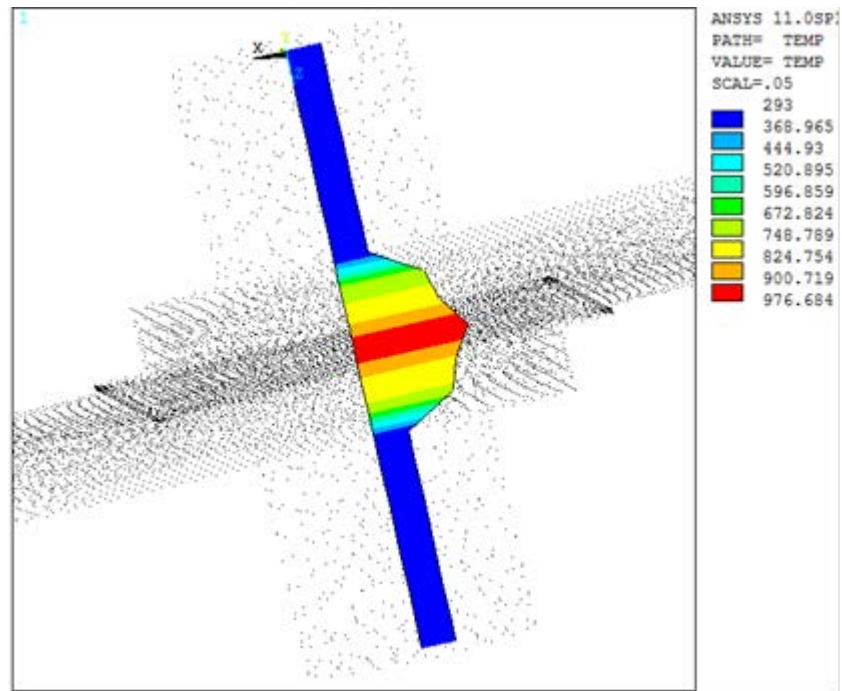


Рисунок 5.37 – Розподілення теплових полів по деталях, що зварюються через 6 шарів тонкого прошарку зі зварювального матеріалу

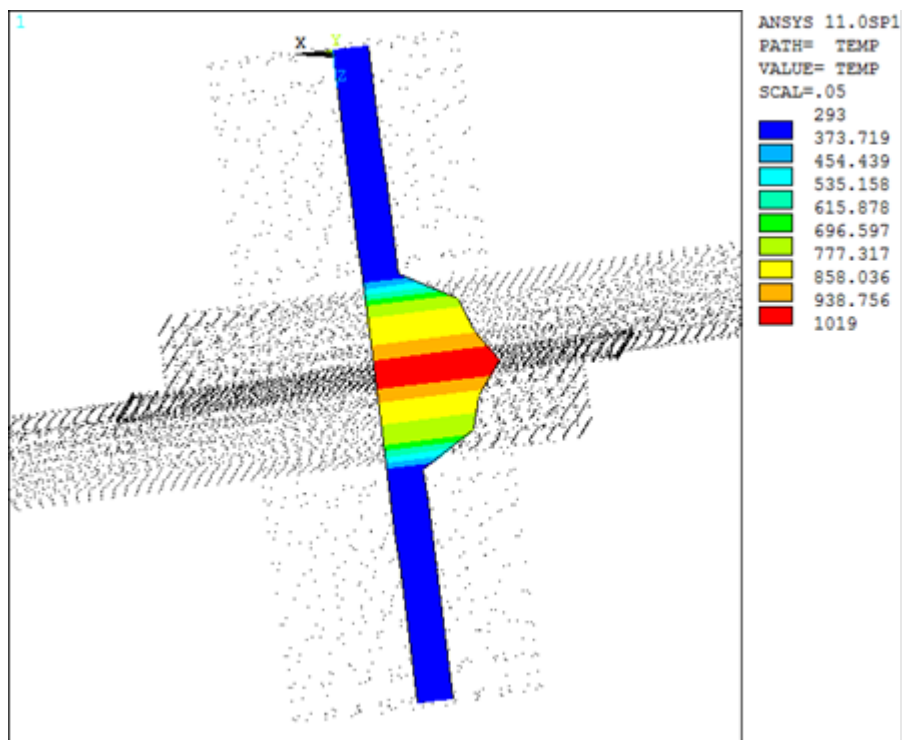


Рисунок 5.38 – Розподілення теплових полів по деталях, що зварюються через 8 шарів тонкого прошарку зі зварювального матеріалу

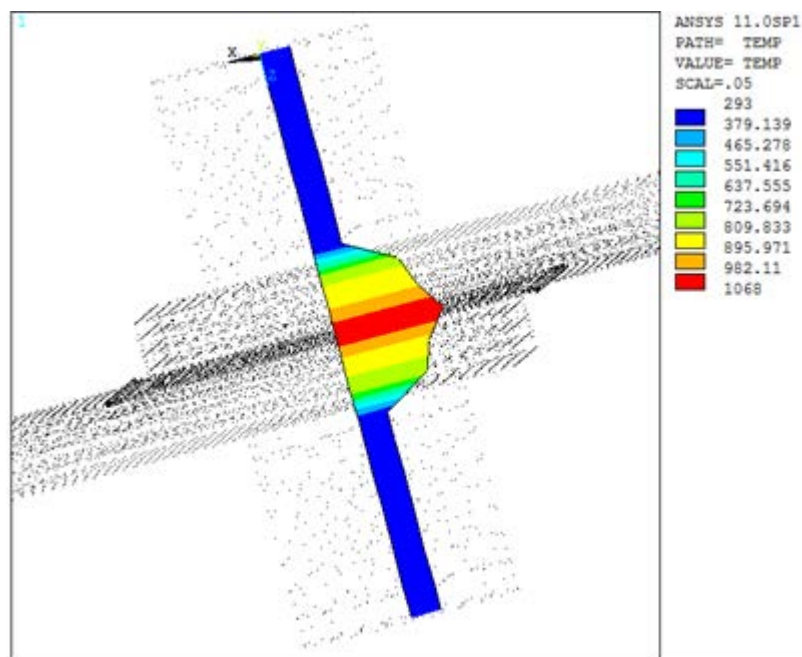


Рисунок 5.39 – Розподілення теплових полів по деталі, що зварюється через 10 шарів тонкого прошарку зі зварювального матеріалу

На рисунку 5.40 представлена залежність температури в контактї деталь-деталь (алюміній) від кількості шарів тонкого прошарку з алюмінію.

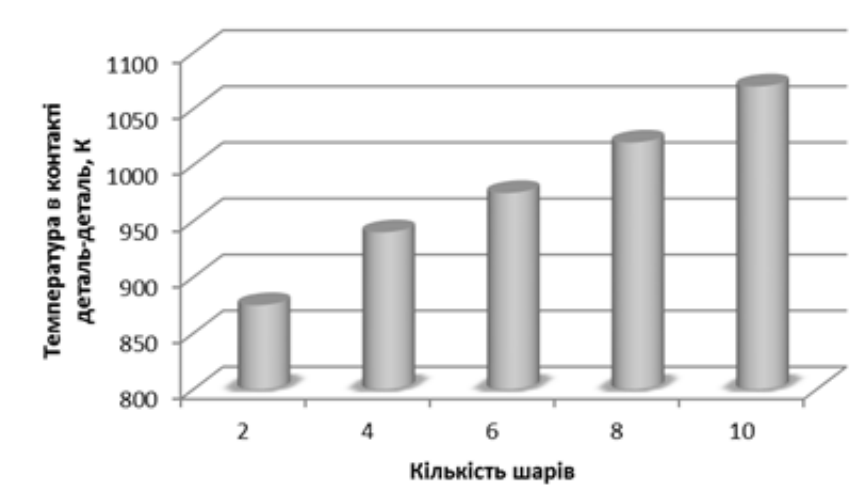


Рисунок 5.40 – Графік залежності температури в контактї деталь-деталь (алюміній-алюміній) від кількості шарів тонкого прошарку з алюмінію

З приведених вище рисунків можемо зробити наступні висновки: зі

збільшенням кількості шарів алюмінієвої фольги зростає локалізація теплової енергії в стику; температура в контакті зварних деталей, досягає температури плавлення алюмінію, у випадку розміщення 4-6 шарів алюмінієвої фольги товщиною 11 мкм.

Таким чином результати проведених досліджень підтвердили наше припущення про можливість локалізації теплової енергії в стику за рахунок використання тонкого проміжного прошарку зі зварювального матеріалу.

5.2.2 Дослідження електроконтактного точкового зварювання алюмінію та його сплавів через тонкі прошарки із зварювального матеріалу

Для підтвердження ефективності запропонованого засобу локалізації теплової енергії були проведені дослідження по електроконтактному точковому зварюванню зразків з алюмінію марки АД00 та АМц розміром $2 \times 20 \times 100$ мм [191]. В якості тонких прошарків із зварювального матеріалу використовували суцільну стрічку алюмінієвої фольги АД0 завтовшки 11 мкм, яка згорталася в необхідну кількість шарів (рис. 5.41). Фольга, яка використовувалась, відповідає ГОСТ 618-73: на ній відсутні сторонні включення, поверхневі забруднення, надриви, складки, забоїни, сліди корозії (алюмінієвого пилу), стружки і плями масел, що перешкоджають розмотуванню стрічки.



Рисунок 5.41 – Вигляд тонкого прошарку із алюмінієвої фольги

Електроконтактне зварювання проводили на максимально можливому жорсткому режимі (для машини МТ-1216): щільність струму – $\sim 330 \text{ А/мм}^2$ (з урахуванням найбільшого вторинного короткочасного струму 12 кА та діаметру електродів 6 мм, а також є умовно віднесеною до кінцевого діаметру ядра), час зварювання – 0,1 с, зусилля зварювання 500-600 Н (мінімально можливе для даного типу машин). Після зварювання з'єднання випробовували на зріз.

Необхідно відмітити, що на вказаних режимах з'єднання алюмінію напряду отримати взагалі не вдається.

В таблиці 5.10 та рисунку 5.42 представлені результати механічних випробувань на зріз та деформації основних матеріалів після електроконтактного точкового зварювання.

Таблиця 5.10 – Результати механічних випробувань на зріз та деформації з'єднань АД00+АД00, отриманих електроконтактним точковим зварюванням через тонкі прошарки з алюмінію ($j_{зв} = 330 \text{ А/мм}^2$, $\tau_{зв} = 0,1 \text{ с}$, $F_{зв} = 500-600 \text{ Н}$)

Кількість шарів	Рівень деформації основного матеріалу, мм (% від товщини)	Розривне зусилля на зріз, Н
2	0,03 (1,5)	1000
4	0,05 (2,5)	1500
6	0,04 (2)	1350
8	0,04 (2)	1250
10	0,02 (1)	850
12	0,01 (0,5)	600

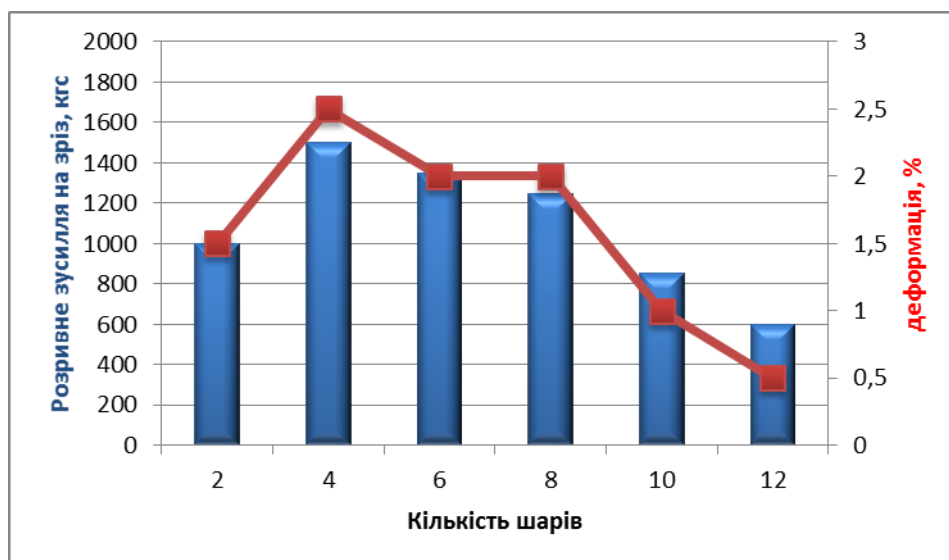


Рисунок 5.42 – Залежність розривного зусилля на зріз та рівня деформації з'єднань АД00+АД00, отриманих електроконтактним точковим зварюванням через тонкі прошарки на режимі $j_{зв} = 330 \text{ А/мм}^2$, $\tau_{зв} = 0,1 \text{ с}$, $F_{зв} = 500\text{-}600 \text{ Н}$, від кількості шарів

З представленої залежності видно, що найбільш міцне зварне з'єднання утворюється при використанні 4 шарів алюмінієвої фольги. Необхідно відмітити, що зменшення міцності при збільшенні кількості шарів алюмінієвої фольги не відповідають результатам дослідження температурних полів (див. рис. 5.40), коли зі збільшенням кількості шарів зростає локалізація теплового поля та підвищується температура в контакті. На нашу думку, це пов'язано з тим, що при проведенні експериментів зі зварювання, коли змінюється кількість шарів (тобто опір в контакті деталь-деталь), при інших рівних умовах відбувається порушення теплового стану внаслідок відповідних змін щільності струму, згідно закону Ома. Тобто, при збільшенні кількості шарів тонких прошарків, необхідно також пропорційно збільшувати силу зварювального струму. Ці дані співпадають з даними щодо рівня деформації в залежності від кількості тонких прошарків. Як видно з рисунку 5.41 при використанні 4 шарів алюмінієвої фольги, при інших рівних умовах, спостерігається найбільша деформація основних матеріалів, що свідчить про максимальний рівень локалізації теплової енергії в цьому

випадку. При використанні іншої кількості шарів, ймовірно, співвідношення контактного опору деталь-деталь та величини силу струму не достатньо для генерування і локалізації потрібної кількості теплової енергії.

Для підтвердження отриманих результатів нами, спільно з інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, було проведено вивчення впливу кількості проміжних прошарків на процеси масоперенесення при прецизійному електроконтактному зварюванні [192].

Дослідження процесів масоперенесення за допомогою методу авторадіографії, проводили при електроконтактному точковому зварюванні алюмінієвого сплаву АМц із використанням проміжних шарів з фольги алюмінію АД0 товщиною 11 мкм на тих же самих режимах вказаних вище.

Для аналізу характеристик масоперенесення в зоні контакту на один із зразків, який зварюється, здійснювалося нанесення радіоактивного ізотопу кобальту ^{60}Co . Складання деталей здійснювалося внапуск у послідовності АМц (^{60}Co) - фольга – АМц. Після зварювання зразок розрізали по центру зварного з'єднання та розміщували на фоточутливій плівці для авторадіографування з наступною витримкою на ній впродовж порядку 240 годин та проявляли плівку. Після проявлення плівку фотометрували та одержували концентраційний розподіл радіоактивного ізотопу кобальту в алюмінії. Отримані авторадіограми для трьох різних випадків зображені на рисунку 5.43 (стрілками показано місце стику деталей).

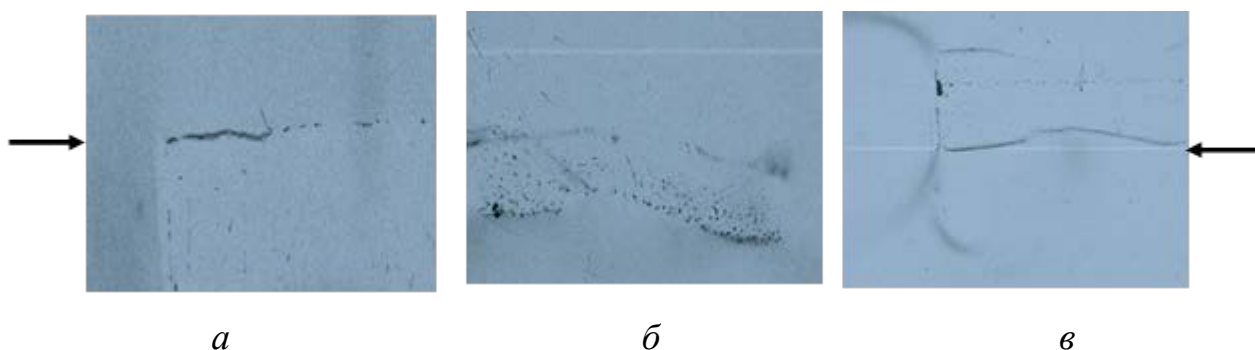


Рисунок 5.43 – Авторадіографічні відбитки зони з'єднання зразків при зварюванні алюмінію через фольгу: а – 2 шари; б – 4 шари; в – 6 шарів

Розподілення радіоактивного ізоотопу у стику після зварювання представлено у вигляді концентраційних кривих для трьох різних випадків на рисунку 5.44.

Вивчення концентраційних кривих показує, що у трьох різних випадках зварювання (через 2, 4 та 6 шарів фольги) механізми утворення з'єднань відрізняються. Про це свідчать особливості розподілу радіоактивного ізоотопу в стику, форма концентраційних кривих та глибина проникнення ізоотопу ^{60}Co у зварні зразки.

Аналіз авторадіограми при зварюванні через 2 шари фольги (рис. 5.43, а) свідчить про наявність пор у зоні зварювання. З вигляду концентраційної кривої (рис. 5.44, а) випливає, що напівширина пори складає близько 20 мкм, а її протяжність – приблизно 120 мкм. Якість зварного з'єднання незадовільна, оскільки наявність пор може призвести до появи тріщин у зоні зварювання та подальшого руйнування зварного виробу в процесі експлуатації. Однак, у той же час, спостерігається відсутність границі розділу між деталями, що зварюються, що свідчить про утворення монолітного з'єднання.

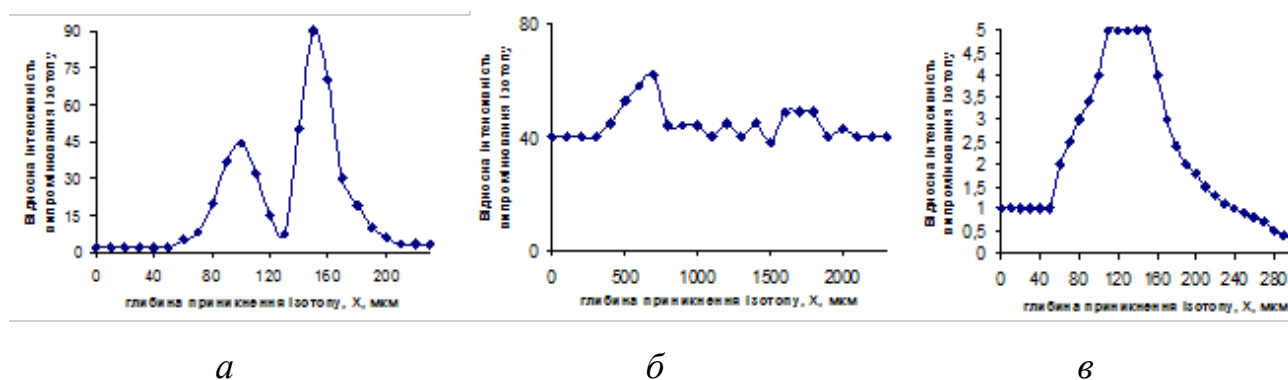


Рисунок 5.44 – Концентраційні криві розподілу радіоактивного ізоотопу кобальту в алюмінії після зварювання через фольгу: а – 2 шари; б – 4 шари; в – 6 шарів

При аналізі авторадіограми (рис. 5.43, б) та концентраційної кривої (рис. 5.44, б) у випадку зварювання через 4 шари фольги наявність пор не

виявлена. Спостерігається відсутність чіткої границі розмежування між зразками, що зварюються, та фольгами, що свідчить про утворення монолітного з'єднання. Глибина проникнення ізотопу в алюміній у даному випадку на порядок вище, ніж у попередньому.

Особливу увагу привертає той факт, що весь об'єм зразка, який не містив ізотоп також заповнений ізотопом. Цей ефект, очевидно, пояснюється проходженням явища надглибокого проникнення частинок в металічну перешкоду [193], [194], що проявляється у проникненні частинок на значну глибину у метал (сотні та тисячі їх діаметрів) при русі цих частинок з великою швидкістю (вище 10^3 м/с) та налітання на металічну перешкоду.

З аналізу концентраційної кривої при зварюванні алюмінію через 6 шарів фольги (рис. 5.44, в) впливає, що в зоні контакту зразків утворюються протяжні зони дифузійної взаємодії металів, які зварюються.

Визначені за даними концентраційними кривими коефіцієнти масоперенесення (D_m) у перерізі по центру кожного зразка наведено у табл. 5.11.

Таблиця 5.11 Значення коефіцієнтів масоперенесення (D_m , cm^2/c) ізотопу ^{60}Co

Кількість шарів фольги					
2		4		6	
зліва	справа	зліва	справа	зліва	справа
$6,4 \cdot 10^{-5}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$

З одержаних результатів видно, що коефіцієнт масоперенесення при зварюванні через 4 шари фольги на 2-3 порядки вище, ніж у інших двох випадках. Слід відмітити, що значення коефіцієнтів приблизно на 4-6 порядків є вищими порівняно із коефіцієнтом самодифузії алюмінію. При відпалі алюмінію при температурі 873 К коефіцієнт самодифузії Al становить $D_{\text{Al-Al}} = 6,1 \cdot 10^{-9}$ cm^2/c , а дифузії Co в Al при цій же температурі $D_{\text{Co-Al}} = 1,5 \cdot 10^{-8}$ cm^2/c [195]. Результат такого пришвидшеного масоперенесення можна пояснити протіканням при електроконтактному

зварюванні явища аномального масоперенесення в металах та сплавах, яке спостерігається при імпульсних впливах [196], [197].

Розраховані значення коефіцієнтів масоперенесення зображено у вигляді гістограми на рисунку 5.45.

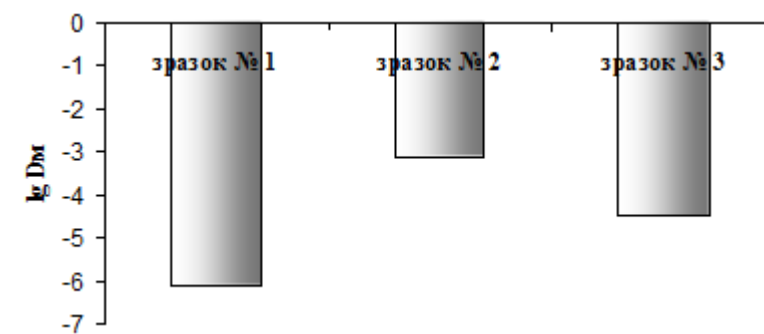


Рисунок 5.45 – Гістограма величин коефіцієнтів масоперенесення у перерізі по центру кожного зразка: зразок №1 – 2 шари; №2 – 4 шари; №3 – 6 шарів

Очевидно, що максимальне значення коефіцієнта масоперенесення спостерігається у зразку отриманого через 4 шари алюмінієвої фольги, що свідчить про найбільш ефективне проходження дифузійних процесів у зоні з'єднання.

Таким чином, можна стверджувати, що при електроконтактному точковому зварюванні алюмінію АД00 товщиною 2 мм на режимі $j_{зв} = 330 \text{ А/мм}^2$, $\tau_{зв} = 0,1 \text{ с}$, $F_{зв} = 500-600 \text{ Н}$ оптимальною кількістю шарів алюмінієвої фольги є 4 шари, коли створюються умови для найбільш ефективного співвідношення контактного опору деталь-деталь та щільності зварювального струму для утворення максимального рівня теплової енергії в стику.

Вивчення мікроструктури зварних з'єднань алюмінію АД00, отриманих на оптимальних режимах, також підтвердили результати проведених досліджень (рис. 5.46 та рис. 5.47).

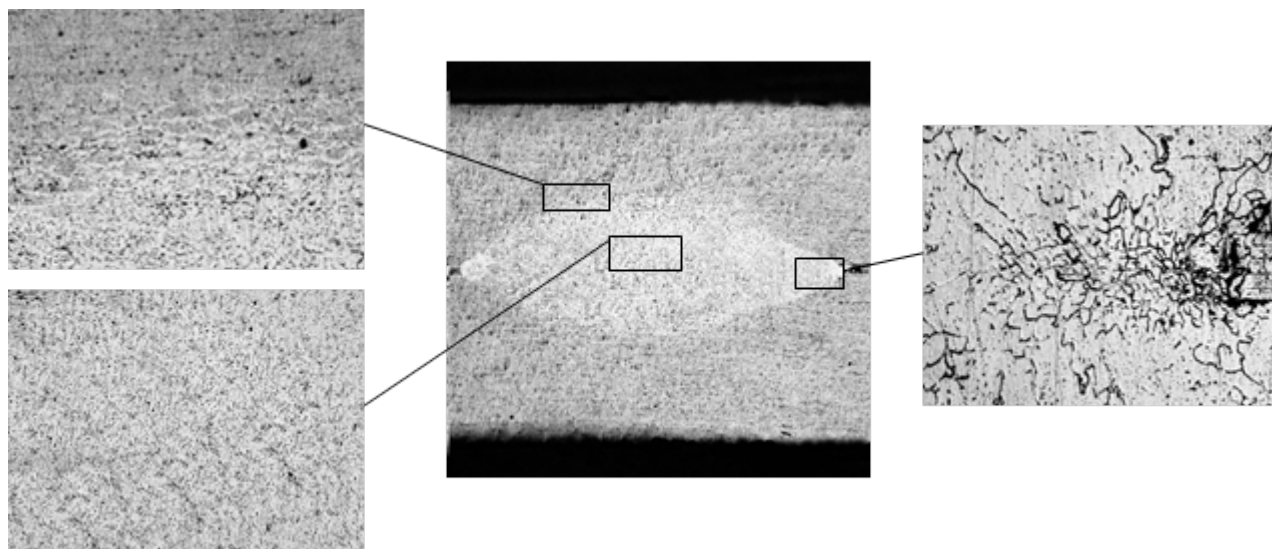


Рисунок 5.46 – Мікроструктура литого ядра зварного з'єднання АД00, отриманого на оптимальних режимах через прошарок з алюмінію (4 шари) (оптична мікроскопія, x10)

З представлених рисунків видно, що з'єднання утворюється за рахунок взаємного розплавлення і утворення загальної литої зони. При цьому деформація основного матеріалу (глибина вм'ятини) не перевищує 2 % товщини деталі, глибина проплавлення складає приблизно 20-25 % товщини основного металу, а діаметр ядра складає 5-6 мм (~85 % від норми, відповідно до стандарту ГОСТ 15878-79). Відповідно до встановленого діаметру ядра та розривного зусилля (див. рис. 5.42), міцність зварних з'єднань алюмінію АД00, отриманих електроконтактним точковим зварюванням на оптимальному режимі через тонкі проміжні прошарки з алюмінію складає 60 МПа, що становить 95-100 % міцності основного матеріалу.

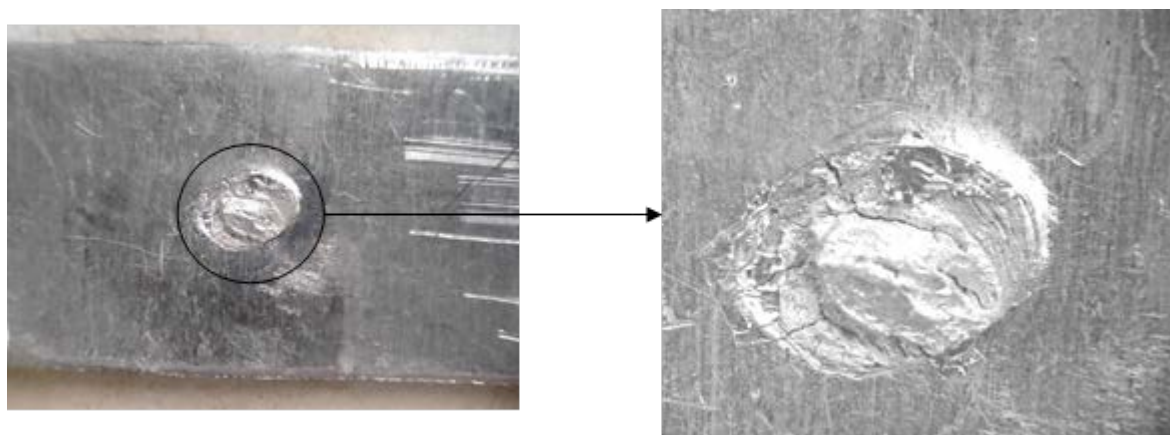


Рисунок 5.47 – Топографія поверхні після випробування на зріз зварного з'єднання АД00, отриманого через прошарок з алюмінію (4 шари) (оптична мікроскопія, x16)

Аналіз отриманих даних з вивчення мікроструктури зварних з'єднань дозволив запропонувати нам модель формування нероз'ємного прецизійного з'єднання при електроконтактному точковому зварюванні алюмінію та його сплавів через тонкі проміжні прошарки з алюмінію (див. рис. 5.48), яка включає проходження чотирьох основних етапів: I – починається з моменту включення струму (утворення електричного контакту та початок локалізованого тепловиділення на контактних опорах між шарами фольги з алюмінію); II – виникнення зони розплавленого металу в стику за рахунок оплавлення тонких проміжних прошарки з алюмінію; III – збільшення зони взаємного розплавлення (ядра) діаметром $\sim 85\%$ від норми та глибиною проплавлення 20-25% товщини основного металу; IV – вимикання струму (охолодження і кристалізація металу).

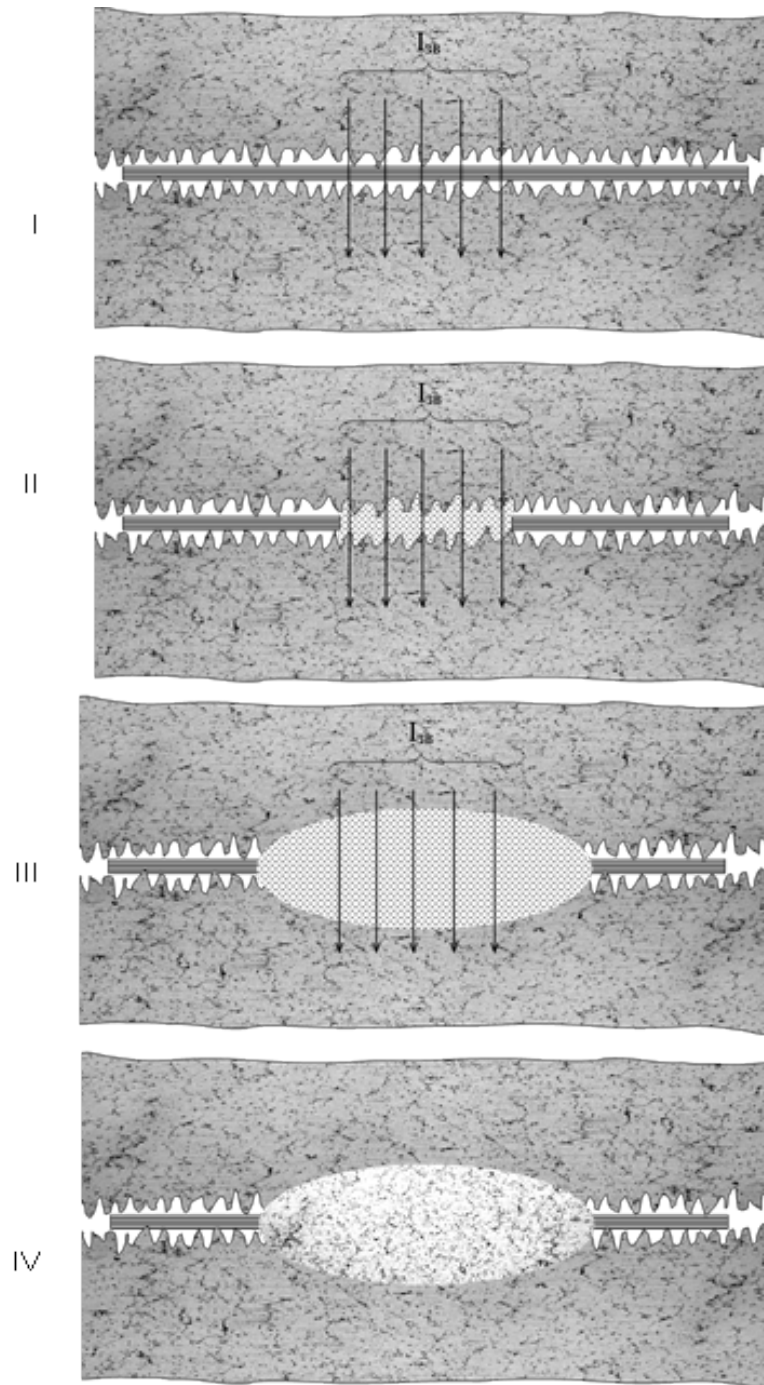


Рисунок 5.48 – Етапи формування прецизійного нероз’ємного з’єднання при електроконтактному точковому зварюванні через тонкі проміжні прошарки

На основі отриманих результатів нами був запропонований новий спосіб електроконтактного точкового зварювання металевих деталей через прошарок [198], з локалізацією тепловиділення у вузькій приконтактній зоні

шляхом розміщення між деталями, що зварюються, декількох шарів фольги зі зварювального матеріалу. Нагрівання зони з'єднання до температури плавлення деталей відбувається за рахунок генерування джоулевого тепла на контактних опорах між шарами фольги при пропусканні імпульсів струму. Процес зварювання можна проводити на повітрі або у вакуумі, в залежності від властивостей матеріалів, що зварюються. Даний спосіб дозволяє здійснювати електроконтактне точкове зварювання з локалізацією тепловиділення в стику і з обмеженим рівнем деформації основного матеріалу та забезпечити високу міцність, теплопровідність і низький питомий опір контакту навіть при порівняно низьких значеннях щільності струму. Останнє має визначальне значення при виготовленні деталей з алюмінієвих та мідних сплавів, електроконтактне точкове зварювання яких потребує дуже жорстких режимів, зі щільністю струму більше 1000 A/mm^2 , а також застосування ряду додаткових засобів і прийомів.

5.2.3 Дослідження електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через тонкі прошарки із зварювального матеріалу

З метою підтвердження ефективності використання тонких проміжних прошарків з матеріалу, що зварюється, для локалізації теплової енергії в стику, нами були проведені також дослідження здатності до прецизійного електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через тонкі фольги з алюмінію [199].

Для дослідження використовували прутки діаметром 6 мм з алюмінію марки АД31, що має низький електричний опір, високу теплопровідність та характеризується високими пластичними властивостями, порівняно з іншими сплавами алюмінію, що ускладнює процес прецизійного їх зварювання.

Електроконтактне стикове зварювання опором проводили на машині МС-802У на режимі, який є максимально жорстким для даного типу машин:

$j = 300 \text{ А/мм}^2$; $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$; $t_{зв} = 0,5-0,7 \text{ с}$. Було досліджено вплив кількості тонких прошарків з алюмінію АД0 завтовшки 11 мкм на міцність зварних з'єднань на розтяг (рис. 5.49). Необхідно відмітити, що при зварюванні заготовок на вказаних режимах напряду нероз'ємне з'єднання не утворюється взагалі.

Встановлено, що при зварюванні прутків з алюмінію АД31 міцність зварних з'єднань досягає 250 МПа, що складає 95 % міцності основного матеріалу при використанні 6-ти тонких прошарків з алюмінієвої фольги. При цьому, рівень деформації основного матеріалу не перевищує 2 %.

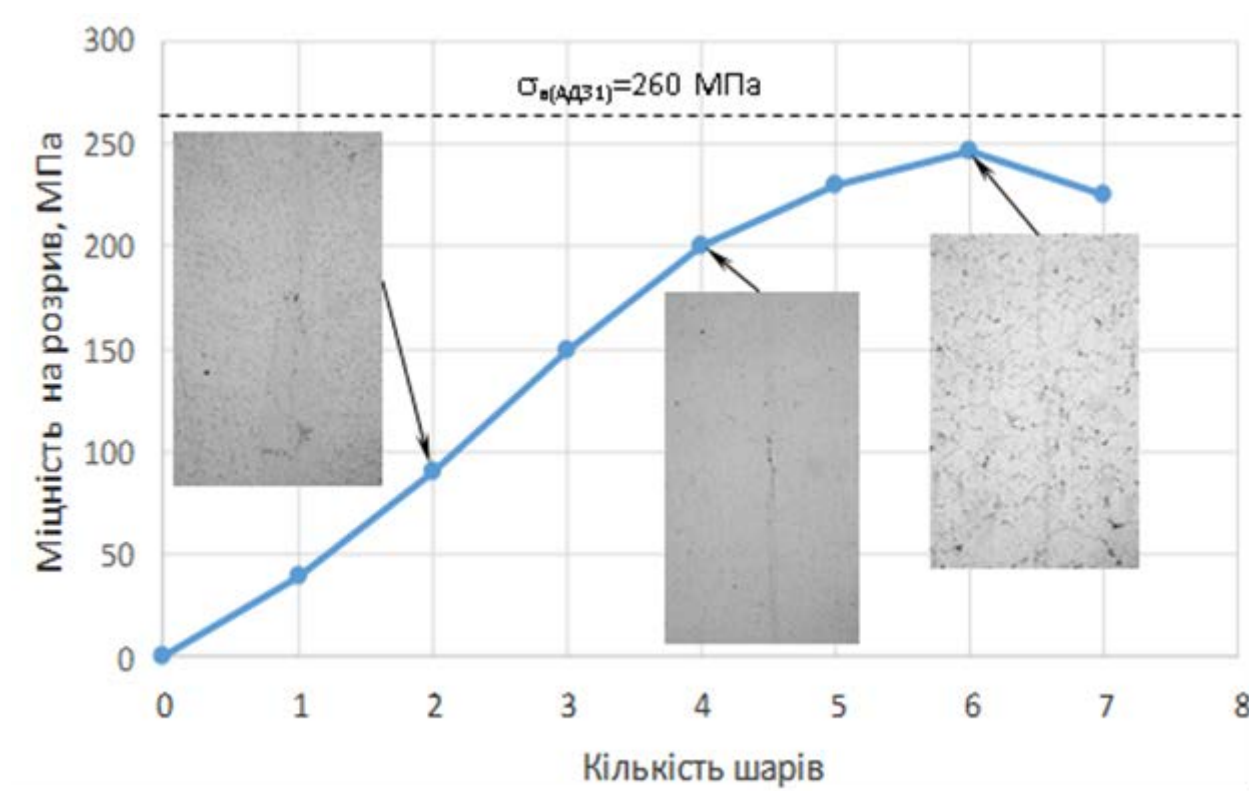


Рисунок 5.49 – Вплив кількості прошарків з алюмінію на міцність зварних з'єднань АД31+АД31, отриманих електроконтактним стиковим зварюванням опором на режимі: $j = 300 \text{ А/мм}^2$; $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$; $t_{зв} = 0,5-0,7 \text{ с}$.

Той факт, що оптимальна кількість шарів тонких прошарків з алюмінію для стикового зварювання опором сплаву АД31 склала 6 шарів, підтверджує висновок зроблений в розділі 5.2.2 про те, що вибір кількості шарів (тобто

вибір величини контактної опору) залежить для кожного конкретного випадку від співвідношення контактної опору деталь-деталь та щільності зварювального струму для утворення максимального рівня теплової енергії в стику.

Проведено дослідження мікроструктури та вимірювання мікротвердості зварних з'єднань, отриманих на оптимальних режимах через 6 шарів проміжних тонких прошарків (рис. 5.50).

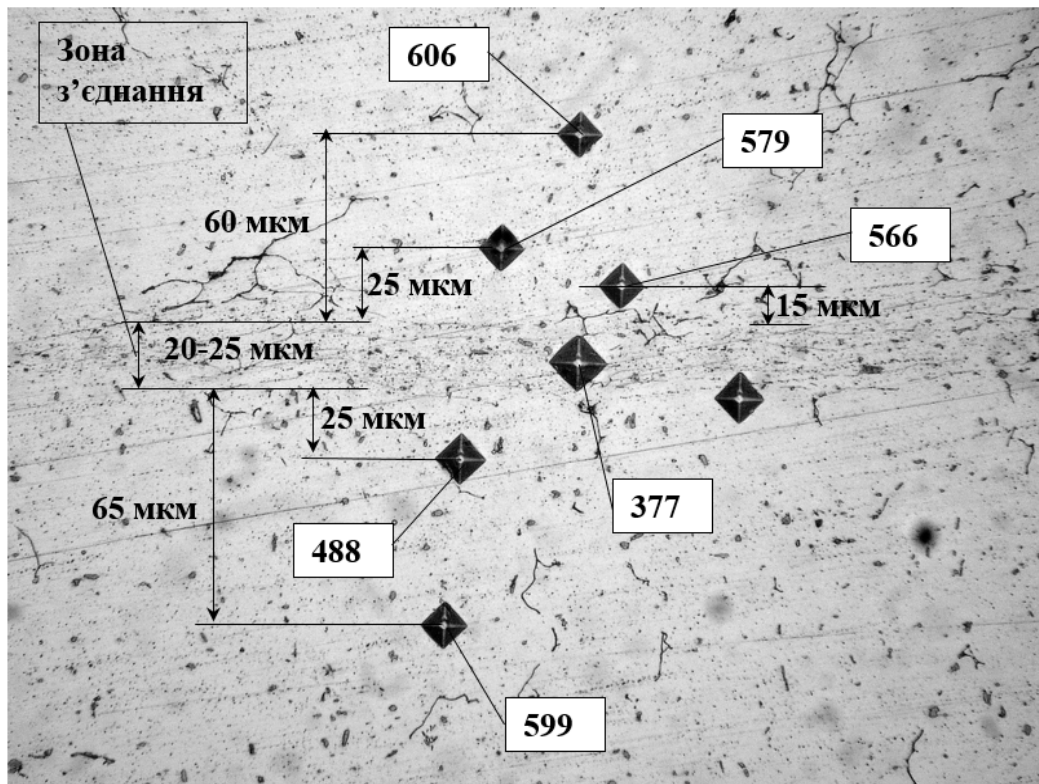


Рисунок 5.50 – Мікроструктура та мікротвердість (МПа) зони з'єднання АД31+АД31 отриманого електроконтактним стиковим зварюванням опором на режимі: $j = 300 \text{ А/мм}^2$; $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$; $t_{зв} = 0,5-0,7 \text{ с}$, через 6 шарів фольги з алюмінію товщиною 11 мкм (оптична мікроскопія, $\times 500$)

З представленого рисунку видно, що ширина зона взаємного розплавлення складає порядку 20-25 мкм, що свідчить про високий ступінь локалізації теплової енергії в стику. При цьому мікротвердість зони контакту

на 25-30 % менше мікротвердості основного металу, що, як відомо, позитивно позначається на працездатності зварних з'єднань.

Таким чином, проведені дослідження підтверджують ефективність використання тонких проміжних прошарків зі зварювального матеріалу для прецизійного електроконтактного зварювання.

На основі проведених досліджень нами був запропонований спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок [200].

Висновки до розділу 5

1. Встановлено, що нагрів імпульсом струму при зварюванні в твердій фазі вольфрамокобальтових сплавів дозволяє локалізувати температурне поле в стику та обмежити температуру по висоті зразків. Показано, що застосування перфорованого прошарку з матеріалу, що має високий електричний опір підвищує рівень локалізації температурного поля та дозволяє інтенсифікувати мікропластичну деформацію у стику.

2. Встановлено ефективність реалізації стадій утворення зварного з'єднання при зварюванні в твердій фазі за допомогою різних джерел нагріву: нагрів струмом, що проходить – для реалізації стадії фізичної та хімічної взаємодії; радіаційний нагрів – для реалізації стадії об'ємної взаємодії. Показано, що зварювання вольфрамокобальтових твердих сплавів через проміжний прошарок з титану на оптимальних режимах забезпечує міцність зварного з'єднання на рівні 480 МПа, що на 25-60 % перевищує міцність паяних з'єднань.

3. Встановлено, що дифузійний відпал зварних з'єднань дозволяє збільшити міцність на зріз. Показано, що після витримки у вакуумі протягом 2 годин при температурі 973 К, міцність зварного з'єднання підвищується на 15 % у порівнянні з міцністю зварного з'єднання безпосередньо після електроконтактного зварювання.

4. Розроблено новий спосіб дифузійного зварювання металевих деталей через прошарок та технологію низькотемпературного з'єднання вольфрамокобальтових твердих сплавів, сутність якої полягає у локалізації теплової та механічної енергії у стику за рахунок використання нагріву імпульсом струму та проміжного перфорованого прошарку з високим електричним опором. Розроблено технологічну схему зварювання алмазно-твердосплавних пластин з твердим сплавом з використанням спеціалізованого оснащення, що обмежує нагрів алмазного шару вище 973 К.

5. Вперше встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової енергії в стику при електроконтактному точковому зварюванні є використання тонких прошарків зі зварювального матеріалу. Показано, що регулювати кількість теплоти, яка виділяється у стику при електроконтактному зварюванні, можна за рахунок зміни кількості шарів.

6. Розроблено нову технологію електроконтактного точкового зварювання металевих матеріалів через тонкі проміжні багат шарові прошарки з матеріалу, який зварюється. Визначено оптимальний режим електроконтактного точкового зварювання алюмінію марки АД00 товщиною 2 мм через проміжні багат шарові прошарки з алюмінію: $j=300-350 \text{ А/мм}^2$; $F_{зв}=500-600 \text{ Н}$; $t_{зв}=0,1 \text{ с}$; товщина фольги 11 мкм, кількість шарів – 4. Показано, що міцність зварних з'єднань алюмінію отриманих електроконтактним точковим зварюванням на оптимальному режимі через тонкі прошарки з алюмінію складає 95-100% міцності основного металу, а зона з'єднання представляє собою загальну зону взаємного розплавлення основного матеріалу без зміни хімічного складу та властивостей перехідної зони (глибина проплавлення – 20-25 %, діаметр ядра – 5-6 мм, деформація – 2 %).

7. Встановлено, що коефіцієнт масоперенесення, при зварюванні алюмінієвого сплаву марки АМц через 4 шари фольги, на 2-3 порядки вище, ніж у випадках зварювання з іншою кількістю шарів. Показано, що при

зварюванні дифузійна зона є максимальною при зварюванні через 4 прошарки та складає порядку 2000 мкм.

8. Запропонований спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок. Показано, що при стиковому зварюванні опором прутків зі алюмінію АД31 на режимі: $j = 300 \text{ А/мм}^2$; $P_{зв} = 8 \text{ МПа}$; $t_{зв} = 0,5-0,7 \text{ с}$ через 6 шарів з фольги алюмінію АД0 завтовшки 11 мкм, міцність зварних з'єднань досягає 95 % міцності основного матеріалу при деформації основного матеріалу не більше 2 %.

РОЗДІЛ 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ХІМІЧНОЇ АКТИВАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ

Відомо, що при обмеженні деформаційного впливу хімічна активація, яка полягає у відновленні оксидної плівки до чистого металу за рахунок взаємодії з певною речовиною, може бути домінуючою для утворення якісного зварного з'єднання [77]. Крім цього, одним із найпростіших засобів активації поверхонь є використання проміжних прошарків, які *при взаємодії з матеріалом, що зварюється, утворюють легкоплавку евтектику* [201]. Ефективність застосування прошарків на основі легкоплавких елементів або евтектичних сплавів пов'язана з формуванням у зоні з'єднання рідкої фази, що полегшує руйнування оксидної плівки, підвищує інтенсивність дифузійного потоку атомів в основний метал як зі з'єднаних частин, так і з боку прошарку. Шляхом підбору елементів, які входять до складу прошарку, його товщини, температури нагрівання з'єднання і часу витримки при цій температурі можна варіювати вміст елементів, що вводяться в зону шва.

Як показав аналіз літературних даних, використання хімічної активації поверхонь може бути ефективним для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань з матеріалів, які мають на своїй поверхні тверді та тугоплавкі оксидні плівки.

У зв'язку з цим, нами були проведені дослідження здатності до прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі *алюмінію та його сплавів*, з'єднання яких широко використовуються у різноманітних конструкціях авіа-, ракето- та суднобудування, автотранспорту, атомної енергетики, хімічної, електротехнічної та електронної техніки, а також *вуглецевої сталі*, яка використовується при виготовленні сучасних деталей машин, конструкцій та виробів для різних галузей.

6.1 Дослідження здатності до прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів через евтектичні прошарки

Відомо спосіб з'єднання деталей з алюмінію та його сплавів [202] суть якого полягає у наступному. Поверхні деталей, які підлягають з'єднанню, плакуються силуміном евтектичного складу, легованим магнієм у кількості $1 \div 1,5$ %. Зібраний виріб розміщують у вакуумній камері, створюють розрідження $10^{-2} \div 10^{-3}$ Па та здійснюють нагрів до температури 873 К. Зі зменшенням вмісту кисню та збільшенням парціального тиску магнію створюються умови для безпосереднього відновлення алюмінію із його оксидів парами магнію. При цьому відбувається адсорбція парів магнію на поверхні алюмінію та утворення твердих розчинів магнію в алюмінії, температура плавлення яких нижча за температуру нагріву.

Процес з'єднання можна вести при невисоких питомих тисках, за рахунок чого можна забезпечити незначний рівень деформацій деталей. Однак через те, що плакуючий прошарок з евтектичного силуміну може мати значну та нерівномірну товщину і здатний при цьому розчиняти помітний об'єм основного металу, загальна величина осадки може мати значення, при якому завдання отримання прецизійного з'єднання ускладнюється. Разом з тим, такий спосіб не дозволяє забезпечити виготовлення складних за конфігурацією виробів через ускладнення нанесення плакуючого шару в малодоступних місцях при підготовці деталей до з'єднання.

Тому, актуальним є розробка нової технології прецизійного зварювання тиском алюмінію та його сплавів з використанням проміжного хімічно активного прошарку з евтектичної суміші. Як показав аналіз літературних даних (див. розділ 1.2.4) для вирішення цієї проблеми необхідним є матеріал, який би утворював евтектику з алюмінієм, температура плавлення якої була б нижчою за температуру плавлення алюмінію. Також необхідно врахувати, що проміжний матеріал повинен містити в евтектиці велику кількість металу, що зварюється. При утворенні евтектик, збагачених на метал, що з'єднується,

активація поверхні може відбуватися і без суттєвого перегріву над евтектичною температурою.

Відомо, що підплавлення алюмінієвих сплавів під оксидною плівкою і диспергація останньої можливі не з усіма елементами, які утворюють з даним матеріалом евтектики. Придатними є тільки ті елементи, які мають достатню хімічну спорідненість з металом і утворюють евтектики, що містять велику кількість алюмінію і мають високу температуру плавлення (але нижчу за температуру плавлення алюмінію). Такими матеріалами є нікель, кремній, мідь, магній, срібло, галій та інші (рис. 6.1) [202].

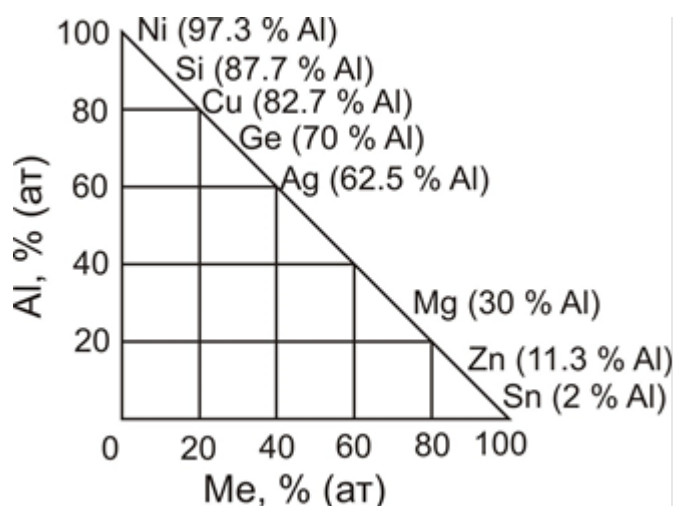


Рисунок 6.1 – Вміст алюмінію в евтектиках з деякими металами [203]

Враховуючи сказане вище, можна було б використати нікель у якості активатора контактено-реактивного плавлення, але через надто високу температуру плавлення евтектики Al-Ni (913 К) від місць контакту алюмінієвого сплаву з рідкою евтектикою Al-Ni розвивається не тільки загальна, але і локальна ерозія по границям зерен основного металу. Тому в якості прошарку придатними є матеріали, які утворюють багату на алюміній евтектику з температурою плавлення нижче 913 К.

Найбільш придатним для використання з урахуванням усіх перерахованих вимог є кремній. Евтектика алюмінію з кремнієм містить 87.7% алюмінію, має температуру плавлення 850 К та володіє достатньо

високою пластичністю [203].

Таким чином, використання кремнію має дозволити отримати необхідний рідкий прошарок на границі розділу алюмінієвих деталей.

6.1.1 Зварювання алюмінію та сплавів через хімічно активний прошарок з евтектичної суміші

У якості матеріалу для досліджень був вибраний алюмінієвий сплав марки АМцМ товщиною 1 мм. Прошарок з кремнію використовували у вигляді напиленого шару товщиною порядку 2 мкм на алюмінієву фольгу товщиною 10 мкм, як з однієї, так і з двох боків. Слід відмітити, що варіант напилення кремнію безпосередньо на зварні поверхні був відкинтий внаслідок ускладнення технологічного процесу.

Дифузійне зварювання зразків для дослідження проводили на установці типу УВН. Термічне напилення кремнію проводили на установці УВН-2М-1.

Температура зварювання у всіх випадках дорівнювала температурі утворення евтектики у системі $Al - Si$ (850 К). Тиск зварювання складав 10 МПа. Час зварювання змінювали в залежності від експерименту. Підготовку поверхні зразків перед зварюванням проводили за двома варіантами: хімічне травлення у 25 %-му розчині $NaOH$ протягом 2–5 хвилин та механічна обробка (шабріння) безпосередньо перед зварюванням.

Механічні випробування на зріз показали, що міцність зварних з'єднань практично не залежить від схеми зварювання (напилений шар кремнію з однієї чи з двох боків алюмінієвої фольги) і зі збільшенням часу зварювання підвищується (рис. 6.2) [204].

З представленого рисунку видно, що при часі зварювання 15–20 хвилин міцність зварних з'єднань досягає 90–92 МПа, що складає близько 90 % від міцності основного матеріалу на зріз. При цьому деформація основного

матеріалу складає менше 5 %. При подальшому збільшенні часу зварювання міцність підвищується незначним чином і залишається менше міцності основного матеріалу. Саме тому час 15-20 хвилин можна вважати оптимальним при даній схемі зварювання алюмінієвих сплавів. Необхідно відмітити, що підготовка поверхні перед зварюванням, хімічне травлення чи механічна обробка дають практично один показник міцності.

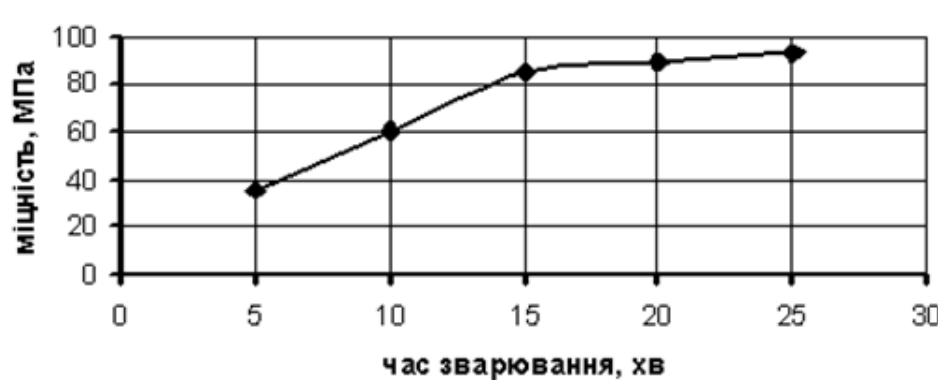


Рисунок 6.2 – Залежність міцності зварних з'єднань АМц+АМц на зріз від часу зварювання, отриманих через алюмінієву фольгу, з напиленим з одного боку шаром кремнію ($T_{зв} = 850 \text{ К}$, $P_{зв} = 10 \text{ МПа}$)

На рисунку 6.3 показана мікроструктура зони з'єднання після зварювання через алюмінієву фольгу з напиленим шаром кремнію.

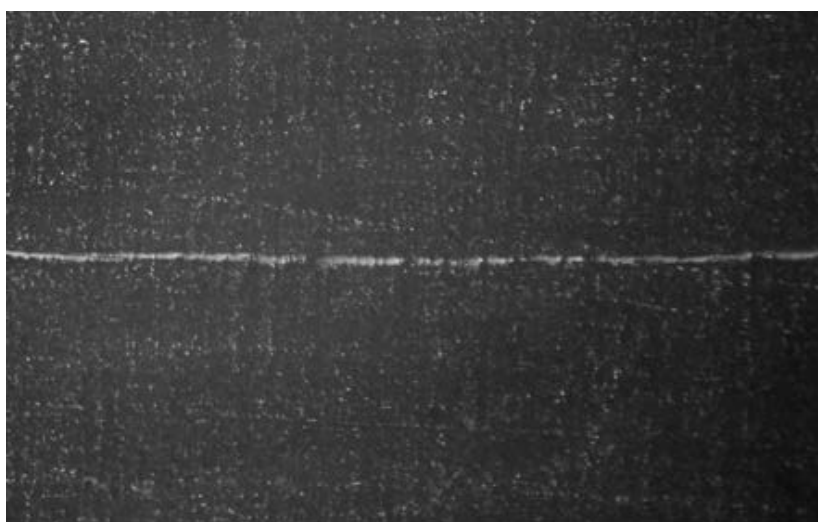


Рисунок 6.3 – Мікроструктура зони з'єднання АМцМ+АМцМ при зварюванні через алюмінієву фольгу з напиленим шаром кремнію ($T_{зв}=850 \text{ К}$, $P_{зв}=10 \text{ МПа}$, $t_{зв}=15 \text{ хв}$, оптична мікроскопія, $\times 100$)

Як видно з рисунку, при зварюванні на оптимальних режимах в стикку спостерігаються окремі місця, де евтектика розчиняється повністю, але розчинення по всій площі контактування не відбувається. Імовірно саме цей факт і є причиною того, що зварне з'єднання не досягає рівномірності з основним матеріалом.

Недолік даної технології є необхідність попереднього вакуумного напилення кремнію на алюмінієву фольгу.

У зв'язку з цим нами було запропоновано використання для з'єднання алюмінію проміжних прошарків визначеного складу, які дозволяють отримати необхідні реагенти в процесі нагріву у вакуумі для прискорення утворення рідкої легкоплавкої евтектики Al-Si, диспергування оксидної плівки та її видалення із зони з'єднання [205].

6.1.2 Зварювання алюмінію та сплавів через кремнієвмісний рідкий евтектичний прошарок

Відомо, кремній, що міститься у складі силумінів, при твердінні евтектики виділяється у вигляді грубих кристалів голчастої форми, які відіграють роль надрізів у пластичному алюмінії. Для подрібнення структури та видалення надлишкових кристалів силуміни модифікують натрієм, а саме сумішшю солей натрію – 67% NaF + 33% NaCl. У присутності натрію відбувається зміщення ліній діаграми стану (рис. 6.4) і заевтектичний сплав стає доевтектичним. Евтектика набуває більш тонкої структури і складається з дрібних кристалів кремнію та α -структури, оскільки у процесі твердіння кристали кремнію обволочуються плівкою силіциду натрію Na_2Si , що перешкоджає їх росту. Такі зміни покращують механічні властивості силумінів [206].

Діаграма стану Al-Na характеризується дуже незначною розчинністю елементів один в одному як в рідкому, так і в твердому стані. Розчинність Na в рідкому Al збільшується від 0,1% (по масі) при 973 K до 0,13% (по масі)

при 1073 K. Al в Na в твердому стані практично не розчиняється або розчиняється дуже незначно: 0,003% (по масі) Al при температурі 932 K і близько 0,002% (по масі) Al при температурах 823-823 K [7].

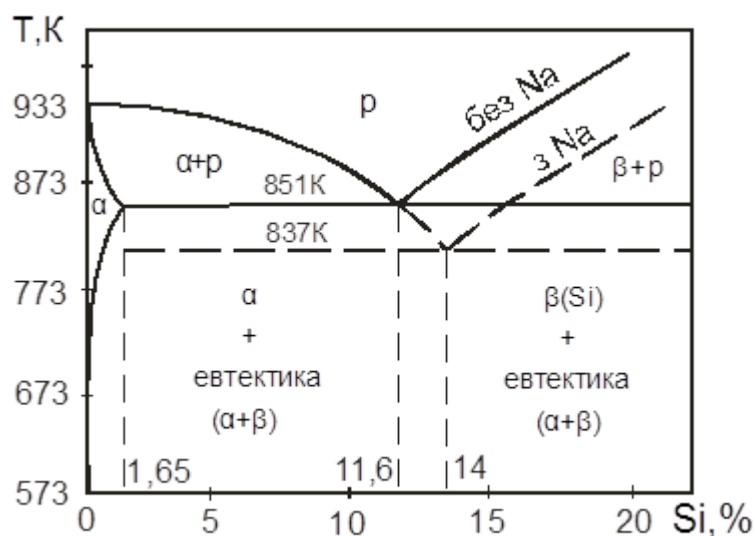


Рисунок 6.4 – Діаграма стану Al-Si [207]

У системі Na-Si утворюється ряд з'єднань Na_xSi_y . Кремній в натрії практично не розчиняється (розчинність Si в Na при температурі 923 K становить $2,4 \cdot 10^{-3}$ ат. %) [208].

При паянні припоями типу силумін, що містять не менше 2 % магнію, у результаті окислення магнію та взаємодії його з залишками кисню у вакуумі на припої перед розплавленням та на рідкому припої при його розтіканні утворюється щільна оксидна плівка MgO [203]. Змочування АМц припоями з 5-10 % Mg відбувається лише при нагріванні до 903 K, ймовірно, внаслідок високої щільності та товщини плівки MgO. Таким чином, введення $\geq 2\%$ Mg у припої на основі силуміну несприятливе для паяння.

Роль магнію зводиться головним чином до очищення вакуумованого середовища печі та відновлення алюмінію з оксидної плівки. Однак, відомо, що у системі Al-Mg-Si утворюється дві евтектики: багата кремнієм з температурою плавлення 823 K і багата магнієм з температурою плавлення 723 K. Подвійна евтектика Al-Si має температуру плавлення 850 K. Таким чином, можливість ведення процесу паяння алюмінію силуміном у парах

магнію при температурі 833 K підтверджує наявність при цьому контактного твердо-газового плавлення [203].

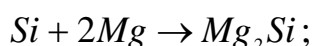
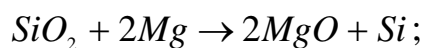
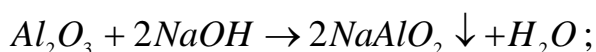
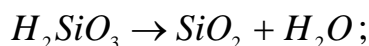
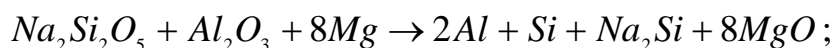
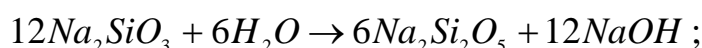
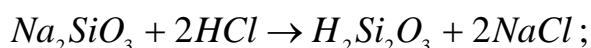
Крім цього, відомо, що доєвтектичні сплави АЛ4 та АЛ9, які додатково леговані магнієм, можуть зміцнюватися, окрім модифікування, термічною обробкою. При цьому зміцнюючою фазою слугує Mg_2Si [209].

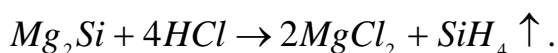
Отже, при паянні алюмінію та його сплавів силумінами необхідно забезпечити введення у зону з'єднання натрію та магнію.

За однією з теорій оксидна плівка з алюмінію видаляється внаслідок утворення в процесі паяння їдкого натрію при взаємодії його хлориду з залишками вологи, в результаті чого утворюється розчинний у воді та флюсі алюмінат натрію [202]: $Al_2O_3 + 2NaOH \rightarrow 2NaAlO_2 + H_2O$.

Таким чином, нами було запропоновано спосіб прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів з використанням суміші складу $Na_2SiO_3-HCl-Mg$, яка складається з кремнієвмісного рідкого матеріалу [205].

Сутність способу полягає у застосуванні композиції, яка містить (мас. %) 75,3% силікату натрію, 22,5% концентрованого хлористого водню та 2,2% дрібнодисперсного порошку магнію, що дозволяє отримувати у процесі з'єднання евтектичний прошарок системи Al-Si з подрібненою структурою і за рахунок ключових властивостей суміші спрощувати складання виробів. Останнє, на сьогоднішній день, дуже актуально для виробництва мікроканальних теплообмінників [210].





Співвідношення компонентів визначається кількістю кремнію, який міститься в композиції і бере участь в утворенні евтектичного сплаву Al-Si (88,3% алюмінію та 11,7% кремнію мас. %), по відношенню до якого магній вводиться у кількості до $\leq 1,5\%$. Як було вказано вище, наявність у складі композиції магнію створює можливість безпосереднього відновлення оксидної плівки алюмінію парами магнію з утворенням зміцнюючої фази Mg_2Si . Необхідно відмітити, що утворення моносилану SiH_4 , який володіє підвищеними відновними властивостями, є одним із факторів інтенсифікації процесу.

Технологічний процес отримання з'єднання включає попереднє очищення з'єднаних поверхонь, механічне шабрення та знежирення поверхонь, нанесення композиції шляхом намазування на одну з них товщиною порядку 30 мкм, складання деталей та їх фіксацію в нагрівачі вакуумної камери, створення розрідження $10^{-2} \div 10^{-3}$ Па, нагрів до температури 853 К, прикладення питомого тиску 0,1 МПа протягом 90 с (вибрано за допомогою розробленої методики (див. розділ 3), пропускання електричного струму густиною $0,2 \text{ А/мм}^2$, охолодження та вилучення виробу із камери. Електричний струм, який проходить через деталі крім дифузійних потоків викликає електропереніс, що інтенсифікує процес видалення оксидної плівки.

У якості матеріалу для дослідження використовували зразки з алюмінію марки АД00 та АМг5 розміром $8 \times 8 \times 10$ мм.

Методом скануючої мікроскопії встановлено, що евтектична суміш, яка утворюється при виділенні вільного кремнію з композиції $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$, заповнює зазор в стику та забезпечує якісне формування зони з'єднання (рис. 6.5, та рис. 6.6).

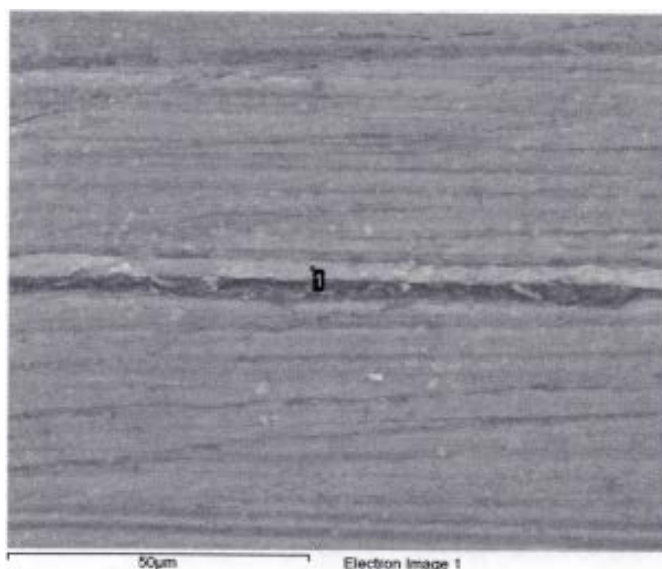


Рисунок 6.5 – Мікроструктура зони з'єднання АД00+АД00 при дифузійному зварюванні у вакуумі через суміш $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ (електронна мікроскопія)

Концентрація елементів безпосередньо у шві (рис. 6.4) за даними мікрорентгеноспектрального аналізу складає 87,65Al – 10,87Si – 1,28Mg – 0,2Na (мас. %).

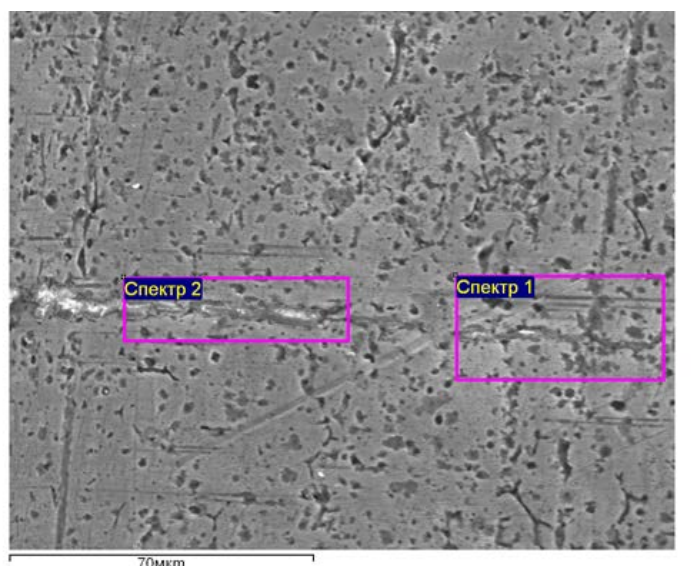


Рисунок 6.6 – Мікроструктура зони з'єднання АМг5+АМг5 при дифузійному зварюванні у вакуумі через суміш $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ (електронна мікроскопія)

Методом енергодисперсійного аналізу визначено хімічний склад в контакті:

- спектр 1 Al – 95,62%; Si – 0,26 %; Na – 0,59 %; Mg – 3,52 %;
- спектр 2 Al – 93,38 %; Si – 0,47 %; Na – 1,56 %; Mg – 4,59 %.

Встановлено, що при заданому термодформаційному режимі окремі ділянки шву утворюються в результаті зрощування вершин кристалів та перехідних зон при майже повному видавлюванні рідкої фази з зони стику. Міцність з'єднань при випробуванні на зріз досягає значення 56 МПа для пари АД00+АД00 та 217 МПа для пари АМг5+АМг5, що складає 90 % від міцності основного матеріалу при деформації виробу по висоті до 2 % [211], [212], [213].

6.2 Дослідження здатності до прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі вуглецевої сталі з використанням хімічної активації

Питання впливу параметрів процесу дифузійного зварювання на зварюваність сталі 45 розглядалися в роботі [214]. Дослідження проводили на зразках діаметром 15 мм і довжиною 30 мм. Температуру зварювання змінювали в діапазоні 1073-1373 К при питомому тиску 5 МПа, 10 МПа і 60 МПа, часу зварювання 5 хв, розрядження в камері $133 \cdot 10^{-6}$ МПа. Автор роботи приходить до висновку, що при порівняно низьких температурах зварювання 1073-1173 К для отримання необхідної міцності потрібні більш тривалі проміжки часу, а для більш високої (1273 К) – менш тривалий. При збільшенні питомого тиску зварювання від 5 МПа до 20 МПа міцність з'єднання підвищується в усьому температурному інтервалі (рис. 6.7).

Подальше підвищення тиску вище 20 МПа позначається не значно. Величина відносної осадки зразків, як зазначається в роботі, зростає при збільшенні тиску зварювання. Визначено, що тривалість нагріву (час зварювання) значно впливає в проміжку до 5 хвилин, а більш тривале

збільшення часу нагрівання незначно впливає на міцність з'єднань. Показано, що найкращі результати отримані при тонкому точінні і поліруванні поверхонь, що зварюються [214].

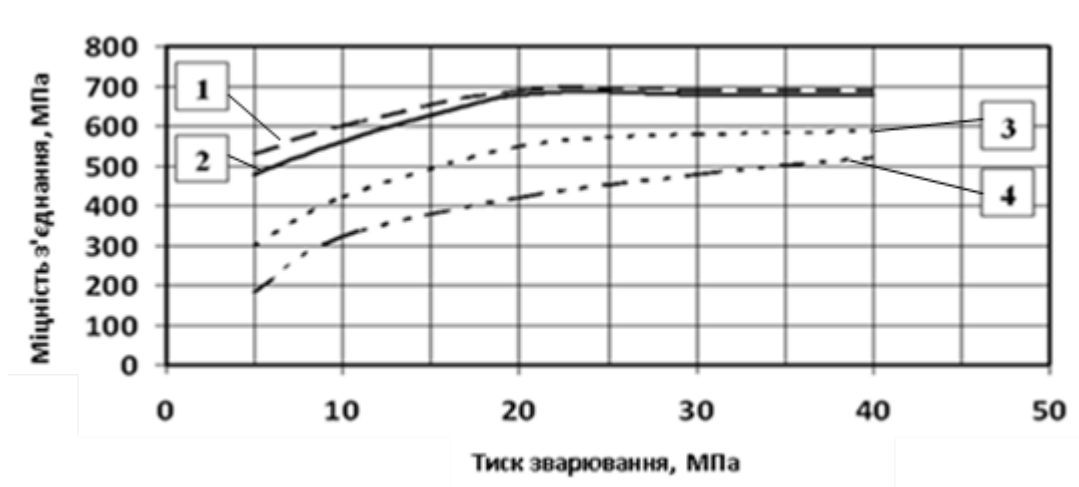


Рисунок 6.7 – Вплив тиску зварювання на міцність з'єднань зі сталі 45:

1 – $T_{зв} = 1373$ К, 2 – $T_{зв} = 1273$ К, 3 – $T_{зв} = 1173$ К, 4 – $T_{зв} = 1073$ К [215]

Вплив вихідної структури сталі на властивості з'єднань досліджували в роботі [215]. Досліджували метал з наклепаною поверхнею після холодної деформації, після відпалу. Експерименти показують, що міцність попередньо відпалених зразків вище, ніж зразків підданих пластичній деформації відповідно 650 МПа і 480 МПа (при 1173 К). Також проведена порівняльна оцінка впливу загартування і відпалу на міцність сталі 45. Відзначається, що термічна обробка істотно впливає на характер зміни міцності зварних з'єднань. Міцність зварних з'єднань з попереднім загартуванням перевищує міцність з'єднань отриманих з відпалених зразків. Міцність зварних з'єднань отриманих дифузійним зварюванням при однакових режимах може суттєво відрізнитися в залежності від структури матеріалу перед зварюванням. Особливо різко відмінність в міцності зварних з'єднань проявляється при невисоких температурах зварювання – 973-1073 К.

У роботі [216] на сталях Ст3 і 2Х13 досліджували відновлення оксидів в умовах дифузійного зварювання у вакуумі. Попередньо окислені зразки (з товщиною оксиду 50-60 нм) поміщали в вакуумну камеру разом із зразками графіту і нагрівали в вакуумі при $0.133 \cdot 10^{-6}$ МПа до температури 1273 К в розведеному положенні. При досягненні температури 1273 К зразки стискали з питомим навантаженням 10 МПа, і витримували в цих умовах від 5 до 30 секунд. Дослідження поверхні металу показало, що видалення оксидів в зоні контакту відбувається за більш короткий час, ніж можна було очікувати з позицій відомих механізмів очищення металів при нагріванні їх у вакуумі: дисоціація оксиду, сублимація, розчинення в матричному матеріалі, відновлення їх вуглецем. Основну роль у відновленні оксидної плівки на зразках автори відводять графіту, пояснюючи його механізмом прямого відновлення. В роботі [216] також досліджено кінетику процесу відновлення оксиду заліза Fe_2O_3 у вигляді порошку високої дисперсності і графіту марки АГ-1500. Методом гарячого пресування з порошку отримували таблетки з щільністю 98 %. Потім їх нагрівали при різних ступенях розрядження з прикладанням навантаження. На рисунку 6.8 представлений графік впливу температури на швидкість прямого відновлення оксидів заліза в умовах вакууму $13,3 \cdot 10^{-6}$ МПа при навантаженні 10 МПа. Відновлення в цих умовах йде при температурі 873 К, але швидкість його мала. При підвищенні температури швидкість відновлення збільшується. Дослідження впливу ступеня розрядження показали, що зі збільшенням глибини вакууму швидкість процесу відновлення зростає [216].

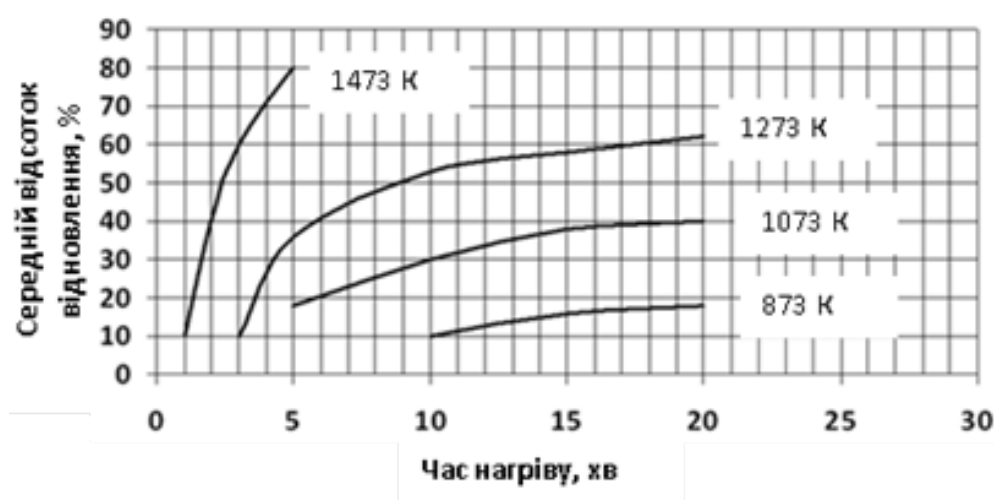


Рисунок 6.8 – Вплив температури та часу нагріву на швидкість відновлення оксиду заліза [216]

Таким чином, аналіз літератури показав, що на отримання якісних з'єднань зі сталі 45 впливають параметри зварювання: температура, тиск, час процесу, величина вакууму в робочій камері установки, якість підготовки поверхонь зразків, що зварюються, ступінь наклепу, величина зерна, а також відновлення оксидних плівок на поверхні зразків в процесі зварювання. Однак вплив режимів зварювання на величину пластичної деформації з'єднань зі сталі 45 не досліджено.

6.2.1 Визначення оптимальних режимів дифузійного зварювання у вакуумі сталі 45

Дослідження проводили на зразках зі сталі 45. Для усунення впливу механічної обробки (перегріву поверхні зразків і утворення наклепу) зразки розміром 25x15x10 мм виготовляли на електроерозійному верстаті з прутка діаметром 60 мм. Зварювання зразків проводили на установках з радіаційним нагрівом П-115 та з електронно-променевою нагрівом У-394 [159].

Дослідження по впливу питомого тиску стискання на формування зварних з'єднань проводили в умовах дифузійного зварювання у вакуумі у вільному стані. Параметри процесу змінювали в наступних інтервалах:

температура зварювання 1073–1473 К, питомий тиск стискання 0,5; 1; 2 МПа, час зварювання 20 хвилин.

Дослідження з оцінки впливу параметрів процесу зварювання на величину пластичної деформації (по висоті) зразків показали, що при збільшенні температури та питомого тиску зварювання ступінь пластичної деформації зразків зростає від $\epsilon = 0,8\%$ при температурі 1073 К до $\epsilon = 5,8\%$ при температурі 1473 К (див. рис. 6.9). Отримані експериментальні дані показують, що при збільшенні питомого тиску стискання вище 2 МПа і температури зварювання вище 1173 К спостерігається значне збільшення пластичної деформації зварних з'єднань.

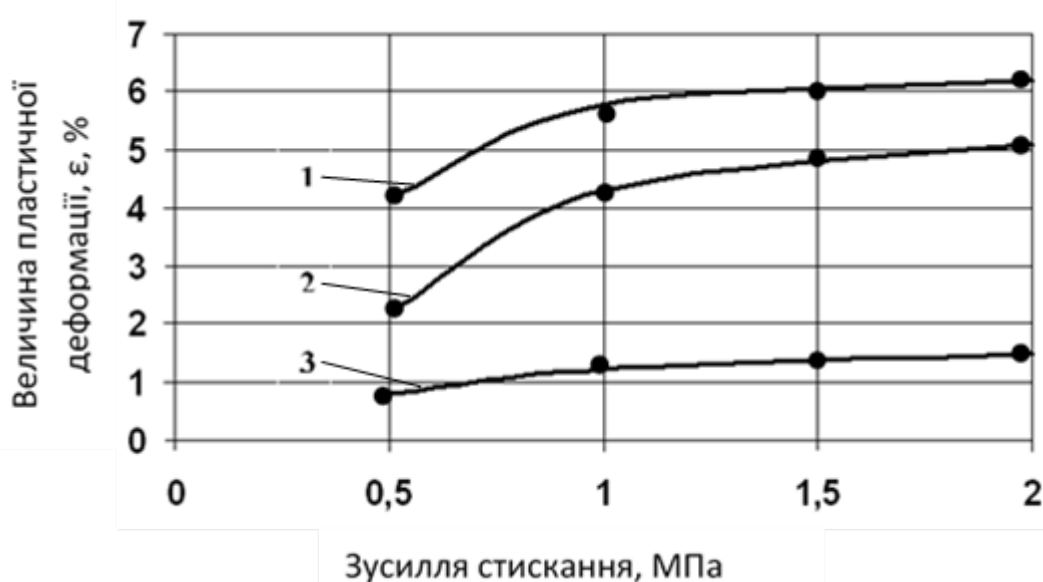


Рисунок 6.9 – Вплив тиску і температури зварювання (1 – $T_{зв} = 1473$ К, 2 – $T_{зв} = 1273$ К, 3 – $T_{зв} = 1073$ К) на ступінь деформації зразків зі сталі 45

З приведенного рисунку видно, що оптимальним режимом дифузійного зварювання для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зі зразків сталі 45 є наступний: температура 1073 К, тиск не більше 0,5-1,0 МПа, тобто коли деформація виробу становить $\sim 1\%$.

6.2.2 Дослідження впливу підготовки поверхні зразків на величину осадки, механічні властивості та структуру зварних з'єднань сталі 45

Вплив механічної обробки поверхонь зварюваних зразків на якість зварних з'єднань досліджували при наступних параметрах зварювання $T_{зв} = 1073$ К, $P_{зв} = 0.5$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв, $V = 0,0133 \cdot 10^{-6}$ МПа. Досліджували зразки з наступною обробкою поверхні: тонке шліфування та полірування. На рисунках 6.10 та 6.11 представлена структура зони з'єднання зразків з різною обробкою поверхонь, отриманих на визначених оптимальних режимах.

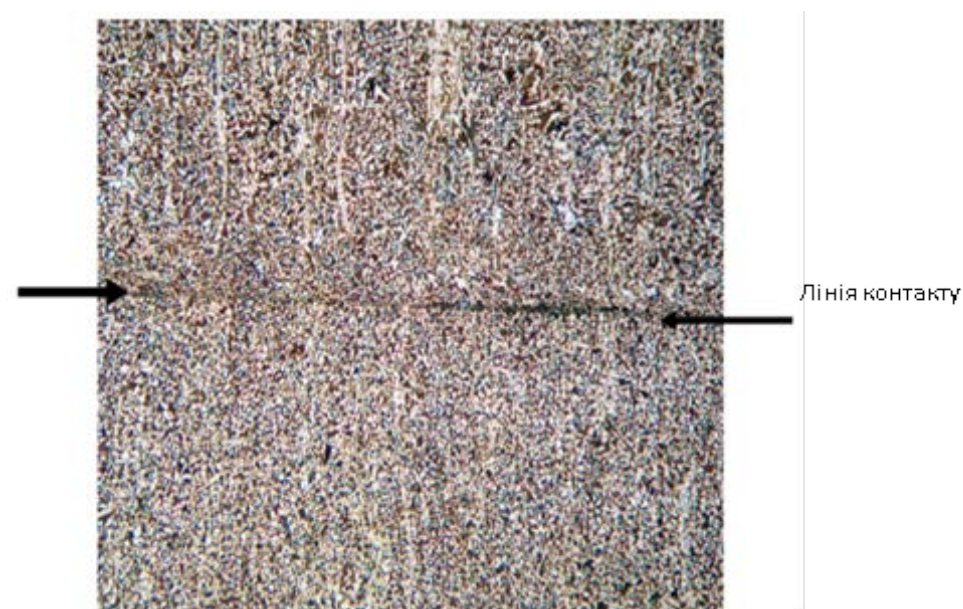


Рисунок 6.10 – Мікроструктура зони з'єднання зразка сталі 45 з попередньою обробкою поверхні тонким шліфуванням (оптична мікроскопія, x100)

При поліпшенні обробки поверхні у вигляді полірування якість зварних з'єднань помітно підвищується, однак лінія контакту (див. рис. 6.11) також спостерігається у вигляді світлої полоси, утворення якої на нашу думку пов'язано зі скупченням феритних зерен уздовж лінії з'єднання, що небажано для зварювання виробів відповідального призначення.

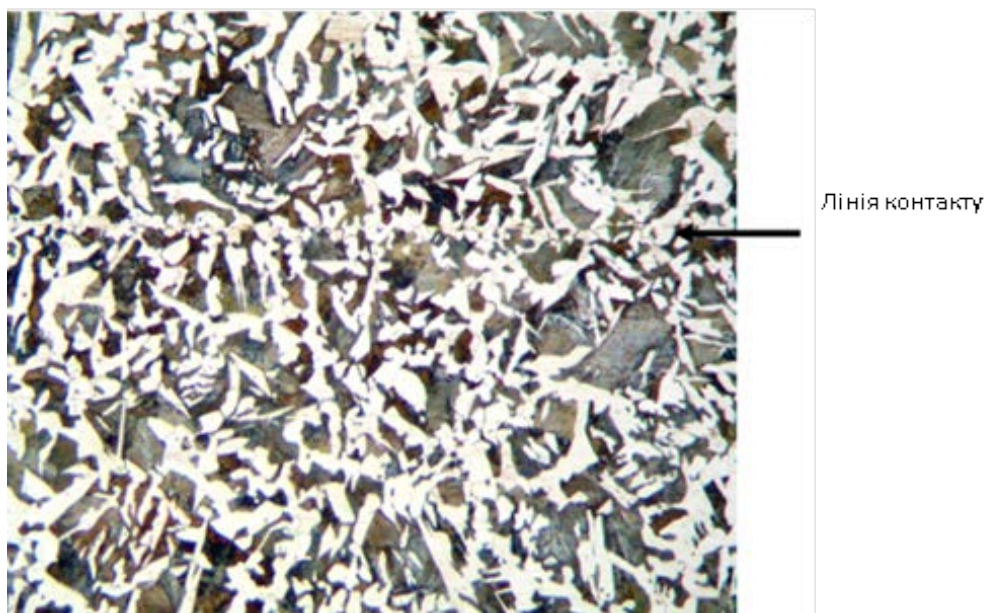


Рисунок 6.11 – Мікроструктура зони з'єднання зразка сталі 45 з попередньою обробкою поліруванням (оптична мікроскопія, x125)

Відомо, що утворення феритної смужки обумовлено комплексом дифузійних і рекристалізаційних процесів на стадіях нагріву, осадки і охолодження, що призводять до збіднення приконттактних об'ємів вуглецем і формуванню в зоні з'єднання феритних зерен. Умови, що сприяють утворенню феритної полоси при зварюванні тиском сталей: 1 – наявність в області зварювання поверхневих оксидних плівок, реакція відновлення яких активізує процеси розпаду цементитних пластин і дифузію в зону відновлення вільного вуглецю; 2 – термодинамічна нестійкість перлітного цементиту в полях високих внутрішніх напружень [217], [218].

Виходячи з аналізу робіт [217], [218] для усунення феритної смужки було запропоновано вводити перед зварюванням в стик тонкий шар вуглеводневої суміші (Vaseline), а для збільшення опору пластичній деформації запропоновано загартування сталі 45, що на нашу думку підвищить прецизійність зварних з'єднань. Тож з урахуванням перерахованих факторів була розроблена наступна технологія зварювання: зразки з температури 1123 К загартовували у воду, а на поліровані поверхні

зразків безпосередньо перед зварюванням наносили шар вуглеводневої суміші.

Дослідження мікроструктури з'єднань, отриманих за запропонованою технологією на вказаних вище режимах показало, що в такому випадку лінія з'єднання в стику не виявляється (рис. 6.12).



Рисунок 6.12 – Мікроструктура зварного з'єднання сталі 45 отриманого дифузійним зварюванням у вакуумі при попередньому загартуванні зразків у воду і застосуванні вуглеводневої суміші (оптична мікроскопія, x50)

Висновки до розділу 6

1. Вдосконалено технологічний процес видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні за рахунок використання нових засобів створення рідких металевих прошарків Al-Si. Показано, що видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні відбувається при змочуванні контактуючих поверхонь рідким металевим прошарком Al-Si, що виникає при виділенні

вільного Si при попередньому введенні в контакт суміші складу $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ або у вигляді напиленого шару Si на алюмінієву фольгу.

2. Розроблено спосіб дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів з використанням проміжного хімічно активного прошарку, який дозволяє отримати з'єднання деталей з алюмінію та його сплавів з міцністю при випробуванні на зріз, що складає 90 % від міцності основного матеріалу, при величині відносної деформації порядку 2 %.

3. Вперше встановлено, що отримання прецизійного зварного з'єднання при зварюванні тиском у твердій фазі зі сталі 45 визначається механічною підготовкою поверхонь, що зварюються, параметрами процесу зварювання і наявністю проміжного шару вуглеводневої суміші.

4. Запропоновано технологію зварювання тиском сталі 45: 1 – загартування зразків у воду з температури 1123 К; 2 – полірування поверхонь зразків; 3 – нанесення на поверхні шару вуглеводневої суміші; 4 – зварювання на режимі: $T_{зв}=1073$ К, $P_{зв}=0,5-1,0$ МПа, $t_{зв}=20$ хв., тиск у камері $0,0133 \cdot 10^{-6}$ МПа. Встановлено, що при зварюванні зразків зі сталі 45 за запропонованою технологією лінія з'єднання в стику не виявляється, а деформація основних матеріалів складає менше 1 %.

РОЗДІЛ 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ ВАЖКОДЕФОРМУЄМИХ ТА РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОМІЖНИХ ПРОШАРКІВ

Серед сучасних конструкційних матеріалів особливе місце займають композиційні матеріали з вуглецевою матрицею, інтерметалідні сплави на основі алюмініду титану та жароміцні сплави на нікелевій основі, які завдяки своїм високотемпературним властивостям можуть експлуатуватися при температурах, близьких до температури плавлення. Вони широко застосовуються при виготовленні газових турбін, в космічних кораблях, ракетних двигунах, атомних реакторах, підводних човнах, парових теплоцентралях і нафтохімічному обладнанні.

Дифузійне зварювання є перспективним процесом для зварювання таких матеріалів, так як дозволяє поєднувати елементи складної конфігурації без розплавлення та непередбачуваних спотворень форми, а також дає можливість отримувати з'єднання з властивостями і мікроструктурою близькими до вихідного матеріалу. Складність отримання з'єднань при цьому полягає в низькій пластичності даної групи матеріалів, а також в наявності на їх поверхнях термічно стійких шарів оксидів, що ускладнює схопленню контактних поверхонь на стадії утворення фізичного контакту.

Відомо, що одним із засобів зниження негативного впливу оксидів, а також інтенсифікації пластичної деформації в зоні з'єднання, є проміжні прошарки. Використання проміжних прошарків залишається на сьогоднішній день одним з найпоширеніших способів прискорення утворення фізичного контакту та активації поверхонь при зварюванні тиском. Застосування таких прошарків дозволяє локалізувати пластичну деформацію безпосередньо в стику, що в свою чергу сприяє утворенню на контактних поверхнях зсувних деформацій, наслідком чого є руйнування оксидних плівок. Як показав

літературний аналіз (див. розділ 1) прошарки з фольги, отримані прокаткою є найбільш технологічними та дешевими, однак їх використання потребує прикладання значного тиску для деформації прошарку та призводить до виникнення хімічної неоднорідності. Порошкові прошарки, які попередньо прокатані та спечені з ультрадисперсних порошків та які мають підвищеною активністю, дозволяють інтенсифікувати процес та знизити температуру зварювання. Однак, використання таких прошарків пов'язано з двома основними проблемами: по-перше, їх виготовлення ускладнюється необхідністю використання двох різних технологічних процесів – створення порошку та його наступне спікання; по-друге, такий прошарок має порівняно низку пластичність й при зварюванні втрачає цілісність та розтріскується, що знижує міцність зварних з'єднань.

Застосування більш тонких фольг, які мають здатність до пластичного деформування при зварюванні тиском, є більш ефективним з точки зору зменшення хімічної неоднорідності та підвищення механічних властивостей зварних з'єднань, особливо для зварювання матеріалів, які важко деформуються. До таких фольг відносяться наноструктуровані багат шарові та пористі фольги, технології виготовлення яких розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [219], [220]. Отримують такі фольги методами випаровування та конденсації у вакуумі.

Для отримання багат шарових фольг використовується метод електронно-променевого випаровування елементів з двох джерел у вакуумній камері. Неперервні парові потоки, осаджуються на підложку, що обертається і таким чином забезпечується послідовне осадження шарів різних металів, товщина яких визначається співвідношенням щільності парового потоку та швидкістю обертання підложки. Загальна товщина фольги залежить від часу процесу осадження та в середньому складає 20-100 мкм. На рисунку 7.1 представлена типова мікроструктура перерізу фольги у вихідному стані.

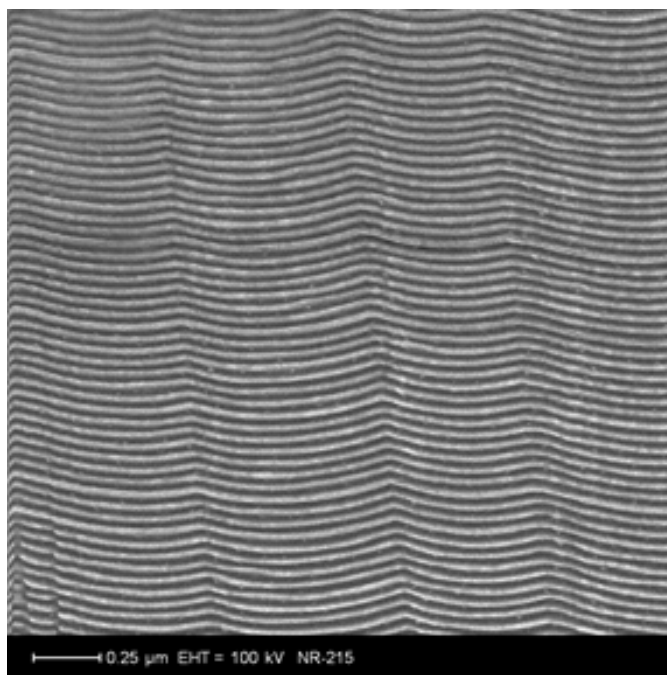


Рисунок 7.1 – Мікроструктура поперечного перерізу фольги системи Al/Ti після осадження

Відомо, що застосування таких багат шарових фольг, в яких відбувається реакція високотемпературного синтезу, що саморозповсюджується, є ефективним при дифузійному зварюванні композитів та інтерметалідів [220].

Крім цього, нами було встановлено динамічний вплив на поверхні, що зварюються, за рахунок реакції високотемпературного синтезу в багат шарових фольгах складу Ti/Al і Ni/Al товщиною 20-100 мкм [221]. Експериментально було встановлено виникнення осцилограми імпульсу електричної напруги в зразках, які зварюються, при реакції високотемпературного синтезу в багат шарових фольгах. Тобто реакція високотемпературного синтезу, що саморозповсюджується, зумовлює появу пружних деформації у зоні контакту поверхонь, між якими розміщувалася багат шарова фольга. Відомо, що така імпульсна деформація зони контакту прискорює дифузійні процеси у приконтактних об'ємах зразків, що контактують [196], [197].

Також наноструктуровані багат шарові фольги в процесі зварювання можуть трансформуватися в структуру близьку за хімічним складом до матеріалу, що зварюється, і, відповідно, зменшувати хімічну неоднорідність в стику [222].

Пористу фольгу отримують способом вакуумного осадження металевого матеріалу у парах галогенідів лужних металів. Загальна товщина металеві фольги в середньому складає 20-30 мкм, а пористість порядку 30 %.

На рисунку 7.2 представлена типова мікроструктура перерізу фольги у вихідному стані.

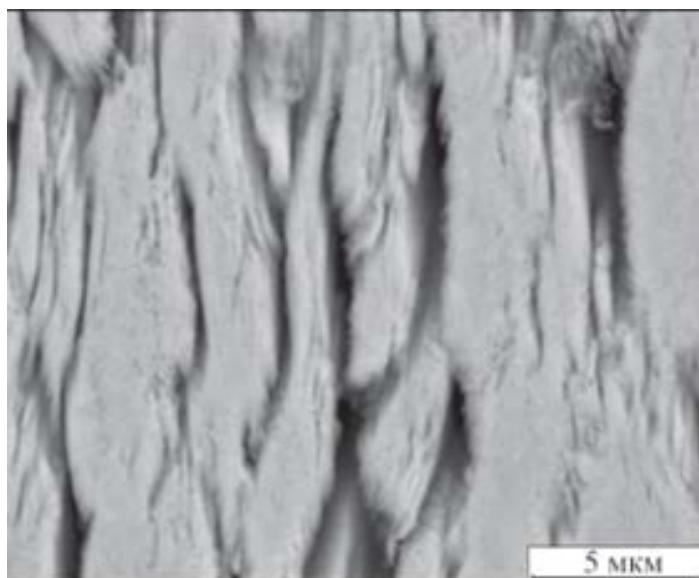


Рисунок 7.2 – Мікроструктура поперечного перерізу пористої фольги з Ni після осадження

У зв'язку з вищенаведеним, нами були проведені дослідження здатності до прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі важкодеформуємих матеріалів з використанням наноструктурованих прошарків: алюмінідів титану з вуглець-вуглецевим композиційним матеріалом, жароміцних сплавів на нікелевій основі та фольг з жароміцного нікелевого сплаву.

7.1 Використання наноструктурованих багатошарових прошарків для зварювання важкодеформуємих матеріалів

Дослідження ефективності використання багатошарової фольги для дифузійного зварювання проведено на парі *вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ)+алюмінід титану* (сплав Ti-48Al-2Nb-2Mn).

Композиційні матеріали з вуглецевою матрицею, що армована вуглецевими волокнами, займають особливе місце серед сучасних конструкційних матеріалів [123], [124]. Розвиток авіації та освоєння космосу сприяли створенню технології вуглецевих волокон, що складаються практично з чистого вуглецю. ВВКМ мають високу хімічну, ерозійну та радіаційну стійкість, тривалий час зберігають працездатність при температурах до 773 К в окисному середовищі та до 3273 К – в інертному середовищі і вакуумі. Для вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів характерна висока температуростійкість при малій густині, високі міцність та модуль пружності, стійкість до теплового удару. ВВКМ відрізняються від відомих конструкційних матеріалів більш високою питомою міцністю та жорсткістю. ВВКМ є конструкційним матеріалом для виготовлення деяких вузлів твердопаливних ракетних двигунів і носових обтікачів ракет. Розроблені технології виготовлення каркасів з вуглецевих тканин з наступним їх насиченням і створенням вуглецевої матриці (рисунок 7.3) [123]. При конструюванні сопел ракетних двигунів гостро встає проблема з'єднання вузлів з ВВКМ з металічними елементами ракетних двигунів, що виготовляються з жаростійких металів. На даний час конструкції виготовляються з використанням болтових з'єднань. Розробка технології зварювання вуглецевих матеріалів з металами дозволить спростити технологію виготовлення ракетних двигунів та зменшити вагу готових виробів.



Рисунок 7.3 – Макрошліфи ВВКМ вздовж та впоперек вуглецевих волокон (×5)

З'єднання вуглецевих матеріалів з металами можливо двома шляхами: зварюванням з утворенням карбідного прошарку в зоні з'єднання та зварюванням з використанням бар'єрних прошарків, що запобігають утворенню карбідів. Для розробки технології з'єднання вуглецю з алюмінідом титану методом дифузійного зварювання у вакуумі було проведено аналіз подвійних діаграм стану вуглець-метал та дифузійної активності вуглецю в цих металах [223].

Подвійна діаграма стану Ti-C [224]. Розчинність вуглецю в α -титані становить до 0,5 ваг. % при перитектоїдній температурі 2023 К. Карбід титану TiC (20,05 ваг. % C) є єдиною проміжною фазою в системі. Коефіцієнт дифузії вуглецю в титані при 1073 К становить $2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$.

Подвійна діаграма стану Al-C [224]. Розчинність вуглецю в рідкому алюмінії мала – її оцінюють як меншу за 0,05 ваг. % при 1573-1773 К, однак спостерігається велика тенденція до утворення карбиду Al_4C_3 (25,03 ваг. % C). При 1273-1373 К розчинність вуглецю в алюмінії практично дорівнює нулю.

Подвійна діаграма стану Nb-C [224]. Розчинність вуглецю в ніобії оцінюють як 0,0025 ваг. %. Спостерігається висока схильність до утворення карбідів Nb_2C та NbC. Вище 50% ат. C з фазою NbC співіснує вільний вуглець.

Подвійна діаграма стану Mn-C [224]. Система досить добре досліджена. В системі існує широка гама карбідів марганцю, найбільш близький до марганцевого кута – Mn_{23}C_6 . Крім того, було встановлено, що марганець утворює з вуглецем розчин впровадження. При температурі 1473 К в

γ -марганці розчиняється до 1,3% ваг. вуглецю. При температурі 873 К в $\alpha\gamma$ -марганці розчиняється до 0,3% ваг. вуглецю.

Подвійна діаграма стану Ni-C [224]. Рідкий нікель може розчиняти значну кількість вуглецю, який виділяється при охолодженні в формі графіту. З боку нікелю існує евтектика (2,22 ваг. % C, 1691 К). Розчинність вуглецю в нікелі при евтектичній температурі до 0,4 ваг. %. В системі можливо існування двох карбидів NiC та Ni₃C, які є метастабільними і в рівноважних умовах, при температурах, менших за 873 К, їх існування малоімовірно. Коефіцієнт дифузії вуглецю в нікелі при 1073 К становить $1,79 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$.

Подвійна діаграма стану Cu-C [225]. Розчинність вуглецю в міді становить $\sim 0,0001$ ваг. % при 1373 К. Таку низьку розчинність пояснюють дуже низькою дифузійною активністю вуглецю в твердій міді. Наявність карбідів не встановлено.

На основі аналізу діаграм стану, можна зробити висновок, що при дифузійному зварюванні вуглецевих матеріалів з металами в якості проміжних прошарків, які запобігатимуть утворенню карбідів, необхідно використовувати мідь або нікель. При використанні марганцю ймовірно утворення перехідної зони з твердим розчином вуглецю в марганці. Про з'єднання ВВКМ з алюмінієм та титаном однозначно сказати неможливо.

Спільно з ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України проведено серію експериментів по дифузійному зварюванню у вакуумі ВВКМ зі сплавом Ti-48Al-2Nb-2Mn на пряму та з використанням багат шарової фольги *Ti/Ni* та *Ti/Cu* загальною товщиною до 20 мкм, при товщині окремих шарів до 30 нм. Зварювання проводили на режимах: температура зварювання 1373 К, навантаження 10 МПа, час зварювання 5 хвилин. Матеріал фольги та температуру обрано з врахуванням подвійних діаграм стану та розчинності вуглецю в металах для запобігання утворенню карбідів.

При зварюванні ВВКМ з алюмінідом титану без проміжних прошарків з'єднання не відбулося. В процесі охолодження після зварювання відбувається розтріскування та руйнування з'єднання. На поверхні металу

спостерігаються осередки схоплення волокон вуглецевого композиту з алюмінідом титану. З'єднання ВВКМ з алюмінідом титану не відбувається внаслідок значної різниці в фізико-механічних властивостях цих матеріалів (див. таблицю 7.1).

Таблиця 7.1 – Властивості ВВКМ та алюмініду титану [124], [226]

Властивості	ВВКМ	Al/Ti
Щільність, г/см ³	1,4–1,5	4,2
Коефіцієнт температурного розширення, 10 ⁶ ×С ⁻¹	0.2	9
Теплопровідність, Вт/(м·°С)	50–70	115
Границя міцності, МПа	50–120	950

При зварюванні ВВКМ з алюмінідом титану через багат шарові фольги *Ti/Ni* та *Ti/Cu* вдалося отримати нероз'ємні з'єднання (рис. 7.4, рис. 7.5).

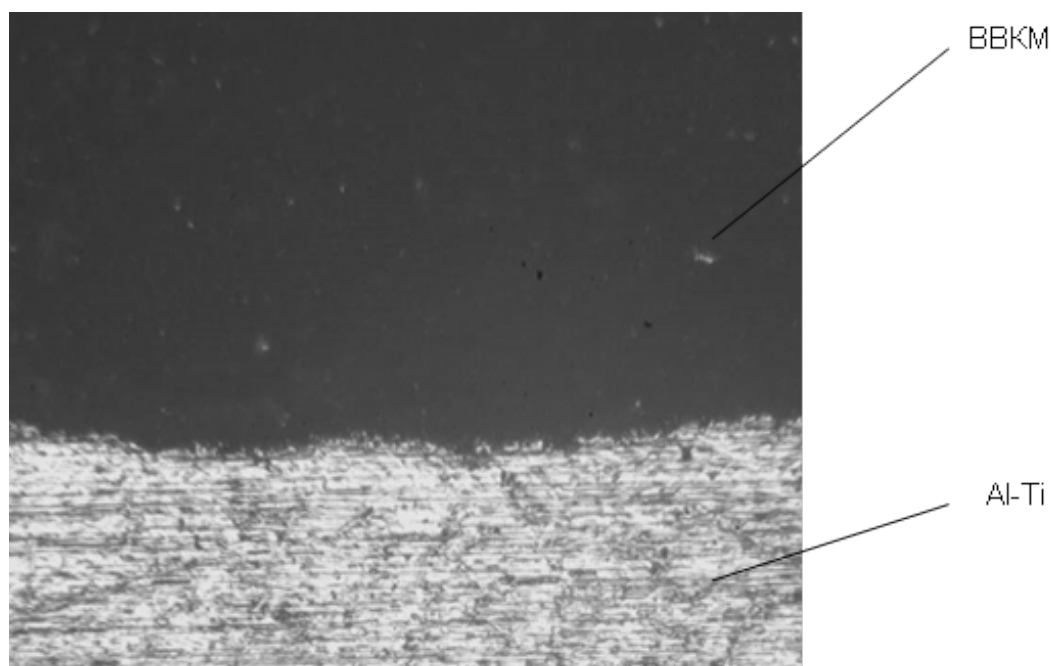


Рисунок 7.4 – Мікроструктура дифузійного з'єднання ВВКМ з алюмінідом титану через багат шарову фольгу *Ti/Ni* (оптична мікроскопія, x100)

Методом скануючої електронної мікроскопії встановлено, що в результаті реакції в прошарку утворюється евтектична суміш, яка заповнює порожнини вуглецевого композиту та забезпечує якісне формування зони з'єднання з деформацією основних матеріалів не більше 1 % (рис. 7.5) [223].

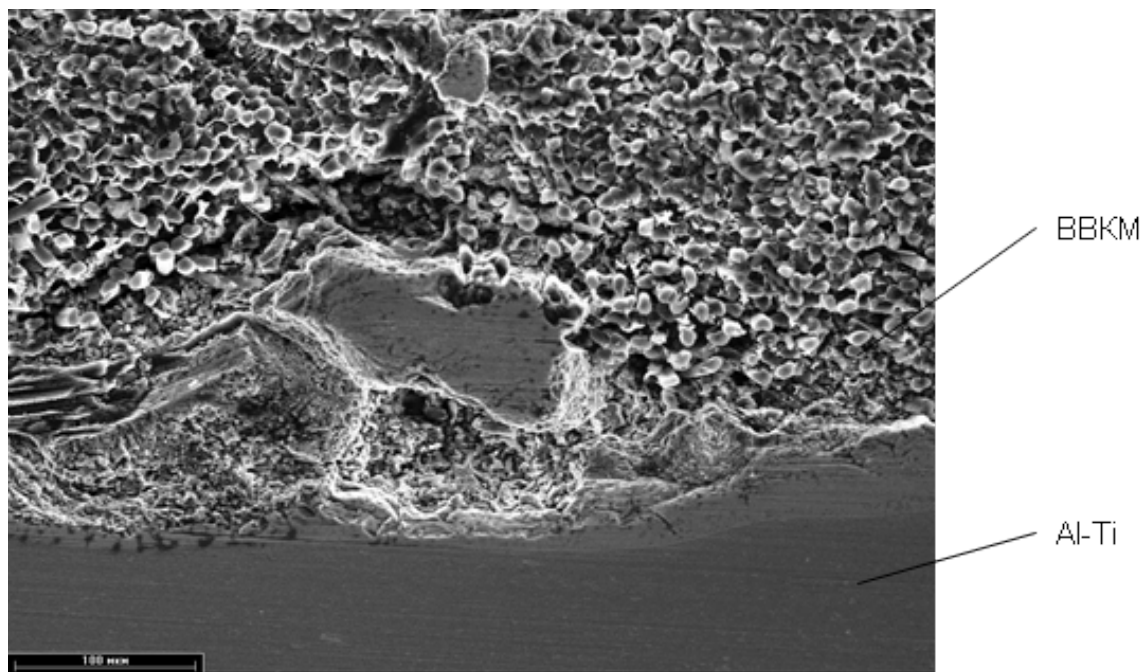


Рисунок 7.5 – Мікроструктура дифузійного з'єднання ВВКМ з алюмінідом титану через багатошарову фольгу Ti/Cu (електронна мікроскопія)

Жароміцні сплави на основі нікелю широко використовуються в автомобільній, аерокосмічній і атомній промисловості. Виробництво деталей складної конфігурації з цієї групи сплавів методами прецензійного лиття є трудомістким і дорогим. Одним зі шляхів вирішення даної проблеми є виготовлення окремих сегментів конструкції з їх наступним з'єднанням.

Тому, на наступному етапі було досліджено можливість використання багатошарових фольг для дифузійного зварювання жароміцного сплаву на нікелевій основі ЖС6К (Ni – 11Cr – 5,5Al – 5W – 4,5Co – 4Mo – 2,75Ti, до 2Fe, % ваг). Сплав є важкозварювальним дисперснозміцненим

суперсплавом, що містить значну кількість титану і алюмінію, схильний до утворення тріщин в шві та зоні термічного впливу [142].

Як правило, при зварюванні без проміжних прошарків з урахуванням перебування на поверхні жароміцних нікелевих сплавів термічно стійкої оксидної плівки, необхідно застосовувати більш жорсткі режими зварювання. В роботі [227] показано, що в з'єднаннях сплаву ЭИ607А отриманих на режимі: температура зварювання 1473 К, навантаження 20 МПа, тривалість зварювання 6 хвилин, в зоні з'єднання поряд із зернами загальними для обох заготовок виявляються сліди лінії розділу, які являють собою мікронесуцільності або залишки оксидних плівок в площині з'єднання.

Автори роботи [228] відзначають, що при зварюванні дисперсійно-зміцненого нікелевого сплаву Ni–Cr–Al–W–Y₂O₃ процес доцільно вести в інтервалі температур 1223–1373 К, при якому в матриці сплаву відбувається розчинення 20–25% γ -фази. Це призводить до збільшення відстані між дисперсними частками сплаву і їх роль у гальмуванні дислокацій знижується. Встановлено, що в з'єднаннях, отриманих на цьому режимі, завжди спостерігається міжфазна плоскоорієнтована границя. Застосування рекристалізаційного відпалу призводить до її усунення.

У роботі [229] розглядали можливість застосування двохстадійного процесу зварювання сплаву NiCr (Ni–20Cr–2ThO₂, % ваг). На першій стадії для забезпечення щільного контакту між площинами, що зварюються, до зразків прикладається тиск порядку 207 МПа при відносно низькій температурі 978 К і тривалості процесу 60 хв. На другій стадії при зниженому тиску 15 МПа і підвищеній температурі 1463 К протягом 30 хвилин відбувається зварювання. Відзначають, що застосування даного процесу дозволяє отримати якісні з'єднання.

При дифузійному зварюванні нікелевого сплаву Rene'41 автори [16] рекомендують застосовувати проміжні прошарки сплаву Ni-2%Be. Було встановлено, що підвищення температури зварювання з 1352 К до 1449 К призводить до формування ділянок схоплювання між поверхнями, що

сполучаються. Це пов'язано з більш інтенсивним протіканням дифузійних процесів, розчиненням залишків оксидів і зменшенням градієнта механічної та хімічної неоднорідності на границі основного металу з прошарком.

В роботі [230] досліджували з'єднання зразків зі сплаву Nimonic 90, отримані при тиску до 230 МПа. В якості проміжних прошарків використовували фольги нікелю. Після прикладення тиску зразки піддавалися витримці тривалістю до 480 хв., температура зварювання становила 1273 К. Максимальна міцність на зріз 370 МПа спостерігалася при використанні прошарку з нікелевої фольги товщиною 25 мкм, тиску стиснення 150-230 МПа.

Як вже зазначалося вище застосування для зварювання прошарків з чистих пластичних металів хоча і сприяє формуванню зварного з'єднання, але створює в зоні з'єднання ділянки з хімічною неоднорідністю, що в свою чергу негативно позначається на фізико-хімічних властивостях з'єднання.

В роботах [231], [232] встановлено, що застосування багатошарової фольги може істотно прискорити протікання дифузійних процесів в стику і зменшити хімічну неоднорідність з'єднань.

Тому в якості проміжних прошарків при зварюванні жароміцного сплаву на нікелевій основі ЖС6К (Ni – 11Cr – 5,5Al – 5W – 4,5Co – 4Mo – 2,75Ti, до 2Fe, % ваг) використовували багатошарові фольги Al – 86,68Ni загальною товщиною 30 мкм. Параметри процесу зварювання виходячи з літературних даних задавали в наступних діапазонах: $T_{зв} = 1273\text{--}1473$ К, $P_{зв} = 10\text{--}20$ МПа, $t_{зв} = 5\text{--}20$ хв., вакуум в робочій камері – $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

Необхідно відмітити, як і у випадку зварювання ВВКМ, при зварюванні сплаву ЖС6К без проміжних прошарків утворення загальних зерен в стику не виявлено – навіть при $T_{зв} = 1473$ К в зоні з'єднання спостерігається значна кількість дефектів у вигляді суцільного ланцюжка пор і оксидних включень (рис. 7.6). Це можна пояснити низькою пластичністю жароміцного нікелевого сплаву, яка не дозволяє на заданому

режимі забезпечити достатню деформацію приповерхневих шарів металу, і як наслідок неможливість утворити повний фізичний контакт.

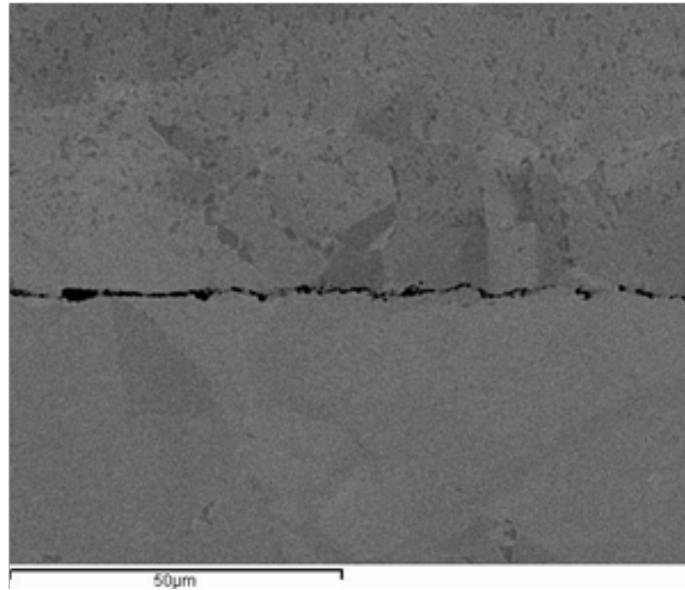


Рисунок 7.6 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ЖС6К, отриманого на режимі: $T_{зв} = 1473 \text{ К}$, $P_{зв} = 20 \text{ МПа}$, $t_{зв} = 20 \text{ хв}$.

Дифузійне зварювання через багат шарову фольгу Al/Ni забезпечує формування зварного з'єднання з мінімальною кількістю дефектів (рис. 7.7).

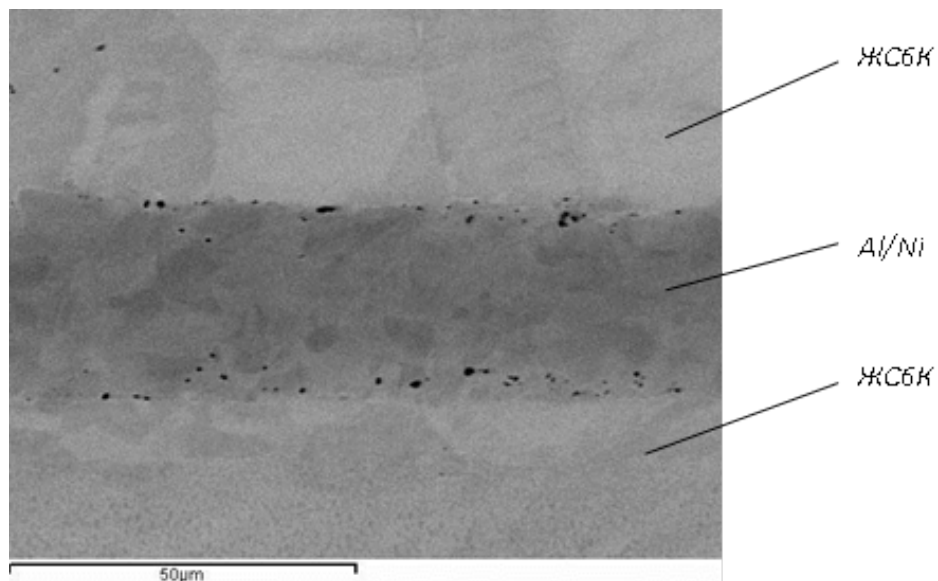


Рисунок 7.7 – Мікроструктура зварного з'єднання ЖС6К+Al/Ni+ЖС6К, отриманого на режимі: $T_{зв} = 1323 \text{ К}$, $P_{зв} = 20 \text{ МПа}$, $t_{зв} = 20 \text{ хв}$.

Отримані результати дозволяють припустити, що пористість на границях прошарку формується за рахунок зустрічної дифузії елементів з нікелевого сплаву в прошарок Al/Ni і в протилежному напрямку (ефект Кіркіндала).

Мікрорентгеноспектральний аналіз показав, що використання прошарку системи Al-Ni сприяє активному протіканню в стику дифузійних процесів, що призводить до формування в стику дифузійної зони шириною ~ 30 мкм. Багат шарова фольга Al/Ni забезпечує формування однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів [233].

7.2 Використання наноструктурованих пористих прошарків для зварювання фольг

Відомо, що основною проблемою при зварюванні тиском тонких матеріалів є виникнення ефекту контактного зміцнення, внаслідок якого додатково зменшується пластичність фольг [12].

Отримання зварних з'єднань фольг з жароміцних нікелевих сплавів, які широко використовуються в аерокосмічній галузі [133], додатково ускладнюється наявністю на їх поверхнях термічно стійкого шару оксиду і низької пластичності даної групи матеріалів [234]

Як вже було зазначено вище, застосування проміжних прошарків дозволяє отримати якісні з'єднання з жароміцних нікелевих сплавів. Однак описані технології розраховані на з'єднання масивних зразків і непридатні для тонких фольг.

Відомо, що одним з найбільш ефективних способів інтенсифікації процесу дифузійного зварювання є застосування проміжних ультрадисперсних порошоків та прошарків, отриманих напиленням. Такі прошарки мають високе відношення поверхні до об'єму, широкий можливий інтервал упорядкування структури, значну пористість,

недосконалості кристалічної решітки, що забезпечує прискорення дифузійних процесів, внаслідок чого забезпечується збільшення міцності з'єднань. Однак застосування проміжних ультрадисперсних порошків та прошарків, отриманих напиленням має ряд недоліків, що пов'язано з технологічними особливостями отримання частинок потрібної форми, дисперсності, властивостей прошарків та їх дозування при внесення у стик при зварюванні [42].

Тому нами був запропонований спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через суцільний прошарок у вигляді фольги [235], який отримується методом електронно-променевого випаровування і осадження з парової фази в вакуумі в парах галогенідів лужних металів [219]. Особливістю структури цієї фольги є наявність пористості на рівні 15...30%.

Даний спосіб дозволяє здійснювати дифузійне зварювання у вакуумі металевих матеріалів та отримувати якісні нероз'ємні з'єднання при температурі зварювання на 30-35 % меншій у порівнянні зі зварюванням без прошарку. Це має визначальне значення для прецизійного зварювання тиском, коли необхідно обмежувати температурний вплив, особливо при виготовленні деталей складної форми, з різнорідних матеріалів. Встановлено, що при зварюванні сталі 12X18H9T через пористі фольги з нікелю з пористістю 30% можна отримати якісні зварні з'єднання з міцністю на рівні основного матеріалу та знизити температуру зварювання при цьому з 1473 К до 1073 К [235].

На підставі вищесказаного, нами спільно з ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України було досліджено ефективність використання пористих фольг при дифузійному зварюванні у вакуумі тонколистового ($\delta = 0,025$ мм) нікелевого сплаву Ni-Cr (Ni – 20Cr – 3–4Fe – 0,40–0,6Al – 0,25–0,35Ti – 0,5Y, % вес.), отриманого методом порошкової металургії.

Зварювання зразків фольги зі сплаву Ni-Cr проводили через пористі фольги з Cu, Co, Ni товщиною 25 – 30 мкм та пористістю близько 20-30 %.

Перед зварюванням зразки розміром 15x5x0,025 мм вирізали з фольги. Зварювання проводили внапуск з перекриттям, що дорівнює 5 мм. Для видалення оксидної плівки, обидві поверхні фольги зачищали на наждачному папері до металевого блиску та знежирювали в ацетоні. Зварювання проводили на режимах: $T_{зв} = 1473$ К, $P_{зв} = 40$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв.

Після зварювання вирізали зразки для проведення механічних випробувань на розтяг (рисунок 7.8).

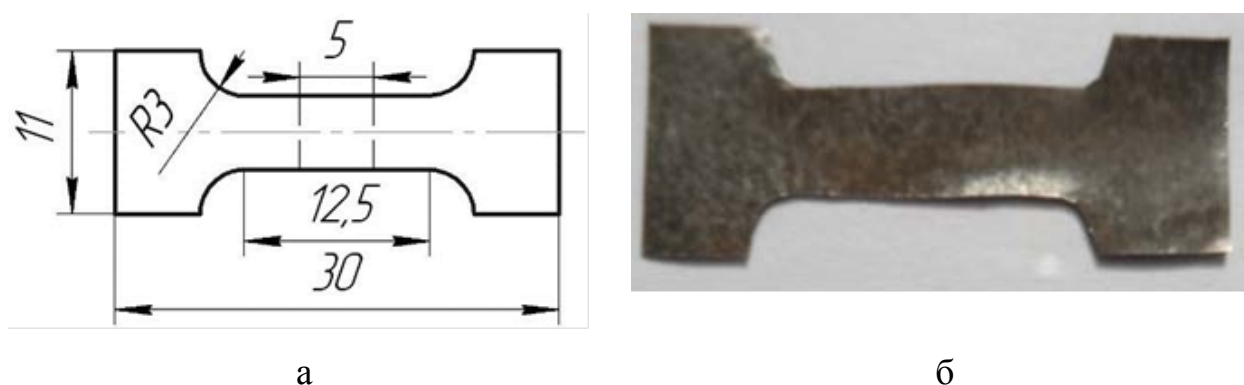


Рисунок 7.8 – Зразки для механічних випробувань на розтяг: а – схема, б – зовнішній вигляд зразків з фольги сплаву Ni-Cr

Встановлено, що міцність з'єднань, отриманих із застосуванням пористого прошарку з нікелю складає всього 27 % від міцності основного матеріалу, що ймовірно пов'язано з утворенням в стику зони, яка складається з чистого нелегованого нікелю. Міцність з'єднань через прошарок з кобальту складає 57,5 % міцності основного матеріалу (в зоні з'єднання спостерігаються дефекти у вигляді пор та хімічної неоднорідності в розподілі основних легуючих елементів). Застосування пористого прошарку з міді при зварюванні сплаву Ni-Cr дозволило отримати з'єднання з міцністю 78 % від міцності основного матеріалу (рисунок 7.9) [137].

Зважаючи на те, що при зварюванні сплаву Ni-Cr на вказаних режимах напряму з'єднання отримати не вдалося, можна стверджувати, що пористі фольги, отримані за технологією електронно-променевого

випаровування і конденсації в вакуумі, сприяють активації поверхні та забезпечують формування зварних з'єднань при зварюванні тонколистового нікелевого сплаву.

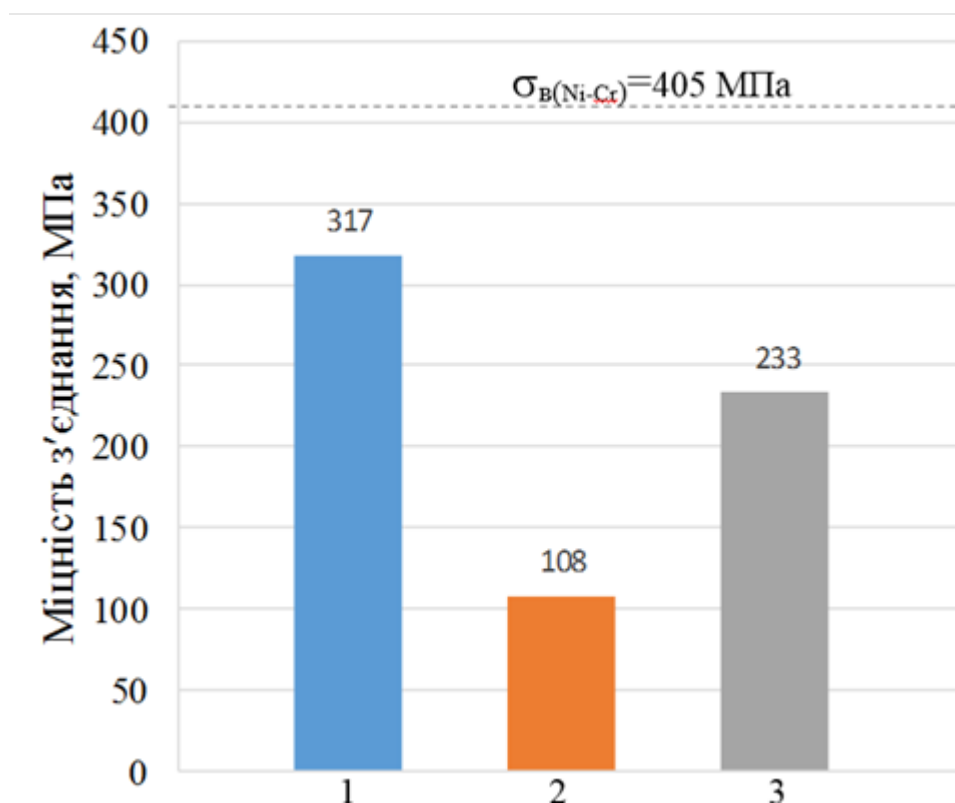


Рисунок 7.9 – Залежність міцності зварних з'єднань сплаву Ni-Cr, отриманих через пористий прошарок Cu (1), Ni (2), Co (3) на режимі:

$$T_{зв} = 1473 \text{ К}, P_{зв} = 40 \text{ МПа}, t_{зв} = 20 \text{ хв.}$$

7.3 Використання наноструктурованих пористих прошарків для зварювання напівпровідникового матеріалу з міддю

Також нами була проведена оцінка ефективності використання пористих фольг при зварюванні напівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з міддю. З'єднання напівпровідникових матеріалів з міддю на сьогодні використовуються при виготовленні термоелементів (термоелектричних перетворювачів) способами паяння, спільного пресування, напилення, гальванічного та хімічного нанесення комутаційних матеріалів [236]. Ці

способи мають недоліки і не можуть в повній мірі задовольнити вимоги до якості нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу з комутуючою пластиною. Тому актуальним є розробка нового способу отримання нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу з комутуючою пластиною при виготовленні термоелементів.

Основними вимогами до отримання нероз'ємних з'єднань напівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з мідною комутуючою пластиною при виготовленні термоелементів є необхідність використання температури процесу з'єднання не більше 525-535 К, а пластична деформація матеріалів, що зварюються, не повинна перевищувати 0,5-1%. Крім цього, тверді розчини Bi_2Te_3 , леговані міддю, при знаходженні на повітрі змінюють з часом свої термоелектричні параметри: концентрація носіїв струму падає, термо-ЕДС зростає, а електропровідність, відповідно, зменшується. Це призводить до відхилення від оптимальних термоелектричних параметрів речовин та знижують, таким чином, ефективність термоелемента. Тому використання мідної комутації вимагає нанесення антидифузійних шарів, наприклад, для зменшення дифузії міді в термоелектричний матеріал товщина антидифузійного шару Ni не повинна бути меншою, ніж 150-200 мкм, що призводить до збільшення внутрішніх напружень, які послаблюють адгезію Ni до термоелектричного матеріалу [236].

Дослідження здатності до дифузійного зварювання напівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з міддю М1 проводили напряму та через пористу фольгу з нікелю товщиною 40 мкм та пористістю близько 30 % на наступних режимах: температура зварювання 523 К, час зварювання 40 хв., тиск зварювання 2 МПа, які обрали на основі літературних даних щодо мінімально допустимого термомеханічного впливу на телурид вісмуту: пластична деформація матеріалів не повинна перевищувати 0,5-1% [236], [237].

Необхідно відмітити, що попередньо з метою встановлення оптимальних режимів були проведені дослідження щодо здатності до

зварювання міді з міддю через пористу нікелеву фольгу. Встановлено, що міцність з'єднання досягає рівномірності міді на наступному режимі: $T_{зв} = 623 \text{ K}$; $t_{зв} = 40 \text{ хв.}$; $P_{зв} = 5 \text{ МПа}$. При цьому деформація основного матеріалу (міді) не перевищує 1 %, а деформація пористої фольги з нікелю складає 35-40 %. На рисунку 7.10 представлено мікроструктуру таких зварних з'єднань.

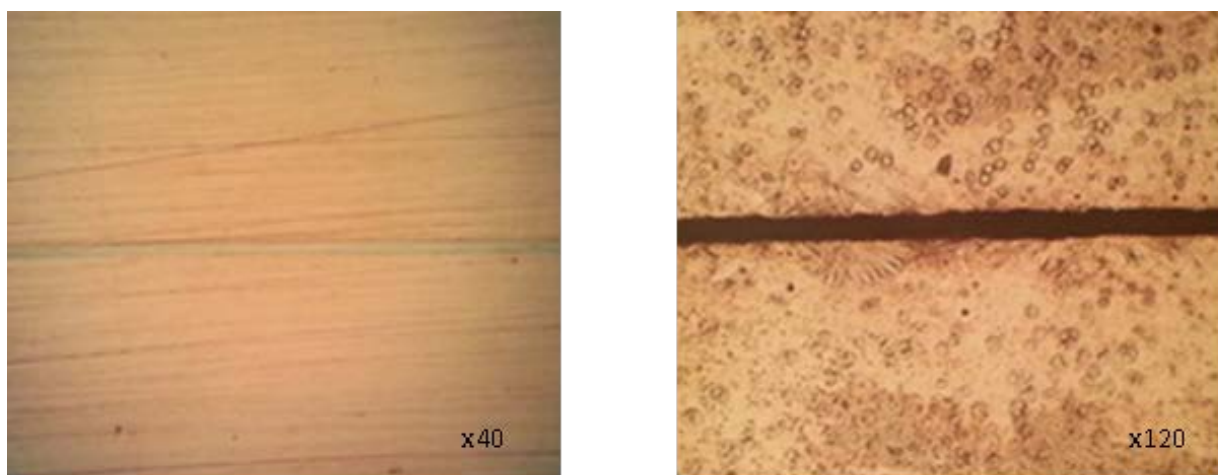


Рисунок 7.10 – Мікроструктура зварного з'єднання міді з міддю, отриманого через пористу фольгу з нікелю: а – без травлення; б – травлення (оптична мікроскопія)

Таким чином, встановлено ефективність використання пористих прошарків з нікелю для прецизійного низькотемпературного зварювання міді.

Механічні випробовування на зріз зварних з'єднань напівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з міддю М1, отриманих на вказаних вище режимах, показали, що міцність зварного з'єднання отриманого напряму складає менше 5 МПа, а через пористу фольгу з нікелю – 10 МПа, що є достатнім для з'єднання даного типу (з'єднання даних матеріалів за допомогою паяння дає міцність 6-20 МПа, міцність зчеплення комутаційних шарів, отриманих плазмовим напиленням, з термоелектричним матеріалом

знаходиться в межах 4,5-7,5 МПа). При цьому деформація напівпровідникового матеріалу складає менше 0,5 %. На рисунку 7.11 представлено мікроструктуру зварного з'єднання.

Розрахунки напружено-деформованого стану зварних з'єднань, проведені за допомогою програмного пакету ANSYS, дозволили встановити, що при зварюванні Bi_2Te_3 з міддю через прошарок з пористого нікелю рівень залишкових напруження на 15-20 % менше, ніж при зварюванні напряму [238], що також підтверджує отримані дані механічних випробувань зварних з'єднань.

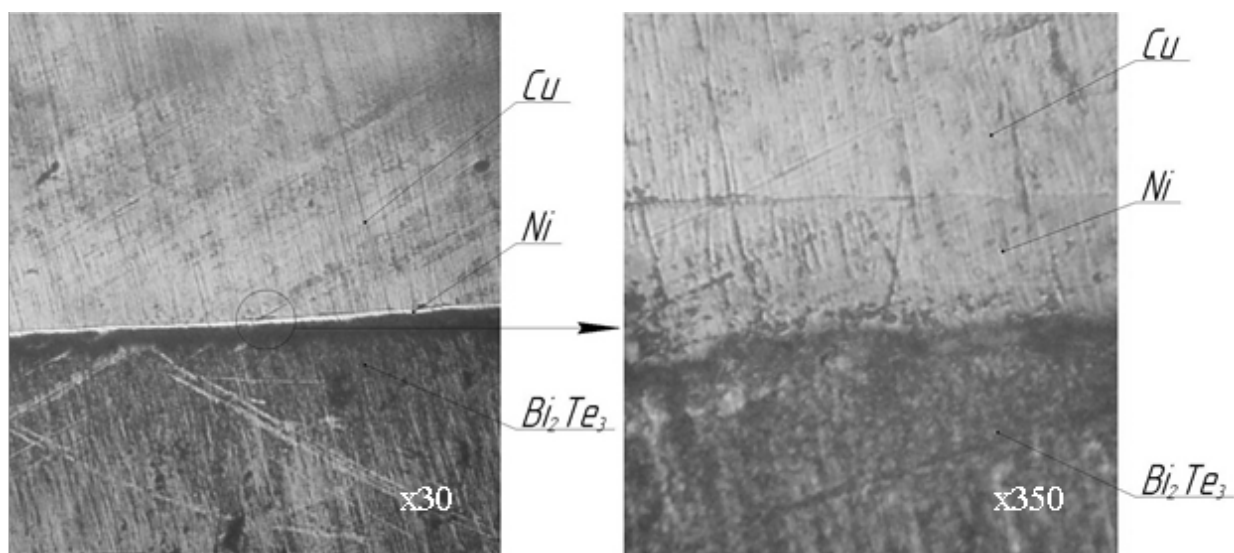


Рисунок 7.11 – Перехідна зона зварного з'єднання Bi_2Te_3 з міддю, отриманого через пористу фольгу з нікелю: 1 – мідь; 2 – пористий нікель; 3 – Bi_2Te_3 (оптична мікроскопія)

З метою обмеження дифузії міді в термоелектричний матеріал нами була запропонована нова схема отримання нероз'ємних з'єднань Bi_2Te_3 з міддю, що передбачає реалізацію двох етапів (рис. 7.12): 1 – створення бар'єрного шару з хрому безпосередньо в поверхневому шарі мідної комутаційної пластини методом іонної імплантації; 2 – дифузійне зварювання у вакуумі через пористу фольгу з нікелю [239].

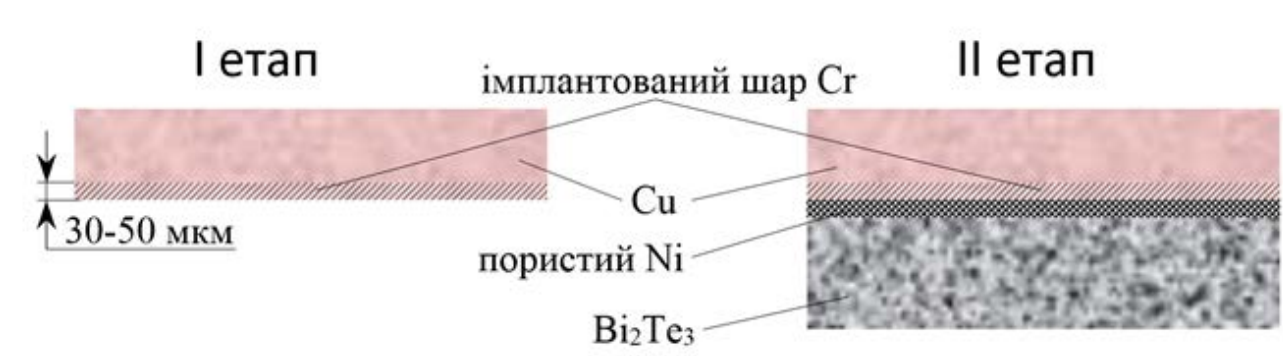


Рисунок 7.12 – Етапи отримання нероз’ємних з’єднань Bi₂Te₃ з міддю

На основі проведених розрахунків встановлено, що антидифузійний шар хрому в поверхневому шарі міді товщиною 30-50 мкм буде гарантувати блокування дифузії міді в напівпровідник [240], [241]. Однак можливість впровадження даної схеми у виробництво потребує подальшого вивчення.

7.4 Дослідження здатності до прецизійного зварювання тиском різнорідних матеріалів через м’які прошарки

Відомо, що для з’єднання різнорідних металів, які утворюють між собою крихкі інтерметалідні сполуки або які є взаємно не розчинними використовуються м’які прошарки, що виконують роль бар’єрного шару або проміжного шару, який має хімічну спорідненість до обох металів, що зварюються. При цьому важливу роль в отриманні бездефектних з’єднань має правильний вибір не тільки параметрів зварювання, але й визначення оптимальної товщини прошарку, як з урахуванням структурно-фазового складу зони з’єднання так і з урахуванням деформацій зсуву в стику на якість зварних з’єднань [242].

З метою оцінки здатності до прецизійного зварювання тиском різнорідних матеріалів через суцільні м’які прошарки, на прикладі зварювання алюмінію АМг6 з титаном ВТ6, було досліджено вплив товщини проміжного прошарку на якість з’єднань цих матеріалів [243],

[244]. Відомо, що з огляду на те, що магній у титані не розчиняється, то отримання якісного з'єднання вказаних матеріалів без застосування чистого алюмінію не можливе. Тому зварні з'єднання АМг6 + ВТ6 отримували на режимах рекомендованих в літературі при постійних значеннях тиску (20 МПа), температури (813 К) та часу (20 хв.) через прошарок з алюмінію марки АД1 товщиною 100, 150 та 200 мкм. На рисунку 7.13 представлено залежність рівня деформації прошарку та загальної площі схоплення від товщини прошарку. Деформацію прошарку вимірювали у міліметрах зменшення товщини прошарку, а загальну площу схоплення визначали при дослідженні мікроструктури зварних з'єднань.

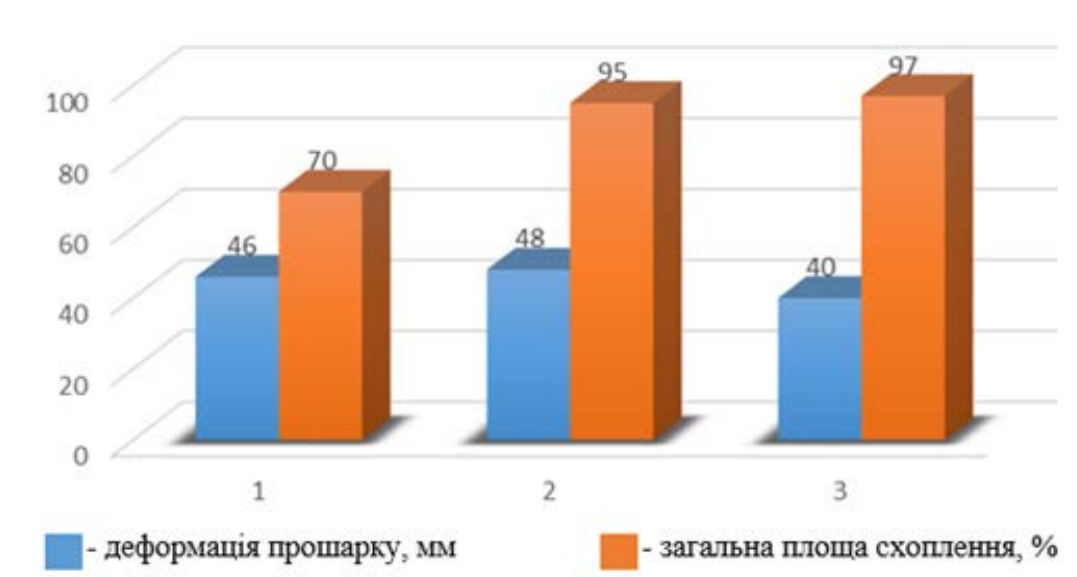


Рисунок 7.13 – Залежність деформації прошарку з алюмінію АД1 та загальної площі схоплення при зварюванні АМг6 + ВТ6 від товщини прошарку: 1 – 100 мкм, 2 – 150 мкм, 3 – 200 мкм

З представленої діаграми видно, що деформація прошарків незалежно від їх товщини приблизно однакова та складає 40-50 мкм, але при цьому при товщині прошарку 150 та 200 мкм суттєво збільшується загальна площа схоплення. Дослідження розподілу хімічних елементів за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу показали, що це пов'язано з перерозподілом магнію з АМг6. Тобто прошарку товщиною 100 мкм не

вистачає для повного перерозподілу магнію й це призводить до утворення більшої кількості областей, де не відбувається процес схоплення. Дослідження дифузійних та рекристалізаційних процесів при зварюванні показали, що при таких умовах в зоні з'єднання прошарку з АД1 зі сплавом ВТ6 інтерметалідні з'єднання не утворюються [245], [246]. Однак, необхідно відмітити, що у всіх випадках деформація основного матеріалу (АМг6) складала більше 10 %, а зниження тиску зварювання з метою зменшення деформації АМг6 призводить до суттєвого зменшення рівня деформації прошарку з АД1, що не дозволяє сформувати фізичний контакт необхідний для отримання якісного зварного з'єднання.

Відомо, що одним зі способів обмеження деформації основних матеріалів є використання формуючих матриць, які використовуються для інтенсифікації пластичної деформації приконттактних об'ємів матеріалу. Вплив використання формуючої матриці при зварюванні через м'який прошарок в літературі майже не досліджено. Для вивчення впливу формуючої матриці на якість зварного з'єднання АМг6 + ВТ6 були зварені зразки без матриці та з її застосуванням (рисунок 7.14) на вказаних вище режимах через прошарок з АД1 з товщиною 150 мкм [247].

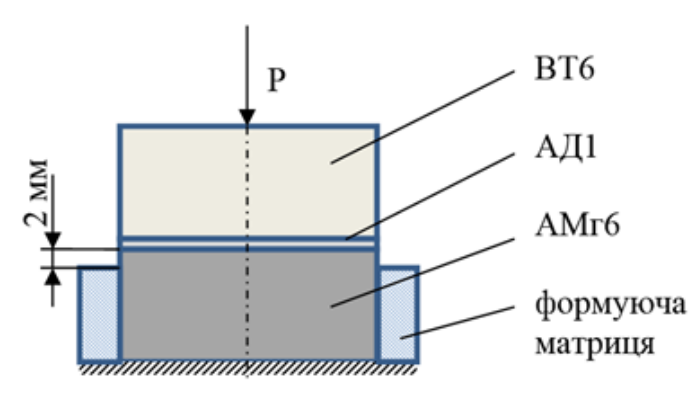


Рисунок 7.14 – Схема зварювання з використанням формуючої матриці

Металографічні дослідження цих зварних з'єднань показали, що деформація прошарку складала 38-40 мкм. Тобто застосування формуючої матриці не дозволяє підвищити рівень деформації прошарку. Крім цього, за

допомогою металографічних досліджень встановлено, що в зоні з'єднання сплаву ВТ6 з прошарком АД1 спостерігається збільшення кількості оксидів, які не були роздрібнені, у порівнянні зі зварюванням без формуючої матриці (рисунок 7.15). Ймовірно це пов'язано з перерозподілом внутрішніх напружень в прошарку та низьким рівнем дотичних напружень вздовж всього стику при застосуванні формуючої матриці.

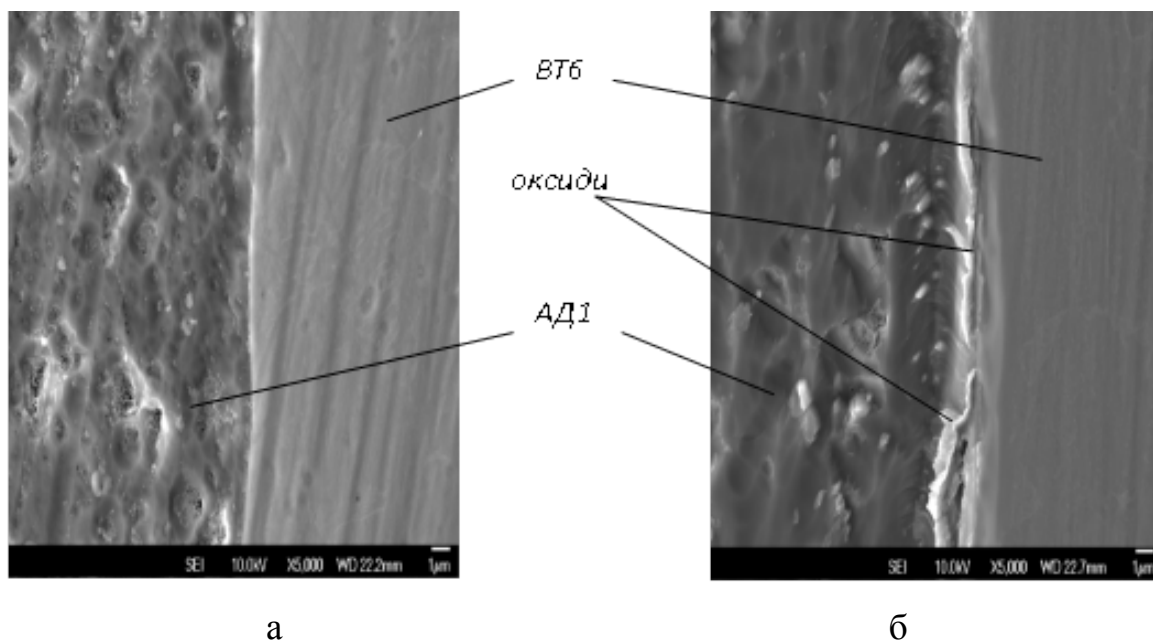


Рисунок 7.15 – Перехідна зона зварного з'єднання прошарку АД1 з ВТ6: а – без застосування формуючої матриці; б – з застосуванням формуючої матриці (електронна мікроскопія)

Таким чином, встановлено, що застосування суцільних м'яких прошарків, як з застосуванням формуючої матриці так і без неї, не дозволяє в повній мірі активувати зварні поверхні при обмеженні рівня пластичної деформації основних матеріалів.

Висновки до розділу 7

1. Встановлено ефективність використання багатошарової та пористої фольги при зварюванні важкодеформуємих та напівпровідникових матеріалів. Показано, що при дифузійному зварюванні у вакуумі вуглець-

вуглецевого композиційного матеріалу з алюмінідом титану та жароміцного нікелевого сплаву використання наночаруватих фольг Ti/Ni, Ti/Cu та Al/Ni, відповідно, забезпечує утворення з'єднань, сприяє активному протіканню дифузійних процесів з формуванням в стику однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів. У випадку зварювання цих матеріалів напряду з'єднання взагалі не утворюється.

2. Розроблено спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через суцільний прошарок у вигляді фольги з пористістю 15-30%. Встановлено, що використання пористої фольги дозволяє зменшити температуру зварювання на 30-35 % у порівнянні зі зварюванням без прошарку, що має визначальне значення для прецизійного зварювання тиском.

3. Встановлено, що застосування пористого прошарку з міді при зварюванні сплаву Ni-Cr дозволяє отримати з'єднання з міцністю 78 % від міцності основного матеріалу.

4. Встановлено ефективність використання пористих фольг з нікелю для дифузійного зварювання напівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з міддю М1. Показано, що міцність зварного з'єднання Bi_2Te_3 з міддю отриманого через пористу фольгу з нікелю складає 10 МПа, що в 2 рази більше у порівнянні зі з'єднаннями отриманими напряду. При цьому деформація основних матеріалів не перевищує 0,5 %.

5. Встановлено, що застосування суцільних м'яких прошарків з алюмінію, як з застосуванням формуючої матриці так і без неї, не дозволяє в повній мірі активувати поверхні при обмеженні рівня пластичної деформації основних матеріалів при дифузійному зварюванні алюмінію АМг6 з титаном ВТ6.

РОЗДІЛ 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗДАТНОСТІ ДО ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОВЕРХНЕВИХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Як показав аналіз процесів, які відбуваються у поверхневому шарі при нагріванні металу у вакуумі (див. розділ 1.1.2), поверхневі фізико-хімічні процеси є взаємозалежними й можуть привести не тільки до очищення поверхні від оксидів, але й до істотної зміни механічних і фізико-хімічних властивостей тонкого поверхневого шару металу. Тому нами на підставі викладеного матеріалу запропоновані можливі процеси очищення різних металів від оксидів у вакуумі при нагріванні (табл. 8.1). Дана інформація може надати істотну допомогу при розробці технології зварювання у твердій фазі у вакуумі $1,33 \cdot 10^{-4}$ - $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па, з температурою зварювання вище $0,4 T_{пл}$.

Таблиця 8.1 – Можливі процеси очищення металів від оксидів при нагріванні
у вакуумі

Метал, сплав	Основне газовиділення $T=(0,4-0,7)T_{пл}$	Можливі процеси очищення металу від оксидів у вакуумі при нагріванні
Fe, Ст3	CO	Дисоціація, відновлення вуглецем
Ni	CO	Дисоціація, сублімація, відновлення вуглецем і воднем
Cu	-	Дисоціація, відновлення воднем
Cr	-	Відновлення воднем і вуглецем
Mn	-	Відновлення вуглецем
V	CO	Сублімація, розчинення, відновлення вуглецем
Mo	CO	Дисоціація, сублімація, відновлення вуглецем і воднем
W	CO	Дисоціація, сублімація, відновлення вуглецем і воднем
Ti, Zr, Nb	H ₂	Розчинення, відновлення вуглецем
Pd	H ₂	Дисоціація, сублімація, відновлення воднем
X19H10T	N ₂	Відновлення вуглецем і воднем

Аналізуючи відомості, наведені в таблиці 8.1 можна зробити висновок, що при зварюванні як однорідних, так і різнорідних металів необхідно враховувати процеси, що протікають у поверхневому шарі металу при його нагріванні у вакуумі. У випадку зварювання різнорідних металів слід визначати параметри нагрівання не тільки з погляду появи крихких фаз у зоні контакту, але й з позицій оптимального очищення поверхні від оксидів. При виборі проміжних прошарків необхідно також враховувати не тільки діаграму стану металів, що зварюються, але й той вплив, який матеріал прошарку може виявити на інтенсивність очищення поверхні контакту основного металу від оксидів.

Таким чином, стосовно зварювання у твердій фазі різних металів і сплавів можна запропонувати п'ять підходів до розробки технологій з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів для забезпечення утворення якісного нероз'ємного з'єднання:

- гальванічне покриття матеріалом, який не утворює термодинамічно стійких оксидів, нітридів й карбидів на поверхні та сприяє процесам очищення основного металу від оксидів;
- застосування проміжних прошарків, матеріал яких дозволяє інтенсифікувати очищення від оксидів основного металу;
- застосування штучних методів відновлення оксидних плівок;
- скорочення до мінімуму часу від обробки поверхні металу до моменту зварювання й зварювання в граничному для даної системи вакуумі;
- використання попереднього підігріву деталей, що зварюються, у розведеному стані для прискорення процесу відновлення оксидних плівок та сублімації одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхню іншого.

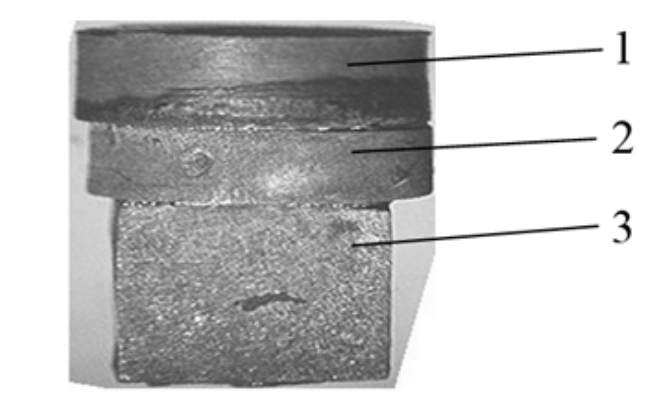
8.1 Вивчення особливостей утворення сублімованих шарів

Раніше нами вже було встановлено, що в стику в замкнених об'ємах при дифузійному зварюванні у вакуумі міді з хромом при нагріві протягом 15 хвилин при температурі 1223 К відбувається сублімація міді та її конденсація на поверхні хрому [73]. Однак вплив конденсованого прошарку на утворення з'єднання не досліджено.

У зв'язку з цим нами були проведені дослідження процесів, що відбуваються в зоні контакту при дифузійному зварюванні у вакуумі різнорідних матеріалів та вплив цих процесів на прецизійне зварювання таких матеріалів. Всі дослідження проводили на з'єднаннях міді з тугоплавкими матеріалами та титаном. Відповідно до проведеного аналізу літературних даних, саме для цих пар металів використання поверхневих фізико-хімічних процесів може дати позитивний результат для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань (див. розділ 1). На сьогодні нероз'ємні з'єднання титану з міддю, що застосовуються для виготовлення деталей електровакуумних приладів, отримують дифузійним зварюванням через проміжні бар'єрні шари, що запобігають їх безпосередній взаємодії і утворенню інтерметалідів в зоні контакту [117]. Однак, в деяких випадках, наприклад, при виготовлення теплових труб, виникає необхідність отримання якісних зварних з'єднань міді з титаном без застосування проміжних шарів [248].

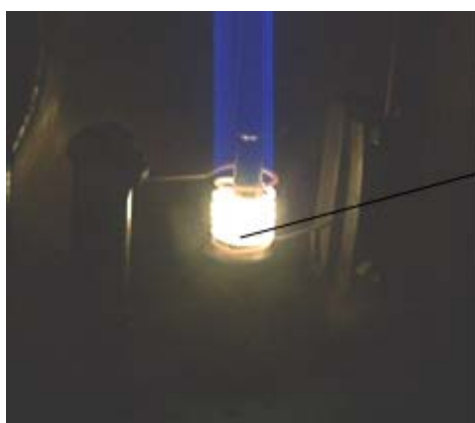
Літературний аналіз поверхневих фізико-хімічних процесів, що відбуваються при нагріві титану та міді, показав можливість автовакуумування герметичних об'ємів за рахунок поглинання титаном кисню (873-913 К) і азоту (1273 К), очищення поверхонь металів від оксидних плівок (>973-1023 К) та сублімацію міді (1219 К). Відомо також, що молібден починає інтенсивно поглинати газу повітря при температурі вище 673 К.

Дослідження топографії та структури сублимованих прошарків проводили за допомогою складеного зразка, що моделює герметичний зазор у контакті, при ДЗВ міді з титаном та тугоплавкими металами (див. рисунок 8.1) після нагрівання в умовах вакууму (рис. 8.2, а) та повітря (рис. 8.2, б) Герметизація замкнутого об'єму, обмеженого елементами 1, 2, 3 досягалася в результаті схоплювання контактуючих поверхонь при незначному зусиллі стискання зразка в період нагрівання.



*1 – пластина титану (молібдену);
2 – мідне кільце (герметичний об'єм);
3 – мідна пластина*

Рисунок 8.1 – Зразок для дослідження процесів, що протікають у герметичних об'ємах при ДЗВ



а

Зразок для дослідження (див. рис. 8.1)

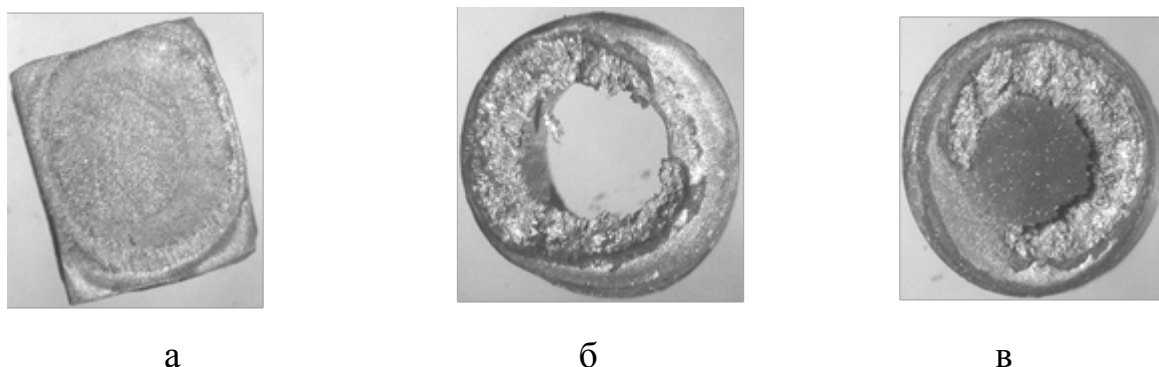


б

Рисунок 8.2 – Зразки для дослідження процесів, що протікають у герметичних об'ємах, при нагріванні в вакуумній камері (а) та муфельній печі (б)

Температуру нагрівання складеного пакету змінювали для пари мідь-молібден від 1073 К до 1273 К, для пари мідь-титан – від 873 К до 1143 К при витримці протягом 5-30 хвилин. Час охолодження визначався інтенсивністю охолодження досліджуваних зразків у вакуумній камері та у муфельній печі до температури 313 К.

Після охолодження зразка (рис. 8.1) елементи 1, 2, 3 відокремлювали один від одного (рис. 8.3) й досліджували внутрішні поверхні на оптичному та растровому електронному мікроскопі і порівнювали з даними, отриманими до проведення експерименту.



а – зразок міді; б – мідне кільце; в – зразок титану (молібдену)

Рисунок 8.3 – Елементи зразка для дослідження процесів, що протікають у герметичних об'ємах в контакті при ДЗВ (оптична мікроскопія)

Пара мідь-титан. При температурі нагріву до 973 К поверхні титану і міді інтенсивно окислювались. При температурі 973 К і вище поверхня титану залишалась окисленою, а поверхня міді мала чистий металевий блиск. При температурі 1023 К поверхні титану і міді мали вигляд, що відповідає вакуумному тепловому травленню (рис. 8.4). При температурі вище 1073 К і витримці більше 10-15 хвилин на поверхні міді внаслідок сублимації утворюється конденсат титану, що представляє собою пористий прошарок товщиною порядку 5 мкм (товщину визначили методом іонного зтравлення), про що свідчить топографія поверхні міді (рис. 8.5) і результати мікрорентгеноспектрального аналізу поверхні міді, який показав, що концентрація титану на міді знаходиться в межах від 4% до 7% [249], [250].

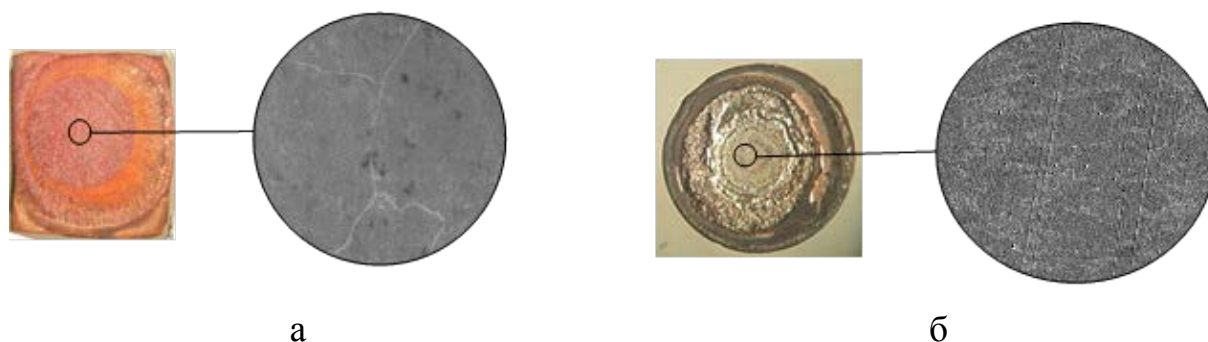


Рисунок 8.4 – Топографія поверхні міді (а) та титану (б) після витримки герметичного зразка мідь-титан протягом 30 хвилин при температурі 1023 К (оптична та електронна мікроскопія x500)

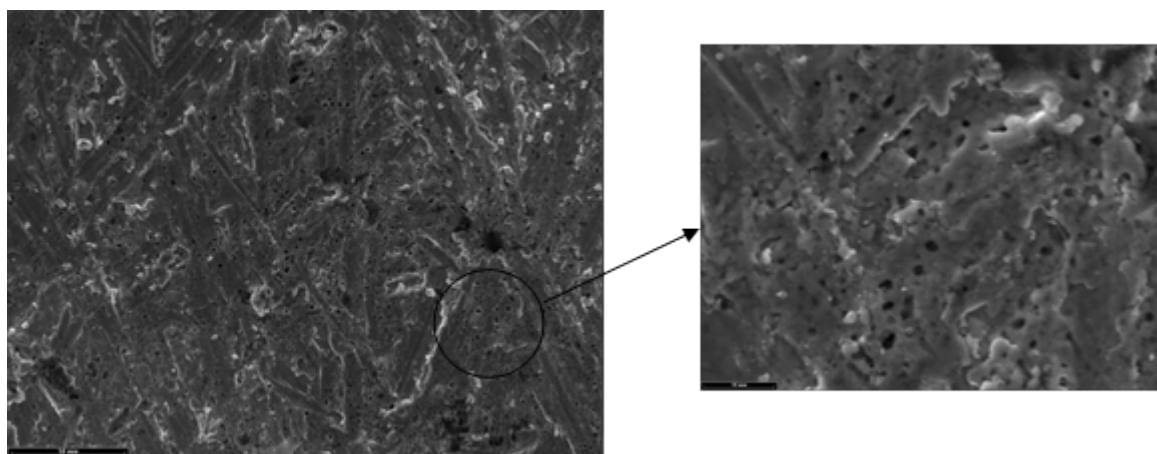


Рисунок 8.5 – Топографія поверхні міді після витримки герметичного зразка мідь-титан протягом 30 хвилин при температурі 1123 К (x2000) (електронна мікроскопія)

Пара мідь-молібден. При температурі нагріву до 673 К поверхні молібдену і міді окислювались. При температурі вище 673 К поверхня міді залишалась окисленою, а поверхня молібдену мала чистий металевий блиск. При температурі вище 1023 К поверхні молібдену і міді мали вигляд, що відповідає вакуумному тепловому травленню. При температурі 1223-1243 К і витримці більше 10-15 хвилин на поверхні молібдену внаслідок сублімації утворюється конденсат міді. Встановлено, що при нагріванні герметичного зразка пари мідь-молібден при температурі 1223 К протягом 20 хвилин

розмір конденсованих часток міді на поверхні молібдену становить 1,5-2 мкм (рис. 8.6).

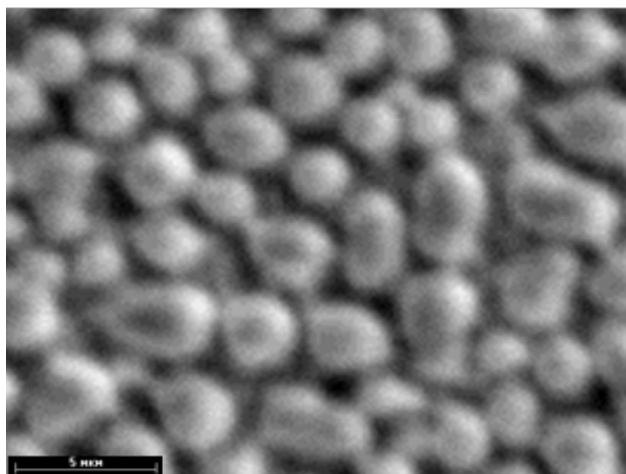


Рисунок 8.6 – Топографія конденсату міді на молібдені після нагрівання при температурі 1223 К протягом 20 хвилин (електронна мікроскопія)

При цьому результати експериментів аналогічні, не залежно від того чи нагрівання зразків відбувалось у вакуумі, чи на повітрі у муфельній печі, що підтверджує факт герметизації об'ємів при незначних зусиллях, а також явище їх автовакуумування. Необхідно відмітити, що пористість сублімованих прошарків складає порядку 20-30 %.

Також був проведений експеримент у вакуумній камері по одержанню конденсату міді на хромі та молібдені, а також титану на міді коли не було герметичності об'єму. Із цією метою мідне кільце 2 (див. рисунок 8.1) виготовляли з бічним отвором, тобто розрядження в об'ємі відповідало розрядженню в робочій камері (10^{-3} Па). Встановлено, що у випадку нагрівання у вакуумі негерметичних об'ємів час необхідний для утворення сублімованих прошарків з одного з контактуючих металів зменшується в 3-4 рази и становить 1-3 хвилини, незалежно від природи іншого металу. Цей факт дає змогу стверджувати, що існує можливість створення проміжних прошарків при ДЗВ різнорідних металів, якщо один з них при температурі зварювання має здатність сублімувати.

8.2 Дослідження здатності до зварювання різнорідних матеріалів через сублімовані шари

Для вивчення впливу конденсату на міцність зварних з'єднань міді з тугоплавкими металами та міді з титаном було проведено ДЗВ за трьома варіантами: 1 – через конденсований шар отриманий за рахунок сублімації; 2 – через конденсований шар отриманий термічним вакуумним розпиленням; 3 – напряму, тобто при відсутності прошарків.

Пара мідь-тугоплавкі метали.

Попередньо на поліровану поверхню зразків із хрому шляхом сублімації у вакуумі при температурі нагрівання 1223-1233 К протягом 3 – 5 хвилин та вакуумним термічним розпиленням наносили шар міді товщиною до 3-5 мкм. Необхідно відмітити, що на відміну від сублімованих прошарків конденсат міді на хромі та молібдені, отриманий розпиленням у вакуумі з рідкої фази, представляє собою майже суцільний шар без наявності сферичних часток.

Щоб уникнути проходження сублімаційних процесів безпосередню в процесі зварювання, температура зварювання була в межах 1193-1203 К. Тиск зварювання (22-24 МПа) та час (20-25 хвилин) вибрали згідно з рекомендованими нами раніше режимами зварювання хрому з міддю [73].

Механічні випробування зварних з'єднань на зсув показали, що міцність хром-мідних з'єднань через шар міді, отриманий як внаслідок сублімації, так і за рахунок термічного вакуумного розпилення із рідкої фази, складає 120 МПа, що на 20 % більше міцності з'єднань, отриманих безпосередньо напряму (рис. 8.7) та більше міцності міді (110 МПа). Аналогічні результати були отримані й при зварюванні міді з молібденом.

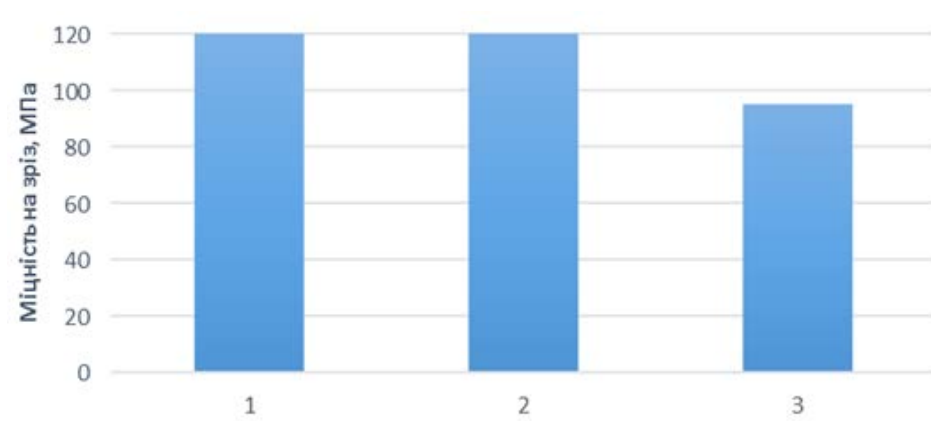


Рисунок 8.7 – Міцність на зріз хром-мідних з'єднань, отриманих ДЗВ через мідний прошарок, отриманий вакуумним термічним розпиленням з рідкої фази (1), внаслідок сублимації міді (2) та без прошарку (3) [251], [252]

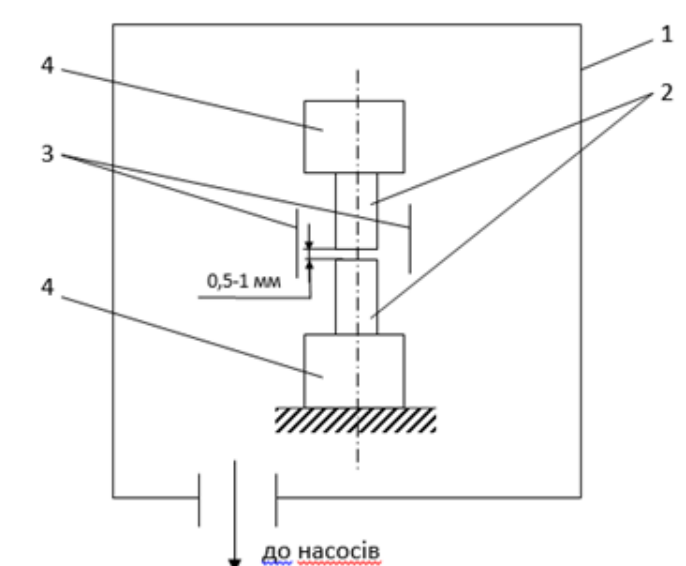
Пара мідь-титан. Відомо, що дифузійне зварювання титану VT1 з міддю виконують на режимі: температура зварювання 1123 К, тиск зварювання 5 МПа, час зварювання 10 хвилин, вакуум $1,33 \cdot 10^{-2}$ МПа [117]. Для проведення експерименту був обраний наступний режим: тиск зварювання 5 МПа, час зварювання 10 хвилин, а температура зварювання 1023 К. Зменшення температури до 1023 К пояснюється запобіганням утворення конденсату титану на поверхні міді відповідно до отриманих даних.

Для реалізації першої схеми зварювання зразки нагрівали у розведеному стані до температури 1123-1143 К і витримували протягом 5 хвилин з метою отримання конденсату титану на міді. Потім температуру знижували до 1023 К і проводили зварювання по вказаному режиму. Після охолодження зразків у вакуумній камері до температури 313-333 К проводили механічні випробування на зріз. Результати випробувань показали, що міцність зварних з'єднань титану з міддю, отриманих через конденсат титану на 15-20 % більше міцності з'єднань, отриманих безпосередньо на пряму й складає 85-90 МПа [249], [250].

Необхідно відмітити, що зважаючи на обраний згідно літературних джерел тиск зварювання деформація основних матеріалів при цьому складала

більше 5 %. Порівнюючи вплив на якість зварних з'єднань конденсатів із міді, можна зробити висновок, що ефективніше, з точки зору економії електроенергії та часу, є використання саме процесу сублімації. Крім того, умови проведення експерименту, коли спочатку створювали проміжні шари міді, а потім проводили зварювання, не дозволили в повній мірі оцінити ефективність використання сублімованих прошарків, у зв'язку з тим, що сублімовані прошарки при цьому встигають окислитись.

Тож нами був запропонований новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублімовані прошарки, що здійснюється за схемою зображеною на рис. 8.8.



1 – вакуумна камера; 2 – деталі, що зварюються;

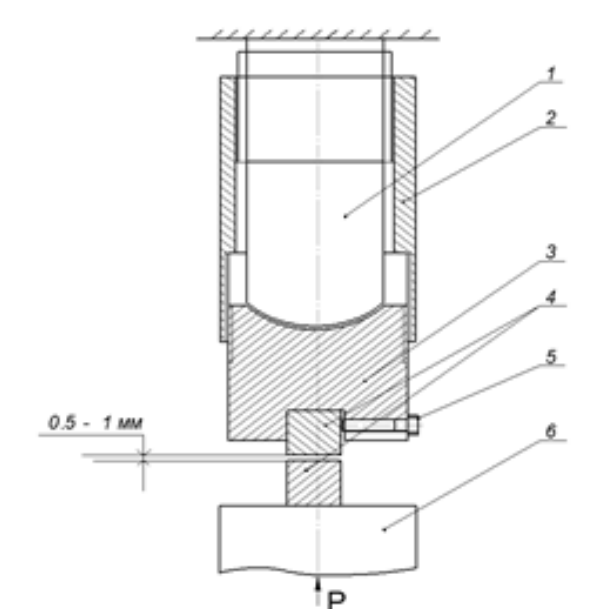
3 – нагрівач; 4 – верхній та нижній штоки

Рисунок 8.8 – Схема ДЗВ різнорідних металів через сублімовані прошарки

Зварні деталі 2 встановлюються та фіксуються за допомогою спеціальної оснастки 4 таким чином, щоб зазор між поверхнями становив 0,5-1 мм. Після герметизації та створення розрідження у робочій камері 1, зібраний вузол нагрівачем 3 нагрівається до температури сублімації одного із матеріалів, що зварюється і після витримки протягом 1-5 хвилин, яка необхідна для прогріву заготовок і проходження процесу сублімації та

конденсації з утворенням тонкого проміжного прошарку, прикладається зусилля зварювання і проводиться дифузійне зварювання [253]. Після зварювання з'єднання охолоджують та виймають із камери. У випадку, коли температура зварювання менше температури сублимації матеріалу, то зусилля зварювання прикладають після зменшення температури до необхідної межі. Представлена схема дозволяє здійснювати дифузійне зварювання через тонкі проміжні прошарки за один цикл в одній робочій камері.

Для реалізації представленої на рисунку 8.8 схеми зварювання була розроблена спеціалізована оснастка (рис. 8.9), що дозволяє проводити попереднє нагрівання заготовок, що зварюються, у розведеному стані з наступним прикладанням зусилля зварювання.



1 – верхній шток; 2 – перехідник; 3 – затискний елемент; 4 – зразки, що зварюються; 5 – затискний гвинт; 6 – нижній шток.

Рисунок 8.9 – Спеціалізована оснастка для ДЗВ різнорідних металів через проміжні активні сублимовані прошарки

Розроблена нова технологія ДЗВ міді з тугоплавкими металами та титаном, яка передбачає:

– збирання заготовок, що зварюються, у вакуумній камері з використанням спеціальної оснастки;

– нагрів заготовок у розведеному стані для створення сублімаційних прошарків;

– процес дифузійного зварювання на режимах: *мідь-тугоплавкі метали (молібден, хром):* $T_{зв}=1223-1243$ К, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1-2 хвилини; $t_{зв}=10$ хвилини; тиск зварювання 1-2 МПа; *мідь-титан:* $T_{зв} = 1123$ К, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1-2 хвилини; $t_{зв} = 10$ хвилини; тиск зварювання 2-3 МПа.

Тиск зварювання був попередньо визначений з метою мінімізації пластичної деформації. Необхідно відмітити, що з врахуванням розміру сублімованих частинок (товщини конденсованого прошарку) порядку 2-5 мкм, поверхні перед зварюванням полірували до 7-го класу шорсткості коли середній розмір мікровиступів не перевищує товщину конденсованого прошарку (рис. 8.10).

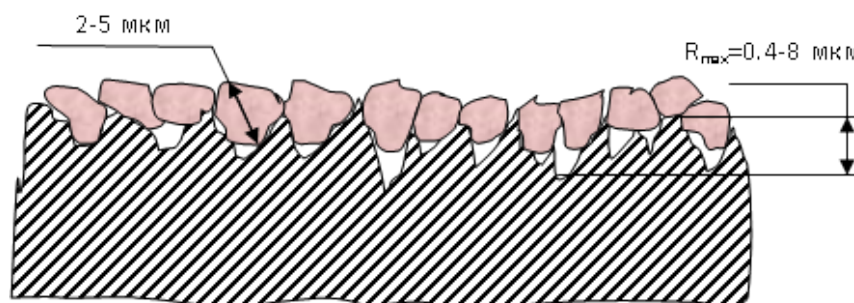


Рисунок 8.10 – Схема розташування сублімованого шару на поверхні при попередньому нагріві різнорідних металів в розведеному стані

Проведено серію експериментів по зварюванню міді з хромом, молібденом та титаном за представленою технологічною схемою з використанням спеціалізованої оснастки (рис. 8.9). Після зварювання проведені металографічні дослідження зварних з'єднань. Вивчення структури перехідної зони з'єднань міді з хромом, молібденом та титаном проводили на не травлених шліфах, виготовлених зі зразків, отриманих ДЗВ на вказаних вище режимах.

Характерний вид зварних з'єднань, отриманих на вказаних режимах

представлено на рис. 8.11, 8.12. Видно, що несучільностей, непроварів і інших дефектів у стику не спостерігається.

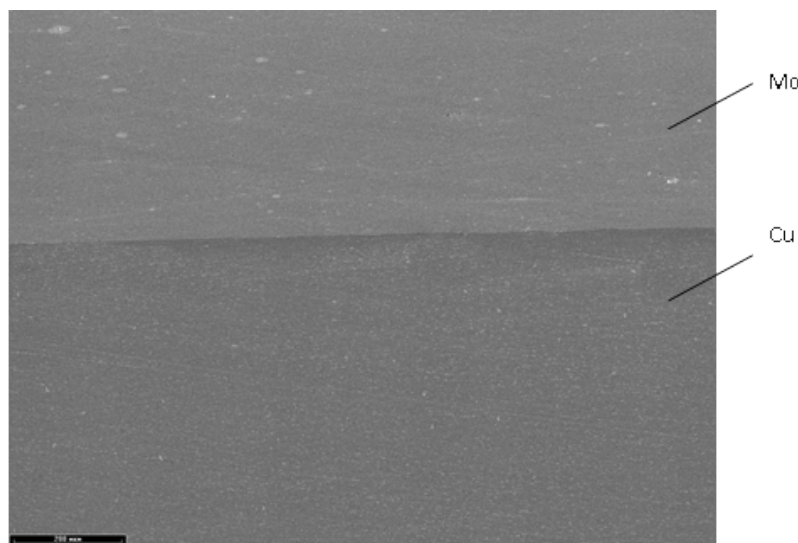


Рисунок 8.11 – Мікроструктура зони з'єднання мідь-молібден (електронна мікроскопія)

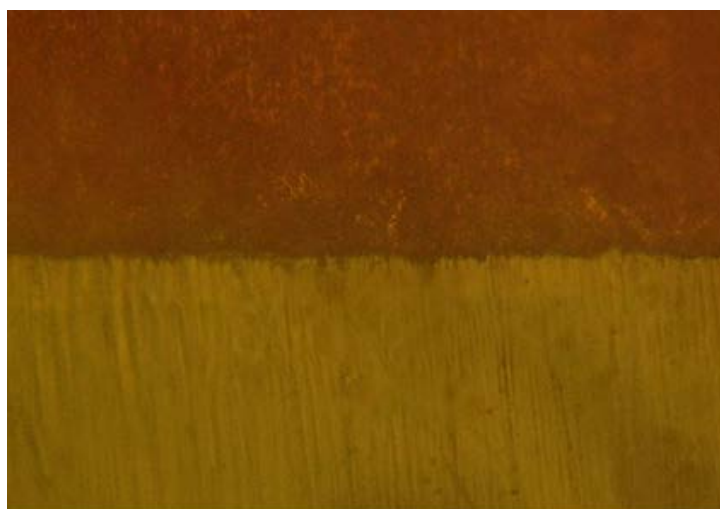
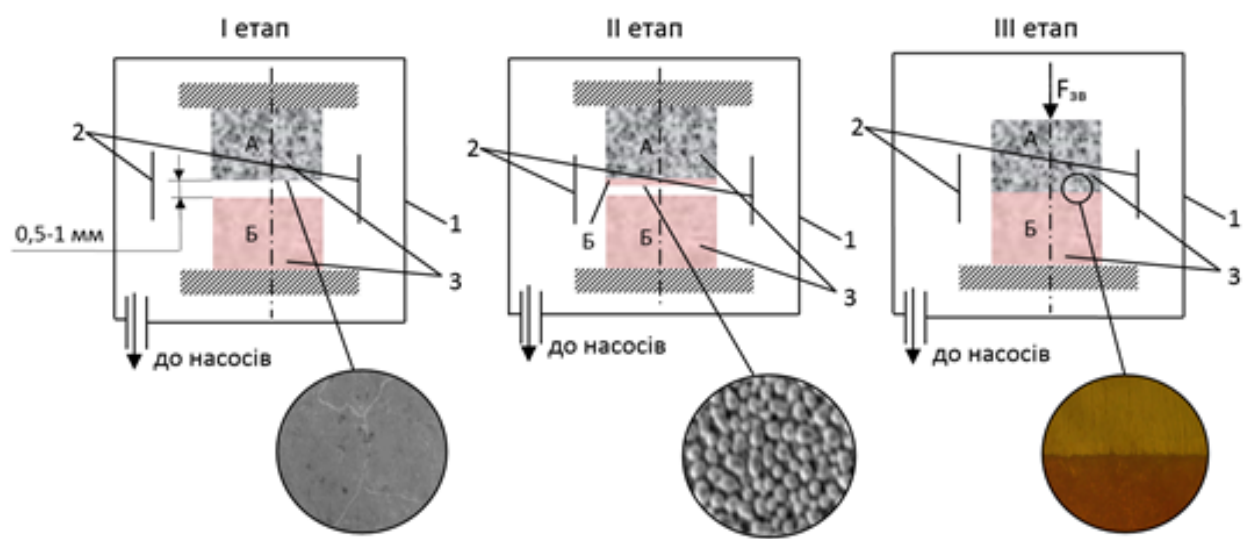


Рисунок 8.12 – Мікроструктура зони з'єднання мідь-титан (оптична мікроскопія) (x100)

Встановлено, що деформація основних матеріалів при зварюванні на вказаних режимах, не перевищує 1%, що відповідає вимогам прецизійності. Механічні випробування на зріз показали, що міцність зварних з'єднань міді з молібденом та хромом при цьому складає 95-100 МПа, що складає 85-90 % від міцності основного матеріалу (міді). Міцність з'єднань міді з титаном складала 80-85 МПа, що складає 73-77 % міцності міді (110 МПа) [254].

Необхідно відмітити, що аналізуючи результати механічних випробувань зварних з'єднань міді з хромом та молібденом, отриманих через шари модифіковані іонною обробкою (100-105 МПа, див. розділ 4), можна зробити висновок, що з економічної точки та складності процесу, більш ефективним для отримання прецизійних з'єднань міді з тугоплавкими матеріалами є саме використання поверхневих фізико-хімічних процесів.

Таким чином, літературний аналіз можливих поверхневих фізико-хімічних процесів при зварюванні тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів, а також отримані експериментальні дані щодо використання таких процесів як засіб активації поверхонь, дозволяє нам запропонувати модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні в твердій фазі за розробленою технологією за рахунок проходження наступних стадій [254]: 1 – самоочищення поверхні від оксидних плівок на стадії попереднього нагрівання заготовок у вакуумі у розведеному стані (внаслідок дисоціації, відновлення та розчинення оксидів); 2 – сублимація одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхні іншого; 3 – утворення на стадії осадки хімічних зв'язків та формування зони об'ємної взаємодії (рис. 8.13).



1 – вакуумна камера; 2 – нагрівач; 3 – деталі, що зварюються

Рисунок 8.13 – Стадії формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском в твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів

Висновки до розділу 8

1. Встановлено, що при зварюванні в твердій фазі міді з тугоплавкими металами та титаном в замкнених герметичних об'ємах в певному температурно-часовому інтервалі проходять процеси автовакуумування, очищення поверхонь зварювання від оксидних плівок, сублімація та конденсація міді на поверхню молібдену, а титану на поверхню міді. Конденсат міді на молібдені представляє собою шар сферичних частинок діаметром порядку 2 мкм, а конденсат титану на міді пористий прошарок товщиною порядку 5 мкм. Показано, що швидкість утворення й розмір часток конденсату залежить від швидкості утворення й ступеня розрідження в герметичному об'ємі, від матеріалів, що обмежують герметичний об'єм, температури й часу нагрівання цього об'єму. Показано, що для одержання конденсованого шару міді товщиною порядку 2 мкм на поверхні молібдену в умовах автовакуумування необхідно 10-15 хвилин (при температурі 1223-1243 К); для одержання конденсованого шару титану на міді – 15-20 хвилин (1113-1123 К).

2. Експериментально встановлено, що у випадку нагрівання у вакуумі негерметичних об'ємів, час необхідний для утворення сублімованих прошарків з одного з контактуючих металів зменшується до 1-3 хвилин, незалежно від природи іншого металу.

3. Встановлено, що міцність зварних з'єднань, отриманих із застосуванням сублімованих прошарків, на 15-20 % більше міцності з'єднань, зварених безпосередньо напряду.

4. Запропоновано новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублімовані активні прошарки, а також модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском в твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів, що включає наступні етапи: 1 – самоочищення поверхні від оксидних плівок на стадії попереднього нагрівання заготовок у вакуумі у розведеному стані; 2 – сублімація одного з

матеріалів з наступною конденсацією на поверхні іншого; 3 – утворення на стадії осадження хімічних зв'язків та формування зони об'ємної взаємодії.

5. Розроблено новий технологічний процес прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі міді з тугоплавкими металами та титаном з використанням спеціалізованої оснастки, яка дозволяє здійснювати зварювання через сублимовані прошарки за один цикл в одній робочій камері. Визначено оптимальні режими зварювання: мідь-тугоплавкі метали (молібден, хром): $T_{зв} = 1223-1243$ К, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1-2 хвилини; $t_{зв} = 10$ хвилин; тиск зварювання 1-2 МПа; мідь-титан: $T_{зв} = 1123$ К, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1-2 хвилини; $t_{зв} = 10$ хвилин; тиск зварювання 2-3 МПа. Показано, що при зварюванні на таких режимах деформація основних матеріалів не перевищує 1 %, а міцність зварних з'єднань міді з молібденом та хромом при цьому становить 95-100 МПа, що складає 85-90 % від міцності міді (110 МПа); міді з титаном – 80-85 МПа, що складає 73-77 % міцності міді.

РОЗДІЛ 9

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ АКТИВАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ

В роботі, на основі аналізу літературних даних (див. табл. 1.3) та проведених досліджень, для отримання прецизійних зварних з'єднань з різних матеріалів, було встановлено ефективність використання існуючих засобів активації: іонної модифікації поверхонь (рис. 9.1, а), електроіскрового легування (рис. 9.1, б) та застосування проміжних наноструктурованих багат шарових прошарків (рис. 9.1, г); а також запропоновано нові засоби активації поверхонь: локалізація теплової та механічної енергії в стику при нагріві імпульсом струму за рахунок використання перфорованих прошарків з матеріалу з високим електричним опором та тонких проміжних прошарків зі зварювального матеріалу (рис. 9.1, в), застосування проміжних наноструктурованих пористих прошарків (рис. 9.1, д), застосування проміжного хімічно активного прошарку евтектичного складу (рис. 9.1, е) та використання поверхневих фізико-хімічних процесів, які відбуваються в контактні різнорідних матеріалів самовільно (рис. 9.1, ж).

Встановлено вплив засобів активації на ступінь пластичної деформації в стику (див. табл. 9.1. та рис. 9.2) та показано, що найбільш оптимальним для прецизійного зварювання тиском однорідних матеріалів є застосування хімічно-активованих шарів, які забезпечують утворення якісних нероз'ємних з'єднань за рахунок хіміко-механічної активації поверхонь. Вибір засобу активації для прецизійного зварювання різнорідних матеріалів залежить від фізико-хімічних та механічних властивостей матеріалів, які з'єднуються.

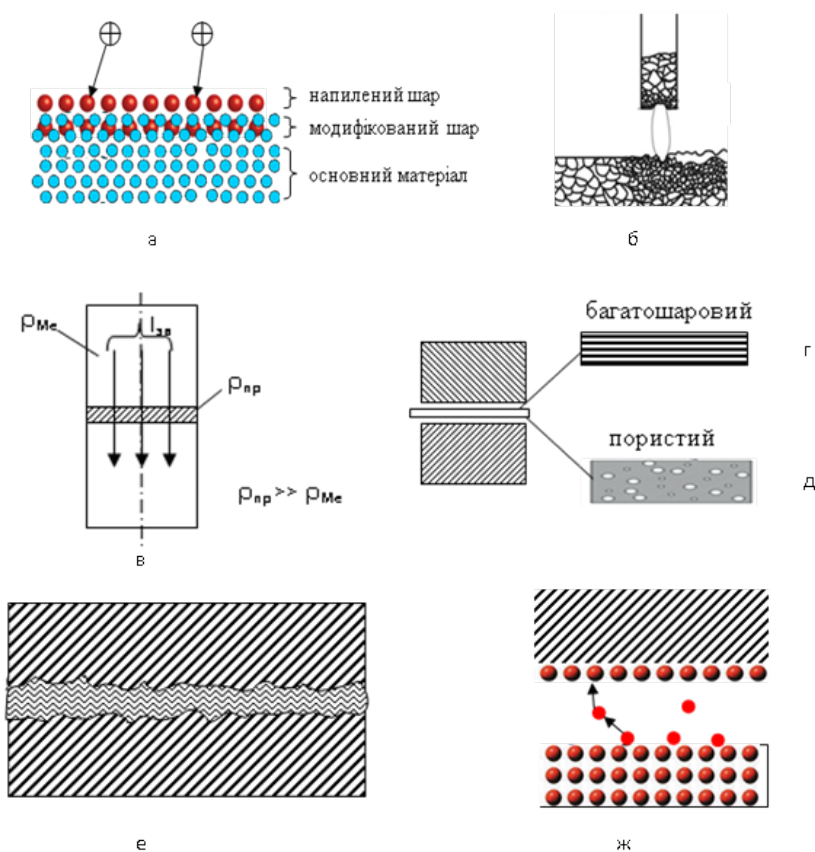
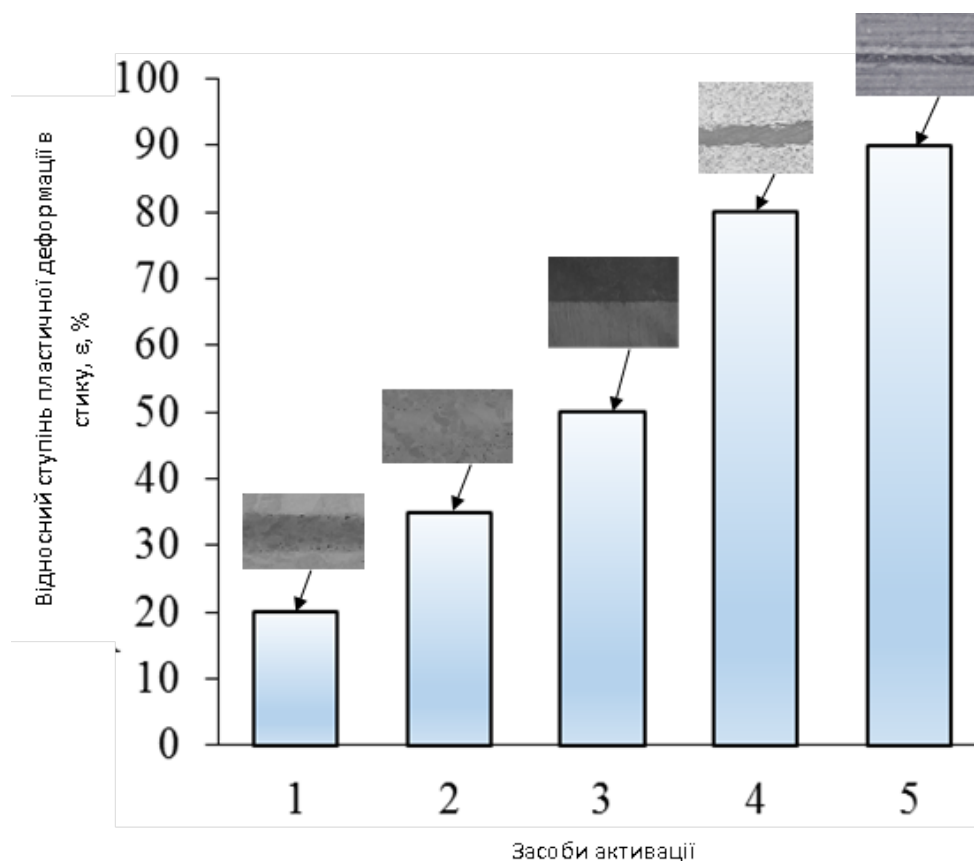


Рисунок 9.1 – Засоби активації, які рекомендується застосовувати для прецизійного зварювання тиском різних матеріалів

Таблиця 9.1 – Вплив засобу активації на рівень пластичної деформації в стику при прецизійному зварюванні тиском

Засіб активації	Вихідна пористість, %	Товщина проміжного шару до зварювання, мкм	Товщина проміжного шару після зварювання, мкм	Ступінь деформації проміжного шару, %	Основний фактор активації
наноструктуровані багатошарові фольги	5-10	30	25	20	хіміко-механічний
наноструктуровані пористі фольги	25-30	40	25	35	механічний
сублимовані прошарки	20-30	2	1	50	механічний
перфоровані прошарки з використанням локалізації енергії в стику	20	200	45	80	термомеханічний
хімічно-активовані шари	—	30	3	90	хіміко-механічний



1 –наноструктуровані багат шарові фольги; 2 – наноструктуровані пористі фольги; 3 –сублімовані прошарки; 4 –перфоровані прошарки з використанням локалізації енергії в стику; 5 –хімічно-активовані шари

Рисунок 9.2 – Вплив засобу активації на рівень пластичної деформації в стику при прецизійному зварюванні тиском

На підставі досліджень здатності до прецизійного зварювання різних однорідних та різнорідних матеріалів з використанням того чи іншого додаткового засобу активації, для кожної пари матеріалів, що відносяться до певної групи основних конструкційних матеріалів (металеві, композиційні, неметалеві) було розроблено рекомендації щодо використання відповідних засобів активації поверхонь, що зварюються (див. табл. 9.2).

Таблиця 9.2 – Рекомендації щодо застосування засобів активації для
прецизійного зварювання тиском різних матеріалів

Матеріал	Засоби активації								
	Модифікація поверхневих шарів		Локалізація енергії в стику		Хімічна активація поверхонь		Застосування проміжних прошарків		Застосування поверхневих фізико-хімічних процесів
	іонна	електро-іскрова	перфоровані прошарки	тонкі фольги	евтектика	активне середовище	пористі	багатошарові	
Al+Al		~		~ ↑	↑				
Cu+Mo(Cr)	≡ ↑								⊠ ↑
Cu+Ti									⊠ ↑
Cu+ Bi ₂ Te ₃							↑<		
ВВКМ+TiAl								↑	
ВК+ВК			≡ ↑<						
Ni-Cr+ Ni-Cr							↑<	↑	
Сталь+Сталь						⊠			

Функції, які виконують засоби активації

- ≡ перетворення тонкого поверхневого шару в пластичний стан
- ~ перетворення тонкого поверхневого шару в рідину
- ⊠ перетворення тонкого поверхневого шару в активний стан (в твердій фазі)
- ↑↓ підвищення дифузійної активності
- || забезпечення фізичного контакту
- < забезпечення зниження параметрів зварювання

Враховуючи отримані результати досліджень створено методологію управління процесом перетворення ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину при прецизійному зварюванні тиском, яка полягає, в першу чергу, у застосуванні відповідних додаткових засобів активації для кожної конкретної пари матеріалів (рис. 9.1, табл. 9.2),

виборі оптимальних режимів зварювання та безпосередньо процес зварювання тиском з обмеженням пластичної деформації основного матеріалу.

Для прецизійного зварювання тиском рекомендовано використовувати наступні засоби активації: *модифікацію поверхневих шарів* – для металевих матеріалів, що суттєво відрізняються за своїми фізико-хімічними та механічними властивостями; *локалізацію теплової та механічної енергії в стику* – для металевих матеріалів з високою тепло та електропровідністю та твердих матеріалів при нагріві імпульсом струму; *хімічну активацію поверхонь* – для матеріалів, які мають на своїй поверхні тверді та тугоплавкі оксидні плівки; *пористі та багатошарові прошарки* – для зварювання важкодеформуємих матеріалів, фольг та різномірних матеріалів; *поверхневі фізико-хімічні процеси, що протікають самовільно* – при зварюванні різномірних металевих матеріалів, один з яких здатний до сублімації.

На основі проведених досліджень була розроблена типова загальна технологія отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском (рис. 9.3).

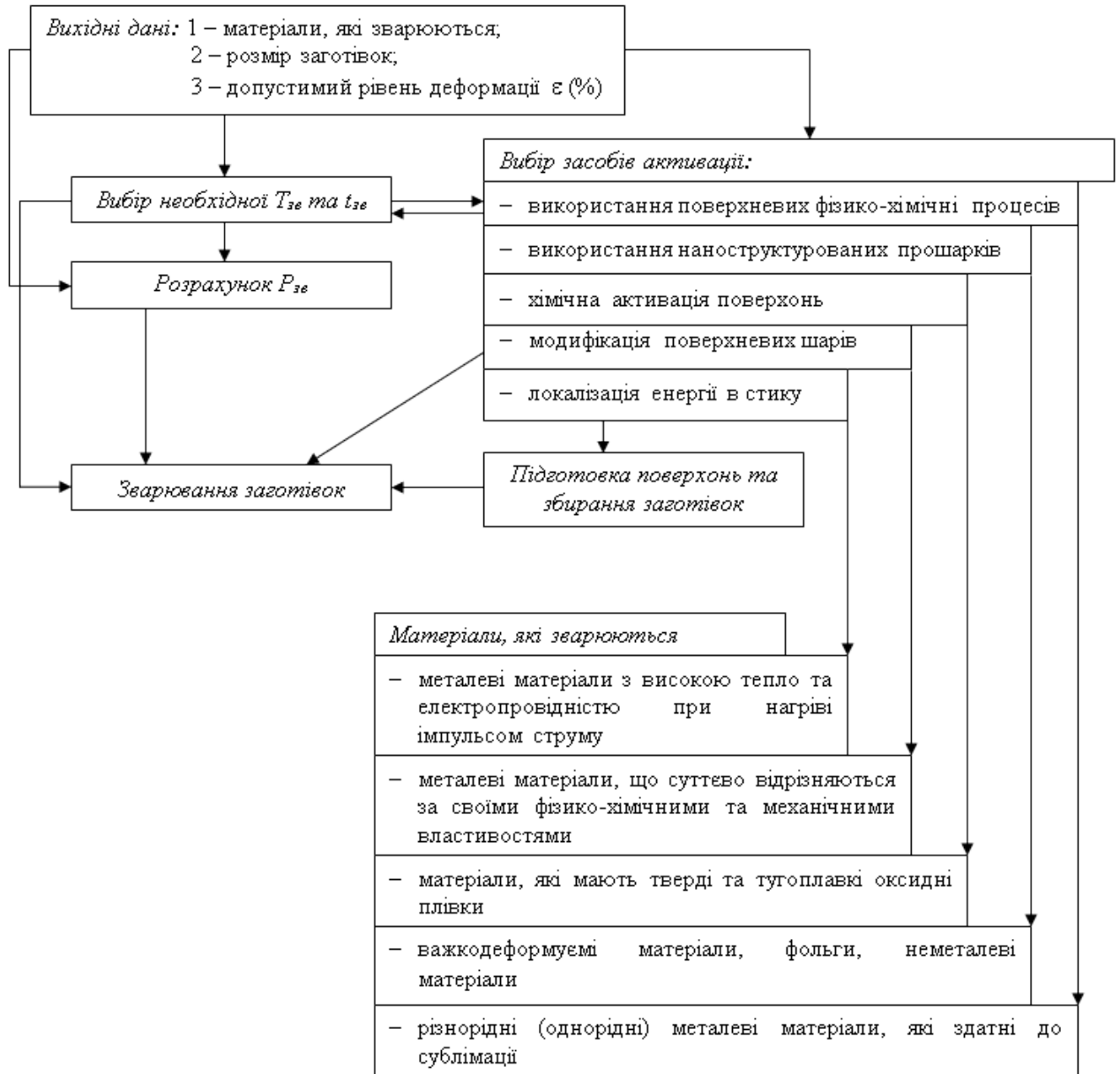


Рисунок 9.3 – Схема типової загальної технології отримання прецизійних нероз'єднаних з'єднань

Основною умовою реалізації прецизійної технології є активація поверхонь в процесі зварювання за рахунок різних засобів вказаних вище. Оптимальні параметри режиму зварювання конкретних прецизійних вузлів визначаються в залежності від властивостей матеріалів та розмірів деталей, які зварюються, від засобів активації поверхонь, які використовуються при зварюванні, а також від допустимого рівня деформації основних матеріалів. Тому основними етапами типової загальної технології прецизійного зварювання тиском є: 1 – підготовка поверхонь перед зварюванням

(механічна обробка, модифікація поверхні); 2 – збирання деталей через хімічно активні прошарки, проміжні наноструктуровані прошарки, ультра тонкі евтектичні фольги або прошарки з матеріалу, що зварюються; 3 – попередня термообробка зразків (за необхідності при дифузійному зварюванні у вакуумі) для забезпечення проходження поверхневих фізико-хімічних процесів (адсорбція, розчинення, очищення від оксидних плівок, сублімація, конденсація) при дифузійному зварюванні; 4 – зварювання тиском (дифузійне або електроконтактне) на оптимальному режимі.

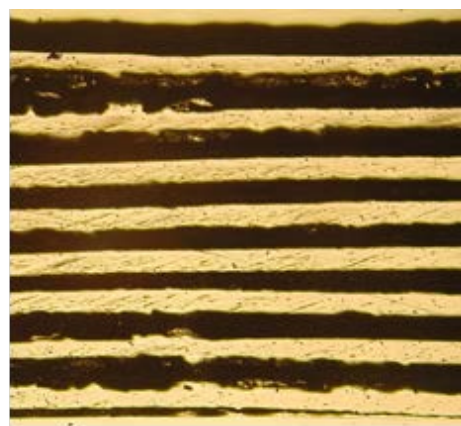
На підставі отриманих результатів було розроблено і реалізовано на підприємствах України низку технологій зварювання тиском.

Для Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (м. Київ) розроблено технологію зварювання тиском *алмазно-твердосплавних пластин з твердим сплавом* (рис. 9.4, а), що використовується при виготовленні ріжучого інструменту. Для локалізації теплової та механічної енергії в стику використовували електроконтактне зварювання через перфоровані прошарки з титану за допомогою спеціалізованого оснащення з наступним дифузійним відпалом. Міцність отриманих з'єднань на 40-45 % більше міцності паяних з'єднань (додаток А).

Для державного науково-випробувального центру Збройних Сил України (м. Чернігів) розроблено технологію виготовлення композитних високоміцних пластин на основі інтерметаліду – алюмініду титану (додаток Б). Застосування при дифузійному зварюванні алюмінію з титаном поверхневих фізико-хімічних процесів (автовакуумування, розчинення, відновлення, змочування), дозволяє забезпечити отримання якісних з'єднань фольг вказаних металів, а наступна термічна обробка – утворення високоміцних інтерметалідних шарів (рис. 9.4, б).



а



б



в

Рисунок 9.4 – Вигляд зварних з'єднань, які отримано за типовою загальною технологією прецизійного зварювання тиском: а – вузол алмазно-твердосплавної пластини збільшеної висоти, шляхом з'єднання з твердим сплавом; б – багатошарове зварне з'єднання титану з алюмінієм (x120, оптична мікроскопія); в – корпусний вузол спеціального призначення з алюмінієвого сплаву АМцМ

Для ПАТ «Чернігівський завод радіоприладів» (м. Чернігів) розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі через проміжний хімічно активний прошарок для виготовлення прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення з алюмінієвого сплаву АМцМ (рисунок 9.4, в). Конструкція вузлів не допускає короблення стінок, що визначає необхідність активації поверхні алюмінію та видалення оксидної плівки за рахунок рідкого металевого прошарку Al-Si. Дослідження зварних з'єднань показали, що розроблена технологія зварювання забезпечує отримання міцності вузлів

на рівні 90% від міцності основного матеріалу, при величині відносної деформації порядку 2% (додаток В). Дану технологію прецизійного зварювання, на прикладі сплавів АД00 та АМг5, було також апробовано під час дослідно-виробничої перевірки на ДП «Харківське державне авіаційне виробниче підприємство», за результатами якої підтверджено можливість застосування розробленого технологічного процесу в авіобудівній галузі (додаток Д).

Крім цього, результати дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес (додаток Е).

Висновки до розділу 9

1. Розроблено рекомендації щодо використання засобів активації поверхонь, що зварюються, для прецизійного зварювання тиском однорідних та різнорідних матеріалів.

2. Створено методологію управління процесом перетворення ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину при прецизійному зварюванні тиском. Показано, що основою забезпечення прецизійності зварних з'єднань є застосування додаткових засобів активації та вибір оптимальних режимів зварювання, що забезпечать обмеження пластичної деформації основного матеріалу.

3. Розроблено типову загальну технологію отримання прецизійних нероз'єднаних з'єднань зварюванням тиском.

4. На підставі отриманих результатів було розроблено і реалізовано на підприємствах України низку технологій зварювання тиском. Результати дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Отримали подальшого розвитку теоретичні основи твердофазного з'єднання. Розроблені наукові основи та закономірності формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском. Встановлено, що основною вимогою для забезпечення прецизійності є перетворення в процесі зварювання ультратонкого поверхневого шару в пластичний стан або рідину за рахунок локалізації енергії в стику, модифікації поверхонь, використання проміжних наноструктурованих прошарків, хімічно активних шарів. Встановлено ефективність використання: *модифікації поверхневих шарів* – для металевих матеріалів, що суттєво відрізняються за своїми фізико-хімічними та механічними властивостями; *локалізації теплової та механічної енергії в стику* – для металевих матеріалів з високою тепло та електропровідністю та твердих матеріалів при нагріві імпульсом струму; *хімічної активації поверхонь* – для матеріалів, які мають на своїй поверхні тверді та тугоплавкі оксидні плівки; *пористих та багатшарових прошарків* – для зварювання важкодеформуємих матеріалів, фольг та різнорідних матеріалів; *поверхневих фізико-хімічних процесів, які протікають самовільно* – при зварюванні різнорідних металевих матеріалів, один з яких здатний до сублімації.

2. Розроблено математичну модель спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності і повзучості для умов високотемпературного стиснення зразків з конкретного металу при їх зварюванні тиском, яка дозволяє оцінити вплив основних факторів на прецизійність зварних з'єднань та обрати оптимальний режим зварювання ($T_{зв}$, $P_{зв}$ та $t_{зв}$). Розроблено методику розрахунку, що дозволяє на основі вихідних даних про матеріал деталі, що зварюється; температуру нагріву; допустимий рівень деформації основного матеріалу; отримувати: максимально можливий тиск та час зварювання для забезпечення допустимого рівня деформації. За результатами проведених численних експериментів побудовані діаграми, що дозволяють при різних температурах

зварювання визначати оптимальне співвідношення тиску і часу витримки для досягнення необхідного рівня деформації матеріалів, що з'єднуються. Порівняльний аналіз експериментальних даних та даних отриманих за допомогою розробленої методики показав співпадіння результатів на 90 %.

3. Отримало подальшого розвитку питання модифікації поверхневих шарів металів низько енергетичною іонною обробкою. Встановлено доцільність для прецизійного зварювання тиском модифікації поверхневих шарів металів низько енергетичною іонною обробкою в плазмі тліючого розряду. Показано, що при дифузійному зварюванні різнорідних металевих матеріалів наявність модифікованого поверхневого шару сприяє збільшенню ширини дифузійної зони при зварюванні у 1,5-2 рази та підвищенню міцності зварного з'єднання на 15-40%. Вдосконалено технологію зварювання тиском міді з молібденом та хромом з використанням модифікованих іонною обробкою прошарків.

4. Розроблено новий спосіб зварювання тиском через прошарок, який дозволяє локалізувати температурний і деформаційний вплив на вузьку приконтатну зону. Встановлено, що застосування перфорованого прошарку з матеріалу, що має високий електричний опір дозволяє додатково локалізувати температурне поле та інтенсифікувати мікропластичну деформацію у стику при нагріві імпульсом струму. Показано, що при використанні проміжного прошарку з титану, температура в контакті твердих сплавів в 2 рази більша, ніж при електроконтактному нагріві твердих сплавів напряду, при інших рівних умовах. Визначені оптимальні параметри режиму зварювання в твердій фазі вольфрамокобальтових твердих сплавів з нагрівом імпульсом струму: $j = 330-350 \text{ А/мм}^2$, $\tau = 0.10-0,12 \text{ с}$, $P = 8-10 \text{ МПа}$, зварювання на яких забезпечує міцність зварного з'єднання на рівні 480 МПа, що на 30-35 % перевищує міцність паяних з'єднань. Встановлено, що дифузійний відпал підвищує міцність з'єднань на 15 % у порівнянні з міцністю після електроконтактного зварювання.

5. Запропоновано модель утворення зварюваного з'єднання твердих сплавів через перфорований прошарок титану. Модель припускає проходження двох етапів: на I-му етапі при електроконтактному нагріві відбувається пластична деформація прошарку на рівня 70-80 %, поверхні схоплюються за рахунок фізичної та хімічної взаємодії; на II-му етапі при термообробці відбувається рекристалізація матеріалу прошарку, релаксація залишкових напружень та збільшення зони об'ємної взаємодії.

6. Вперше встановлено, що ефективним засобом локалізації теплової енергії в стику та активації поверхонь при електроконтактному зварюванні є використання тонких прошарків зі зварювального матеріалу. Розроблено новий засіб активації поверхонь при електроконтактному точковому та стиковому зварюванні опором. Встановлено, що застосування проміжних тонких прошарків із зварювального матеріалу при електроконтактному зварюванні дозволяє локалізувати теплову енергію в стику та підвищити прецизійність зварних з'єднань. Показано, що міцність зварних з'єднань з алюмінієвих сплавів отриманих електроконтактним точковим та стиковим зварюванням опором на оптимальному режимі через проміжний багат шаровий прошарок з алюмінію складає 95-100% міцності основного металу. При цьому деформація основного матеріалу не перевищує 2 % товщини деталі.

7. Отримало подальшого розвитку дослідження процесу хімічної активації поверхонь. Вдосконалено технологічний процес видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні за рахунок використання нових засобів створення рідких металевих прошарків Al-Si. Встановлено, що видалення оксидної плівки з поверхні алюмінію та його сплавів й утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні відбувається при змочуванні контактуючих поверхонь рідким металевим прошарком Al-Si, що виникає при виділенні вільного Si при попередньому введенні в контакт

суміші складу $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ або у вигляді напиленого шару Si на алюмінієву фольгу.

8. Розроблено спосіб дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів з використанням проміжного хімічно активного прошарку, який дозволяє отримати з'єднання деталей з алюмінію та його сплавів з міцністю при випробуванні на зріз, що складає 90 % від міцності основного матеріалу, при величині відносної деформації порядку 2 %.

9. Розроблено новий метод хімічної активації поверхонь та технологічні рекомендації щодо його застосування для прецизійного зварювання тиском вуглецевих сталей. Вперше встановлено, що отримання прецизійного зварного з'єднання ($\epsilon \leq 1\%$) при зварюванні тиском у твердій фазі сталі 45 визначається механічною підготовкою стикуємих поверхонь, параметрами процесу (температура, тиск і час) і наявністю проміжного шару вуглеводневої суміші, що наноситься до зварювання на поверхні.

10. Встановлено ефективність використання багат шарової та пористої фольги при зварюванні важкодеформуємих та напівпровідникових матеріалів. Показано, що при дифузійному зварюванні у вакуумі вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу з алюмінідом титану та жароміцного нікелевого сплаву використання багат шарових фольг Ti/Ni, Ti/Cu та Al/Ni, відповідно, забезпечує формування якісних зварних з'єднань, коли у випадку зварювання цих матеріалів напряду з'єднання взагалі не утворюється.

11. Розроблено спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через суцільний прошарок у вигляді фольги з пористістю 15...30%. Встановлено, що використання пористої фольги дозволяє зменшити температуру зварювання на 30-35 % у порівнянні зі зварюванням без прошарку, що має визначальне значення для прецизійного зварювання тиском. Показано, що застосування пористого прошарку з міді при зварюванні сплаву жароміцного нікелевого сплаву дозволяє отримати з'єднання з міцністю 78 % від міцності основного матеріалу. Показано, що міцність зварного з'єднання напівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з міддю отриманого через пористу

фольгу з нікелю складає 10 МПа, що в 2 рази більше у порівнянні зі з'єднаннями отриманими напряду.

12. Отримало подальшого розвитку дослідження поверхневих фізико-хімічних процесів (адсорбція, автовакуумування, розчинення, самоочищення від оксидних плівок, сублімація та конденсація). Встановлено ефективність використання поверхневих фізико-хімічних процесів, які протікають самовільно, як засіб активації поверхонь, що зварюються при обмеженні рівня пластичної деформації. Показано, що у випадку нагрівання у вакуумі негерметичних об'єктів, час необхідний для утворення сублімованих прошарків з одного з контактуючих металів зменшується до 1-3 хвилин, незалежно від природи іншого металу. Встановлено, що міцність зварних з'єднань, отриманих із застосуванням сублімованих прошарків, на 15-20 % більше міцності з'єднань, зварених безпосередньо напряду.

13. Розроблено новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублімовані активні прошарки, що передбачає попередній нагрів заготовок у розведеному стані для створення сублімаційних прошарків та безпосередньо процес дифузійного зварювання. Показано, що міцність зварних з'єднань, отриманих за даною технологією, міді з молібденом та хромом складає 91-95 % від міцності основного матеріалу, а міді з титаном – 73-77 %. При цьому деформація основних матеріалів не перевищує 1 %.

14. Запропоновано модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні в твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів за рахунок проходження наступних стадій: 1 – самоочищення поверхні від оксидних плівок на стадії попереднього нагріву заготовок у вакуумі у розведеному стані (внаслідок дисоціація, відновлення та розчинення оксидів); 2 – сублімація одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхні іншого; 3 – утворення на стадії осадки хімічних зв'язків та формування зони об'ємної взаємодії.

15. Розроблено типову загальну технологію отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань металевих матеріалів зварюванням тиском, яка включає: розрахунок параметрів зварювання за допомогою розробленої методики, вибір та застосування одного з засобів активації поверхонь та безпосередньо процес зварювання. На основі результатів проведених досліджень розроблено і реалізовано на підприємствах України низку технологій дифузійного та електроконтактного зварювання, які забезпечили отримання зварних з'єднань, які задовольняють технологічним вимогам виробництва, що підтверджено актами дослідно-промислової перевірки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] К. К. Хренов, Б. И. Костецкий, и Г. П. Сахацкий, *Холодная сварка металлов сдвигом*. Киев: Издательство Академии наук УССР, 1954.
- [2] Г. П. Сахацкий, *Технология сварки металлов в холодном состоянии*. Киев: Наукова думка, 1979.
- [3] А. В. Марадудин, *Дефекты и колебательный спектр кристаллов*. Москва: Мир, 1968.
- [4] Г. В. Конюшков, и Ю. В. Копылов, *Диффузионная сварка в электронике*. Москва: Энергия, 1979.
- [5] А. В. Люшинский, *Диффузионная сварка разнородных материалов: учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений*. Москва, Россия: Издательский центр «Академия», 2006.
- [6] Ю. Л. Красулин, и М. Х. Шоршоров, «О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии», *Физика и химия обработки материалов*, № 1, с. 89–97, 1967.
- [7] Ж. Бенар, *Окисление металлов*. Т.1. Пер. с французского. Москва: Металлургия, 1967.
- [8] Э. С. Каракозов, *Сварка металлов давлением*. Москва: Машиностроение, 1986.
- [9] Н. Б. Демкин, *Контактирование шероховатых поверхностей*. Москва: Наука, 1970.
- [10] И. А. Биргер, и Р. Р. Мавлютов, *Сопротивление материалов: учебное пособие*. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
- [11] Б. С. Касаткин, и Г. Н. Кораб, «Формирование соединения при сварке без оплавления», *Автоматическая сварка*, № 4, с. 33-36, 1967.
- [12] В. А. Патрашев, и Н. Ф. Казаков, «Механизм восстановления оксидных пленок при диффузионном соединении металлов с графитом», в *Диффузионное соединение в вакууме*. Москва: Проблемная лаборатория диффузионной сварки в вакууме, 1971, с. 23-32.

- [13] Э. С. Каракозов, и М. Х. Шоршоров, «О понятии энергии активации топохимической реакции в твердой фазе», *Физика и химия обработки материалов*, № 4, с. 94-100, 1971.
- [14] С. М. Гуревич, *Сварка химически активных и тугоплавких металлов*. Москва: Машиностроение, 1982.
- [15] В. А. Бачин, и др., *Теория, технология и оборудование диффузионной сварки: Учебник для вузов*. Москва: Машиностроение, 1991.
- [16] Р. А. Мусин, В. Н. Анциферов, и В. Ф. Квасницкий, *Диффузионная сварка жаропрочных сплавов*. Москва: Металлургия, 1979.
- [17] К. А. Кочергин, *Сварка давлением*. Ленинград: Машиностроение, 1972.
- [18] В. Б. Стычинский, и С. Д. Бешелев, *Предупреждение образования окалины и методы очистки деталей*. Москва: Машиностроение, 1964.
- [19] Е. М. Савицкий, и Г. С. Бурханов, *Металловедение сплавов тугоплавких металлов*. Москва: Наука, 1971.
- [20] Б. Б. Гуляев, О. Н. Магницкий, и А. А. Демидов, *Литье из тугоплавких металлов*. Москва-Ленинград: Машиностроение, 1964.
- [21] В. Ф. Квасницкий, «О возгонке поверхностных пленок при соединении жаропрочных сплавов в твердом состоянии в вакууме», *Труды НКИ им. С. О. Макарова, Технология судостроения и сварочного производства в судостроении*, вып. 45, 1971.
- [22] А. А. Шмыков, «Закономерности взаимодействия контролируемых атмосфер с металлами», *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 5, с. 54-65, 1967.
- [23] А. А. Шмыков, В. Г. Хорошайлов, и Е. Л. Гюлиханданов, *Термодинамика и кинетика процессов взаимодействия контролируемых атмосфер с поверхностью стали*. Москва: Металлургия, 1991.
- [24] В. Т. Слепуха, «Образование поверхностей, свободных от оксидных пленок при диффузионной сварке в вакууме», *Сварочное производство*, № 5, С. 30-40, 1965.

- [25] Г. В. Соколова, и С. Ф. Юрьев, «Взаимодействие ниобия с газами при высоких температурах и низких давлениях (обзор литературы)», *Металловедение*, № 14, 1970.
- [26] И. С. Куликов, *Термическая диссоциация соединений*. Москва: Металлургия, 1966.
- [27] Н. Н. Грибов, Ю. И. Звездин, А. И. Мелькер, С. С. Шураков, и В. А. Яковлев, «Испарение и металлические свойства металлических материалов в вакууме (обзор литературы)», *Металловедение*, № 8, 1964.
- [28] С. Дэшман, *Научные основы вакуумной техники*. Пер. с англ. Москва: Мир, 1964.
- [29] В. И. Рымарь, С. Н. Лоцманов, В. М. Радзиевский, и В. Ю. Чернов, «Взаимодействие марганца, хрома и титана с воздухом в условиях автовакуумного нагрева при пайке», *Сварочное производство*, № 11, С. 6-8, 1973.
- [30] Н. А. Аникеев, Я. Б. Гуревич, И. М. Павлов, А. В. Крупин, и В. Л. Оржеховский, «Масс-спектрометрический анализ газов при прокате в вакууме», *Известия ВУЗов. Черная металлургия*, № 7, С. 61-67, 1969.
- [31] Д. Коллинз, и К. Тернбалл, «Термическое обезгаживание электровакуумных материалов», на *5-й национальной конференции по технике электронных ламп*. Москва, 1963.
- [32] А. С. Гельман, М. С. Барышев, «О взаимодействии сталей с газами в условиях автовакуумного нагрева при сварке», *Сварочное производство*, № 5, С. 9-11, 1971.
- [33] Н. А. Аникеев, Я. Б. Гуревич и др., «О кинетике выделения газов при прокатке в вакууме», *Физика и химия обработки материалов*, № 12, С. 52-61, 1970.

- [34] Г. В. Скибина, «Исследование газоотделения нержавеющей сталей в динамическом высоком вакууме», автореф. дис. канд. наук, МВТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 1970.
- [35] С. Норман, «Усовершенствования в области сварки металлов», англ. патент, кл. 83(с) В23к, № 919031, 1963.
- [36] А. П. Семенов, *Схватывание металлов*. Москва: Машгиз, 1958.
- [37] П. С. Вадило, *Кристаллизация металлов*. Москва: Металлургия, 1964.
- [38] А. Я. Борисов, Г. В. Ильина, и Ю. В. Соломко, «Исследование испаряемости нержавеющей сталей и никелевых жаропрочных сплавов в вакууме при высоких температурах», *Металловедение*, № 9, с. 124-131, 1965.
- [39] D. S. Duvall, W. A. Owczarski, D. F. Paulonis, and W. H. King, «Methods for Diffusion Welding the Superalloy Udimet 700», *Welding Research Supplement*, Vol. 2. pp. 41–49, 1972.
- [40] С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, и др., «Самоочистка от оксидов стыкуемых поверхностей при сварке в твердой фазе с нагревом», *Автоматическая сварка*, № 2, с. 16 – 23, 1998.
- [41] А. С. Гельман, *Основы сварки давлением*. Москва: Машиностроение, 1970.
- [42] Н. Ф. Казаков, и А. Г. Браун, «Интенсификация процесса диффузионной сварки путем применения порошковых промежуточных прокладок», *Автоматическая сварка*, № 10, с. 67-69, 1982.
- [43] Д. М. Рабин, *Сварка разнородных металлов*. Москва: Техника, 1975.
- [44] Н. Ф. Казаков, *Диффузионная сварка материалов*. Москва: Энергия, 1976.
- [45] Р. А. Мусин, и Г. В. Конюшков, *Соединение металлов с керамическими материалами*. Москва: Машиностроение, 1991.
- [46] И. И. Метелкин, М. А. Павлова, та Н. В. Поздеева, *Сварка керамики с металлами*. Москва: Металлургия, 1977.

- [47] Т. В. Шевчук, Г. К. Харченко, и Э. С. Каракозов, «Образование соединения при ударной сварке в вакууме (Аналитический обзор)», *Автоматическая сварка*, № 12, с. 31-35, 1981.
- [48] Л. И. Маркашова, В. В. Арсенюк, и Г. М. Григоренко, «Особенности пластической деформации разнородных материалов при сварке давлением», *Автоматическая сварка*, № 5, с. 12-16, 2002.
- [49] О. А. Кайбышев, Р. А. Лутфуллин, и В. К. Бердин, «Природа формирования твердофазного соединения в состоянии сверхпластичности», *Физика металлов и металловедение*, № 1, с. 136-143, 1993.
- [50] В. В. Квасницький, «Дифузійне зварювання з керованим напружено-деформованим станом та модифікуванням поверхонь з'єднання», автореф. дис. д-ра техн. наук, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ, 2010.
- [51] Н. Н. Хоменко, «Сварка давлением диэлектриков с металлами в электрическом поле», *Автоматическая сварка*, № 6, с. 62-63, 1983.
- [52] Н. Н. Хоменко, и О. В. Гнатюк, «Свойства стеклокремниевое соединения, полученного сваркой в электрическом поле высокого напряжения», *Сварочное производство*, № 12, с. 22, 1982.
- [53] К. Е. Чарухина, и В. И. Григорьевский, *Сварочное производство*, № 10,11, 1979.
- [54] Кавано Акиоми, и Хатано Кадзуеси, япон.заявка, кл. 12 В 4 (В 23 К 19/00) № 54-2956, Заявл. 10.06.1977, № 52-67875, Оpubл. 10.01.1979.
- [55] D. Billard, and J. P. Trottier, «Original HCl surface treatment for diffusion bonding of nickel superalloy specimens», *Metals Technology*, vol. 5, № 9, с. 309-319, 1978.
- [56] Ю. Б. Малевский, Л. И. Маркашова, и В. С. Несмих, «Влияние структуры поверхностных слоев на образование соединения в твердой фазе», *Автоматическая сварка*, № 12, с. 29-32, 1970.

- [57] Л. И. Маркашова, и Ю. Б. Малевский, «Особенности диффузии при сварке без расплавления», *Автоматическая сварка*, № 10, с. 9-12, 1975.
- [58] Б. Н. Золотых, М. М. Якушкин, Н. Ф. Казаков, и А. В. Сергеев, *А.с.616089*, Заявл. 12.03.1976, кл. В 23 К19/00, СССР, № 2333436, Опубл. 07.07.1978.
- [59] Б. Р. Лазаренко, и др., *Электроискровая обработка металлов*, Труды ЦНИЛ – Электром. Москва: Изд-во АН СССР, Вып. 1, 1957.
- [60] С. Н. Химухин, «Разработка научных основ формирования изменённого слоя на металлах и сплавах с заданными свойствами при низковольтной электроискровой обработке», автореф. дис. д-ра техн. наук, КНАГТУ, Комсомольск-на-Амуре, 2009.
- [61] С. Намба, *Технология ионного легирования*. Перевод с японского, Москва: Сов. радио, 1974.
- [62] Е. В. Рябченко, «Применение тлеющего разряда для диффузионного насыщения металлов», в *Труды Московского авиационного института*, Москва: МАИ, 1971, С. 65-80.
- [63] Г. П. Болотов, «Фізико-технічні та технологічні основи застосування розподіленої газорозрядної плазми для дифузійного зварювання та паяння», автореф. дис. д-ра техн. наук, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ, 2007.
- [64] В. А. Лабунов, В. Е. Борисенко, и В. А. Ухов, *Электронная техника. Сер.6: Материалы*, вып. 11, с. 72, 1977.
- [65] Masaya Iwaki, Susumu Namba, Kiyota Yoshida, Norimune Soda, Ken-ichi Yukawa1 and Taiichi Sato, «Concentration Profiles of Nickel and Chromium Implanted in Mild Steel», *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 16, № 8, p. 1475-1477, 1977.
- [66] S. B. Agarwal, Y. F. Wang, C. R. Clayton, H. Herman, and J. K. Hirvonen, «Interpretation of electrochemical behavior of nickel-implanted type-430 stainless steel using x-ray photoelectron spectroscopy and transmission electron microscopy», *Thin Solid Films*, vol. 63, p. 19-25, 1979.

- [67] Y. F. Wang, C. R. Clayton, G. K. Hubler, W. H. Lucke, and J. K. Hirvonen, «Applications of ion implantation for the improvement of localized corrosion resistance of M50 bearing steel», *Thin Solid Films*, vol. 63, p. 11-18, 1979.
- [68] H. H. Andersen, «The depth resolution of sputter profiling», *Applied Physics*, vol. 18, p. 131-140, 1979.
- [69] B. Y. Tsaur, S. Matteson, G. Chapman, Z. L. Lian, and M-A. Nicolet, «Depth dependence of atomic mixing by ion beams», *Applied Physics Letters*, vol. 35, p. 825, 1979.
- [70] B. Y. Tsaur, S. S. Lau, L. S. Hung, and J. W. Mayer, «Microalloying by ion-beam mixing», *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 182-183, part 1, p. 67-77, 1981.
- [71] О. А. Бакши, «О напряженном состоянии мягких прослоек в сварных соединениях при растяжении (сжатии)», *Вопросы сварочного производства: Тр. Челяб. Политехн. ин-та*, № 33, с. 5-26, 1963.
- [72] Я. В. Лямин, «Разработка методов интенсификации процесса диффузионной сварки и повышения прочности металл-керамических соединений», автореф. дис. канд. техн. наук, Перм. гос. техн. ин-т, Пермь, 1998.
- [73] О. О. Новомлинець, «Розробка технології дифузійного зварювання у вакуумі хрому з міддю», автореф. дис. канд. техн. наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, Київ, 2003.
- [74] Г. К. Харченко, В. В. Арсенюк, Ю. В. Фальченко, та О. О. Новомлинець, «Зварювання тиском алюмінію з міддю (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 22, С. 81–90, 2005.
- [75] Н. Ф. Казаков, А. В. Сергеев, «Диффузионная сварка алюминиевых сплавов», *Актуальные проблемы сварки цветных металлов*, Киев, Наукова думка, 1985, с. 172–174.

- [76] В. В. Квасницкий, *Специальные способы сварки: Учебное пособие*. Николаев: УДМТУ, 2003.
- [77] В. А. Бачин, *Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами*. Москва: Машиностроение, 1986.
- [78] С. Э. Шлифер, В. П. Анюков, и А. Г. Браун, «Исследование экзоэлектрического эффекта при соединении германия и кремния со стеклом в электростатическом поле», на *XII Всесоюзной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития диффузионной сварки»*, Москва, 1987, с. 124-129.
- [79] С. В. Авакян, и Н. Ф. Лашко, *Журнал физической химии*, т. 23, вып. 3, с. 316-323, 1949.
- [80] С. В. Лашко-Авакян, и Н. Ф. Лашко, *Металловедение сварки*. Москва, «Машгиз», 1953.
- [81] И. П. Добровольский, Б. А. Карташкин, и М. Х. Шоршов, в *Физико-химические исследования в металлургии и металловедении с применением ЭВМ*. Москва: «Наука», 1974, с. 48-55.
- [82] Н. Ф. Лашко, и С. В. Лашко, *Пайка металлов*. Москва: «Машиностроение», 1977.
- [83] Б. Е. Патон, А. Я. Ищенко, и А. И. Устинов, «Применение нанотехнологии неразъемного соединения перспективных легких металлических материалов для аэрокосмической техники», *Автоматическая сварка*, № 12, с. 5-12, 2008.
- [84] В. А. Поздняков, и А. М. Глезер, «Структурные механизмы пластической деформации нанокристаллических материалов», *Физика твердого тела*, том 44, вып. 4, с. 705–710, 2002.
- [85] Б. А. Мовчан, «Неорганические материалы, осаждаемые из паровой фазы в вакууме», в *Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. Збірка праць*. Київ: Наукова думка. 1998, с. 318-332.

- [86] М. Д. Банов, В. В. Масаков, и Н. П. Плюснина, *Специальные способы сварки и резки : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования*. Москва: Издательский центр «Академия», 2009.
- [87] Moritz Wolfram, und Mehlhorn Herbert, «Verfahren und Vorrichtung zum Diffusionsschweißen mit Zwischenschichten», «Способ и устройство для диффузионной сварки через промежуточные прокладки», Патент 215723, ГДР, Заявл. 10.05.83, N 2512602, МКИ В23 К 20/02, опубл. 21.11.84.
- [88] Г. В. Конюшков, и Р. А. Мусин, *Специальные методы сварки давлением. Учебное пособие*. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009.
- [89] В. Ш. Авагян, «Разработка технологии и аппаратуры получения сварных длинномерных медных волноводов», автореф. дис. канд. техн. наук, ИЭС им. Е.О. Патона, Київ, 1994.
- [90] Иноуэ Киёси, «Способ сварки материалов с низким сопротивлением тепловым ударам», япон. патент, кл. 12В4, № 19981, заявл. 6.05.67, опубл. 28.08.69.
- [91] Танакоги Тацуро, и др., «Способ сварки давлением стальных деталей», япон. патент, кл. 12В4, № 24829, заявл. 11.11.65, опубл. 28.11.67.
- [92] Тацумото Хицэкиса, «Способ изготовления металлических контактов», япон. патент, кл. 59 С3, № 44274, заявл. 10.04.69, опубл. 8.11.72.
- [93] Pegoud Joseph, «Procédé de liaisons métallurgiques entre pièces réalisées en magnésium ou en alliager de magnésium et pièces en métaux ou alliager à point de fusion élevé. [Soc. Industrielle de Combustible Nucléaire]», франц. патент, кл. В 23к 35/00, № 2076383, заявл. 13.01.70, опубл. 15.10.71.
- [94] Hoppin George S., Yount Reed E., Berry Thomas F., and Barker James F., «Diffusion bonding of superalloy members. [General Electric Co.]», пат. США, кл. 29-487 (В 23к 31/02), № 3632319, заявл. 11.07.69, опубл. 04.01.72.

- [95] Miyazaki Kunio, Tamamura Takeo, and Ochiai Izumi, «Pressure joining method for aluminum and copper pipes utilizing eutectic reaction», *ИВ, Док. № IA-298-80, I-GT-DIF. 04-08. S. I.*, 1980.
- [96] Миядзаки Кунио, Тамamura Такэо, Сакадзука Томио, Судзуки Хитоси, и Отиан Идзуми, «Способ диффузионного соединения деталей из разнородных металлов», япон. заявка, кл. 12 В 134, (В 23 К 19/00), № 54-133450, заявл. 10.04.78, № 53-41186, опубл. 17.10.79.
- [97] Миядзаки Кунио, Тамamura Такэо, Судзуки Хитоси, Отиан Васэн, и Оути Кодзи, «Сварка давлением изделий из алюминия и алюминиевого сплава», япон. заявка, кл. В 23 К 20/00, № 55-57388, заявл. 20.10.78, опубл. 28.04.80.
- [98] Hanink Dean K., «Method of bonding», [General Motors Corp.], пат. США, кл. 29-488, № 3339269, заявл. 15.03.62, опубл. 05.09.67.
- [99] Activated diffusion bonding – a new process from the U. S. A. “Assem. and Fast. Eng.”, 1971, 9, № 11, 43.
- [100] Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев, А. Л. Марченко, и В. А. Сидякин, *Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для машиностроительных вузов*. Москва: Машиностроение, 1986.
- [101] К. А. Кочергин, *Контактная сварка*. Ленинград: Машиностроение, 1987.
- [102] ГОСТ 15878 – 79 "Контактне зварювання. З'єднання зварні. Конструктивні елементи і розміри".
- [103] В. А. Пахаренко, *Зварювання тиском*. Киев: «Екотехнологія», 2011.
- [104] М. А. Федорин, И. М. Соцкая, и П. С. Орлов, «Способ точечной электроконтактной сварки алюминия и его сплавов», *RU 2374049 МПК В 23 К 11/18*, опубл. 27.11.2009.
- [105] Lutz Dorn, *Talat Lecture 4500: Resistance Welding*, Berlin: European Aluminium Association, 1994.

- [106] В. С. Кучук-Яценко, А. В. Лозовская, А. А. Наконечный, и А. Г. Сахацкий, «Контактная сварка алюминиево-стальных переходников с использованием деформируемых композитных прослоек», *Автоматическая сварка*, № 8 (640), с. 46-48, 2006.
- [107] В. М. Клименко, О. П. Шиліна, и А. Ю. Осадчук, *Технологія конструкційних матеріалів. Частина перша. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво. Навчальний посібник*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
- [108] Б. Е. Патон, и Б. И. Медовар, *Многослойная сталь в сварных конструкциях*. Киев: Наукова думка, 1984.
- [109] С. Н. Федоров, В. В. Пешков, и В. В. Шурупов, «Об образовании физического контакта между сталью и титаном в условиях диффузионной сварки», *на рос. научн.-техн. конф. Славяновские чтения (Сварка – XXI век)*, Липецк, 1999, с. 112-115.
- [110] Е. В. Ткаченко, Б. И. Медовар, Г. А. Бойко, и др., «Сублимация никеля в замкнутом пространстве при нагреве», *Проблемы специальной электрометаллургии*, № 2, с. 17-18, 1986.
- [111] А. С. Никитин, «Сублимация химических элементов с поверхностей нагрева в условиях автовакуума», *Сварочное производство*, № 7, с. 18-20, 1998.
- [112] Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, Т. Г. Таранова, О. А. Новомлинец, и Е. В. Половецкий, «Сублимация металлов при нагреве в условиях автовакуума», *Проблемы специальной электрометаллургии*, № 2, с. 50-52, 2002.
- [113] «Aluminum and Aluminum Alloys», *Handbook of Aluminum: Volume 1*, eds. George E. Totten, D. Scott MacKenzie, AMS International, 1993.
- [114] В. М. Белецкий, и Г. А. Кривов, *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник*. Под общей ред. академика РАН И. Н. Фридляндера, Киев: «Коминтех», 2005.

- [115] *Алюминиевые сплавы. Металловедение алюминия и его сплавов: Справочное руководство.* Под общей ред И. Н. Фридляндера. Ленинград: Металлургия, 1971.
- [116] В. Р. Рябов, *Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами.* Киев: Наукова думка, 1983.
- [117] С. М. Гуревич, *Справочник по сварке цветных металлов.* Киев: Наукова думка, 1990.
- [118] А. П. Смирягин, Н. А. Смирягина, и А. В. Белова, *Промышленные цветные металлы и сплавы. Справочник.* Москва: Металлургия, 1974.
- [119] С. Г. Глазунов, и В. Н. Моисеев, *Конструкционные титановые сплавы.* Москва: Машиностроение, 1974.
- [120] А. А. Ильин, Б. А. Колачев, и В. С. Польшкин, *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник.* Москва: ВИЛС – МАТИ, 2009.
- [121] *Конструкционные сплавы хрома. Технология: Сб. научн. тр.* Киев: Наукова думка, 1988.
- [122] Д. Г. Карпачев, Е. Д. Доронькин, С. А. Цукерман, М. Б. Таубкин, А. И. Князева, и Л. И. Клестова, *Тугоплавкие и редкие металлы и сплавы. Справочник.* Москва: Металлургия, 1977.
- [123] Ю. В. Соколкин, А. М. Вотинов, А. А. Ташкинов, А. М. Постных, и А. А. Чекалкин, *Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций.* Москва: Наука, Физматлит, 1996.
- [124] В. И. Костиков, и А. Н. Варенков, *Сверхвысокотемпературные композиционные материалы.* Москва: Интернет Инжиниринг, 2003.
- [125] И. И. Корнилов, «Металлиды – материалы с уникальными свойствами», *Вестник Российской академии наук*, № 12, С. 30 – 33, 1970.
- [126] В. И. Иванов, и К. К. Ясинский, «Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti_3Al $TiAl$ для работы при температурах 600-800 °С в авиакосмической технике», *Технология легких сплавов*, № 3, С. 7 – 12, 1996.

- [127] В. С. Панов, и А. М. Чувилін, *Технология и свойства спеченных сплавов и изделий из них. Учебное пособие для вузов.* Москва, Россия: Мисис, 2001.
- [128] В. С. Самойлов, Э. Ф. Эйхманс, В. А. Фальковский и др., *Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: Справочник.* Редкол.: И. А. Ординарцев (пред.) и др., Москва: Машиностроение, 1988.
- [129] Е. А. Малыгин, М. П. Козорезов, и А. М. Черников, «Исследования термоэлектрических батарей, скоммутированных на основе вакуумных конденсаторов кобальта», *Гелиотехника*, № 3, С. 27 - 31, 1973.
- [130] L. M. Goncalves, C. Couto, P. Alpuim, D. M. Rowe, «Thermoelectric Properties of Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ Thin Films», in *Materials Science Fórum Vols. 514-516*, Switzerland, (May 2006), pp. 156-160.
- [131] Kim Kyung Tae, Lee Hye Moon, Kim Dong Won, Kim Kyong Ju, Ha Gook Hyun, Lee Gil Geun, «Bismuth-telluride Thermoelectric Nanoparticles Synthesized by Using a Polyol Process», *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 57 (41), pp. 1037-1040, 2010.
- [132] ГОСТ 12766.1 «Проволока из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением».
- [133] Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф, и У. К. Хагель, *Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок.* Пер. с англ. В 2-х книгах. Книга 1, Под ред. Шалина Р. Е. Москва: Металлургия, 1995.
- [134] Б. Н. Арзамасов и др., *Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений.* 2-е изд. Москва: Машиностроение, 1986.
- [135] Л. В. Тихонов, В. А. Каноненко, Г. И. Прокопенко, и В. А. Рафаловский, *Механические свойства металлов и сплавов. Справочник.* Киев: Наукова думка, 1986.

- [136] Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, и А. А. Буханова, *Механические свойства титана и его сплавов*. Москва: Металлургия, 1974.
- [137] Ю. Фальченко, Л. Петрушинець, А. Устінов, Т. Мельниченко, О. Новомлинець, та І. Гусарова, «Дифузійне зварювання в вакуумі тонколистового нікелевого сплаву», *Технічні науки та технології*, № 4 (6), С. 87–98, 2016.
- [138] Н. И. Корнеев, С. Б. Певзнер, Е. И. Разуваев, и В. Б. Емельянов, *Обработка давлением тугоплавких металлов и сплавов*. Москва: Металлургия, 1975.
- [139] Б. М. Гольцман, В. А. Кудинов, и И. А. Смирнов, *Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3* . Москва: Изд-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1972.
- [140] А. А. Пустовалов, В. В. Гусев, Л. П. Небера, М. И. Панкин, и Н. Н. Рыбкин, «Термоэлектрические батареи на основе сплавов Bi_2Te_3 с рабочей температурой до $300^\circ C$ », на *VIII Межгосударственном семинаре «Термоэлектрики и их применение»*, С.-Петербург, ФТИ, 2002, с. 357-362.
- [141] Н. Д. Жуков, Н. Ф. Лашко, и М. С. Беляев, «Влияние факторов кристаллизации на выносливость литейных никелевых сплавов», *Проблемы прочности*, № 7, с. 99-105, 1974.
- [142] Л. И. Сорокин, В. И. Лукин, и Ю. С. Багдасаров, «Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов типа ЖСб», *Сварочное производство*, № 6, с. 12 – 17, 1997.
- [143] Я. В. Лямин, и Р. А. Мусин, «Деформируемость перфорированных прокладок при диффузионной сварке», *Сварочное производство*, № 6, с. 24 - 26, 1994.
- [144] Я. В. Лямин, и Р. А. Мусин, «Пластическая деформация при диффузионной сварке разнородных материалов», *Сварочное производство*, № 5, с. 24-29, 2002.

- [145] М. Беккерт, и Х. Клемм, *Способы металлографического травления. 2-е изд.* Москва: Металлургия. 1988.
- [146] С. З. Бокштейн, С. С. Гинзбург, Л. М. Мороз, и С. Т. Кишкин *Электронномикроскопическая автордиография в металловедении.* Москва: Металлургия, 1978.
- [147] А. П. Терновский, «Диффузионная сварка с принудительным деформированием (аналитический обзор)», *Сварочное производство*, № 9, с. 1 - 4, 1988.
- [148] Э. С. Каракозов, А. П. Терновский, и В. Э. Тарлавский, «Диффузионная сварка с принудительным деформированием титанового сплава ВТ6», *Автоматическая сварка*, № 4, с. 25-27, 1979.
- [149] В. К. Лебедев, Г. П. Сахацкий, и Р. М. Широковский, «Контактная стыковая сварка сопротивлением с формированием соединения. Сущность способа и его возможности», в *сборнике научных трудов Контактная стыковая сварка сопротивлением с формированием соединения*, под ред. В. К. Лебедев, Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1988, с. 70.
- [150] В. В. Квасницкий, А. В. Лабарткава, М. В. Матвиенко, Е. Н. Волкодаева, и А. В. Гетманце, «Влияние деформаций ползучести на напряженно-деформированное состояние при диффузионной сварке разнородных материалов», *Збірник наукових праць НУК*, № 6, с. 41-49, 2008.
- [151] В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, и М. В. Матвиенко, «Влияние пластических деформаций на напряжённо-деформированное состояние при диффузионной сварке деталей цилиндрической формы из разнородных материалов», на *Международной конференции «Сварка и родственные технологии в третьем тысячелетии»*, Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2008, с. 138-139.
- [152] В. И. Махненко, и В. В. Квасницкий, «Особенности формирования напряжённо-деформированного состояния соединений разнородных

материалов, полученных диффузионной сваркой», *Автоматическая сварка*, № 8, с. 11-16, 2009.

- [153] В. В. Квасницкий, М. В. Матвиенко, и Г. В. Ермолаев, «Влияние деформаций ползучести на напряженно-деформированное состояние при сжатии в условиях диффузионной сварки разнородных материалов», *Збірник наукових праць НУК*, № 1, с. 98-105, 2009.
- [154] В. Д. Кузнецов, и В. В. Квасницкий, «Роль термомодеформационных процессов и модифицирование поверхностей при диффузионной сварке и пайке с давлением», *Збірник наукових праць НУК*, № 3, с. 111-121, 2009.
- [155] В. И. Махненко, *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев: Наукова думка, 2006.
- [156] О. В. Махненко, О. А. Великоіваненко, О. С. Міленін, Ю. В. Фальченко, та **О. О. Новомлинець**, «Методика розрахунку режимів зварювання тиском для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань», *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, № 5 (235), С. 111–116, 2017.
- [157] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та В. О. Мартиненко, «Дослідження деформаційної кінетики алюмінію при високих температурах», *Технічні науки та технології*, № 2 (2), с. 67–72, 2015.
- [158] Р. Хоникомб, *Пластическая деформация металлов*. Перевод с англ. Москва: Мир, 1972.
- [159] Y. Falchenko, O. Novomlynets, and E. Polovetskyi, «Special features of precision pressure welding of carbon steel with chemical activation of surfaces», *Scientific and educational journal*, Geneve, Switzerland, № 6, P. 65-70, July, 2016.
- [160] ГОСТ 4784-97 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки».

- [161] Я. В. Лямин, Р. А. Мусин, и В. Н. Иванова, «О напряженном состоянии сварных соединений разнородных материалов, полученных диффузионной сваркой», *Автоматическая сварка*, № 9, с. 13–17, 1986.
- [162] Г. В. Ермолаев, и А. В. Лабарткава, «Моделирование полей напряжений в паяных соединениях из разнородных материалов», *Автоматическая сварка*, № 11, с. 17–21, 1999.
- [163] А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, и А. Ф. Смалюк, *ANSYS для инженеров: Справочное пособие*. Москва: Машиностроение-1, 2004.
- [164] И. В. Терешко, О. В. Обидина, В. В. Глущенко, А. М. Терешко, А. А. Руссиян, и И. Е. Елькин, «Проблемы самоорганизации и упрочнения металлов после их низкоэнергетического ионного облучения», на *Международной конференции «Современное материаловедение: достижение и проблемы»*, Киев, ИПМ им. И.Н. Францевича, 2005, с. 33.
- [165] М. Хансен, и К. Андрейко, *Структуры двойных сплавов. Том 2*. Москва: Металлургиздат, 1962.
- [166] Л. Н. Парицкая, «Диффузионные процессы в дисперсных системах», *Порошковая металлургия*, № 11, с. 44–58, 1990.
- [167] V. F. Mazanko, H. K. Kharchenko, T. R. Hanieiev, O. O. Novomlynets, and I. V. Zavalna, «The distinctive features of diffusive interaction of copper and molybdenum at pressure welding through the layers modified by ion-beam processing», *Металлофизика и новейшие технологии*, т. 37, вып. 2, с. 233–241, 2015.
- [168] Г. К. Харченко, О. А. Новомлинец, и Т. Р. Ганеев, «Применение ионной модификации поверхностных слоев при диффузионной сварке в вакууме меди с молибденом», на *8-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия»*, Москва: «МАТИ» - РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2009, с. 290–292.

- [169] Г. П. Болотов, О. А. Новомлинець, Т. Р. Ганеев, и М. Г. Болотов, «Активация и модификация поверхностей металлов в вакууме перед сваркой и пайкой» на *Научно-практическом семинаре «Сварка и родственные процессы в промышленности»*, Киев: Экотехнология, 2006, с. 47–49.
- [170] А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, и В. М. Ревуцкий, *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца, 1985.
- [171] О. О. Новомлинець, та Т. Р. Ганеев, «Розробка технології прецизійного електроконтактного точкового зварювання алюмінію та його сплавів», на *VII науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2013, с. 49.
- [172] О. О. Новомлинець, та П. С. Сластион, «Електроконтактне точкове зварювання алюмінію та його сплавів через проміжні прошарки» на *II міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2012, с. 60-61.
- [173] О. О. Новомлинець, «Прецизійне контактне зварювання алюмінію та його сплавів з використанням проміжних прошарків», на *III международной научно-технической конференции «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития»*, Под общ. ред. д-р техн. наук Н. А. Макаренко, Краматорск: ДГМА, 2012, с. 120–122.
- [174] В. В. Бачин, В. В. Квасницкий, Д. И. Котельников, и др., *Теория, технология и оборудование диффузионной сварки*, Москва: Машиностроение, 1991.
- [175] А. А. Шульженко, *Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Т.1. Синтез алмаза и подобных материалов*. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ "Алкон" НАНУ, 2003.

- [176] Р. К. Богданов, И. А. Свешников, А. П. Загора, С. Д. Заболотный, и А. М. Исонкин, «Исследование и разработка конструкции долот для бурения дегазационных скважин», *Вісті Донецького гірничого інституту*, № 1, с. 46-50, 2010.
- [177] Mehlhorn Herbert, Kleppek Lutz, Hinz Fred, «Anwendungsmöglichkeiten des Diffusionsschweißens. Stahl- und Hartstoffverbindungen», *«Schweiz-technik» (DDR)*, № 4, С. 172-174, 1986.
- [178] *Твердосплавные штампы. Опыт конструирования, изготовления, эксплуатации.* Харьков: Прапор, 1971.
- [179] В. А. Бобровский, и К. О. Каленчян, «Повышение надежности твердосплавного инструмента», *Промышленность Армении*, №8, С. 32-34, 1982.
- [180] В. М. Бакланський, «Розробка технології та обладнання зварювання стисненням у вакуумі алмазно-твердосплавних пластин і кібориту», дис. канд. техн. наук, Приазовський державний технічний університет, Маріуполь, 2006.
- [181] В. Е. Зиновьев, *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах.* Москва: Металлургия, 1989.
- [182] Р. Киффер, и Ф. Бенезовский, *Твердые сплавы.* Перев. с нем. Москва: Металлургия, 1971.
- [183] Y. Falchenko, and O. Novomlynets, «Precision low temperature pressure welding of solid alloys», *Modern Science - Moderní věda*, Praha, Ceska Republika, № 1, (P. II), P. 56-62, 2017.
- [184] О. О. Новомлинець, та М. М. Руденко, «Дослідження впливу матеріалу проміжного прошарку на температурні поля при електроконтактному нагріві твердих сплавів типу ВК», на *I міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2011, С. 122.
- [185] Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, М. М. Руденко, та В. В. Свириденко, «Дифузійне зварювання вольфрам кобальтових

- твердих сплавів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 40, С. 14–17, 2009.
- [186] G. K. Harchenko, O. A. Novomlins, and M. N. Rudenko, «Diffusion Welding of Cobalt Cemented Carbide», in *18th Spanish Technical Sessions on Welding*, Industrial Engineering Madrid, Spain, oct., 2010. [Online]. https://indusnet.etsii.upm.es/gestion_escuela/personal/adjuntos/presentaciones/864.pdf
- [187] Y. Falchenko, O. Novomlynets, I. Prybytko, and M. Rudenko, «The investigation of strain-tension state and diffuse interaction under the pressure welding of cutting alloy», *Scientific and educational journal*, Geneva, Switzerland, № 8, P. 95-101, July, 2017.
- [188] Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, М. М. Руденко, С. В. Олексієнко, І. О. Прибителько, та Ю. В. Фальченко, «Спосіб дифузійного зварювання металевих деталей через прошарок», *Патент на корисну модель № 60407 Україна*, Опубл. 25.06.2011.
- [189] «Спосіб зварювання матеріалів з низьким опором тепловим ударом», *япон. патент, кл. 12В4, №19981*, заявл. 06.05.67, опубл. 28.08.69.
- [190] І. О. Дудла, Т. В. Ганєєва, та О. О. Новомлинець, «До питання щодо використання алюмінію і його сплавів та проблеми їх зварювання (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 42, С. 156–161, 2010.
- [191] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, І. В. Завальна, та Є. В. Половецький, «Прецизійне електроконтактне точкове зварювання металевих матеріалів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 2 (73), С. 104–111, 2014.
- [192] В. Мазанко, О. Новомлинець, С. Олексієнко, та С. Ющенко, «Дослідження процесів масоперенесення у процесі прецизійного електроконтактного зварювання алюмінію», *Технічні науки та технології*, № 2 (8), С. 75–81, 2017.

- [193] С. П. Киселев, и В. П. Киселев, «О механизме сверхглубокого проникания частиц в металлическую преграду», Прикладная механика и техническая физика, Т. 41, № 2, С. 37-44, 2000.
- [194] S. M. Usherenko, O. A. Dibov, and O. I. Koval, «Consideration of Results on superdeep penetration of particles into metallic obstacles», *Journal of Engineering and thermophysics*, vol. 75, № 2, P. 508–512, 2002.
- [195] Н. Mehrer, *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Luxemburg: Springer Science & Business Media, 2007.
- [196] С. І. Сидоренко, О. В. Філатов, и С. М. Волошко, *Аномальне масоперенесення. Закономірності та механізми: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей вищих закладів освіти*. Київ: Політехніка, 2008.
- [197] Д. В. Миронов, В. М. Миронов, Д. С. Герцрикен, и В. Ф. Мазанко, *Массоперенос в металах при действии магнитных полей и импульсных деформаций*. Самара: Самарский университет, 2011.
- [198] Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, Ю. В. Фальченко, та Л. В. Петрушинець, «Спосіб електроконтактного точкового зварювання металевих деталей через прошарок», *Патент на корисну модель № 89671 Україна*, Опубл. 25.04.2014.
- [199] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та Є. В. Половецький, «Прецизійне зварювання тиском алюмінієвих сплавів», *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 67–76, 2017.
- [200] Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, Є. В. Половецький, І. О. Прибитько, та І. В. Нагорна, «Спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок», *Патент на корисну модель № 117001 Україна*, Опубл. 12.06.2017.
- [201] Н. Ф. Лашко, и С. В. Лашко, «Контактно-реактивная пайка», *Сварочное производство*, № 11, с. 34-37, 1969.

- [202] А. М. Никитинский, *Пайка алюминия и его сплавов*. Москва: Машиностроение, 1983.
- [203] Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко, *Контактные металлургические процессы при пайке*. Москва: Металлургия, 1977.
- [204] О. О. Новомлинець, І. М. Крапивний, та Ю. В. Фальченко, «Зварювання тиском алюмінієвих сплавів через рідкі евтектичні прошарки», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 26, С. 105–107, 2006.
- [205] С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та О. О. Новомлинець, «Спосіб прецизійного дифузійного з'єднання алюмінію та його сплавів», *Патент № 94095 Україна*, Опубл. 27.10.2014 р, Бюл. № 20.
- [206] Ю. М. Лахтин, и В. П. Леонтьева, *Металловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. 2-е изд.* Москва: Машиностроение, 1990.
- [207] Н. П. Лякишев, *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Том 1*. Москва: Машиностроение, 1996.
- [208] Н. П. Лякишев, *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Том 3. Кн. 2*. Москва: Машиностроение, 2000.
- [209] С. В. Олексієнко, Р. А. Куликовський, В. О. Мартиненко, та С. М. Ющенко, «Спосіб реактивно-флюсового паяння алюмінію», *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, Запоріжжя, № 2, с. 84-87, 2013.
- [210] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та Т. В. Ганєєва, «Досвід і перспективи виробництва мікроканальних теплообмінників», на *VI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 261–262.
- [211] С. В. Олексієнко, О. А. Новомлинець, І. А. Прибытько, и С. М. Ющенко, «Способ прецизионного соединения алюминия и его сплавов» на *VII науково-технічній конференції молодих вчених і*

- спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2013, С. 50.
- [212] S. V. Oleksiienko, O. O. Novomlynets, and S. M. Yushchenko, «Diffusion bonding technique concerning production of microchannel heat exchangers» in *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2016, P. 57–60. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7493009>.
- [213] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, та С. М. Ющенко, «Способи зварювання тиском алюмінієвих сплавів з обмеженням рівня деформації», in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 371–373.
- [214] Н. Ф. Казаков, «Диффузионная сварка в вакууме стали 45», *Сварочное производство*, № 8, с. 31-34, 1962.
- [215] М. Л. Филькенштейн, *Диффузионная сварка в жидких средах*, Москва: «Металлургия», 1978.
- [216] В. А. Патрашев, и Н. Ф. Казаков, «Восстановление окислов в условиях диффузионной сварки сталей с графитом», на *VII всесоюзной научно-технической конференции*, сб.труд. №6, Москва, 1973, с. 52-61.
- [217] С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, Т. Г. Таранова, и С. Г. Григоренко, «Особенности образования ферритной полосы при сварке стали давлением в вакууме», *Автоматическая сварка*, № 6, с. 11-16, 2000.
- [218] С. Г. Григоренко, «Влияние термомеханических параметров сварки на формирование структуры в зоне соединения низколегированных малоуглеродистых сталей при сварке давлением в вакууме», *Обробка матеріалів у машинобудуванні*, № 1, с. 59-63, 2012.
- [219] Б. Є. Патон, Б. О. Мовчан, А. І. Устінов, Т. В. Мельниченко, та К. В. Ляпіна, «Спосіб одержання покриття з градієнтною пористою структурою», *Патент України №84089*, 2008.

- [220] А. Я. Ищенко, Ю. В. Фальченко, А. И. Устинов, Б. А. Мовчан, Г. К. Харченко, А. Н. Муравейник, Т. В. Мельниченко, и А. Э. Руденко, «Диффузионная сварка микродисперсного композита $AMg5+27\%Al_2O_3$ с применением нанослойной фольги Ni/Al», *Автоматическая сварка*, № 7, с. 5-9, 2007.
- [221] Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, М. М. Руденко, та М. О. Хоменко, «Виникнення електричного потенціалу на поверхні металевих зразків при високотемпературному синтезі, що самопоширюється, в наночаруватих фольгах», на *конференції Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее*, Киев: Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2013, С. 103–104.
- [222] А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, Т. В. Мельниченко, Г. К. Харченко, Л. В. Петрушинец, и Е. А. Шишкин, «Многослойные фольги Ti/Al: методы получения, свойства и применение при сварке», *Современная электрометаллургия*, № 1, с. 30 – 37, 2012.
- [223] Ю. В. Фальченко, А. И. Устинов, В. С. Федорчук, Г. К. Харченко, та О. О. Новомлинець, «Особливості зварювання у твердій фазі алюмінідів титану з вуглець-вуглецевим композиційним матеріалом», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 34, С. 133–137, 2008.
- [224] М. Хансен, и К. Андерко, *Структуры двойных сплавов. Том 1*. Москва: Металлургиздат, 1962.
- [225] М. Е. Дриц, и др., *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. Справочник*. Москва: Наука, 1979.
- [226] J. P. Kuang, R. A. Harding, & J. J. Campbell, «Microstructures and mechanical properties of an investment cast gamma titanium aluminide», *Materials Science and Technology*, vol. 15, P. 840-850, July, 1999.
- [227] В. Н. Столяров, «Жаропрочные соединения никелевых сплавов, выполненных диффузионной сваркой и прессовой сваркой-пайкой», *Сварочное производство*, № 1, с. 26 – 29, 1971.

- [228] Э. С. Каракозов, А. П. Терновский, Т. С. Самсонова, Э. В. Давидьян, С. С. Хаюров, и И. С. Полькин, «Диффузионная сварка с принудительным деформированием дисперсно-упрочненного сплава на основе никеля», *Сварочное производство*, № 6, с. 15–17, 1984.
- [229] В. Ф. Квасницкий, и Л. И. Маркашова, «Интенсификация процесса диффузионной сварки жаропрочных сплавов», *Автоматическая сварка*, № 8, с. 16–19, 2004.
- [230] B. J. Davies, and S. Stephenson, «Diffusion bonding and pressure brazing of Nimonic 90 nickel-chromium-cobalt alloy», *British Welding Journal*, vol. 2, № 3, P. 139–148, 1962.
- [231] A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, A. Ya. Ishchenko, G. K. Kharchenko, T. V. Melnichenko, and A. N. Muraveynik, «Diffusion welding of TiAl alloys through nano-layered foil of Ti/Al system», *Intermetallic*, № 16, P. 1043–1045, 2008.
- [232] Г. К. Харченко, В. Ф. Мазанко, А. І. Устінов, Ю. В. Фальченко, та Л. В. Петрушинець, «Дослідження дифузійних процесів у зварних з'єднаннях алюмініду титану (TiAl)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія технічні науки*, № 37, С. 117–119, 2009.
- [233] Л. Петрушинець, Ю. Фальченко, А. Устінов, Т. Мельниченко, та О. Новомлинець, «Дифузійне зварювання у вакуумі жароміцного сплаву на Ni основі». *Технічні науки та технології*, № 3 (9), С. 63-71, 2017.
- [234] H. V. Atkinson, «A Review of the Role of Short-Circuit Diffusion in the Oxidation of Nickel, Chromium, and Nickel–Chromium Alloys», *Oxidation of Metals*, Vol. 24, № 3/4, P. 177–197, 1985.
- [235] Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, О. О. Новомлинець, Л. В. Петрушинець, А. І. Устінов, Т. В. Мельниченко, та К. В. Ляпіна, «Спосіб дифузійного зварювання через пористу фольгу», *Патент № 94079 Україна*, Опубл. 27.10.2014.

- [236] О. О. Новомлинець, І. В. Завальна, та Є. В. Половецький, «Особливості отримання нероз'ємних з'єднань у процесі виготовлення термоелементів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 4 (69), С. 82–90, 2013.
- [237] О. О. Новомлинець, та І. В. Завальна, «Дослідження прецизійного зварювання тиском напівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з міддю щодо виготовлення термоелементів», на *Международной научно-технической конференции «Университетская наука-2014»*, Мариуполь: ПГТУ, 2014, С. 142–144.
- [238] S. V. Oleksiienko, L. Y. Berezin, I. V. Zavalna, та О. О. Novomlynets, «The investigation of weldability of Bi_2Te_3 semiconductor material with copper through the nanoporous interlayers» in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Kosice, 2015, С. 30–32.
- [239] G. K. Kharchenko, О. О. Novomlynets, I. O. Prybytko, and I. V. Nahorna, «The Search of New Ways of Thermoelements Production», in *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering «YSF-2016»*, Kharkiv, 2016, P. 156–159. [Online]. Available: <http://www.ysc.org.ua>.
- [240] І. В. Нагорна, О. О. Новомлинець, та Є. В. Половецький, «Вивчення бар'єрних властивостей іонно–модифікованих шарів», на *VI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 253–254.
- [241] О. О. Новомлинець, І. О. Прибитько, та І. В. Нагорна, «Вивчення дифузійних процесів при виготовленні термоелементів», in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 373–375.
- [242] Г. К. Харченко, В. В. Арсенюк, М. М. Руденко, та О. О. Новомлинець, «Зварювання тиском титану з алюмінієм (огляд літератури)», *Вісник*

Чернігівського державного технологічного університету, № 21, С. 101–106, 2004.

- [243] Ю. В. Фальченко, Е. В. Половецкий, и О. А. Новомлинец, «Влияние параметров режима диффузионной сварки на структуру биметаллических соединений АМГ6-ВТ6», на *II міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2012, С. 64-66.
- [244] Е. В. Половецкий, Л. М. Капитанчук, и О. А. Новомлинец, «Влияние толщины промежуточной прослойки на структуру и свойства сварных соединений сплава алюминия АМГ6 со сплавом титана ВТ6 способом диффузионной сварки в вакууме», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 1 (63), С. 131–138, 2013.
- [245] Є. В. Половецкий, Л. М. Капітанчук, та О. О. Новомлинець, «Особенности формирования структуры з'єднань сплавів алюмінію зі сплавами титану при дифузійному зварюванні у вакуумі», на *Всеукраїнській науково-технічній конференції, присвяченій 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова, та III Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих науковців «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології»*, Миколаїв : НУК ім. адм. Макарова, 2014, С. 90–91.
- [246] Е. В. Половецкий, О. А. Новомлинец, А. В. Лабарткава, В. А. Мартыненко, и М. В. Матвиенко, «Диффузионные и рекристаллизационные процессы при диффузионной сварке в вакууме сплава алюминия АМГ6 со сплавом титана ВТ6», *Збірник наукових праць НУК*, № 3, С. 34–40, 2015.
- [247] Е. В. Половецкий, О. А. Новомлинец, А. В. Лабарткава, М. В. Матвиенко, К. К. Трунин, и В. А. Мартыненко «Исследование возможности применения принудительной схемы деформирования при

диффузионной сварке сплавов АМГ6 и ВТ6», *Вісник НУК імені адмірала Макарова*, № 2, 2013. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://evn.nuos.edu.ua>.

- [248] Ю. Е. Николаенко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, и О. А. Новомлинец, «Сварка давлением с нагревом в вакууме титана с медью в технологии изготовления тепловых труб», *Технологические системы*, № 2 (22), С. 56–59, 2004.
- [249] О. О. Новомлинець, «Дослідження впливу сублімаційних процесів в стику на якість зварних з'єднань», на *III Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2005, С. 124.
- [250] Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, Д. М. Демиденко, та Ю. В. Фальченко, «Дослідження впливу сублімаційних процесів в стику на якість зварних хром-мідних з'єднань», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 22, С. 91–93, 2005.
- [251] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, та Т. Р. Ганєєв, «Дифузійне зварювання у вакуумі титану з міддю» на *IV Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2007, С. 29.
- [252] Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, І. О. Прибитько, Т. Р. Ганєєв, та М. М. Руденко, «Спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через сублімовані прошарки», *Патент № 41718 Україна*, Опубл. 10.06.2009.
- [253] Y. Falchenko, and O. Novomlynets, «Diffusion welding of titanium with copper using surface physical and chemical processes», *Collection of Scientific Papers: Information Technologies, Management and Society*, Riga, Latvia, vol. 4 (12), P. 184-191, 2015.
- [254] Ю. В. Фальченко, О. О. Новомлинець, С. М. Ющенко, та І. В. Нагорна, «Основи використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском», *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 54–66, 2017.

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Чернігівського національного технологічного університету,

д.т.н., проф.



_____ С.М. Шкарлет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора Інституту надтвердих матеріалів

ім. В.М. Бакуля НАН України,

д.т.н., проф.



_____ С.А. Клименко

А К Т

дослідно-виробничої перевірки результатів дисертаційної роботи

м. Київ

02 жовтня 2017 р.

Цей акт складено представниками Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України та Чернігівського національного технологічного університету в тому, що в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України проведено дослідно-виробничу перевірку результатів дисертаційної роботи Новомлинця О.О. «Наукові основи отримання прецизійних зварних з'єднань зварюванням тиском», у якій на прикладі з'єднання алмазно-твердосплавних пластин (АТП) з твердим сплавом ВК10 та ВК15, що використовується при виготовлення ріжучого інструменту, було досліджено можливість використання локалізації теплової енергії для прецизійного зварювання матеріалів, що мають низьку деформаційну здатність.

На основі розробленої технології низькотемпературного з'єднання вольфрамкобальтових твердих сплавів в роботі був розроблений технологічний процес з'єднання алмазно-твердосплавних пластин з твердим сплавом, який і був переданий в ІНМ ім. В.М. Бакуля.

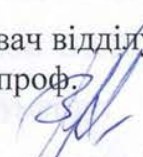
За результатами проведених випробувань технології зварювання тиском алмазно-твердосплавних пластин на основі твердого сплаву ВК15 з твердим сплавом ВК15 експериментально було підтверджено оптимальний режим зварювання: $j = 400-500 \text{ А/мм}^2$, $\tau = 0,10-0,12 \text{ с}$, $P = 8-10 \text{ МПа}$, на який вказано у дисертаційній роботі. Для локалізації теплової та механічної енергії в стику АТП з твердим сплавом використовували електродотактне

зварювання через перфоровані прошарки з титану ВТ1 за допомогою спеціалізованого оснащення. Застосування такого перфорованого прошарку з матеріалу, що має високий електричний опір дозволяє додатково локалізувати температурне поле та інтенсифікувати мікропластичну деформацію у стику та обмежити нагрів алмазного шару до небезпечних температур. Підтверджено також, що при інших рівних умовах зварювання твердих сплавів через проміжний прошарок титану товщиною 200 мкм забезпечує міцність зварного з'єднання на 25 % більше ніж через прошарок товщиною 50 мкм. Автором це пояснюється тим, що чим більша товщина прошарку тим більше його електричний опір, а відповідно й тепловиділення, внаслідок чого більш інтенсивно відбувається його деформація та активація поверхні твердого сплаву.

Перевірка результатів дисертаційної роботи Новомлинця О.О. засвідчили, що розроблений технологічний процес можливо застосовувати у дослідному виробництві.

Від ІНМ ім. В.М. Бакуля:

Завідувач відділу № 3
д.т.н., проф.

 Лавріненко В.І.

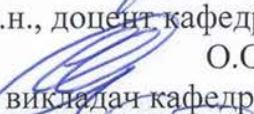
Ст. наук. співробітник
к.т.н, с.н.с.

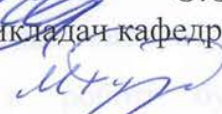
 Пасічний О.О.

Від Чернігівського національного технологічного університету:

Завідувач кафедри ЗВ та АПБК
к.т.н., доцент

 І.О. Прибытько
к.т.н., доцент кафедри ЗВ та АПБК

 О.О. Новомлинець
ст. викладач кафедри ЗВ та АПБК

 М.М. Руденко

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ
ТВО начальника Державного
науково-випробувального центру
Збройних Сил України



І.В.ТИЩЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Чернігівського національного
технологічного університету



С.М. ШКАРЛЕТ

А К Т

м. Чернігів

серпень 2017 р.

Цей акт складено представниками Державного науково-випробувального центру Збройних Сил України та Чернігівського національного технологічного університету в тому, що в університеті розроблено технологію виготовлення композитних високоміцних пластин на основі інтерметаліду – алюмініду титану. Застосування при зварюванні алюмінію з титаном поверхневих фізико-хімічних процесів, дозволяє забезпечити отримання якісних з'єднань фольг вказаних металів, а наступна термічна обробка – утворення високоміцних інтерметалідних шарів.

Випробування з'єднань на механічну міцність показали задовільні результати.

Від Державного науково-
випробувального центру
Збройних Сил України:

Заступник начальника
Центру з наукової роботи
В.А. ДМИТРІЄВ

Від Чернігівського національного
технологічного університету:

Завідувач кафедри ЗВ та АПБК
к.т.н., доцент

І.О. ПРИБИТЬКО
к.т.н., доцент кафедри ЗВ та АПБК

О.О. НОВОМЛИНЕЦЬ
Аспірант

О.В. БАЙДАЛА

Додаток В

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор ПАТ
"Чернігівський завод радіоприладів"



А.О. Свириденко

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Чернігівського національного
технологічного університету



С.М. Шкарлет

А К Т

м. Чернігів

вересень 2017 р.

Цей акт складено представниками ПАТ «Чернігівський завод радіоприладів» та Чернігівського національного технологічного університету в тому, що в університеті розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі через проміжний хімічно активний прошарок для виготовлення прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення з алюмінієвого сплаву АМцМ. Конструкція вузлів не допускає короблення стінок, що визначає необхідність активації поверхні алюмінію та видалення оксидної плівки за рахунок рідкого металевого прошарку Al-Si.

Дослідження зварних з'єднань показали, що розроблена технологія зварювання забезпечує отримання міцності вузлів на рівні 90% від міцності основного матеріалу, при величині відносної деформації порядку 1 %.


Від ПАТ «Чернігівський завод радіоприладів»:


Заступник генерального
директора, технічний
директор

 М.М. Пасечний

Від Чернігівського національного технологічного університету:

Завідувач кафедри ЗВ та АПБК
к.т.н., доцент

 І.О. Прибитько
к.т.н., доцент кафедри ЗВ та АПБК

 О.О. Новомлинець
асистент кафедри ЗВ та АПБК

 С.М. Ющенко

Додаток Д



ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Чернігівського національного
технологічного університету,

С.М. Шкарлет



ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. генерального директора
Харківського державного авіаційного
виробничого підприємства

С.П. Санагурський

А К Т

**дослідно-виробничої перевірки технології прецизійного зварювання тиском
алюмінію та його сплавів**

м. Харків

жовтень 2017 р.

Цей акт складено представниками Харківського державного авіаційного виробничого підприємства (далі - ХДАВП) та Чернігівського національного технологічного університету в тому, що на ХДАВП проведено дослідно-виробничу перевірку технології прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ) алюмінію та його сплавів, що використовуються в авіабудівній галузі, яка була розроблена в університеті.

За результатами проведених випробувань технології ДЗВ алюмінію марки АД00 та АМг5 експериментально було підтверджено оптимальний режим зварювання: температура 853 К, тиску 0,1 МПа, час зварювання 90 с. Для активації поверхонь, що зварюються, використовували суміш складу $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$, яка складається з кремнієвмісного рідкого матеріалу, що забезпечує легке і технологічне нанесення його на поверхні деталей, що з'єднуються. Застосування такого хімічно активного прошарку дозволяє полегшити руйнування оксидної плівки на поверхні алюмінію та підвищити інтенсивність дифузійної взаємодії матеріалів, що зварюються. Підтверджено, що при заданому термодформаційному режимі окремі ділянки шва утворюються в результаті зрощування вершин кристалів та перехідних зон при майже повному видавлюванні рідкої фази з зони стику.

Перевірка технології прецизійного ДЗВ алюмінію та його сплавів засвідчила, що розроблений технологічний процес можливо застосовувати у виробництві.

Від ХДАВП

Головний інженер

В. О. Алейников

Від Чернігівського національного технологічного університету:

Завідувач кафедри ЗВ та АПБК
к.т.н., доцент

І.О. Прибитько
к.т.н., доцент кафедри ЗВ та АПБК

О.О. Новомлинець
асистент кафедри ЗВ та АПБК

С.М. Ющенко

Додаток Е

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ



MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE

ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

тел. +38(04622) 3-16-51;
факс +38(04622) 3-42-44
E-mail: cstn@stn.cn.ua
www.stn.cn.ua
Код СДРПОУ 05460798

CHERNIHIV NATIONAL
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14027,
Україна

95, Shevchenko str., Chernihiv, 14027,
Ukraine

28.08.2014 № 10/10-1549

На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів докторської дисертації
к.т.н., доцента Новомлинця О.О. у навчальний процес

Наукові розробки та практичні рекомендації дисертаційної роботи к.т.н., доцента кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій Новомлинця Олега Олександровича впроваджено в навчальний процес підготовки здобувачів вищої освіти освітнього ступеню бакалавр, магістр за спеціальністю 131 – Прикладна механіка (освітня програма: Технології та устаткування зварювання):

- в лекційні курси з дисциплін: «Технології та устаткування зварювання тиском», «Інженерія поверхні», «Матеріалознавство», «Теорія зварювальних процесів», «Зварювання в твердій фазі» – теоретичні основи та закономірності формування прецизійних нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском, засоби перетворення в процесі зварювання ультратонкого поверхневого шару в пластичний, активований стан або рідину.

- в лабораторні роботи з дисциплін: «Технології та устаткування зварювання тиском», «Інженерія поверхні», «Зварювання в твердій фазі» – нові засоби локалізації теплової та механічної енергії в стику при електроконтактному зварюванні; використання при зварюванні тиском поверхневих фізико-хімічних процесів, які протікають самовільно; способи модифікації поверхонь; використання при зварюванні проміжних багат шарових, пористих наноструктурованих прошарків, хімічно активних шарів та ін.

- в кваліфікаційні випускні роботи здобувачів вищої освіти: технологічні основи прецизійного зварювання тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів; закономірності впливу технологічних параметрів на особливості формування прецизійних зварних з'єднань; методику розрахунку параметрів процесу зварювання тиском в залежності від допустимого рівня деформації основних матеріалів.

Ректор



С.М. Шкарлет

Додаток Ж

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях та виданнях, внесених до наукометричних баз даних:

- [1] Г. К. Харченко, В. В. Арсенюк, М. М. Руденко, та **О. О. Новомлинець**, «Зварювання тиском титану з алюмінієм (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 21, С. 101–106, 2004.
- [2] Ю. Е. Николаенко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, и **О. А. Новомлинец**, «Сварка давлением с нагревом в вакууме титана с медью в технологии изготовления тепловых труб», *Технологические системы*, № 2 (22), С. 56–59, 2004.
- [3] Г. К. Харченко, В. В. Арсенюк, Ю. В. Фальченко, та **О. О. Новомлинець**, «Зварювання тиском алюмінію з міддю (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 22, С. 81–90, 2005.
- [4] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, Д. М. Демиденко, та Ю. В. Фальченко, «Дослідження впливу сублімаційних процесів в стику на якість зварних хром-мідних з'єднань», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 22, С. 91–93, 2005.
- [5] **О. О. Новомлинець**, І. М. Крапивний, та Ю. В. Фальченко, «Зварювання тиском алюмінієвих сплавів через рідкі евтектичні прошарки», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 26, С. 105–107, 2006.
- [6] Ю. В. Фальченко, А. І. Устінов, В. Є. Федорчук, Г. К. Харченко, та **О. О. Новомлинець**, «Особливості зварювання у твердій фазі алюмінідів титану з вуглець-вуглецевим композиційним матеріалом», *Вісник*

- Чернігівського державного технологічного університету*, № 34, С. 133–137, 2008.
- [7] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, М. М. Руденко, та В. В. Свириденко, «Дифузійне зварювання вольфрам кобальтових твердих сплавів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 40, С. 14–17, 2009.
- [8] І. О. Дудла, Т. В. Ганєєва, та **О. О. Новомлинець**, «До питання щодо використання алюмінію і його сплавів та проблеми їх зварювання (огляд літератури)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 42, С. 156–161, 2010.
- [9] Е. В. Половецький, Л. М. Капитанчук, и **О. А. Новомлинец**, «Влияние толщины промежуточной прослойки на структуру и свойства сварных соединений сплава алюминия АМГ6 со сплавом титана ВТ6 способом диффузионной сварки в вакууме», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 1 (63), С. 131–138, 2013.
- [10] Е. В. Половецкий, **О. А. Новомлинец**, А. В. Лабарткава, М. В. Матвиенко, К. К. Трунин, и В. А. Мартыненко, «Исследование возможности применения принудительной схемы деформирования при диффузионной сварке сплавов АМГ6 и ВТ6», *Вісник НУК імені адмірала Макарова*, № 2, 2013. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://evn.nuos.edu.ua>.
- [11] **О. О. Новомлинець**, І. В. Завальна, та Є. В. Половецький, «Особливості отримання нероз'ємних з'єднань у процесі виготовлення термоелементів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 4 (69), С. 82–90, 2013.
- [12] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, І. В. Завальна, та Є. В. Половецький, «Прецизійне електроконтактне точкове зварювання металевих матеріалів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*, № 2 (73), С. 104–111, 2014.

- [13] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та В. О. Мартиненко, «Дослідження деформаційної кінетики алюмінію при високих температурах», *Технічні науки та технології*, № 2 (2), С. 67–72, 2015.
- [14] V. F. Mazanko, H. K. Kharchenko, T. R. Hanieiev, **O. O. Novomlynets**, and I. V. Zavalna, «The distinctive features of diffusive interaction of copper and molybdenum at pressure welding through the layers modified by ion-beam processing», *Металлофизика и новейшие технологии*, т. 37, вип. 2, С. 233–241, 2015.
- [15] Е. В. Половецкий, **О. А. Новомлинец**, А. В. Лабарткава, В. А. Мартыненко, и М. В. Матвиенко, «Диффузионные и рекристаллизационные процессы при диффузионной сварке в вакууме сплава алюминия АМГ6 со сплавом титана ВТ6», *Збірник наукових праць НУК*, № 3, С. 34–40, 2015.
- [16] Ю. Фальченко, Л. Петрушинець, А. Устінов, Т. Мельниченко, **О. Новомлинець**, та І. Гусарова, «Дифузійне зварювання в вакуумі тонколистового нікелевого сплаву», *Технічні науки та технології*, № 4 (6), С. 87–98, 2016.
- [17] В. Мазанко, **О. Новомлинець**, С. Олексієнко, та С. Ющенко, «Дослідження процесів масоперенесення у процесі прецизійного електроконтактного зварювання алюмінію», *Технічні науки та технології*, № 2 (8), С. 75–81, 2017.
- [18] Л. Петрушинець, Ю. Фальченко, А. Устінов, Т. Мельниченко, та **О. Новомлинець**, «Дифузійне зварювання у вакуумі жароміцного сплаву на Ni основі», *Технічні науки та технології*, № 3 (9), С. 63–73, 2017.
- [19] О. В. Махненко, О. А. Великоіваненко, О. С. Міленін, Ю. В. Фальченко, та **О. О. Новомлинець**, «Методика розрахунку режимів зварювання тиском для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань», *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, № 5 (235), С. 111–116, 2017.

- [20] Ю. В. Фальченко, **О. О. Новомлинець**, Л. В. Петрушинець, та І. В. Нагорна, «Основи використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском», *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 54–66, 2017.
- [21] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, Є. В. Половецький, «Прецизійне зварювання тиском алюмінієвих сплавів», *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 67–76, 2017.

Статті у наукових періодичних фахових виданнях інших держав:

- [22] Y. Falchenko, and **O. Novomlynets**, «Diffusion welding of titanium with copper using surface physical and chemical processes», *Collection of Scientific Papers: Information, Technologies, Management and Society*, Riga, Latvia, № 4 (12), P. 184-191, 2015.
- [23] Y. Falchenko, **O. Novomlynets**, and E. Polovetskyi, «Special features of precision pressure welding of carbon steel with chemical activation of surfaces», *Scientific and educational journal*, Geneve, Switzerland, № 6, P. 65-70, July, 2016.
- [24] Y. Falchenko, and **O. Novomlynets**, «Precision low temperature pressure welding of solid alloys», *Modern Science - Moderní věda*, Praha, Ceska Republika, № 1, (P. II), P. 56-62, 2017.
- [25] Y. Falchenko, **O. Novomlynets**, I. Prybytko, and M. Rudenko, «The investigation of strain-tension state and diffuse interaction under the pressure welding of cutting alloy», *Scientific and educational journal*, Geneve, Switzerland, № 8, P. 95-101, July, 2017.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

- [26] **О. О. Новомлинець**, «Дослідження впливу сублімаційних процесів в стику на якість зварних з'єднань», на *III Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2005, С. 124.

- [27] Г. П. Болотов, **О. А. Новомлинець**, Т. Р. Ганеев, и М. Г. Болотов, «Активация и модификация поверхностей металлов в вакууме перед сваркой и пайкой» на *Научно-практическом семинаре «Сварка и родственные процессы в промышленности»*, Киев: Экотехнология, 2006, С. 47–49.
- [28] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, та Т. Р. Ганєєв, «Дифузійне зварювання у вакуумі титану з міддю» на *IV Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2007, С. 29.
- [29] Г. К. Харченко, **О. А. Новомлинець**, и Т. Р. Ганеев, «Применение ионной модификации поверхностных слоев при диффузионной сварке в вакууме меди с молибденом», на *8-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия»*, Москва: «МАТИ» - РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2009, С. 290–292.
- [30] G. K. Harchenko, **O. A. Novomlinets**, and M. N. Rudenko, «Diffusion Welding of Cobalt Cemented Carbide», in *18th Spanish Technical Sessions on Welding*, Industrial Engineering Madrid, Spain, oct., 2010. [Online]. Available: https://indusnet.etsii.upm.es/gestion_escuela/personal/adjuntos/presentaciones/864.pdf
- [31] **О. О. Новомлинець**, та М. М. Руденко, «Дослідження впливу матеріалу проміжного прошарку на температурні поля при електроконтактному нагріві твердих сплавів типу ВК», на *I міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2011, С. 122.
- [32] **О. О. Новомлинець**, «Прецизійне контактне зварювання алюмінію та його сплавів з використанням проміжних прошарків», на *III міжнародної науково-технічної конференції «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития»*, Под общ. ред. д-р техн. наук Н. А. Макаренко, Краматорск : ДГМА, 2012, С. 120–122.

- [33] **О. О. Новомлинець**, та П. С. Сластион, «Електроконтактне точкове зварювання алюмінію та його сплавів через проміжні прошарки» на *II міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2012, С. 60-61.
- [34] Ю. В. Фальченко, Е. В. Половецкий, та **О. А. Новомлинець**, «Влияние параметров режима диффузионной сварки на структуру биметаллических соединений АМг6-ВТ6», на *II міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2012, С. 64-66.
- [35] **О. О. Новомлинець**, та Т. Р. Ганєєв, «Розробка технології прецизійного електроконтактного точкового зварювання алюмінію та його сплавів», на *VIII науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2013, С. 49.
- [36] С. В. Олексієнко, **О. А. Новомлинець**, И. А. Прибытько, и С. М. Ющенко, «Способ прецизионного соединения алюминия и его сплавов» на *VIII науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2013, С. 50.
- [37] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, М. М. Руденко, та М. О. Хоменко, «Виникнення електричного потенціалу на поверхні металевих зразків при високотемпературному синтезі, що самопоширюється, в наночастиночкх фольгах», на *конференції Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее: Тез. стенод. докл.*, Киев: Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2013, С. 103–104.
- [38] **О. О. Новомлинець**, та І. В. Завальна, «Дослідження прецизійного зварювання тиском напівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з міддю щодо виготовлення термоелементів», на *Международной научно-технической конференции «Университетская наука-2014»*, Мариуполь: ПГТУ, 2014, С. 142–144.

- [39] Є. В. Половецький, Л. М. Капітанчук, та **О. О. Новомлинець**, «Особливості формування структури з'єднань сплавів алюмінію зі сплавами титану при дифузійному зварюванні у вакуумі», на *Всеукраїнській науково-технічній конференції, присвяченій 55-річчю кафедри зварювального виробництва НУК ім. адм. Макарова, та III Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих науковців «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології»*, Миколаїв : НУК ім. адм. Макарова, 2014, С. 90–91.
- [40] S. V. Oleksiienko, **O. O. Novomlynets**, and S. M. Yushchenko, «Diffusion bonding technique concerning production of microchannel heat exchangers» in *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2016, P. 57–60. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7493009>.
- [41] S. V. Oleksiienko, L. Y. Berezin, I. V. Zavalna, та **O. O. Novomlynets**, «The investigation of weldability of Bi₂Te₃ semiconductor material with copper through the nanoporous interlayers» in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Kosice, 2015, С. 30–32.
- [42] G. K. Kharchenko, **O. O. Novomlynets**, I. O. Prybytko, and I. V. Nahorna, «The Search of New Ways of Thermoelements Production», in *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering «YSF-2016»*, Kharkiv, 2016, P. 156–159. [Online]. Available: <http://www.ysc.org.ua>.
- [43] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та Т. В. Ганєєва, «Досвід і перспективи виробництва мікроканалних теплообмінників», на *VI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 261–262.
- [44] І. В. Нагорна, **О. О. Новомлинець**, та Є. В. Половецький, «Вивчення бар'єрних властивостей іонно-модифікованих шарів», на *VI міжнародній*

науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)», Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 253–254.

- [45] **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, та С. М. Ющенко, «Способи зварювання тиском алюмінієвих сплавів з обмеженням рівня деформації», in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 371–373.
- [46] **О. О. Новомлинець**, І. О. Прибитько, та І. В. Нагорна, «Вивчення дифузійних процесів при виготовленні термоелементів», in *International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 373–375.

Патенти:

- [47] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, І. О. Прибитько, Т. Р. Ганєєв, та М. М. Руденко, «Спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через сублімовані прошарки», *Патент № 41718 Україна*, Опубл. 10.06.2009 р, Бюл. № 11.
- [48] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, М. М. Руденко, С. В. Олексієнко, І. О. Прибитько, та Ю. В. Фальченко, «Спосіб дифузійного зварювання металевих деталей через прошарок», *Патент № 60407 Україна*, Опубл. 25.06.2011 р, Бюл. № 12.
- [49] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, Ю. В. Фальченко, та Л. В. Петрушинець, «Спосіб електроконтактного точкового зварювання металевих деталей через прошарок», *Патент № 89671 Україна*, Опубл. 25.04.2014 р, Бюл. № 8.
- [50] С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та **О. О. Новомлинець**, «Спосіб прецизійного дифузійного з'єднання алюмінію та його сплавів», *Патент № 94095 Україна*, Опубл. 27.10.2014 р, Бюл. № 20.
- [51] Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, **О. О. Новомлинець**, Л. В. Петрушинець, А. І. Устінов, Т. В. Мельниченко, та К. В. Ляпіна,

«Спосіб дифузійного зварювання через пористу фольгу», *Патент № 94079 Україна*, Опубл. 27.10.2014 р, Бюл. № 20.

- [52] Г. К. Харченко, **О. О. Новомлинець**, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, Є. В. Половецький, І. О. Прибитько, та І. В. Нагорна, «Спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок», *Патент № 117001 Україна*, Опубл. 12.06.2017 р, Бюл. № 11.