

**Міністерство освіти і науки України**  
**Чернігівський національний технологічний університет**

**Донбаська державна машинобудівна академія**

**Міністерство освіти і науки України**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ЮЩЕНКО СВІТЛАНА МИХАЙЛІВНА**

УДК 621.791.4

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕЦИЗІЙНОГО З'ЄДНАННЯ**  
**АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ**

Спеціальність 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології  
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело \_\_\_\_\_ С.М. Ющенко

Науковий керівник    Новомлинець Олег Олександрович  
кандидат технічних наук, доцент

Чернігів – 2018

## Анотація

Ющенко С.М. Розробка технології прецизійного з'єднання алюмінієвих сплавів. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

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

Алюміній та його сплави є одними з найбільш розповсюджених конструкційних матеріалів. Вони відрізняються низькою питомою вагою, високою міцністю, значною тепло- та електропровідністю, високою корозійною стійкістю, що робить їх у ряді випадків незамінними при виготовленні конструкцій різноманітного призначення. Таке поєднання властивостей дозволяє вирішити проблему зниження маси конструкцій при одночасному підвищенні їх експлуатаційних характеристик в умовах різних видів навантажень та широкого діапазону температур.

Зокрема, алюміній та його сплави знайшли широке застосування у виробництві тонкостінних та корпусних конструкцій складної конфігурації, що застосовуються у авіа-, ракето- та суднобудуванні, автомобільному транспорті, атомній енергетиці, нафтовій, хімічній, електротехнічній, електронній промисловості та інших галузях. При цьому в процесі виготовлення таких конструкцій необхідно забезпечувати прецизійність з'єднань для збереження їх проектних характеристик.

Останнім часом для одержання прецизійних з'єднань широко використовують способи зварювання тиском, серед яких найбільш перспективними є дифузійне зварювання у вакуумі та, у ряді випадків, електроконтактне зварювання. Однак отримання нероз'ємних з'єднань з алюмінію та його сплавів значно ускладнюється наявністю тугоплавкої оксидної плівки на поверхні металу, видалення якої перед з'єднанням без

використання складних технологій не може забезпечити утворення якісного фізичного контакту, що суттєво погіршує умови для одержання прецизійних з'єднань.

*У першому розділі* проведено аналіз існуючих способів одержання нероз'ємного з'єднання алюмінію та його сплавів. Розглянуто особливості зварювання та паяння алюмінію та його сплавів. Способи зварювання плавленням не дозволяють забезпечити необхідної прецизійності та міцності зварних з'єднань з алюмінію та сплавів внаслідок застосування високих температур зварювання (вище температури плавлення основного металу). Для отримання прецизійних виробів з алюмінію використовуються різноманітні способи паяння, однак паяні з'єднання характеризуються невисокою міцністю, необхідністю рівномірного розподілення зазорів між деталями та ретельної підготовки деталей, що робить цей процес складним та трудомістким. Літературний аналіз показав, що найбільш ефективними технологіями для одночасного забезпечення міцності та прецизійності виробів з алюмінію та його сплавів є дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) та електроконтактне зварювання (ЕКЗ), що відбуваються при температурах, нижчих за температуру плавлення металу.

Встановлено, що необхідною умовою для формування прецизійного зварного з'єднання алюмінієвих деталей при ДЗВ є видалення оксидної плівки та утворення фізичного контакту за короткий проміжок часу безпосередньо у процесі з'єднання, а при ЕКЗ – локалізація теплової енергії у приконтактній зоні з'єднання. При цьому в обох випадках визначальний вплив на прецизійність з'єднань здійснює термодформаційний цикл процесу. Однак інформації стосовно дослідження термодформаційної поведінки алюмінію під дією температури і навантаження у літературі недостатньо для оцінки можливості забезпечення потрібного рівня прецизійності зварних виробів.

Виходячи з літературного аналізу, зроблено висновок, що ефективність застосування прошарків на основі евтектики системи Al-Si при ДЗВ 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 сторони з'єднаних частин, так і з боку прошарку. Застосування тонких проміжних прошарків з алюмінієвої фольги при ЕКЗ дозволяє досягти локалізованого тепловиділення у вузькій приконтатній зоні.

На підставі огляду літературних джерел обґрунтовано доцільність досліджень, визначено мету роботи та сформульовано основні задачі досліджень.

*У другому розділі* наводиться інформація про матеріали, обладнання та методики, що використовуються для проведення досліджень. Матеріали для досліджень: алюміній марки АД00 та деформовані алюмінієві сплави марок АД31 та АМг5. Використовувалися зразки розмірами 8×8×10 мм та циліндричні стержні діаметрами 6-12 мм. Для приготування рідкого прошарку для дифузійного зварювання у вакуумі використовувалися насичений розчин силікату натрію  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 2М розчин соляної кислоти  $\text{HCl}$  та порошок магнію з розміром частинок 25 мкм. При електроконтактному зварюванні як проміжний прошарок використовувалася алюмінієва фольга марки АД0 товщиною 11 мкм.

Для зварювання зразків використовувалися модернізована дифузійна установка УВН-2М-1 з радіаційним джерелом нагріву та машина для електроконтактного стикового зварювання МС-802У. Якість зварних з'єднань оцінювалася за результатами оптичної мікроскопії на мікроскопах МИМ-8 та Neophot-32 та растрової електронної мікроскопії на скануючому електронному мікроскопі JSM-840 фірми «JEOL» (Японія). Мікротвердість зварних з'єднань вимірювалася за допомогою мікротвердоміра М400 фірми «LECO» (США). Механічні випробування зварних з'єднань на

розрив та на зріз проводилися на розривній машині УМ-5 з використанням спеціалізованого оснащення.

*У третьому розділі* наведено результати дослідження термодформаційної кінетики алюмінію та його сплавів.

Прецизійне з'єднання алюмінію та його сплавів зварюванням тиском потребує незначних питомих зусиль задля забезпечення мінімальної залишкової деформації виробів. Це обумовлено тим, що внаслідок високої пластичності алюмінію при підвищенні температури відбувається різке зниження його пружних властивостей та значне зростання повзучості, яка полягає у зміні деформації у часі під дією постійного навантаження. Тому існує необхідність вивчення механічних властивостей та термодформаційної поведінки алюмінію та сплавів під дією температури і навантаження.

На основі проведених досліджень термодформаційної кінетики алюмінію АД00 та сплаву АМг5 одержано рівняння повзучості та функціональні залежності величини деформації алюмінію при температурі утворення евтектики Al-Si від величини навантаження та часу його дії. Визначено залежності швидкості повзучості алюмінію АД00 та сплаву АМг5 від величини навантаження та температурні залежності коефіцієнта Пуассона, що можуть бути використані для моделювання деформації виробів при їх виготовленні.

*Четвертий розділ* присвячений розробці технології дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів.

Обґрунтовано склад проміжного прошарку на основі системи Al-Si для дифузійного з'єднання у вакуумі алюмінію та його сплавів. З літературних джерел відомо, що зниження рівня деформації та підвищення міцності з'єднання досягається активацією поверхонь, що з'єднуються, шляхом інтенсифікації утворення фізичного контакту за рахунок введення між поверхнями проміжних прошарків.

Встановлено, що використання прошарків системи  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$  дозволяє отримувати у процесі дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію АД00 та сплаву АМг5 евтектичний прошарок системи Al-Si з подрібненою структурою і за рахунок клейових властивостей суміші спрощувати складання виробів. Модифікація евтектики Al-Si натрієм, що подрібнює структуру евтектики, та утворення зміцнюючої фази  $\text{Mg}_2\text{Si}$  забезпечують високий рівень механічних властивостей зварного з'єднання. Наявність у складі суміші магнію чи магнію у сплаві, що з'єднується, створює можливість безпосереднього відновлення алюмінію з оксиду парами магнію.

Встановлено, що за рахунок збільшення електропровідності силікату натрію при підвищенні температури створюються умови для інтенсифікації процесу видалення оксидної плівки шляхом пропускання постійного електричного струму густиною  $0,2 \text{ A/mm}^2$ . Нанесення суміші  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$  на поверхню деталей і наступне їх складання дозволяє досягти утворення евтектики у кількості, що забезпечує мінімальну осадку при питомому тиску  $0,1 \text{ МПа}$ . Розроблена технологія ДЗВ дозволяє одержати вироби із рівнем залишкової деформації 2-3 % по висоті.

**П'ятий розділ** присвячено розробці технології електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів. Наведено результати досліджень особливостей формування з'єднань алюмінію та його сплавів при електроконтактному зварюванні через тонкі проміжні алюмінієві прошарки та факторів, що впливають на тепловиділення у зоні контакту деталей.

Показано, що при стиковому ЕКЗ опором алюмінієвого сплаву АД31 ефективним засобом для локалізації тепловиділення у вузькій приконтактній зоні є розміщення між деталями, що зварюються, тонких проміжних шарів з алюмінієвої фольги марки АД0. Утворення між прошарком та деталями більшої кількості контактних опорів, на яких локалізується виділення теплової енергії значної величини при

проходженні електричного струму, дозволяє збільшити температуру в контактній деталі-деталі, зменшити час нагріву та рівень залишкових деформацій.

**Практичне значення.** Розроблено нову технологію дифузійного зварювання алюмінію та його сплавів у вакуумі з використанням рідкого евтектичного проміжного прошарку на основі кремнію, яка дозволяє отримати зварні з'єднання з міцністю при випробуванні на зріз до 90 % від міцності основного матеріалу при деформації виробу до 2-3 %.

Розроблено нову технологію електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через тонкий проміжний прошарок з алюмінієвої фольги. Запропонована технологія дозволяє одержати зварні з'єднання з міцністю на розрив до 95% від міцності основного матеріалу з рівнем деформації виробу до 1-2%.

Розроблена технологія дифузійного зварювання у вакуумі через прошарок впроваджена у виробництво прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення на ПАТ «Чернігівський завод радіоприладів» (м. Чернігів). Дану технологію також апробовано під час дослідно-виробничої перевірки на ДП «Харківське державне авіаційне виробниче підприємство» (м. Харків), за результатами якої підтверджено можливість застосування розробленого технологічного процесу в авіабудівній галузі.

Окремі наукові розробки та практичні рекомендації за результатами дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес Чернігівського національного технологічного університету.

**Ключові слова:** алюміній, прецизійне з'єднання, дифузійне зварювання у вакуумі, електроконтактне стикове зварювання опором, оксидна плівка, фізичний контакт, проміжний прошарок, пружні характеристики, пластичність, повзучість, рівень деформації, міцність з'єднання.

## Summary

Yushchenko S.M. The development of precision joining technique of aluminium alloys. – Qualification scientific work presented as manuscript.

The thesis for obtaining a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences (Engineering) on speciality 05.03.06 “Welding and related processes and technologies”. Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2018.

Aluminium and its alloys are one of the most common structural materials. Such materials are distinguished by the low specific weight, high strength, significant thermal and electrical conductivity and high corrosion resistance. It makes them, in a number of cases, irreplaceable in the manufacturing of structures for various purposes. Such combination of properties allows solving the problem of weight reducing of structures with simultaneous increasing of their operating characteristics in conditions of different types of loads and wide temperature range.

In particular, aluminium and its alloys have found widespread using in the production of thin-walled and body constructions with complex configuration that are used in aircraft, rocket and shipbuilding, road transport, nuclear energy, petroleum, chemical, electrical, electronic and other industries. Besides, it is necessary to ensure the precision of joints and their design characteristics during the manufacturing of such structures.

Lately, pressure welding methods are widely used for obtaining of precision joints. The most perspective ones are the diffusion welding in vacuum and resistance welding. However, the presence of a high-melting oxide film on the metal surface is considerably impedes the production of permanent joints made of aluminium and its alloys. The removal of such film before joining without usage of complex technologies may not provide the formation of qualitative physical contact, which significantly worsens the conditions of precision joints obtaining.



**The first section** contains the analysis of existing methods of obtaining permanent joints of aluminium and its alloys. It has been considered the features of welding and brazing of aluminium and its alloys. The fusion welding methods are not able to provide the required precision and strength of welded joints of aluminium and alloys owing to the usage of high welding temperatures (above the melting temperature of the base metal). Various methods of brazing are used to obtaining the precision aluminium products. However, brazed joints are characterized by low strength, the necessity of uniform distribution of gaps between details and their careful preparation, which make this process complicated and labour-consuming. Literary analysis has been showed that the diffusion welding in vacuum (DWV) and resistance welding (RW) which occur at temperatures below the melting point of the metal are the most effective technologies for ensure simultaneously the strength and precision of aluminium products and its alloys.

It has been established that the oxide film removal and the formation of physical contact for the short period directly during the joining process are the necessary conditions for the formation of precision permanent joint of the aluminium parts during the DWV. The localization of thermal energy in the contact area of the joint is the necessary condition for the formation of precision permanent joint during the RW. Besides, in both cases the decisive influence on the precision of joints provides thermo-deformative cycle of process. However, the literary information concerning to the investigation of thermo-deformative behaviour of aluminium under the temperature and load influence is insufficient to assess the possibility of achieving the desired level of weldments precision.

After literature review it has been concluded that the efficiency of interlayer application based on the Al-Si eutectic during the DWV is related with liquid phase formation in the joining area. It facilitates the oxide film destruction and increases the intensity of the diffusion flow of atoms into the base metal from both the side of joining parts and the layers one. The usage of

thin intermediate layers of aluminium foil during the RW allows achieving localized heat release in a narrow contact area.

Based on the literature review, it has been justified the expediency of researches. It has been also defined the main objective and tasks of the research.

**The second section** provides the information of materials, equipment and techniques, which have been used to carrying out of researches. Materials for researches: aluminium 1070A and wrought aluminium alloys 6063 and 5083. The samples with dimensions of 8×8×10 mm and cylindrical rods with diameters of 6-12 mm have been used. A saturated solution of sodium silicate  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 2M solution of hydrochloric acid HCl and magnesium powder with a particle size of 25  $\mu\text{m}$  have been used for the liquid layer preparation for vacuum diffusion welding. An aluminium foil 1050 with the thickness of 11  $\mu\text{m}$  has been used as an intermediate layer during the resistance welding. Modernized diffusion plant UVN-2M-1 with radiation heat source and resistance butt welding machine MS-802U have been used for welding of the samples. The quality of welded joints has been estimated by the result of optical microscopy using optical microscope MIM-8 and scanning electron microscopy using scanning electron microscopes Neophot-32 by “Carl Zeiss” company and JSM-840 by “JEOL” company. Microhardness of welded joints has been measured using hardness tester M400 by “LECO” company. Mechanical tensile and shearing tests of welded joints have been carried out using tensile testing machine UM-5 applying specialized equipment.

**The third section** shows the results of investigation of thermo-deformative kinetics of aluminium and its alloys.

Precision pressure welding aluminium and its alloys requires insignificant specific loads for ensuring a minimum relative deformation of the products. It caused by the high plasticity of aluminium under higher temperature there is a sharp decrease of its elastic properties and a significant increase in creep, which is the change of strain with time under the constant load. Therefore, there is a

necessity of studying the mechanical properties and thermo-deformative behaviour of aluminium and alloys under the influence of temperature and load.

Based on the experimental investigations of thermo-deformative kinetics of aluminium 1070A and alloy 5083 it has been obtained the creep equation and functional dependences of the aluminium deformation magnitude of the temperature of eutectic Al-Si formation from the load magnitude and its duration. It has been determined the correlation of the strain rate of aluminium 1070A and alloy 5083 from the load rate and the temperature dependences of Poisson's ratio, which can be used for modelling of deformation of produced items.

**The fourth section** focuses on developing of the technology of vacuum diffusion welding of aluminium and its alloys. The composition of intermediate layer based on the system of Al-Si for vacuum diffusion joining of aluminium and its alloys have been substantiated. It is known that the reduction of deformation level and the strength increasing of the joints is achieved by the activation of the joining surfaces. Such activation process is possible by the intensification of physical contact formation owing to introducing of the intermediate layers between the surfaces.

It has been determined that the usage of interlayers of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$  system during the process of vacuum diffusion welding of aluminium 1070A and alloy 5083 allows obtaining the eutectic layer of Al-Si with fine grain structure. Owing to the adhesive properties of the mixture, it is possible to simplify the assembly of products. Modification of eutectic Al-Si by the sodium, which leads to the grinding of the eutectic structure and the formation of the strengthening phase of  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , provides the high level of mechanical properties of welded joints. The magnesium presence in the mixture or in the joining alloy creates the possibility of direct reduction of aluminium from the oxide film by the vapours of magnesium.

It has been established that the increasing of the electrical conductivity of sodium silicate under the temperature increasing makes the conditions for the

intensification of the process of oxide film removing by passing the direct electric current with the density of  $0,2 \text{ A/mm}^2$ . The application of mixture of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$  on the surface of parts and their subsequent assembly allow to achieve the formation of eutectic alloy in a quantity which provides a minimum deformation at specific pressure of  $0,1 \text{ MPa}$ . Developed DWV technology allows to obtain the products with the level of residual deformation of 2-3% in height.

**The fifth section** is devoted to the development of resistance butt welding technology of aluminium and its alloys. The investigation results of formation features of the joints of aluminium and its alloys during the resistance welding through the thin aluminium intermediate layers have been demonstrated. It has been also shown the results of investigations of factors that influence on the heat release in the contact area of details.

It has been shown that the effective method of localization of heat release in a narrow contact area during the resistance butt welding of aluminium alloy 6063 is the placement of thin interlayer of aluminium foil 1050 between welded parts. The formation of greater number of contact resistances between the layer and details, where the considerable value of heat emission is localized during electric current passage, leads to the increase of the temperature in the detail-detail contact, and also to reduce the heating time and the level of residual deformations.

**Practical importance.** The new technology of vacuum diffusion welding of aluminium and its alloys with using a liquid eutectic intermediate layer based on silicon has been developed. Such technology allows obtaining welded joints with shearing strength up to 90 % of the strength of the basic material when the deformation of the product is up to 2-3 %.

The new technology of resistance butt welding of aluminium and its alloys through the thin intermediate layer of aluminium foil has been developed. The proposed technology allows obtaining welded joints with tensile strength up

to 95% of the strength of the basic material with the deformation level of products up to 1-2%.

The developed technology of diffusion welding in vacuum through interlayer has been implemented into the production of the precision body nodes for special purpose on Public Joint-Stock Company “Chernihiv Plant of radio equipment” (Chernihiv, Ukraine). This technology has been also approbated during research-industrial testing on the State enterprise “Kharkov state aircraft manufacturing company”(Kharkiv, Ukraine), as a result of which the possibility of usage the developed process in aircraft building has been confirmed.

As a results of the qualification scientific work some of scientific developments and practical recommendations have been introduced in the educational process of the Chernihiv National University of Technology.

**Keywords:** aluminium, precision joining, diffusion welding in vacuum, electric resistance welding, oxide film, physical contact, intermediate layer, elastic behaviour, plasticity, creeping, deformation value, joint strength.

### Список публікацій здобувача

- [1] С. В. Олексієнко, О. М. Савченко, та **С. М. Ющенко**, «Флюсове видалення оксидних плівок при паянні алюмінію та сплавів на його основі (літературний огляд)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 1(63), С. 119-124, 2013. [фахове видання] (0,5 друк.арк.)

*Дисертант проаналізував існуючі флюси для паяння алюмінію та його сплавів, вплив їх складу на ефективність видалення оксидної плівки з поверхні металу.*

- [2] 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*, № 2, С. 84-87, 2013. [фахове видання] (0,25 друк.арк.)

*Автором встановлено можливість високотемпературного реактивно-флюсового паяння алюмінію в печах за рахунок використання прошарку на основі силікату натрію, соляної кислоти та магнію.*

- [3] 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.)

*Дисертант дослідив швидкість повзучості алюмінію та одержав рівняння повзучості для математичного моделювання термодформаційної поведінки матеріалу під дією температури і навантаження.*

- [4] 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.)

*Здобувачем проаналізовано процеси масоперенесення у металі при електроконтактному зварюванні алюмінієвих сплавів через проміжні прошарки, визначено залежність коефіцієнта масоперенесення від кількості прошарків.*

- [5] О. Новомлинець, С. Олексієнко, **С. Ющенко**, та Є. 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] (0,6 друк. арк.)

*Автором досліджено процеси тепловиділення при електроконтактному зварюванні алюмінієвого сплаву через проміжний прошарок з алюмінієвої фольги, а також вплив кількості шарів у прошарку на прецизійність зварного з'єднання, встановлено оптимальну кількість прошарків.*

- [6] С.В. Олексієнко, **С.М. Ющенко**, «Електрохімічна активація при паянні алюмінію та його сплавів силумінами», на *III Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2013, С. 117.
- [7] 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.
- [8] С. В. Олексієнко, **С. М. Ющенко**, «Спосіб паяння алюмінію та сплавів на його основі», на *Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі»*, Чернігів: ЧДТУ, 2013, С. 111-113.
- [9] С. В. Олексієнко, **С. М. Ющенко**, «Технологія з'єднання алюмінію та його сплавів через прошарок при дії постійного електричного струму», на *Науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці»*, Маріуполь: ПГТУ, 2013, С. 107-109.
- [10] 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>.
- [11] 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.

- [12] **С. М. Ющенко**, «Мікроканалні теплообмінники: особливості конструкції та виготовлення», на *Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 12-14.
- [13] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, та **С. М. Ющенко**, «Способи зварювання тиском алюмінієвих сплавів з обмеженням рівня деформації», in *II International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 371-373.
- [14] В. Ф. Мазанко, О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, та **С. М. Ющенко**, «Особливості дифузійної взаємодії при електроконтактному зварюванні алюмінію», на *VII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧНТУ, 2017, С. 70.
- [15] О. О. Novomlynets, S. V. Oleksiienko, V. F. Mazanko, and **S. M. Yushchenko**, «The investigation of mass-transfer processes during electric resistance welding of aluminium», in *XI International conference of young scientists «Welding and related technologies»*, Kyiv, 2017, С. 298. [Online]. Available: [http://wrtys.com.ua/2017/wp-content/uploads/Paton\\_Proceedings\\_2017\\_Small\\_New.pdf](http://wrtys.com.ua/2017/wp-content/uploads/Paton_Proceedings_2017_Small_New.pdf).
- [16] 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.
- [17] 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.



## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ЗМІСТ .....	17
ВСТУП.....	19
<b>РОЗДІЛ 1 ВИКОРИСТАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ У ПРЕЦИЗІЙНИХ КОНСТРУКЦІЯХ .....</b>	<b>26</b>
1.1. Застосування алюмінію та його сплавів у прецизійних конструкціях .....	26
1.2. Способи одержання нероз’ємних з’єднань алюмінію та його сплавів.....	28
1.3. Вплив температури на пружно-пластичні характеристики алюмінію.....	43
1.4. Висновки .....	48
<b>РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>50</b>
2.1. Характеристика матеріалів, що зварюються .....	50
2.2. Експериментальне обладнання .....	54
2.3. Методика проведення досліджень.....	60
2.4. Обробка результатів експериментів .....	65
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ З’ЄДНАНЬ З АЛЮМІНІЮ ТА ЙОГО СПЛАВІВ .....</b>	<b>67</b>
3.1. Дослідження термодифузійної кінетики матеріалів.....	67
3.2. Визначення залежностей пружно-пластичних характеристик матеріалів від температури.....	80
3.3. Висновки.....	84
<b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ДИФУЗІЙНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО З’ЄДНАННЯ У ВАКУУМІ АЛЮМІНІЮ ТА ЙОГО СПЛАВІВ .....</b>	<b>85</b>
4.1. Дослідження процесу деформування при утворенні евтектики алюміній-кремній.....	85

	18
4.2. Хімічна активація поверхонь, що з'єднуються.....	88
4.3. Контактне плавлення в об'ємі шорсткої поверхні.....	96
4.4. Електрохімічні засоби інтенсифікації процесу дифузійного зварювання.....	103
4.5. Технологія дифузійного зварювання у вакуумі.....	109
4.6. Висновки .....	115
<b>РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ОПОРОМ АЛЮМІНІЮ ТА СПЛАВІВ .....</b>	
<b>117</b>	
5.1. Дослідження процесу тепловиділення у контакті деталей, що зварюються через прошарок.....	117
5.2. Технологія електроконтактного стикового зварювання опором...	128
5.3. Висновки .....	135
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>137</b>
<b>ПОСИЛАННЯ .....</b>	<b>139</b>
Додаток А. ....	156
Додаток Б.....	160
Додаток В. ....	164
Додаток Г.....	165
Додаток Ґ.....	166
Додаток Д.....	167

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Сучасна промисловість потребує використання конструкційних матеріалів з високими показниками міцності та пластичності, значною тепло- та електропровідністю, низькою питомою вагою та високою корозійною стійкістю. З цієї точки зору найбільший інтерес представляють алюміній та сплави на його основі, які широко застосовуються у різноманітних конструкціях авіа-, ракето- та суднобудування, автотранспорту, атомної енергетики, хімічної, електротехнічної та електронної техніки. До таких конструкцій, зокрема, належать тонкостінні та корпусні конструкції складної форми.

Складна конфігурація таких конструкцій, невеликі товщини складових елементів, велика кількість з'єднань потребують пошуку та використання найбільш технологічних методів їх виготовлення та одержання якісних нероз'ємних з'єднань у характерних вузлах, оскільки окрім високої міцності з'єднань існує необхідність збереження проектною форми даних виробів. Необхідною вимогою при цьому є забезпечення прецизійності виробів, що характеризується величиною залишкової деформації на рівні 1-2 % від початкового розміру виробу.

Через притаманні алюмінію та його сплавам властивості отримання прецизійних з'єднань способами зварювання плавленням та паяння ускладнене необхідністю реалізації складних технологічних процесів.

Серед існуючих способів зварювання алюмінію та сплавів досягти прецизійності дозволяють способи зварювання тиском, зокрема дифузійне зварювання у вакуумі та, у ряді випадків, електроконтактне зварювання. При цьому отримання нероз'ємних з'єднань з алюмінію та його сплавів значно ускладнюється наявністю тугоплавкої оксидної плівки на поверхні металу, видалення якої перед з'єднанням без використання складних технологій не забезпечує утворення якісного фізичного контакту, що, як наслідок, суттєво погіршує умови для одержання прецизійних з'єднань.

При дифузійному зварюванні наявність вакууму дозволяє уникати надлишкового окислення зони з'єднання, однак термодформаційний цикл процесу зварювання не забезпечує низького рівня деформації через високу пластичність алюмінію та сплавів при високих температурах. Особливо поставлена задача ускладнюється через неможливість використання спеціальної оснастки для обмеження рівня деформації при зварюванні складних за конфігурацією виробів.

Вирішення завдання прецизійного з'єднання алюмінію та сплавів електроконтактним зварюванням ускладнюється через притаманні їм високі термопластичні властивості, тепло- та електропровідність. Це, у свою чергу, не дозволяє локалізувати тепловиділення у вузькій зоні контакту, внаслідок чого вироби мають високий рівень залишкової деформації.

У зв'язку з цим необхідним та актуальним завданням є створення нових технологій з'єднання алюмінію та його сплавів способами зварювання тиском на основі розробки засобів інтенсифікації процесів, що обумовлюють утворення з'єднань.

***Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами.***

Дисертаційна робота виконувалась у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи Чернігівського національного технологічного університету на тему «Наукові основи отримання нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском» (номер державної реєстрації № 0112U003008).

***Мета і задачі досліджень.*** Метою дисертаційної роботи є розробка технологій з'єднання алюмінію та його сплавів способами зварювання тиском з низьким рівнем залишкової деформації виробів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Вивчити термодформаційну кінетику деталей з алюмінію та його сплавів.
2. Дослідити використання проміжних евтектичних прошарків при дифузійному зварюванні у вакуумі алюмінію та його сплавів.

3. Розробити засоби інтенсифікації процесу дифузійного з'єднання при використанні питомих зусиль низького рівня.

4. Визначити засоби локалізації тепловиділення у контакті деталей при електроконтактному стиковому зварюванні опором.

**Об'єкт дослідження** – процес прецизійного зварювання тиском алюмінію та його сплавів.

**Предмет дослідження** – інтенсифікуючі фактори видалення оксидної плівки при дифузійному зварюванні у вакуумі; фактори, що впливають на тепловиділення при електроконтактному стиковому зварюванні опором.

**Методи досліджень.** Якість зварних з'єднань оцінювалася за результатами оптичної мікроскопії на оптичних мікроскопах МИМ-8 та Neophot-32 та растрової електронної мікроскопії на скануючому електронному мікроскопі JSM-840 фірми «JEOL». Мікротвердість зварних з'єднань вимірювалася за допомогою мікротвердоміра М400 фірми «LECO». Визначення характеристик шорсткої поверхні деталей перед зварюванням здійснювалося за методикою, розробленою Дьомкіним Н.Б., з використанням профілограм поверхонь, знятих до зварювання на профілографі-профілометрі моделі 201. Механічні випробування зварних з'єднань на розрив та на зріз проводилися на розривній машині УМ-5 з використанням спеціалізованого оснащення. Обробка результатів експериментів здійснювалася за методикою, розробленою Кассандровою О.Н. та Лебедевим В.В., з використанням математичного пакета Mathcad 15. При дослідженні складу проміжного евтектичного прошарку для дифузійного зварювання у вакуумі використовувалися теоретичні основи неорганічної хімії. При дослідженні деформування матеріалів та обробці даних досліджень використовувалися математичний апарат, теоретичний апарат повзучості та пластичності металів, фізико-механічні властивості металів та сплавів. Моделювання процесу нагріву та деформування алюмінієвих сплавів проводилося з використанням

скінченно-елементного пакета 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). Математичні залежності деформації алюмінію від величини та часу дії навантаження одержані з використанням математичного пакету Mathcad 15.

### ***Наукова новизна.***

1. На основі дослідження термодформаційної кінетики вперше одержано рівняння повзучості для моделювання деформаційної поведінки виробів з алюмінію АД00 та сплаву АМг5 під дією температури та навантаження. Визначено температурну залежність коефіцієнта Пуассона алюмінію АД00 в інтервалі 293-873 К. Отримані дані дозволяють здійснювати прогнозування величини деформації виробу з використанням скінченно-елементних програмних комплексів залежно від геометричних характеристик виробу, величини температури, зусиль при зварюванні та тривалості їх дії.

2. Вперше встановлено можливість інтенсифікації процесу дифузійного зварювання на основі електрохімічної активації шляхом використання прошарку системи  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ , що вноситься перед зварюванням між контактними поверхнями, та пропускання постійного електричного струму густиною до  $0,2 \text{ А/мм}^2$  в процесі зварювання. Утворення фізичного контакту, що виражається у змочуванні контактуючих поверхонь рідким металевим евтектичним прошарком системи алюміній-кремній, відбувається за рахунок видалення оксидної плівки при утворенні їдкого натрію  $\text{NaOH}$  та безпосереднього відновлення алюмінію з оксиду парами магнію з виділенням вільного кремнію. За рахунок пропускання струму час контактного плавлення та утворення з'єднання скорочується до 90 с. Модифікація евтектики натрієм, що подрібнює її структуру, та утворення зміцнюючої фази силіциду магнію

Mg<sub>2</sub>Si забезпечують високий рівень механічних властивостей зварного з'єднання.

3. Вперше встановлено ефективність застосування тонких проміжних прошарків з алюмінієвої фольги для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань при електроконтактному стиковому зварюванні опором алюмінію та його сплавів. Визначено, що утворення зварного з'єднання зі сплаву АД31 відбувається за рахунок внесення суцільної алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм у контакт між деталями, що зварюються, у кількості 6-ти шарів, проходження через деталі електричного струму густиною 300 А/мм<sup>2</sup> протягом 0,5-0,7 с та прикладення питомого тиску 8 МПа. Розміщення тонкого проміжного прошарку з декількох шарів фольги дозволяє зосередити тепловиділення у зоні з'єднання внаслідок утворення між шарами фольги та деталями більшої кількості контактних опорів, на яких локалізується виділення теплової енергії значної величини при проходженні електричного струму.

**Практичне значення.** Розроблено нову технологію дифузійного зварювання алюмінію та його сплавів у вакуумі з використанням рідкого евтектичного проміжного прошарку на основі кремнію, яка дозволяє отримати зварні з'єднання з міцністю при випробуванні на зріз до 90 % від міцності основного матеріалу при деформації виробу до 2-3 %.

Розроблено нову технологію електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через тонкий проміжний прошарок з алюмінієвої фольги. Запропонована технологія дозволяє одержати зварні з'єднання з міцністю на розрив до 95% від міцності основного матеріалу з рівнем деформації виробу до 1-2%.

Розроблена технологія дифузійного зварювання у вакуумі через прошарок впроваджена у виробництво прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення на ПАТ «Чернігівський завод радіоприладів» (м. Чернігів). Дану технологію також апробовано під час дослідно-виробничої перевірки на ДП «Харківське державне авіаційне виробниче

підприємство» (м. Харків), за результатами якої підтверджено можливість застосування розробленого технологічного процесу в авіабудівній галузі.

Окремі наукові розробки та практичні рекомендації за результатами дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес Чернігівського національного технологічного університету.

**Особистий внесок здобувача.** За участю автора були проведені дослідження і розробка засобів інтенсифікації процесу одержання нероз'ємних з'єднань при дифузійному зварюванні у вакуумі, дослідження деформаційної поведінки алюмінію під дією температури та навантаження, вивчення процесів масоперенесення при електроконтактному зварюванні алюмінію. Автором самостійно було одержано аналітичні залежності повзучості алюмінію АД00 та АМг5 під дією температури та навантаження, встановлено температурну залежність модуля пружності та коефіцієнта Пуассона для АД00, виконано дослідження електропровідності проміжного прошарку для дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію АД00 та сплаву АМг5, одержано результати досліджень впливу кількості шарів проміжного прошарку на тепловиділення у контакті між деталями при електроконтактному стиковому зварюванні опором алюмінію АД31. Проведення експериментів, обробка, аналіз та узагальнення результатів досліджень виконувалися особисто та за участю співавторів.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 3-й Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2013 р.), на 7-й Науково-практичній конференції молодих учених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (Київ, 2013 р.), на Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі» (Чернігів, 2013 р.), на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених та студентів «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці»



(Маріуполь, 2013 р.), на 2-й Міжнародній конференції «Ukraine – EU. Modern Technology, Business and Law. Modern Priorities of Economics. Engineering and Technologies» (Словаччина, м. Кошице, 2016 р.), на 6-й Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2016 р.), на Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі» (Чернігів, 2016 р.), на 36-й Міжнародній конференції «IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)» (Київ, 2016 р.), на 7-й Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2017 р.), на 9-й Міжнародній конференції молодих учених «Welding and related technologies» (Київ, 2017 р.).

**Публікації.** За результатами проведених досліджень опубліковано 17 наукових робіт: 5 статей у фахових наукових виданнях, з яких 4 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних; 10 у збірниках наукових праць та матеріалів конференцій (матеріали 1 конференції входять до наукометричної бази даних Scopus); отримано 2 патенти України.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і шести додатків. Загальний обсяг дисертації 169 сторінок, з них дисертації без додатків – 155 сторінок, що містить 60 рисунків, 15 таблиць, список використаних джерел включає 158 найменувань.

## РОЗДІЛ 1

### ВИКОРИСТАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ У ПРЕЦИЗІЙНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

#### 1.1 Застосування алюмінію та його сплавів у прецизійних конструкціях

Широке впровадження алюмінію та його сплавів у виробництво сучасної техніки обумовлюється сукупністю характерних властивостей цих матеріалів, таких як низька питома вага, висока механічна міцність, значна тепло- та електропровідність, добра здатність до обробки тиском та зварювання, висока стійкість до дії повітря, води та агресивних середовищ. Поєднання унікальних властивостей алюмінію та його сплавів зробили очевидним їх вибір дослідниками, інженерами та конструкторами стосовно великої кількості промислових застосувань. Постійне підвищення уваги до питання економії енергоспоживання та охорони навколишнього середовища суттєво збільшує попит на використання алюмінієвих конструкцій [1]. Саме тому обсяги виробництва алюмінію з року в рік зростають, а галузі застосування постійно розширюються [1-5].

На сьогоднішній день алюмінієві конструкції мають широке застосування у пріоритетних високотехнологічних галузях індустрії: авіаційній, ракетно-космічній, автомобіле- та суднобудуванні, виробництві пристроїв військового призначення, енергетичному, електротехнічному та електронному машинобудуванні, хімічній та нафтовій промисловості [5-10]. Зокрема, до них відносять компенсатори падіння тиску, паливні акумулятори, розширювальні малогабаритні баки [8-10], хімічні реактори, фільтри, дистиляційні та ректифікаційні апарати [11, 12], камери змішування, камери згоряння, радіатори, нагрівачі [8, 13-15], холодильні установки [16-18], корпуси електродвигунів [6, 19, 20], теплообмінні

апарати [21-24] та інші. У таких конструкціях наявність вузлів складної конфігурації суттєво ускладнює процес їх виготовлення.

Заміна мідно-латунних та сталевих елементів конструкцій алюмінієвими суттєво підвищує технічні характеристики подібних конструкцій [10]. Оксидна плівка, що виникає на поверхні алюмінію при взаємодії з повітрям, є дуже міцною, герметично ізолює метал від контакту з киснем повітря і запобігає подальшому окисленню металу, що є важливою перевагою перед іншими конструкційними матеріалами [25].

Слід відмітити, що питома вага алюмінію забезпечує загальне зменшення ваги конструкцій, що, у свою чергу, знижує трудомісткість процесу виготовлення конструкції та збільшує економію матеріалу, позитивно позначається на зменшенні шкідливого впливу на навколишнє середовище [1, 8, 13].

Однією з найбільш широких галузей застосування алюмінію в тонкостінних конструкціях є виготовлення теплообмінників для різноманітних систем охолодження [15, 27, 28].

Серед таких теплообмінників найбільш прогресивними у наш час є пластинчасто-ребристі теплообмінники, вузли та деталі яких повністю алюмінієві, а їх основні частини виконують штампуванням та зварюванням [27-29]. Це створює можливості економічного масового виготовлення таких виробів при мінімальній металоємності. На відміну від традиційних, такі теплообмінники є більш міцними, компактними, енергоефективними та надійними в експлуатації.

Крім того, останнім часом спостерігається суттєве підвищення ефективності пластинчасто-ребристих алюмінієвих теплообмінників, викликане застосуванням у них міні- та мікроканальних технологій, які дозволяють створювати більш компактні апарати [30-33]. Зі зменшенням діаметра каналів до мікророзмірів (10 мкм ÷ 1 мм) в одиниці об'єму апарата збільшується площа теплообмінної поверхні і, відповідно, зростає теплообмінна здатність. У таких конструкціях завдяки високій корозійній

стійкості алюмінію повністю відсутній ризик виникнення гальванічної корозії, якої у традиційних теплообмінниках при контакті двох металів (міді та алюмінію) неможливо уникнути внаслідок протікання гальванічних струмів [33].

Однак складна конфігурація та розміри таких конструкцій потребують пошуку та використання найбільш технологічного методу їх виготовлення та одержання якісних нероз'ємних з'єднань у характерних вузлах. Необхідною умовою при цьому є одночасне забезпечення високої міцності, прецизійності і збереження проектної форми даних виробів.

Тонкостінні конструкції та вироби складної конфігурації, виготовлені з алюмінію та його сплавів, потребують дотримання вимог прецизійності з'єднань, що, у свою чергу, забезпечує технічні характеристики, надійність та довготривалість її служби. Прийнято вважати прецизійними, або високоточними, вироби з рівнем залишкової пластичної деформації до 2% від їх початкового розміру [34].

Тому необхідним завданням для виготовлення тонкостінних конструкцій та виробів складної конфігурації є одержання нероз'ємних з'єднань з алюмінію та сплавів із високими показниками міцності та низьким рівнем деформації зі збереженням проектної форми виробів.

## **1.2 Способи одержання нероз'ємних з'єднань алюмінію та його сплавів**

Специфічні властивості алюмінію та його сплавів є вигідними для виготовлення конструкцій різного призначення, однак суттєво ускладнюють процес одержання нероз'ємних з'єднань, особливо у вузлах, які потребують дотримання вимог прецизійності.

Внаслідок високої теплопровідності алюмінію необхідно застосовувати спеціальні технологічні прийоми, а наявність на його поверхні тугоплавкої оксидної плівки перешкоджає утворенню якісного

фізичного контакту між поверхнями, що зварюються. Коефіцієнт лінійного розширення алюмінію у 2 рази, а теплопровідність у 3 рази більше, ніж для сталі, що призводить до значних деформацій деталей, що з'єднуються [35].

Отримання нероз'ємних з'єднань з алюмінію та його сплавів значно ускладнюється наявністю тугоплавкої оксидної плівки на поверхні металу, видалення якої перед з'єднанням без використання складних технологій не забезпечує утворення якісного фізичного контакту, що, як наслідок, суттєво погіршує умови для одержання прецизійних з'єднань. Низька температура плавлення алюмінію ( $T_{пл}=933\text{ K}$ ) та висока температура плавлення оксидної плівки ( $T_{пл}=2323\text{ K}$ ) значно ускладнюють керування процесом зварювання [36]. Оскільки оксидна плівка характеризується високою здатністю до адсорбції вологи з навколишнього середовища, то її необхідно видаляти перед зварюванням або безпосередньо у процесі зварювання [37-40].

Серед існуючих способів одержання нероз'ємного з'єднання алюмінію та його сплавів можна виділити три групи: зварювання плавленням (електродугове, електрошлакове, газове, лазерне, плазмове, електронно-променеве), зварювання тиском (електроконтактне, холодне, дифузійне) та паяння [37-43].

Способи зварювання плавленням дозволяють вирішувати лише обмежене коло проблем, що виникають при з'єднанні алюмінію та його сплавів і вимагають значного часу на післязварювальну обробку деталей. Як правило, з'єднання з алюмінію, отримані способами зварювання плавленням, характеризуються низькою міцністю і високим рівнем деформації у результаті застосування високих температур зварювання (вище температури плавлення основного металу) [38-40, 44]. Рідкотекучість алюмінію при дуговому зварюванні призводить до витікання металу через корінь шва. Деталі перед зварюванням потребують ретельної підготовки, яка полягає у механічному очищенні поверхні деталей та хімічному травленні. Частинки оксидної плівки, що потрапили

до зварювальної ванни, можуть утворювати неметалеві включення, а це знижує міцність та працездатність з'єднання.

Широкого розповсюдження для одержання прецизійних з'єднань набули різні технології паяння [45-48]. Однак паяні з'єднання характеризуються невисокою міцністю, необхідністю застосування флюсів, рівномірного розподілення зазорів між деталями, ретельної підготовки деталей та акуратного видалення залишків флюсів, що робить паяння складним технологічним процесом. Зокрема, паяння у сольових ваннах потребує ретельного видалення корозійних хлоридних флюсів з поверхні теплообмінника, оскільки навіть найменші залишки флюсу призводять до корозії. Для вакуумного паяння припоєм переважно слугують листи, плаковані силуміном або іншими матеріалами, нанесення яких потребує застосування додаткових технологій [41-42].

Зварювання тиском порівняно зі зварюванням плавленням характеризується більш низькими температурами та прикладенням тиску до деталей, що зварюються. Утворення міцного та якісного зварного з'єднання при цьому відбувається за рахунок пластичної деформації мікровиступів на поверхнях, що зварюються [39, 40, 49, 50]. У результаті дії стискаючих зусиль різні забруднення та оксиди на поверхнях, що зварюються, витісняються із зони з'єднання, а чисті поверхні наближаються одна до одної по всій площі на відстань атомного зчеплення.

На сьогоднішній день для виготовлення нероз'ємних з'єднань з низьким рівнем деформації та високою точністю найбільш перспективними є способи зварювання тиском, зокрема дифузійне зварювання у вакуумі [34, 51, 52] (ДЗВ) та, у ряді випадків, електроконтактне зварювання [34, 53, 54] (ЕКЗ). При цьому умовою отримання прецизійності є формування зварного з'єднання із залишковою пластичною деформацією 2 % від висоти деталей для ДЗВ та товщини (або діаметра) деталі для ЕКЗ [34].

ДЗВ широко використовується для зварювання алюмінію внаслідок вагомих переваг: можливість регулювання в широких інтервалах параметрів режиму, можливість з'єднання деталей незалежно від розміру поперечного перерізу деталей та форми поверхні, економічність та гігієнічність процесу зварювання. Наявність вакууму при дифузійному зварюванні дозволяє уникати надлишкового окислення зони з'єднання [55, 56].

Технологія ДЗВ полягає у нагріванні деталей, що зварюються, у вакуумі до температур (0,7-0,8) від температури плавлення основного металу, прикладенні питомого тиску до деталей та ізотермічній витримці при температурі зварювання.

Класичні режими дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та алюмінієвих сплавів між собою та з іншими металами передбачають прикладення питомих тисків 5-12 МПа при температурі зварювання 773-873 К та часі витримки 15-30 хв. [50, 55-57].

Режими, що пропонуються у деяких сучасних роботах, також пропонують застосування тривалого прикладання високих питомих тисків. Зокрема, авторами роботи [58] розроблено спосіб ДЗВ алюмінієво-магнієвого сплаву за режимом: температура зварювання 833 К, час 20 хв., питомий тиск 40 МПа. Задля зменшення рівня деформацій при такому високому тиску автори використовують спеціальні формуючі пристрої.

У роботі [59] описано спосіб зварювання алюмінію ДЗВ за режимом, що передбачає прикладення питомого тиску 7,35 МПа при температурі зварювання 773 К та часі витримки 30 хв.

У роботі [60] ДЗВ алюмінію запропоновано проводити при низькому питомому тиску величиною 0,9-1,2 МПа при температурі 833 К та часі зварювання 15-20 хв. із застосуванням п'яти циклів навантаження з тривалістю одного циклу 3 хв.

Однак внаслідок високої пластичності алюмінію та сплавів при високих температурах такі термодформаційні цикли процесу ДЗВ не

забезпечують низького рівня деформації виробів. Особливо поставлена задача ускладнюється через неможливість використання спеціальної оснастки для обмеження рівня деформації при зварюванні складних за конфігурацією виробів.

Необхідною умовою, що забезпечує утворення зварного з'єднання при дифузійному зварюванні у вакуумі, є створення між поверхнями, що з'єднуються, фізичного контакту, при якому будь-які фактори, які перешкоджають процесу дифузії, будуть зведені до мінімуму [61].

Для забезпечення формування з'єднання поверхні піддають ретельному поліруванню і хімічному очищенню від забруднень. Однак утворенню чистого фізичного контакту поверхонь алюмінієвих деталей, що з'єднуються, перешкоджає тугоплавка оксидна плівка, повне видалення якої є проблематичним. Тому при дифузійному зварюванні такі плівки необхідно зруйнувати і диспергувати, використовуючи різноманітні засоби інтенсифікації процесу.

З метою забезпечення утворення фізичного контакту та сприяння руйнуванню оксидної плівки алюмінію при ДЗВ застосовують такі засоби інтенсифікації процесу зварювання як вібраційні коливання ультразвукової частоти, циклічне прикладання тиску, циклічна зміна температури в процесі зварювання, прикладення електростатичного поля, попереднє опромінення поверхні деталей (нейтронами,  $\alpha$ -частками,  $\gamma$ -променями, електронами та ін.), використання проміжних прошарків з чистих легкоплавких елементів або зі сплавів, які утворюють з основним металом легкоплавку евтектику [55-57].

Кожен з названих засобів володіє сукупністю переваг перед іншими, однак вони не дозволяють комплексно вирішити поставлену задачу та потребують розробки технологій, створення високоточного зварювального та спеціалізованого обладнання та оснащення, а також значних матеріальних затрат.



Ефективним способом, що забезпечує як фізичний контакт, так і протікання дифузійних процесів між поверхнями, що з'єднуються, є примусове деформування матеріалів у зоні з'єднання [62]. При пластичній деформації відбувається механічне руйнування оксидних плівок на поверхнях деталей, що з'єднуються, збільшується поверхня контакту та відбувається пластичне деформування приконтатної зони матеріалу. Все це активізує дифузійні процеси в зоні з'єднання. Однак при цьому рівень деформації основного металу складає значну величину, що обмежує область використання цього способу.

Імпульсне деформування, запропоноване у роботі [63], яке забезпечує інтенсивне масоперенесення через зону контакту, на нашу думку, не може вирішити питання на користь точності виготовлення конструкції. Причому даний спосіб придатний тільки в конкретних випадках, оскільки він пов'язаний зі збільшенням загального часу зварювання та зниженням продуктивності процесу.

Значне підвищення міцності з'єднань та зниження рівня деформації досягається при введенні між поверхнями, що зварюються, тонких прошарків, які наносяться на одну чи обидві поверхні гальванічним чи хімічним осадженням, термічним випаровуванням у вакуумі або у вигляді фольги чи порошку [56, 57, 64].

Ефективність застосування прошарків на основі легкоплавких елементів або евтектичних сплавів пов'язується з формуванням у зоні з'єднання рідкої фази, що полегшує руйнування оксидної плівки, підвищує інтенсивність дифузійного потоку атомів в основний метал як зі сторони 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 з'єднання.

Способом впливу на дифузійні процеси в стику в присутності рідкої фази є поєднання процесу нагрівання із зовнішнім навантаженням [65]. При цьому частина рідкої фази може бути видавлена із зони з'єднання, що забезпечить досягнення оптимального обсягу рідкої фази в зоні контакту, і,

як наслідок цього, надходження необхідної кількості елементів із проміжного шару в основний матеріал. Рідка фаза, яка утворюється в результаті так званого контактного плавлення, завдяки своїй високій поверхневій активності добре змочує контактуючі метали й швидко розтікається по їх поверхні.

Для оцінки придатності металу для контактнореактивного плавлення з алюмінієм важливе значення мають його вміст в евтектиці, що утворюється, гранична розчинність при температурі процесу металу в евтектиці, а також пружність випаровування цього металу у вакуумі, яка характеризує можливість перенесення його через несучільності в оксидній плівці на алюмінії [66, 67].

Підплавлення алюмінію під оксидною плівкою і диспергування 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 та мають високу температуру плавлення (але нижчу за температуру плавлення алюмінію). Такими матеріалами є нікель, кремній, мідь, срібло, магній, цинк, олово (рис. 1.1). При утворенні евтектик, збагачених алюмінієм, активування може відбуватися і без суттєвого перегріву понад евтектичну температуру.

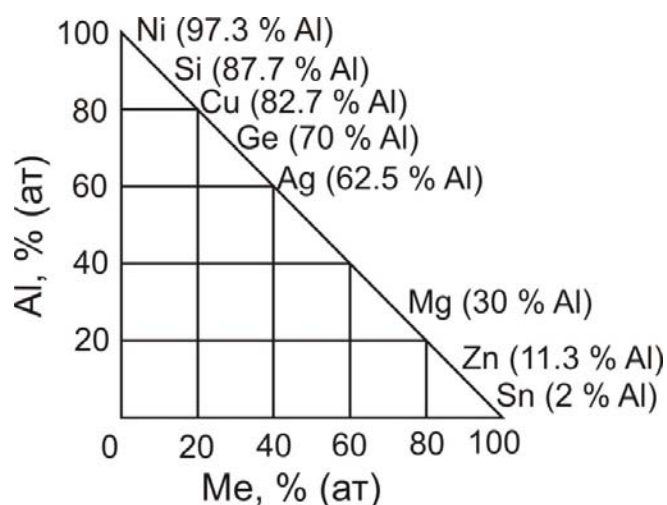


Рисунок 1.1 – Вміст алюмінію в евтектиках з деякими металами [67]

Найбільш збагачені алюмінієм евтектики з нікелем та кремнієм. Зі збільшенням вмісту в евтектиці алюмінію підвищується її температура плавлення, що також активує процес контактної-реактивного плавлення.

Однак через занадто високу температуру плавлення евтектики Al-Ni (913 K) від місць контакту алюмінієвого сплаву з рідкою евтектикою Al-Ni розвивається не лише загальна, але і локальна ерозія по границям зерен основного металу [67]. Тому в якості прошарку придатними є матеріали, які утворюють багату на алюміній евтектику з температурою плавлення нижче 913 K.

Найбільш придатним для використання з урахуванням вище вказаних вимог є евтектичний силумін Al-Si, що містить 11,7 % (мас.) кремнію (рис. 1.2). Евтектика алюмінію з кремнієм має температуру плавлення 850 K і володіє високою пластичністю [41, 42, 43].

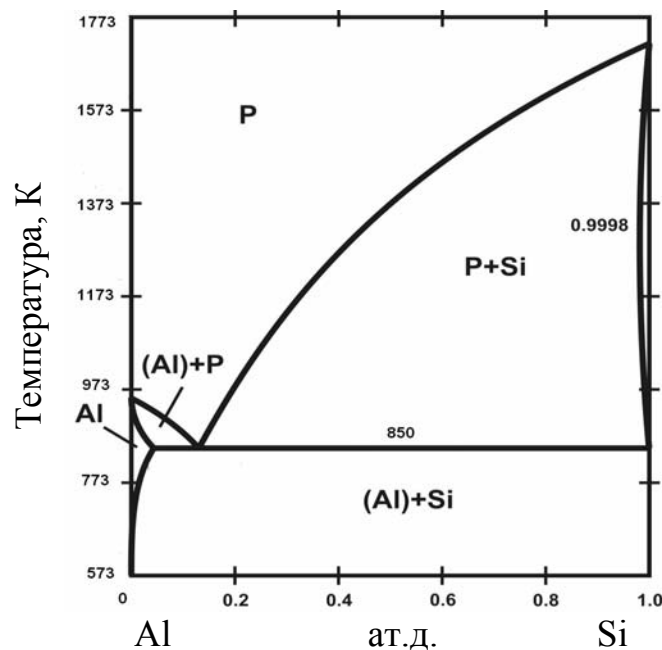


Рисунок 1.2 – Діаграма стану алюміній-кремній [43]

Евтектичний прошарок із силуміну може вводитися у зону з'єднання шляхом гальванічного чи хімічного осадження, у вигляді фольги чи порошку або термічним вакуумним напиленням [56, 57, 64].

У роботі [56] вказується, що технологія дифузійного зварювання через напилені прошарки потребує дві вакуумні камери: для напилювання

та зварювання. При цьому напилені прошарки встигають окислитись, що зменшує ефективність їх використання.

Автори роботи [69] 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 закрыта 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, але установка для виконання зварювання досить складна.

У роботах [70, 71] описано спосіб інтенсифікації утворення зони об'ємної взаємодії при дифузійному зварюванні металів у вакуумі, при якому проміжний шар не наноситься на поверхню металу, а утворюється під час зварювання. Таким чином, необхідні реагенти для прискорення утворення з'єднання одержуються безпосередньо у процесі нагріву.

У роботі [41] запропоновано спосіб з'єднання у вакуумі алюмінію та сплавів, що відбувається у парах магнію. Поверхні деталей, які підлягають з'єднанню, плакуються евтектичним силуміном, легованим магнієм у кількості 1-1,5 %. Зібраний виріб розміщують у вакуумній камері, створюють розрідження  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  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 деформації 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.

Відомий спосіб дифузійного з'єднання через рідкий проміжний прошарок, що утворюється при евтектичній температурі у результаті сплавлення матеріалу, що входить до його складу, з приконтатними об'ємами матеріалів, що зварюються [56]. Подібно припою, він змочує поверхні матеріалу впродовж досить короткого проміжку часу та при охолодженні формує нероз'ємне з'єднання. Перевага такого способу дифузійного зварювання перед способами паяння полягає у тому, що у системі «основний матеріал – евтектичний проміжний прошарок – основний матеріал» немає вираженої границі розділу та різкої зміни фізико-хімічних та механічних властивостей, які зазвичай характерні для системи «основний матеріал – припой – основний матеріал». Евтектичний сплав матеріалу з проміжним шаром володіє властивостями обох матеріалів.

Ефективність використання проміжних прошарків при дифузійному зварюванні у вакуумі алюмінію встановлена також у роботі [51]. Автором роботи визначено, що використання проміжних евтектичних прошарків для дифузійного зварювання алюмінієвих сплавів дозволяє одержати більш міцні зварні з'єднання порівняно зі звичайним дифузійним зварюванням у твердій фазі.

Технологія дифузійного зварювання алюмінію знайшла застосування стосовно виготовлення вузлів тонкостінних конструкцій [72,73]. Зокрема, автори роботи [72] встановили, що міцність з'єднань пластинчасто-ребристих теплообмінників, виготовлених дифузійним зварюванням у вакуумі, вище, ніж при застосуванні паяння, що дозволяє застосовувати їх у конструкціях, що працюють при тисках 13 МПа і вище. У роботі [73]

зазначається, що дифузійно з'єднані пластинчасто-ребристі теплообмінники є більш компактними та мають цілісну конструкцію. Їх габарити зазвичай складають лише 20 % від розмірів аналогічних пластинчато-трубчастих паяних теплообмінників, і, на відміну від інших компактних теплообмінників, вони можуть бути спроектовані для тисків більш ніж 62 МПа.

Тобто, з проведеного аналізу літератури випливає, що застосування дифузійного зварювання у вакуумі через прошарок евтектичного складу відкриває більші можливості завдяки використанню вакуумованого середовища та зведення до мінімуму факторів, які перешкоджають процесу дифузії. При цьому технологічність процесу може бути піднято на більш високий рівень, якщо забезпечити умови, при яких відпаде необхідність ретельної і складної підготовки деталей до зварювання, створити умови для ефективного транспортування кремнієвмісного середовища до чистого алюмінію під оксидною плівкою.

Отже, актуальною задачею є розширення функціональних можливостей способу дифузійного з'єднання деталей з алюмінію та його сплавів через прошарок шляхом підбору складових елементів прошарку за умови їх здатності забезпечувати вивільнення поверхонь від оксидних плівок та формувати евтектичний сплав у кількості, яка пропорційна об'єму основного матеріалу, що знаходиться в шорстких поверхнях з'єднаних деталей, дозволяючи отримати мінімальну осадку при виготовленні прецизійних виробів.

Електроконтактне зварювання (ЕКЗ) алюмінію, у свою чергу, знайшло широке застосування завдяки таким перевагам як висока продуктивність процесу, висока якість зварних з'єднань, невисокі вимоги до зварювальника, низькі витрати допоміжних матеріалів, можливість механізації та автоматизації процесу [53, 74, 75].

ЕКЗ здійснюється термомеханічним шляхом при проходженні електричного струму через контакт металевих деталей із прикладенням до

них стискаючого зусилля [74,75]. При цьому процес формування нероз'ємного з'єднання відбувається шляхом утворення міжатомних зв'язків у результаті локального нагрівання в зоні з'єднання та сумісної пластичної деформації торців деталей.

ЕКЗ засноване на виникненні у металі опору потоку електричного струму з метою генерування тепла, необхідного для з'єднання. Оскільки алюміній має високий коефіцієнт електропровідності, рівень струму для зварювання алюмінію повинен бути значно вищим, ніж для низькоелектропровідної сталі. Тепло, необхідне для з'єднання, генерується електричним опором металу та опором зони контакту між деталями [75].

Останнім часом для одержання прецизійних зварних з'єднань серед способів електроконтактного зварювання поступово набуває поширення електроконтактне стикове зварювання опором [34]. Однак у літературі і досі знаходиться мало інформації щодо застосування даного способу стосовно прецизійного зварювання алюмінію та сплавів.

При стиковому ЕКЗ опором деталі з'єднуються по всій площині без оплавлення торців, що стикаються [75,76]. Подача напруги до деталей, закріплених в електродах стикової машини та стиснутих зусиллям певної величини, викликає появу струму та нагрів деталей у стикі до температури, рівної (0,8-0,9) від температури плавлення металу. Після нагрівання металу в зоні зварювання до пластичного стану різко збільшують зусилля осадки, у результаті чого в твердій фазі формується зварне з'єднання. Тепло, яке генерується у контакті між деталями, у балансі загального тепла не перевищує 10-15 %. Проте воно виділяється за короткий час і у вузькій приконтактній зоні, що є достатньою умовою для формування зварних з'єднань [76].

Необхідною умовою, що забезпечує утворення з'єднання при електроконтактному зварюванні, є активація контакту шляхом умисного підвищення теплової енергії у поверхневих шарах або по площині контакту та збільшення опору у контакті деталь-деталь.

Для забезпечення деформації при стиковому ЕКЗ до 2 % необхідно вести процес стиску деталей з критичною швидкістю на рівні  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  с<sup>-1</sup> без деформаційного зміцнення приконтного шорсткого шару та проводити зварювання з мінімальним проплавленням не вище 0,2 від товщини (або діаметра) деталі [34].

Внаслідок високої теплопровідності, низького перехідного опору в контакт між алюмінієвими деталями та утворення на торцях оксидної плівки при електроконтактному стиковому зварюванні необхідне застосування великого зусилля осадки та швидкості осадки, і, як наслідок, більших установочних довжин деталей [75].

За класичними режимами стикового ЕКЗ опором рекомендовані питомі зусилля осадки для зварювання алюмінію становлять 3-15 МПа [74, 75], а для стикового зварювання оплавленням їх величини складають 150-200 МПа [50], однак через високі термопластичні властивості, тепло- та електропровідність алюмінію та сплавів виробу характеризуються високим рівнем пластичної деформації і вимагають використання спеціального оснащення [43, 45]. Деформація при класичному електроконтактному зварюванні супроводжується гратом у стику чи вм'ятиною у точці, що досягає 20 % від товщини чи діаметра деталі, що для виготовлення прецизійних виробів є неприйнятним.

Тому при ЕКЗ алюмінію застосовують жорсткі режими, що характеризуються високою густиною струму та низькою тривалістю нагріву [50, 75]. Однак при надмірній густині струму можливий виплеск металу, а значне зниження часу зварювання збільшує нерівномірність нагріву деталей по перерізу і, таким чином, не забезпечує якісного формування з'єднання.

Вищевказані особливості визначають необхідність використання додаткових засобів підвищення контактного опору між деталями, що дозволить у комплексі отримати концентроване тепловиділення в стику між деталями та досягти утворення якісного зварного з'єднання. Одним із



таких засобів є використання тонких проміжних прошарків, що вносяться безпосередньо у зону контакту деталей.

У роботі [76] розроблено спосіб контактного точкового зварювання металів з високою електропровідністю, таких як мідь та алюміній, а також сплавів та металів з покриттям на їх основі, при якому між поверхнями, що зварюються, вводиться проміжний порошкоподібний прошарок з високим питомим електроопором. При цьому прошарок товщиною до 3 мм наноситься на одну з поверхонь деталей, що зварюються. Зварювання відбувається при питомому тиску 0,5 МПа, струмі 17,6 кА та часі пропускання імпульсу струму 0,5 с. У процесі зварювання розплавлений метал прошарку під дією осьових навантажень витісняється на периферію зварної точки. Наявність у порошкоподібному прошарку нікелю, хрому та міді сприяє значному підвищенню перехідного опору та температури розігріву у контакті деталь-деталь, що є достатнім для створення температурних та металургійних умов формування литого ядра.

Авторами роботи [77] запропоновано спосіб стикового електроконтактного зварювання сплавів на основі алюмінідів титану з використанням наноструктурованих фольг систем Al-Ni та Al-Cu. При використанні таких фольг, що складаються з шарів титану та алюмінію або міді та алюмінію, відбувається додаткове виділення тепла у зоні контакту, обумовлене протіканням екзотермічної реакції між металами, завдяки чому зменшується час зварювання. Також додатково показано, що використання наносхаруватих фольг сприяє однорідності нагріву та покращенню формування зварних з'єднань.

У роботах [54, 78] розроблено спосіб електроконтактного точкового зварювання алюмінію та його сплавів через прошарок зі зварювального матеріалу. Цей спосіб передбачає використання 4-6 шарів алюмінієвої фольги, що розміщується безпосередньо між торцями деталей, що зварюються. Нагрівання зони з'єднання деталей відбувається за рахунок виділення джоулевого тепла на контактних опорах між шарами фольги при

пропусканні імпульсів струму щільністю 300-600 А/мм<sup>2</sup> тривалістю 0,1-0,3 с. даний спосіб дозволяє отримати зварні з'єднання з рівнем деформації 2-5 % та міцністю до 90-95 % від міцності основного металу. Дана робота констатує, що використання проміжних прошарків з алюмінієвої фольги дозволяє збільшити контактний опір, температуру в контакті деталь-деталь, зменшити час нагріву та рівень залишкових деформацій за рахунок зниження об'єму розплавленого металу та утворення зв'язків між матеріалом проміжного шару і основним металом.

Отже, огляд існуючих публікацій по ЕКЗ через проміжні прошарки дозволяє припустити, що для збільшення контактного опору і локалізації тепловиділення у зоні контакту необхідно забезпечити внесення у проміжок між деталями тонкий металевий прошарок зі зварювального матеріалу або матеріалу, близького за хімічним складом до основного металу.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що, при усіх відмінностях дифузійного зварювання у вакуумі та електроконтактного зварювання, необхідна міцність та прецизійність не можуть бути гарантованими без додаткових операцій, що інтенсифікують процес утворення з'єднання. Зокрема, при дифузійному зварюванні у вакуумі алюмінію та його сплавів необхідно забезпечити активацію поверхонь, що з'єднуються, шляхом прискорення процесу утворення фізичного контакту за рахунок введення у зону з'єднання проміжного рідкого евтектичного прошарку системи Al-Si. При електроконтактному зварюванні утворення з'єднання забезпечується локалізацією теплової енергії у приконтактній зоні з'єднання, що досягається шляхом розміщення тонких металевих проміжних прошарків, зокрема з алюмінієвої фольги.

### **1.3 Вплив температури на пружно-пластичні характеристики алюмінію**

При розробці технологічних процесів прецизійного з'єднання необхідним завданням є прогнозування характеру деформування виробів під дією температури та тиску обраного процесу з'єднання.

При підвищених температурах в алюмінієвих сплавах зростає пластичність, особливо у випадках прикладення навантажень при змінній температурі, коли механічні характеристики суттєво залежать від температури [79-81].

Внаслідок високої пластичності алюмінію в умовах підвищених температур відбувається різке зниження його пружних властивостей та зміна міцності від тривалості дії навантаження, що викликані структурними та фазовими перетвореннями матеріалу у часі, починаючи з певного діапазону температур [80, 82]. Крім того, при високих температурах матеріал проявляє нові властивості, зокрема повзучість, що полягає у зміні деформації у часі під дією постійного навантаження [79-81, 83-85].

На основі даних про зміну залежно від температури таких характеристик матеріалу як модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границя текучості, швидкість повзучості з'являється можливість встановлення характеру зміни геометричної форми та розмірів виробів під дією температури та тисків.

У той час як відомості про перші три характеристики можна вважати у тій чи іншій мірі відомими, то стосовно повзучості алюмінію, як найважливішої характеристики деформації, у літературі наведено доволі обмежений ряд даних [86-88].

В інтервалі температур (0,05-0,3) від температури плавлення металу повзучість змінюється за логарифмічним законом. В інтервалі (0,2-0,7) від температури плавлення спостерігаються перша і друга стадії повзучості, а

поблизу точки плавлення при низьких напруженнях відбувається усталена повзучість без першої стадії [85].

У співвідношення для визначення залежності повзучості від часу зазвичай входить багато параметрів, однак було проведено мало спроб по визначенню залежності цих параметрів від напруження. У більшості досліджень визначено лише залежність швидкості другої стадії повзучості від напруження [81, 83-85].

Подовження зразка, дослідженого на повзучість при одновісному розтягу, виміряне при навантаженні, складається з пружної та пластичної деформації. У багатьох випадках таке подовження мале і його вимірювання потребує точних та чутливих приладів. Подовження зазвичай досягається за час у межах секунди, і, як наслідок, відбувається з великими швидкостями деформації, порядку  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$  та вище. При таких умовах слід очікувати, що залежність початкової деформації від напруження буде підкорятися закономірностям наклепу при пластичній деформації [85].

Вивчення повзучості алюмінієвих сплавів при стиску показало, що різниця між кривими повзучості при розтягу та при стиску не виходять за межі смуги розкиду [81].

Швидкість повзучості на першій стадії визначається за законом [85]:

$$V_n = A_n \sigma^n, \quad (1.1)$$

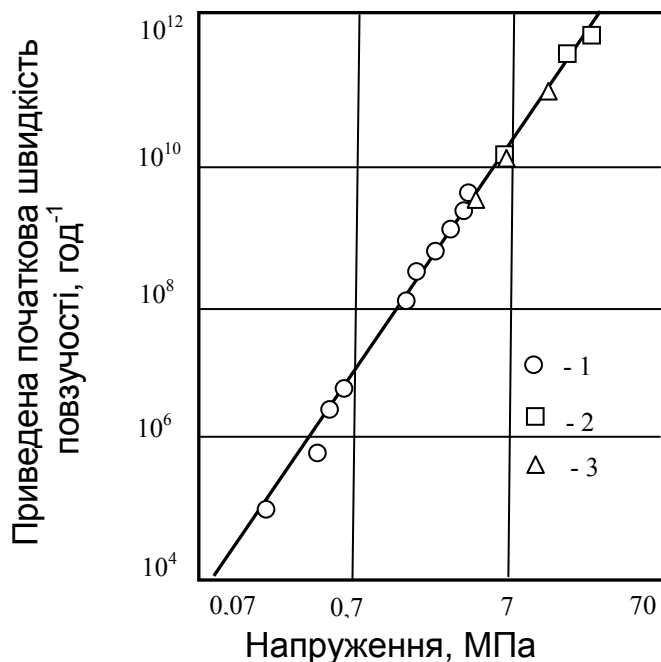
де  $\sigma$  – постійне напруження;

$A_n$ ,  $n$  – параметри матеріалу, що залежать від температури і не залежать від напруження.

Дана залежність підтверджується для алюмінієво-магнієвих сплавів, випробуваних на повзучість при низьких напруженнях та температурах від 531 до 853 К [85]. При цьому експериментальні точки вирівнюються в одну лінію (рис. 1.3).

Слід відмітити, що початкова деформація складно піддається вимірам не тільки із-за необхідності точних і чутливих приладів, а й тому,

що складно визначити початок залежної від часу повзучості. Взаємозв'язок між початковою швидкістю повзучості та швидкістю усталеної повзучості показав, що початкова швидкість повзучості повинна залежати від напруження так само, як і швидкість другої стадії повзучості [81,85].



1 – 853 К; 2 – 753 К; 3 – 531 К

Рисунок 1.3 – Залежність початкової швидкості повзучості, приведеної до однієї температури, від напруження [85]

Основний час розвитку повзучості припадає зазвичай на усталену стадію. Залежність швидкості усталеної повзучості від напруження при постійній температурі досліджена достатньо добре. Для описання процесу усталеної повзучості при заданих умовах було запропоновано цілий ряд емпіричних рівнянь.

До найбільш розповсюджених відноситься експериментально визначений степеневий закон, що виглядає аналогічно рівнянню (1.1) [83-85].

При цьому коефіцієнти  $A$  та  $n$  для алюмінію одержані тільки при декількох значеннях температури випробувань (табл. 1.1).

Розрахункові значення  $A$  та  $n$  [79]

Матеріал	$T_{\text{випр}}, \text{K}$	$A, \text{c}^{-1}$	$n$
Алюміній	477	$2,78 \cdot 10^{-6}$	5
	533	$1,94 \cdot 10^{-6}$	4,55
	920	$2,67 \cdot 10^{-6}$	1,24
Сплав Al+3,1 %Mg	531	$4,17 \cdot 10^{-6}$	2,26

Іноді замість степеневого закону використовують експоненціальну залежність [79, 83-85]:

$$V = A' \exp(a\sigma)^n, \quad (1.2)$$

де  $A'$  та  $a$  – константи, що залежать від температури.

Швидкість повзучості можна описати, наприклад, функцією вигляду [79, 84, 85]:

$$V = A'' (sh\alpha\sigma)^n, \quad (1.3)$$

де  $A''$  та  $\alpha$  постійні при постійній температурі.

Для значень  $\alpha\sigma < 0,8$  рівняння (1.3) перетворюється у рівняння (1.1) і  $A''\alpha^n = A$ . Для значень  $\alpha\sigma > 1,2$  рівняння (1.3) перетворюється у рівняння (1.2). Рівняння (1.3) дає лінійну залежність (рис. 1.4, в) та узгоджується з експериментальними результатами для алюмінію, одержаними на алюмінії при 477, 533 та 920 K та на сплаві Al+3,1 %Mg [85].

На рис. 1.4 зображено результати випробувань алюмінію при температурі 477 та 533 K, оброблені у відповідності до рівнянь (1.1), (1.2) та (1.3).

Існують також деякі інші емпіричні формули для визначення швидкості повзучості, встановлені різними авторами [79, 80, 83, 84], але найчастіше використовуються вище наведені формули.

У нещодавніх роботах [89-92], присвячених питанню повзучості алюмінію та його сплавів, механізм цього явища вивчений достатньо

добре, однак результати досліджень повзучості стосуються тільки деяких марок сплавів при обмежених діапазонах температур випробувань.

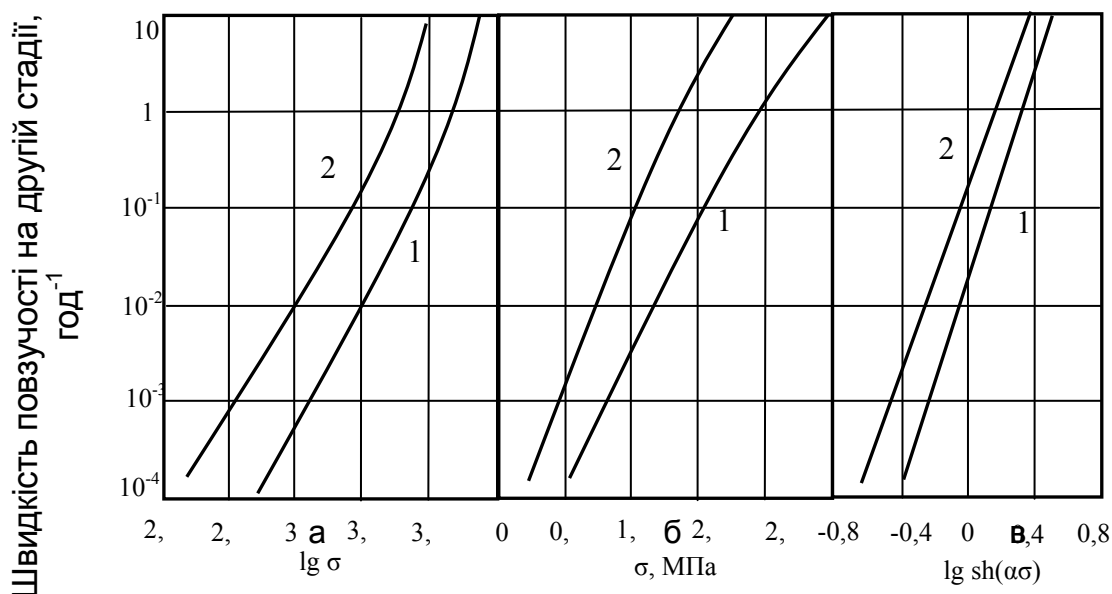


Рисунок 1.4 – Залежність логарифму швидкості на другій стадії повзучості від логарифму напруження (а); від напруження (б) та від логарифму  $\text{sh } \alpha\sigma$  (в) для алюмінію, випробуваного при температурі 477 К (1) та 533 К (2) [85]

Зокрема, у роботі [89] досліджуються алюмінієво-кремнієві сплави при температурах 493 та 553 К. Авторами [90] проаналізовано повзучість алюмінію при температурах 623 К, 673 К, 773 К та 783 К. У роботі [91] проведено довготривалі дослідження повзучості сплаву АМг6 лише в діапазоні температур, близьких до кімнатних. Автором праці [92] вивчено повзучість алюмінієво-цинкового сплаву при температурах, рівних та дещо вищих за температуру плавлення.

Таким чином, результати існуючих на сьогоднішній день досліджень повзучості алюмінію не в повній мірі відображають властивості матеріалу. Тому в таких умовах математичне моделювання та числовий експеримент можуть дати більш розгорнуте уявлення про характеристики повзучості матеріалу під дією температури.

## 1.5 Висновки

1. Алюміній та його сплави внаслідок вагомих переваг порівняно з іншими конструкційними матеріалами широко використовуються при виробництві тонкостінних та корпусних конструкцій складної форми.

2. Для одержання прецизійного нероз'ємного з'єднання найбільш ефективними способами є способи зварювання тиском, такі як дифузійне зварювання у вакуумі та, у ряді випадків, електроконтактне зварювання опором.

3. Важливим завданням з точки зору розробки технології прецизійного зварювання є вивчення характеристик повзучості алюмінієвих сплавів при високих температурах.

4. Необхідною умовою локалізації деформації металу є скорочення тривалості дії навантаження при дифузійному зварюванні через прискорення видалення оксидної плівки, а при електроконтактному зварюванні опором – шляхом забезпечення концентрованого тепловиділення у зоні контакту.

5. Ефективним засобом активації поверхонь, що з'єднуються, та прискорення утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні у вакуумі алюмінію та його сплавів є внесення у зону контакту деталей евтектичних прошарків на основі системи Al-Si.

6. Для забезпечення утворення з'єднання при електроконтактному зварюванні опором ефективним засобом локалізації тепловиділення у приконтактній зоні є розміщення між деталями тонких проміжних прошарків з алюмінієвої фольги.

7. Необхідним та актуальним завданням є створення нових технологій з'єднання алюмінію та його сплавів способами зварювання тиском на основі розробки засобів інтенсифікації процесів, що обумовлюють утворення з'єднань.



З огляду на сформульовані висновки метою дисертаційної роботи є розробка технологій з'єднання алюмінію та його сплавів способами зварювання тиском з низьким рівнем залишкової деформації виробів.

Для досягнення поставленої мети та розв'язання науково-технічної проблеми дослідження вирішувалися наступні задачі:

1. Вивчити термдеформаційну кінетику деталей з алюмінію та його сплавів.
2. Дослідити використання проміжних евтектичних прошарків при дифузійному зварюванні у вакуумі алюмінію та його сплавів.
3. Розробити засоби інтенсифікації процесу дифузійного з'єднання при використанні питомих зусиль низького рівня.
4. Визначити засоби локалізації тепловиділення у контакті деталей при електроконтактному стиковому зварюванні опором.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Характеристика матеріалів, що зварюються

Алюміній є найбільш розповсюдженим металом на землі. Вміст алюмінію у земній корі, за різними даними, коливається від 7,5 до 8,8 % по масі [37, 44, 93]. Саме цей метал стає найбільш конкурентоспроможним в інженерних застосуваннях, поступово витісняючи залізо. З року в рік виробництво алюмінію зростає, що викликано неперервним збільшенням попиту на цей метал. За об'ємом виробництва металів у світі алюміній займає друге місце після заліза, а за обсягом споживання займає перше місце з усіх кольорових металів [1, 3, 4, 7, 25].

За зовнішнім виглядом алюміній має сріблясто-білий колір. За фізичними характеристиками відрізняється низькою питомою вагою, високою тепло- та електропровідністю. Температура плавлення чистого алюмінію 933 К, температура кипіння 2543 К, модуль пружності складає 71 ГПа, питомий електроопір дорівнює  $2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, коефіцієнт лінійного розширення у межах 293-373 К становить  $23,9 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup> [37].

Внаслідок високої хімічної активності алюміній у природі зустрічається тільки у вигляді з'єднань з іншими елементами, а саме у вигляді оксидів та гідроксидів. Металічний алюміній отримують електролізом глинозему, розчиненого у розплавленому кріоліті ( $Na_3AlF_6$ ). Сировиною для отримання глинозему слугують боксити, каоліни, нефеліни, алуніти [94].

Алюміній – хімічний елемент третьої групи періодичної системи Д.І. Менделєєва з атомним номером 13. Радіус атома алюмінію 0,143 нм, атомна маса становить 26,98154. Відповідно до сучасних уявлень структуру алюмінію можна представити у вигляді кубічної

гранецентрованої кристалічної решітки (рис. 2.1). Координаційне число такої решітки становить 12, а розмір ребра елементарного куба приймають рівним 0,404 нм [61].

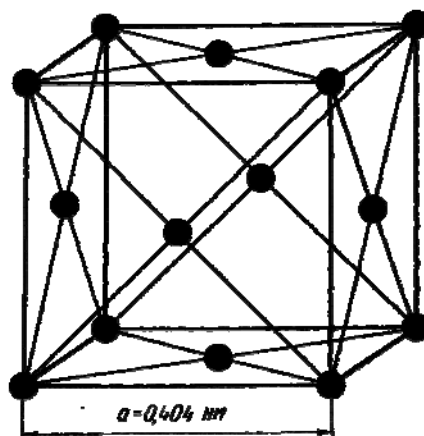


Рисунок 2.1 – Елементарна комірка кристалічної решітки алюмінію [61]

Усі сплави алюмінію, у тому числі технічний алюміній, містять постійні легуючі домішки, що вводяться в них для покращення властивостей [14, 37]. Так, наприклад, марганець у промислових деформованих алюмінієвих сплавах, як правило, міститься у межах від 0,3 до 0,9 % і додається для підвищення корозійної стійкості сплаву. Легування алюмінієвих сплавів магнієм помітно збільшує границю міцності та текучості. Кремній є найбільш розповсюдженою домішкою в алюмінієвих сплавах. У кількості 0,5-4 % кремній зменшує схильність до тріщиноутворення. Цей метал, а також мідь, магній, цинк, нікель та хром вводять у алюмінієві сплави як основні компоненти. З'єднання  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{CuMgAl}_2$  ефективно зміцнюють алюмінієві сплави. Додавання заліза у малих кількостях (0,04 %) підвищує міцність та покращує характеристики повзучості. Титаном алюмінієві сплави легуються з метою подрібнення зерна у виливках та зливках, що суттєво підвищує міцність та рівномірність властивостей у всьому об'ємі. Берилій вводиться для запобігання інтенсивного окислення при підвищених температурах.

На повітрі алюміній за короткий час окислюється та покривається тонкою плівкою оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ , що характеризується високою міцністю та тугоплавкістю. Алюміній, очищений від оксидної плівки, відрізняється високою хімічною активністю по відношенню до багатьох елементів та газів, що містяться в атмосфері [25, 41].

Наявність на поверхні алюмінію щільної оксидної плівки забезпечує порівняно високу стійкість його проти корозії у ряді середовищ, зокрема у вологій атмосфері, у концентрованій азотній кислоті та багатьох органічних кислотах. Корозійна стійкість алюмінію визначається захисними властивостями оксидної плівки, тому будь-які порушення суцільності плівки можуть слугувати причиною появи осередків корозії. Зі збільшенням чистоти алюмінію корозійна стійкість його зростає.

Властивості та кристалічна будова оксидних плівок на поверхні алюмінію та його сплавів можуть змінюватися в залежності від умов окислення. Однак незалежно від хімічного та фазового складу оксидних плівок на поверхні алюмінію вони мають наступні властивості [41].

1. Оксид  $Al_2O_3$  відрізняється високою хімічною міцністю, стійкий проти дисоціації та реакцій з іншими металами у твердому стані. Відновлення алюмінію з оксиду в умовах металургійних процесів неможливе.

2. Оксидна плівка на алюмінії має високу температуру плавлення (2323 K).

3. Оксид  $Al_2O_3$  не розчиняється ні в твердому, ні в рідкому металі та в певному інтервалі температур характеризується постійністю складу і стабільністю структури.

4. Оксидна плівка на поверхні алюмінію характеризується високою питомою вагою ( $\rho = 3,97 \text{ г/см}^3$ ).

5. Плівка оксиду алюмінію має відносно високу механічну міцність. При товщині  $10^{-5}$  см міцність плівки на розрив становить близько 20 МПа.

6. Електроопір оксиду алюмінію високий ( $10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ).

7. Коефіцієнт температурного розширення оксидної плівки  $Al_2O_3$  майже в 3 рази менше коефіцієнту теплового розширення алюмінію.

8. Важливою особливістю оксидної плівки алюмінію є висока адсорбційна здатність до парів води. Водяний пар, адсорбований окисленою поверхнею алюмінію, утримується до високих температур. Частина вологи на поверхні алюмінію утримується навіть після витримки металу у вакуумі до температури 623 К.

Шляхи видалення оксидної плівки при зварюванні алюмінію та його сплавів розглянуті у розділі 4.

Для досліджень у роботі використовувалися технічний алюміній марки АД00, АД0 та деформовані алюмінієві сплави марок АДЗ1, АМг5. Хімічний склад та властивості даних матеріалів наведені у табл. 2.1, 2.2 [37-40].

АД00 та АД0 – технічний алюміній з вмістом алюмінію 99,7% та 99,5 %, відповідно. АДЗ1 – деформований сплав системи Al-Mg-Si з підвищеною пластичністю та корозійною стійкістю. АМг5 – деформований сплав системи Al-Mg з високою корозійною стійкістю, пластичний при кімнатній та підвищеній температурі.

Для приготування рідкого прошарку для дифузійного зварювання у вакуумі використовувалися насичений розчин силікату натрію  $Na_2SiO_3$ , 2М розчин соляної кислоти HCl та дрібнодисперсний порошок магнію з розміром частинок 25 мкм. Як проміжний прошарок для електроконтактного зварювання використовувався технічний алюміній марки АД0 у вигляді фольги товщиною 11 мкм.

Обґрунтування вибору матеріалу суміші рідкого прошарку для нанесення на алюмінієві зразки для ДЗВ та вибору товщини прошарку з алюмінієвої фольги для ЕКЗ наведено у розділах 1, 4, 5.

Таблиця 2.1

Хімічний склад (мас. %, не більше) матеріалів [37-40]

Сплав	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Інші
АД00	99,7	0,015	0,02	0,02	0,16	0,016	0,07	0,05	-
АД0	99,5	0,02	0,05	0,025	0,3	0,3	0,1	0,1	-
АД31	97,65- 99,35	0,1	0,45- 0,9	0,1	0,5	0,2- 0,6	0,2	0,15	0,1 Cr
АМГ5	91,9- 94,68	0,1	4,8- 5,8	0,3- 0,8	0,5	0,5	0,2	0,02- 0,1	0,005 Be

Таблиця 2.2

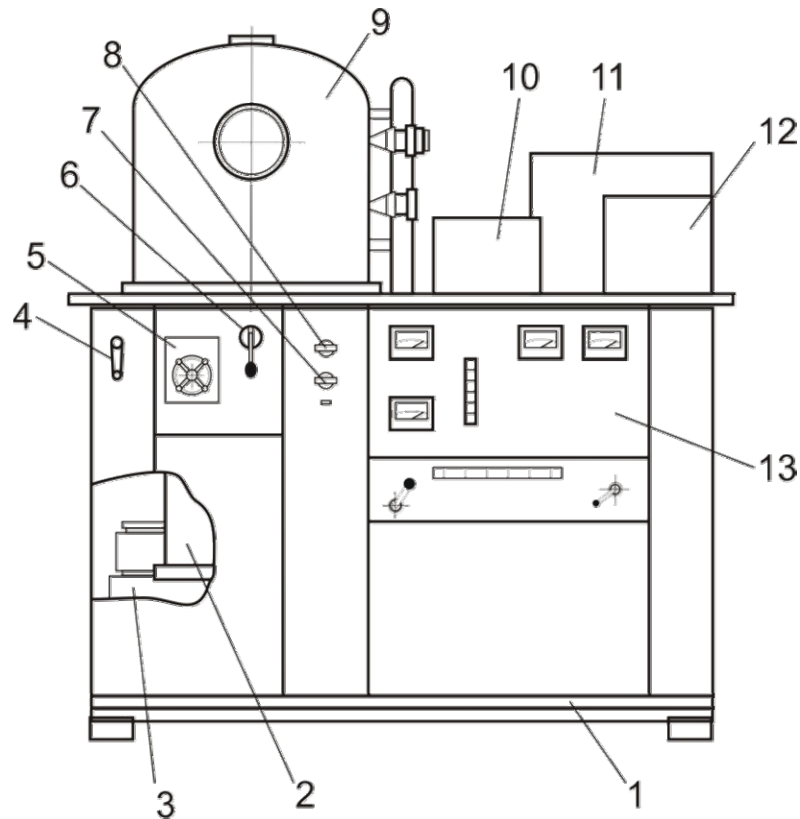
Фізико-механічні властивості матеріалів (при  $T = 273 \text{ K}$ ) [37-40]

Сплав	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>	$\rho \times 10^{-8}$ , Ом·м	$\lambda$ , Вт/м·К	E, ГПа	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	НВ, МПа	$\delta$ , %
АД00	2,71	24,3	2,65	230	70	60	40	35	20
АД0	2,71	24,0	2,92	226	71	80	40	30	15
АД31	2,71	23,4	3,44	188	71	260	210	80	10
АМГ5	2,65	23,9	6,4	126	71	300	150	65	14

## 2.2 Експериментальне обладнання

Апаратура для проведення експериментів: модернізована дифузійна установка УВН-2М-1, машина для електроконтактного стикового зварювання МС-802У, оптичні мікроскопи МИМ-8 та Neophot-32, скануючий електронний мікроскоп JSM-840, мікротвердомір М400.

Дифузійне зварювання у вакуумі зразків здійснювали за допомогою модернізованої установки УВН-2М-1 (рис. 2.2).



*1 – корпус; 2 – паромасляний насос; 3 – механічний насос; 4 – керування підйомом ковпака; 5 – ручка керування каруселлю; 6 – ручка керування клапаном, 7,8 – клапани механічного та паромасляного насосів; 9 – ковпак; 10 – КИТ-1; 11 – МЕР-1-08; 12 – М-218; 13 – панель приладів*

Рисунок 2.2 – Схема вакуумної установки УВН-2М-1

Основними частинами установки УВН-2М-1 є вакуумна камера з вакуумною системою, джерело нагріву деталей та механічний привод для передачі необхідного тиску на деталі. Для зварювання використовувався вакуум  $10^{-1}$ - $10^{-3}$  Па. Установка включає в себе, окрім системи нагріву, систему охолодження. Для охолодження використовується проточна вода, що поступає з водопровідної мережі.

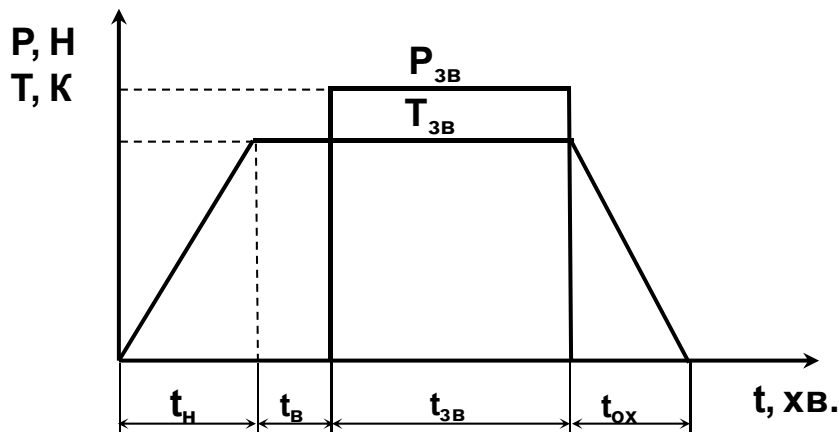
Прилади для вимірювання температури і вакууму в установці призначені для регулювання та контролю температури деталей, що

зварюються, у зоні контакту, вимірювання та контролю залишкового тиску в робочій камері у період забезпечення, збереження та покращення вакууму.

Основні технічні характеристики установки УВН-2М-1:

1. Об'єм робочої камери, м<sup>3</sup> .....0,12;
2. Максимальний струм випарника, А .....500;
3. Мінімальний тиск у камері, Па ..... $1 \cdot 10^{-6}$ .

Циклограма процесу дифузійного зварювання зображена на рис. 2.3.



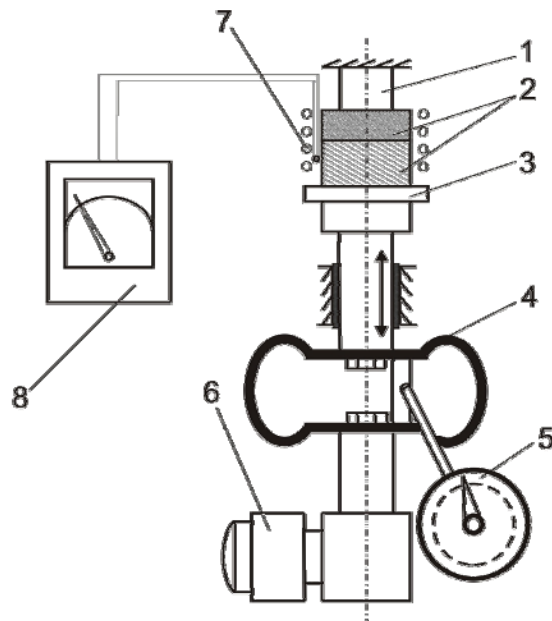
$P_{зв}$  – зусилля стиску,  $T_{зв}$  – температура нагріву,  $t_n$  – час нагріву до  $T_{зв}$ ,  
 $t_v$  – час витримки при  $T_{зв}$ ;  $t_{зв}$  – час зварювання;  $t_{ох}$  – час охолодження

Рисунок 2.3 – Циклограма процесу дифузійного зварювання у вакуумі

Нагрів деталей, що зварюються, відбувається за допомогою молібденового нагрівача. Температура нагріву деталей вимірюється хромель-алюмелевою термопарою. Зусилля стискання вимірюється за допомогою динамометра, який дає переміщення, пропорційні прикладеному зусиллю. Механізм притискання установки УВН-2М-1 зображений на рис. 2.4.

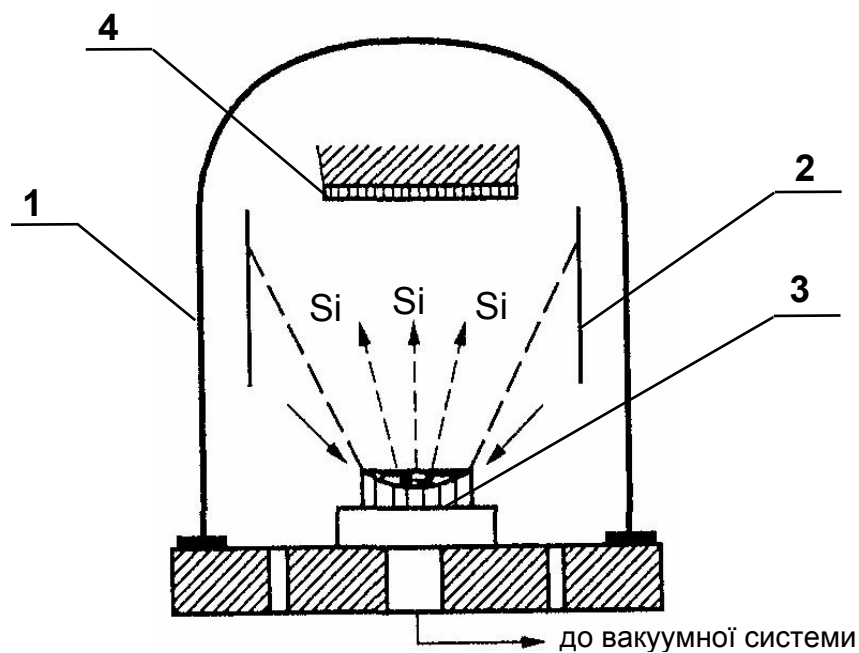
Термічне вакуумне напилення кремнію на поверхню алюмінію перед дифузійним зварюванням здійснювали за схемою, зображеною на рис. 2.5.





1 – пуансон; 2 – деталі, що зварюються; 3 – робочий стіл;  
4 – динамометр; 5 – індикатор годинникового типу; 6 – привод  
стискування; 7 – нагрівач; 8 – вольтметр з термопарою

Рисунок 2.4 – Схема робочого механізму установки УВН-2М-1



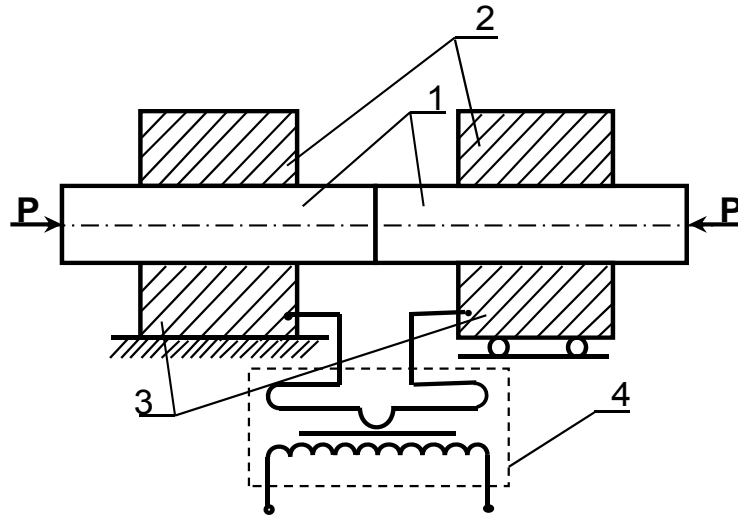
1 – вакуумна камера; 2 – екран; 3 – випарник; 4 – підложка

Рисунок 2.5 – Схема термічного вакуумного напilenня

Перед термічним вакуумним напilenням алюмінієва деталь оброблялась у тліючому розряді для очищення поверхні від оксидів за

режимом: відстань від електрода до зразка – 50 мм, прискорююча напруга – 1000 В, робочий газ – аргон, тиск у камері – 13,3 Па.

Електроконтактне стикове зварювання проводили на машині для електроконтактного стикового зварювання МС-802У за схемою зварювання опором (рис. 2.6).



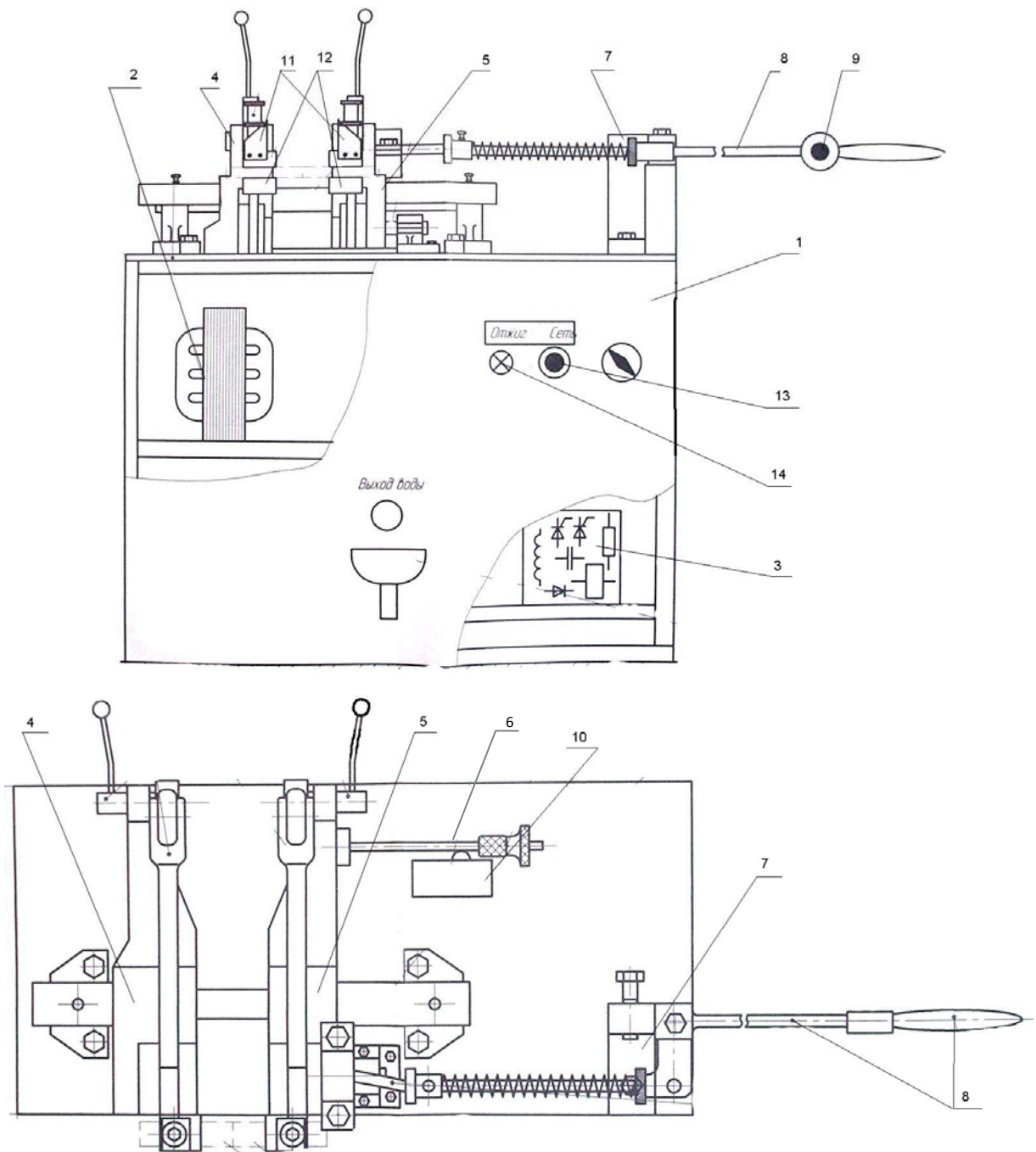
*1 – нижні затискні губки; 2 – верхні затискні губки; 3 – деталі, що зварюються; 4 – зварювальний трансформатор; P – стискаюче зусилля*

Рисунок 2.6 – Схема електроконтактного стикового зварювання опором

Основні технічні характеристики машини МС-802У:

1. Номінальний зварювальний струм, кА .....	8
2. Номінальна потужність, кВА.....	4,5
3. Напруга на вторинній обмотці, В.....	4,4
4. Робочий хід рухомої частини, мм.....	20
5. Максимальне зусилля стиску, кН.....	25
6. Максимальне зусилля осадки, кН.....	20

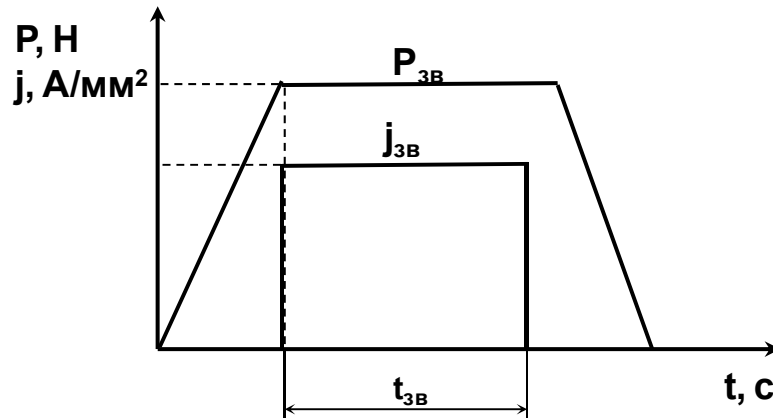
Зовнішній вигляд машини МС-802У представлено на рис. 2.7.



1 – корпус; 2 – зварювальний трансформатор; 3 – електромагнітний контактор; 4 – нерухомий затискний пристрій; 5 – рухомий затискний пристрій; 6 – напрямна штанга; 7 – механізм подачі і осадки; 8 – важіль; 9 – кнопка для ввімкнення струму; 10 – вимикач; 11 – верхні затискні губки; 12 – нижні затискні губки; 13 – сигнальна лампа; 14 – кнопка для відпау

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд машини МС-802У

Циклограма процесу ЕКЗ опором зображена на рис. 2.8.



$P_{зв}$  – стискаюче зусилля;  $j_{зв}$  – густина зварювального струму;

$t_{зв}$  – час зварювання

Рисунок 2.8 – Циклограма процесу електроконтактного стикового зварювання опором

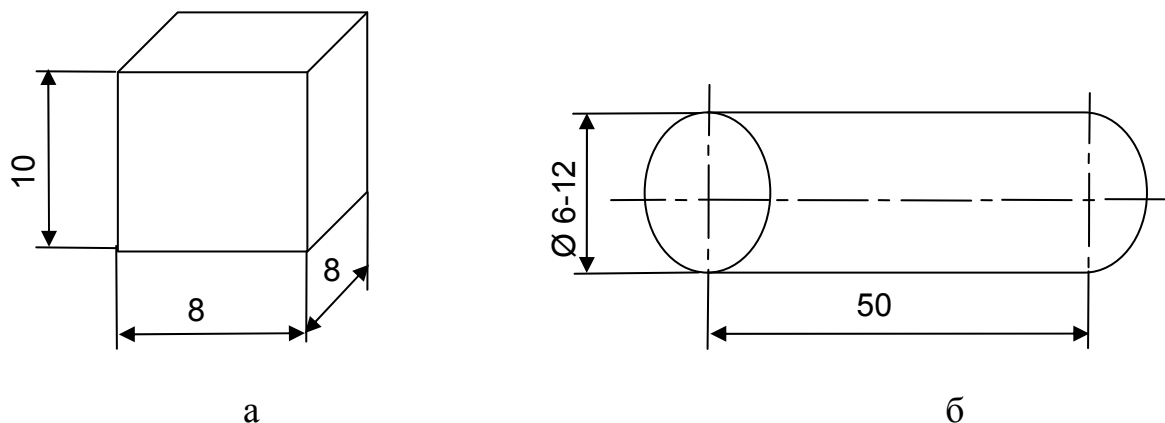
### 2.3 Методика проведення досліджень

Для проведення досліджень та експериментів використовувалася наступна методика:

1. Огляд літератури стосовно способів з'єднання алюмінію та його сплавів.
2. Дослідження деформаційної кінетики алюмінію при нагріванні та зміні навантаження.
3. Вибір кремнієвмісного матеріалу для утворення евтектики Al-Si.
4. Вибір оптимального складу суміші рідкого прошарку для дифузійного зварювання алюмінію.
5. Вибір оптимальної товщини проміжного прошарку з алюмінієвої фольги для електроконтактного зварювання.
6. Проведення експериментів зі зварювання.
7. Дослідження мікроструктури одержаних зразків.
8. Механічні випробування зварних з'єднань.

## 9. Обробка та аналіз одержаних результатів.

Для проведення досліджень використовувалися зразки з алюмінію АД00 та сплаву АМг5 розміром  $8 \times 8 \times 10$  мм (рис. 2.9, а) та циліндричні стержні з алюмінію АД31 діаметрами 6-12 мм та довжиною 50 мм (рис. 2.9, б).



*а – зразок для ДЗВ, б – зразок для ЕКЗ*

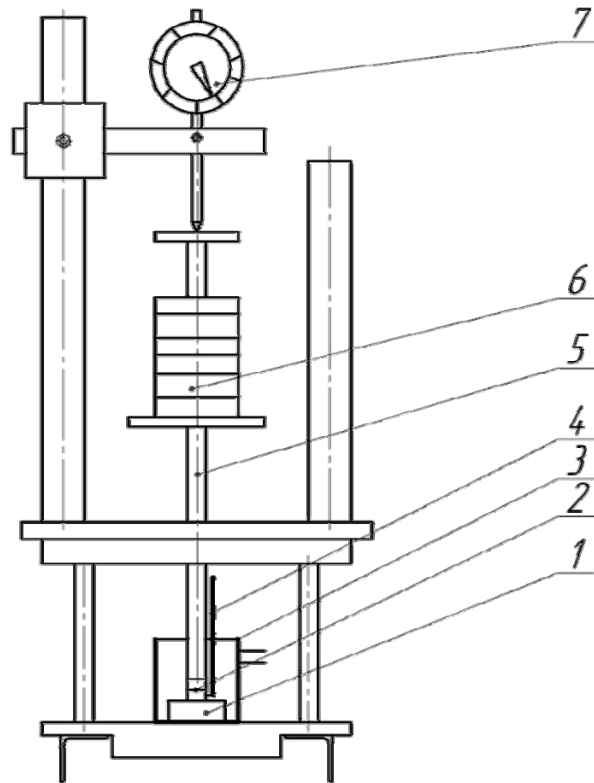
Рисунок 2.9 – Зразки для досліджень

Для вимірювання деформацій в процесі контактного плавлення використовувалося спеціальне пристосування, схема якого зображена на рис. 2.10.

На жорстку основу 1 встановлювався зразок 2 з попередньо закарбованою в нього хромель-алюмелевою термопарою 4, до якого прикладалося необхідне зусилля через пуансон 5, проводився нагрів до температури 853 К (за допомогою нагрівача 3). Після нагріву та ізотермічної витримки при заданій температурі з індикатору годинникового типу знімалися покази за зміною лінійних розмірів зразка.

Знімання профілограм поверхонь матеріалів, що зварюються, здійснювали на профілографі-профілометрі моделі 201 алмазною голкою з радіусом закруглення при вершині 2 мкм. Запис на електротермічний папір вели при вертикальному збільшенні  $\times 40000$  і горизонтальному збільшенні  $\times 200$ . За даними профілограм було визначено площу контакту поверхонь,

що з'єднуються, а також середню товщину зазору між двома контактуючими поверхнями.



*1 – жорстка недеформована основа; 2 – зразок для виміру деформації; 3 – нагрівач; 4 – термоелектричний датчик (термопара); 5 – рухомий пуансон; 6 – набір змінних вантажів; 7 – індикатор годинникового типу*

Рисунок 2.10 – Схема пристосування для вимірювання величини деформації алюмінієвого зразка

Для пар матеріалів, що розглядаються, відбувається пластичний контакт, оскільки практично деформація виступів вважається пластичною при розрахунку деформації контакту грубо оброблених металевих поверхонь (1-4 класи) та для приблизної оцінки площі контакту металевих поверхонь з середньою чистотою обробки (5-7 класи).

Підготовка поверхні алюмінію полягала у знятті шабером приповерхневого шару товщиною (0,2-0,3) мм. Торці циліндричних зразків обточували на токарному верстаті задля забезпечення плоскопаралельності їх поверхонь.

Вибір режиму зварювання, необхідні вхідні дані для експериментальних досліджень та випробувань описані у розділах 4 та 5.

Після проведення експериментів зі зварювання з отриманих зразків було підготовлено мікрошліфи для подальшого мікроаналізу. Приготування мікрошліфів полягало у шліфуванні та поліруванні зразка до досягнення плоскої та блискучої поверхні. Для зручності виготовлення мікрошліфів зварний зразок затискався у струбцину.

Операції шліфування та полірування проводили вручну, використовуючи наждачні шкурки різної зернистості у порядку зростання номера шкурки. При шліфуванні зразок переміщували по шкурці, злегка притискаючи, і шліфували доти, поки не зникли сліди попередньої обробки. При переході на більш дрібнозернистий папір зразок повертали на 90° і шліфували доти, поки не зникали подряпини, отримані на попередніх шкурках.

Полірували зразок на фетрі з нанесеною на нього пастою ГОИ, змінюючи напрям полірування кожні дві хвилини. Після шліфування та полірування шліф промили водою, спиртом і просушили.

Для зберігання шліфів використовували спеціальний ексикатор, що являє собою скляну посудину із щільно притертою кришкою та хлористим кальцієм усередині, що, поглинаючи вологу, захищає шліф від окислення.

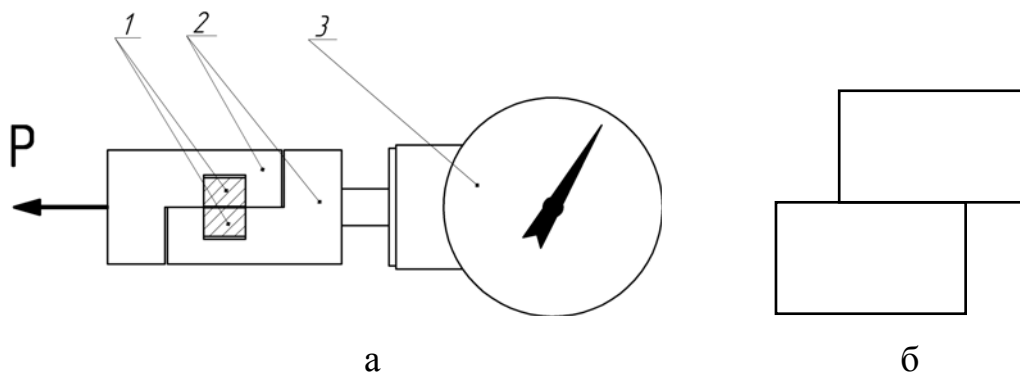
Для виявлення мікроструктури перед металографічними дослідженнями проводили хімічне травлення зануренням протягом 5-10 с у 0,5 %-ий розчин плавикової кислоти (1 мл плавикової кислоти HF (48 %) на 200 мл води). Дослідження мікроструктури зварного з'єднання проводили на оптичному мікроскопі марки МИМ-8 та Neophot-32 та скануючому електронному мікроскопі марки JSM-840.

Для дослідження процесів масоперенесення у зоні з'єднання використовували метод авторадіографії та радіоактивні ізотопи кобальту  $^{60}\text{Co}$ , які наносили гальванічним осадженням на поверхні деталей, що підлягали зварюванню.

Моделювання процесу повзучості при дифузійному зварюванні у вакуумі та процесу тепловиділення при електроконтактному зварюванні здійснювалося методом скінченних елементів за допомогою комплексного програмного пакету ANSYS 11.0. Використовувався осесиметричний скінченний елемент PLANE 183.

Якість одержаних зварних зразків оцінювали за результатами механічних випробувань на розтяг та на зріз на розривній машині типу УМ-5 з використанням спеціалізованого оснащення, розробленого на кафедрі зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій ЧНТУ (рис.2.11, а). Для зручності проведення випробувань на зріз зразок виготовляли зміщеним (рис. 2.11, б).

Математичні залежності деформації від величини та часу дії навантаження одержані з використанням математичного пакету Mathcad 15.



*а – пристосування для випробувань*

*(1 – зварні деталі; 2 – губки оснащення для випробувань; 3 – динамометр);*

*б – вигляд зразка для випробувань на зріз*

Рисунок 2.11 – Схема проведення механічних випробувань на зріз

Вимірювання мікротвердості поверхонь здійснювалось на приладі М400 фірми «LECO» (США) методом Вікерса. В якості інструмента, що вдавлювався в матеріал, використовувалась алмазна піраміда з квадратною основою та кутом при вершині між протилежними гранями  $136^{\circ}$ .



Вдавлювання піраміди здійснювалось навантаженням, рівним 10 г. При вимірюваннях мікротвердості вимірювали довжину діагоналі відбитка і визначали значення мікротвердості за виразом [96]:

$$HV = \frac{1854P}{d^2}, \quad (2.1)$$

де  $P$  – навантаження на піраміду, г;

$d$  – середнє арифметичне двох діагоналей відбитка, виміряних після зняття навантаження, мкм.

## 2.4 Обробка результатів експериментів

Обробка результатів експериментально одержаних даних за результатами механічних випробувань та вимірювання величини деформації зразків здійснювалася за методикою Кассандрової О.Н., Лебедева В.В. [97] з використанням математичного пакету Mathcad 15.

1. Результати кожного виміру записували в таблицю.
2. Визначали середнє значення із  $n$  вимірів:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i. \quad (2.2)$$

3. Знаходили похибку окремих вимірів:

$$\Delta a_i = \bar{a} - a_i. \quad (2.3)$$

4. Визначали квадрати похибок окремих вимірів  $(\Delta a_i)^2$ .
5. Якщо один чи два виміри різко відрізнялись за своїм значенням від решти вимірів, то робили перевірку, чи не являються вони промахом.
6. Визначали середню квадратичну похибку результату серії вимірів:

$$\Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}} . \quad (2.4)$$

7. Задавали значення надійності  $\alpha$ .

8. Визначали коефіцієнт Стюдента  $t_{\alpha}(n)$  для вибраної надійності  $\alpha$  та числа вимірів  $n$ .

9. Знаходили межі довірчого інтервалу (похибку результату вимірів):

$$\Delta a = t_{\alpha}(n) \Delta S_{\bar{a}} . \quad (2.5)$$

10. При величині похибки результату вимірів, порівняної з величиною похибки приладу, межю довірчого інтервалу визначали за формулою:

$$\Delta a = \sqrt{t_{\alpha}^2(n) \Delta S_{\bar{a}}^2 + \left(\frac{k_{\alpha}}{3}\right)^2 \delta^2} . \quad (2.6)$$

де  $k_{\alpha} \equiv t_{\alpha}(\infty)$ ,

$\delta$  – величина похибки приладу.

11. Оцінювали відносну похибку результату серії вимірювань:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{\bar{a}} 100\% . \quad (2.7)$$

Відносна похибка (у шістнадцяти вимірах) при випробуваннях на міцність зварних з'єднань, отриманих дифузійним зварюванням у вакуумі, склала 7,1 %, електроконтактним зварюванням – 7,4 %, відносна похибка при визначенні деформації зразків склала 0,5 %.

Статистична обробка результатів експериментів здійснювалась на ЕОМ з використанням математичного пакету Mathcad 15.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУВАННЯ З'ЄДНАНЬ З АЛЮМІНІЮ ТА ЙОГО СПЛАВІВ

#### 3.1 Дослідження термдеформаційної кінетики матеріалів

Дифузійне зварювання алюмінію та його сплавів між собою та з іншими матеріалами, виконане за класичними режимами, розглянутими у першому розділі, із застосуванням питомих тисків 5-12 МПа при температурах 773-813 К [50, 55], призводять до надмірних величин деформації внаслідок високої пластичності алюмінію при підвищених температурах (табл. 3.1). При цьому рівень деформації  $\epsilon$  зварних виробів склав 48-62 % від початкової висоти зразка.

Таблиця 3.1

Режими ДЗВ алюмінію АД00 (вакуум  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  Па)

№ зразка	Питомий тиск, МПа	Температура зварювання, К	Ізотермічна витримка, хв.	$\epsilon$ , %
1	5	793	15	48
2	7	783	15	48
3	7	813	25	53
4	7,5	773	30	56
5	10	813	15	52
6	10	793	15	58
7	12	723	2	62

На прикладі зразка № 5 показано зовнішній вигляд зварного з'єднання з алюмінію АД00 (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд зварного зразка № 5

*( $p = 10 \text{ МПа}$ ,  $T = 813 \text{ К}$ ,  $t = 15 \text{ хв.}$ )*

У зв'язку з одержаними результатами, для розробки технології зварювання та для якісного розуміння того, яким чином досягти потрібного рівня прецизійності кінцевих виробів, виникає необхідність теоретичного моделювання картини деформування матеріалу під дією навантаження при температурах зварювання.

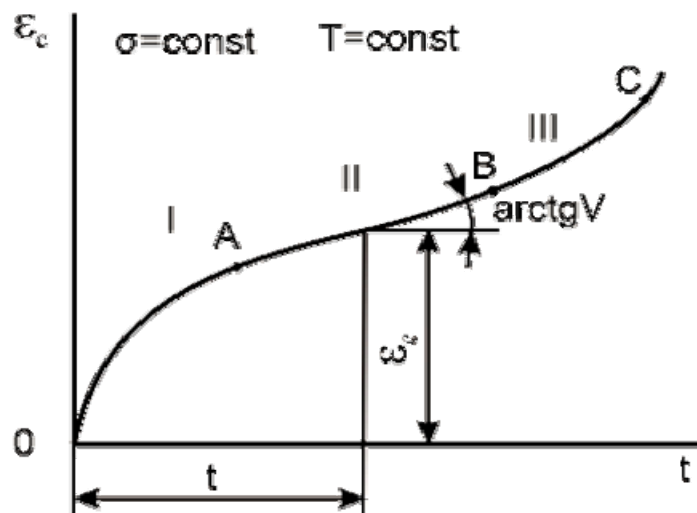
Можливість спрогнозувати рівень деформації виробів з'являється за рахунок використання сучасного програмного забезпечення. На сьогоднішній день на допомогу у вирішенні цього питання приходять скінченно-елементні програмні пакети, що дозволяють більш повно описати елементи конструкцій та проводити розрахунки з урахуванням реальних властивостей матеріалів, характеру навантаження тощо.

Як правило, визначення характеру та величини деформації виробу за допомогою скінченно-елементного моделювання можливе за умов наявності вхідних даних щодо зміни в залежності від температури нагріву модуля пружності, коефіцієнта Пуассона, границі текучості та швидкості повзучості матеріалу при заданій температурі залежно від величини навантаження. Однак стосовно вказаних властивостей алюмінію у літературі наведено обмежений ряд даних.

З вище сказаного випливає, що необхідним завданням є визначення температурних залежностей пружно-пластичних властивостей алюмінію.

Як було вказано у першому розділі, з підвищенням температури механічні властивості алюмінію змінюються: пружні властивості різко знижуються, натомість у матеріалі зростають пластичні властивості.

Для визначення пластичних характеристик алюмінію потрібно знати, як змінюється швидкість деформації матеріалу під дією температури і навантаження. Прийнято, що зміна у часі деформації матеріалу характеризується повзучістю [79-81, 84, 85]. Залишкова (пластична) деформація, що збільшується з часом при постійному напруженні, називається деформацією повзучості та позначається  $\varepsilon_c$ . Графічно залежність залишкової деформації від часу випробувань при постійних напруженні та температурі зображають кривою повзучості (рис. 3.2).



*I – стадія неусталеної повзучості (ділянка OA); II – стадія усталеної повзучості (ділянка AB); III – стадія руйнування (ділянка BC)*

Рисунок 3.2 – Типова крива повзучості [79]

На початковій ділянці OA швидкість деформації зменшується і характеризується неусталеною повзучістю, ділянка AB відповідає усталеній повзучості, коли швидкість деформації приблизно однакова, а на ділянці BC спостерігається прискорена повзучість, що закінчується руйнуванням [79].

У залежності від матеріалу, навантаження і температури співвідношення між величинами ділянок кривої повзучості можуть бути різноманітними. Для багатьох матеріалів криві повзучості характеризуються невеликою першою та третьою стадіями (рис. 3.3).

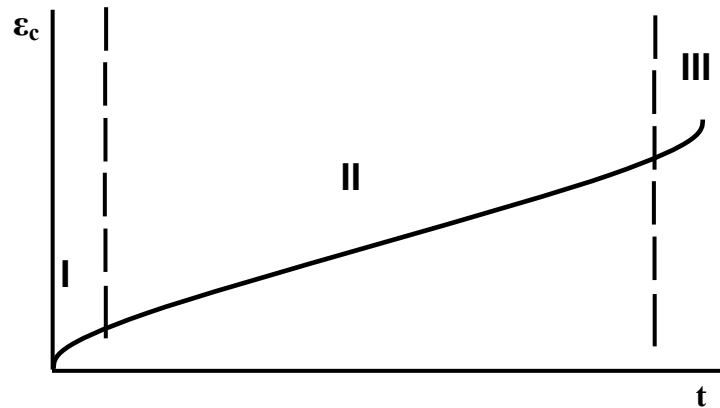


Рисунок 3.3 – Крива повзучості з постійною швидкістю деформації [80]

Випробування на повзучість є зазвичай дуже довготривалими. Тому важливе значення має можливість прогнозування повзучості протягом тривалого часу на основі короткочасних випробувань. Найбільш простий спосіб екстраполяції для випадку кривих типу, зображеному на рис. 3.3, полягає в тому, що першою стадією повзучості нехтують і вважають всю деформацію такою, що відбувається з постійною швидкістю  $V(\sigma)$ , яка залежить від напружень [80].

Таким чином, на стадії усталеної повзучості деформація [80]:

$$\varepsilon = V(\sigma)t . \quad (3.1)$$

При цьому швидкість деформації повзучості, або скорочено швидкість повзучості, визначається за виразом [79, 80]:

$$V = \frac{d\varepsilon_c}{dt} . \quad (3.2)$$

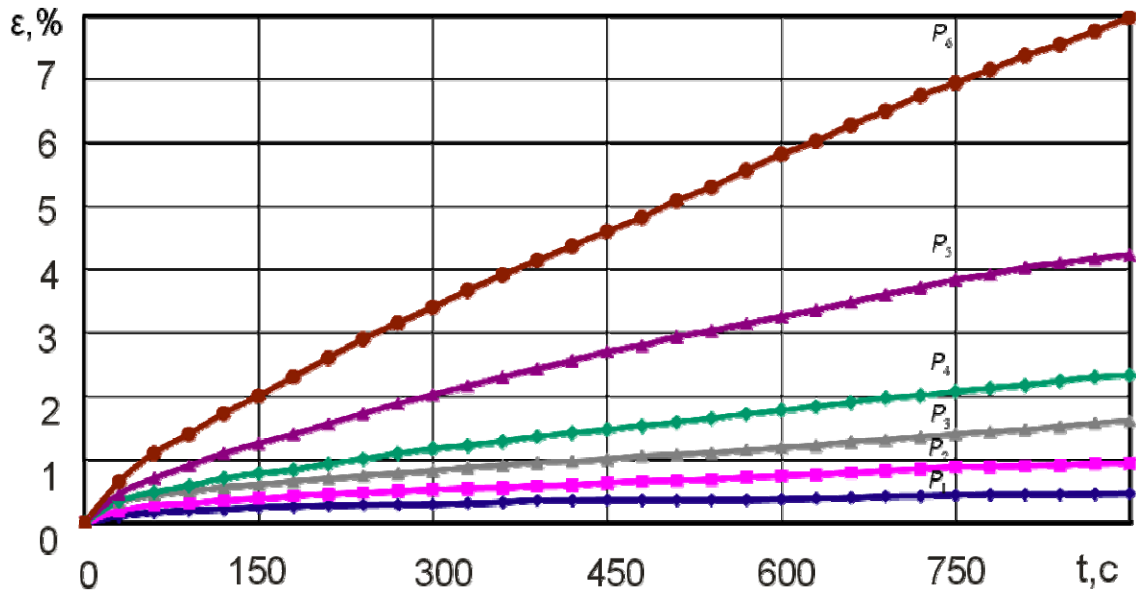
Зважаючи на вищенаведені міркування, можна зробити висновок, що визначити прогнозований рівень деформації з достатньою для практики точністю можна, використовуючи лише ділянку усталеної повзучості.

Криві повзучості при розтягу під постійним напруженням є основним джерелом відомостей про повзучість матеріалів, оскільки випробування такого роду найбільш прості і до теперішнього часу накопичено велику кількість експериментальних даних. Для досліджень поведінки матеріалів при інших видах навантажень необхідні деякі універсальні гіпотези стосовно залежності між напруженнями, деформаціями і часом [87].

Вивчення повзучості алюмінієвих сплавів при стиску показало, що різниця між кривими повзучості при розтягу та при стиску не виходять за межі смуги розкиду [81]. Тому у подальшому приймаємо, що при розтягу та стиску матеріал проявляє однакові пружно-пластичні властивості.

Для досліджень термодформаційної поведінки матеріалів у роботі використовувалися алюміній марки АД00 та сплав марки АМг5. Дослідження проводилися на спеціальному пристосуванні (див. рис. 2.10) на зразках розмірами  $8 \times 8 \times 10$  мм при їх одновісному стиску та температурі нагріву 853 К. Використання такої температури обґрунтовується тим, що прецизійне дифузійне з'єднання алюмінію та його сплавів можливе за рахунок використання проміжних прошарків системи Al-Si, евтектична температура плавлення яких складає значення 850 К [98].

З метою вивчення термодформаційної поведінки алюмінію було проведено ряд експериментів для виявлення впливу величини та часу дії питомого зусилля стиску на величину деформації алюмінієвих деталей, за результатами яких було одержано криві повзучості  $\varepsilon = f(t)$ . На рис. 3.4 представлено одержані залежності при дослідженні зразків з алюмінію марки АД00 [99].



$$P_1 = 0,5 \text{ МПа}; P_2 = 0,75 \text{ МПа}; P_3 = 1 \text{ МПа};$$

$$P_4 = 1,25 \text{ МПа}; P_5 = 1,5 \text{ МПа}; P_6 = 1,75 \text{ МПа}$$

Рисунок 3.4 – Криві повзучості для зразка з АД00 при різному питомому тиску  $T=853 \text{ К}$

За результатами експериментів було одержано аналітичний вигляд залежностей деформації від часу дії стискаючого зусилля при різних значеннях зусиль:

$$\epsilon_{0,5} = -3 \cdot 10^{-9} t^2 + 7 \cdot 10^{-6} t + 0,00123. \quad (3.3)$$

$$\epsilon_{0,75} = -3 \cdot 10^{-9} t^2 + 1,1 \cdot 10^{-5} t + 0,00173; \quad (3.4)$$

$$\epsilon_1 = -5 \cdot 10^{-9} t^2 + 1,9 \cdot 10^{-5} t + 0,00268; \quad (3.5)$$

$$\epsilon_{1,25} = -5 \cdot 10^{-9} t^2 + 2,8 \cdot 10^{-5} t + 0,00266; \quad (3.6)$$

$$\epsilon_{1,5} = -2 \cdot 10^{-8} t^2 + 6,2 \cdot 10^{-5} t + 0,00371; \quad (3.7)$$

$$\epsilon_{1,75} = -2 \cdot 10^{-8} t^2 + 9,9 \cdot 10^{-5} t + 0,0036. \quad (3.8)$$



Функція швидкості повзучості при цьому може бути визначена за виразом (3.2), а швидкість повзучості, що відповідає кожній кривій при різному значенні тиску  $P$ , – за величиною  $\text{arctg}(V)$  через кут нахилу другої ділянки на кривих  $\varepsilon = f(t)$ , що відповідає стадії усталеної повзучості (як показано на рис. 3.2).

Для зручності використання отриманих даних при моделюванні картини деформування в одному напрямку з використанням математичного пакету Mathcad на основі залежностей (3.3)-(3.8) було одержано залежності величини деформації від значення питомого стискаючого зусилля для зразка з АД00 (рис. 3.5). Програма для визначення даних залежностей наведена у додатку А.

На основі розрахунку одержано аналітичні залежності деформації від величини стискаючого зусилля при різній тривалості деформування:

$$\varepsilon_{100} = 0,0063P^2 - 0,0031P + 0,0007; \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{200} = 0,0093P^2 - 0,0046P + 0,0009; \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{300} = 0,0137P^2 - 0,0074P + 0,0012; \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{400} = 0,0177P^2 - 0,0103P + 0,0015; \quad (3.12)$$

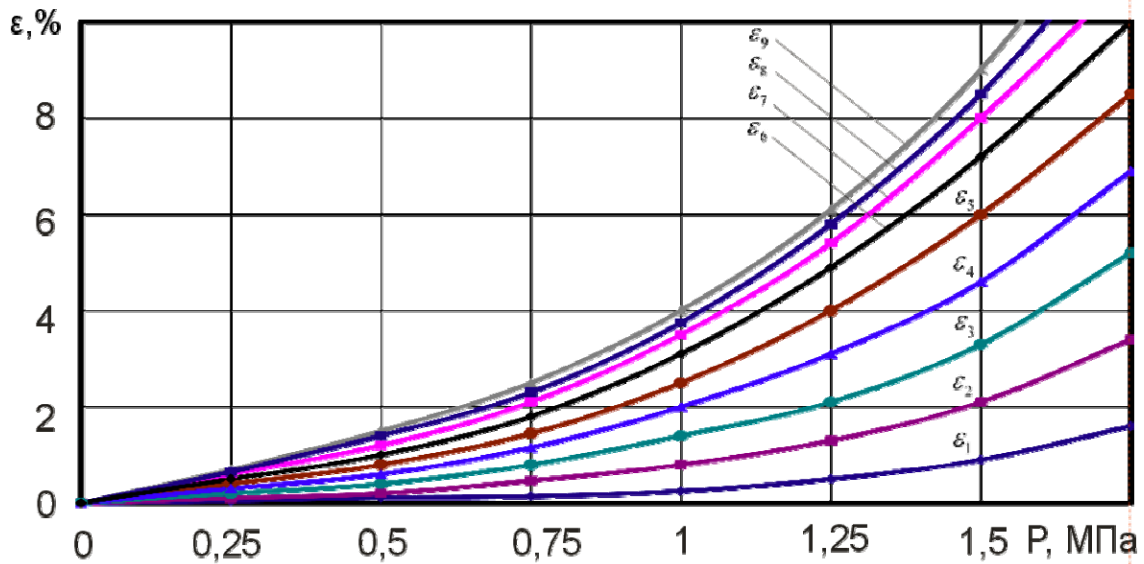
$$\varepsilon_{500} = 0,022P^2 - 0,014P + 0,002; \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_{600} = 0,0264P^2 - 0,0173P + 0,0022; \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_{700} = 0,0285P^2 - 0,0174P + 0,0023; \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_{800} = 0,0322P^2 - 0,0203P + 0,0025; \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_{900} = 0,0357P^2 - 0,0233P + 0,0029. \quad (3.17)$$



$$\begin{aligned} \varepsilon_1 - t = 100 \text{ c}; \varepsilon_2 - t = 200 \text{ c}; \varepsilon_3 - t = 300 \text{ c}; \varepsilon_4 - t = 400 \text{ c}; \varepsilon_5 - t = 500 \text{ c}; \\ \varepsilon_6 - t = 600 \text{ c}; \varepsilon_7 - t = 700 \text{ c}; \varepsilon_8 - t = 800 \text{ c}; \varepsilon_9 - t = 900 \text{ c} \end{aligned}$$

Рисунок 3.5 – Залежність деформації зразка з АД00 від питомого тиску при різному часі деформування,  $T=853 \text{ K}$

Аналогічна методика досліджень термодформаційної поведінки була проведена для сплаву АМг5. Одержані при цьому залежності деформації від часу та прикладеного питомого тиску представлені на рис. 3.6 та 3.7. Програма для визначення даних залежностей наведена у додатку Б.

Аналітичний вигляд залежностей  $\varepsilon_i = f(t)$ , зображених на рисунку 3.6:

$$\varepsilon_{0,5} = -3 \cdot 10^{-9} t^2 + 6 \cdot 10^{-6} t + 3,7 \cdot 10^{-4}; \quad (3.18)$$

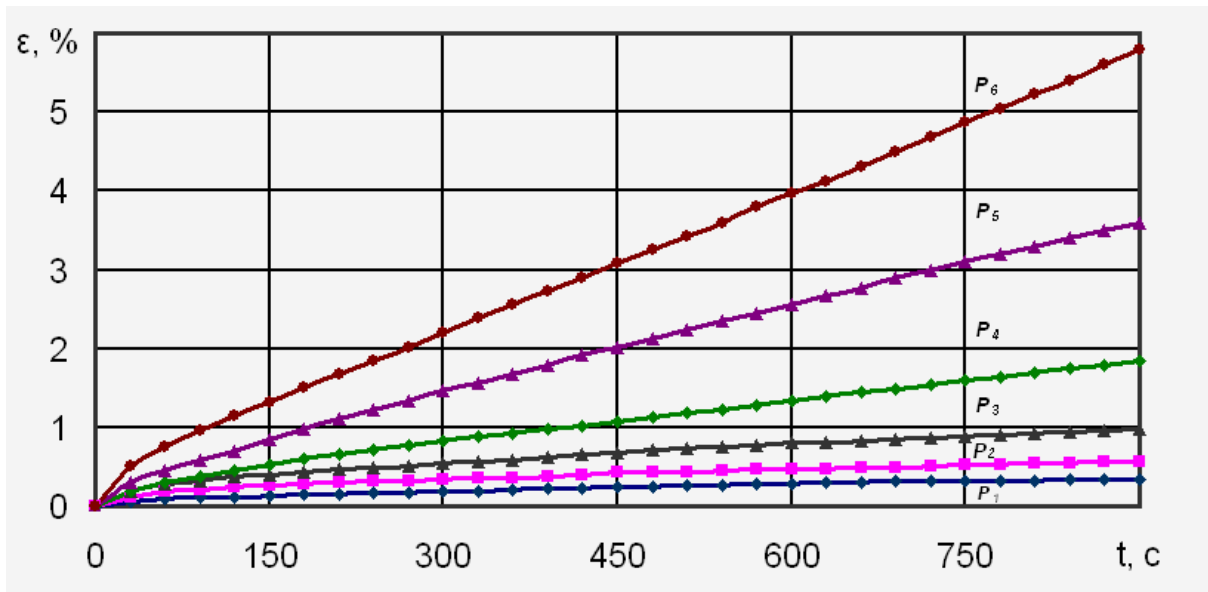
$$\varepsilon_{0,75} = -5 \cdot 10^{-9} t^2 + 9 \cdot 10^{-6} t + 0,0011; \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_1 = -7 \cdot 10^{-9} t^2 + 2 \cdot 10^{-5} t + 0,0015; \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_{1,25} = -6 \cdot 10^{-9} t^2 + 3 \cdot 10^{-5} t + 0,0014; \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_{1,5} = -8 \cdot 10^{-9} t^2 + 5 \cdot 10^{-5} t + 0,0015; \quad (3.22)$$

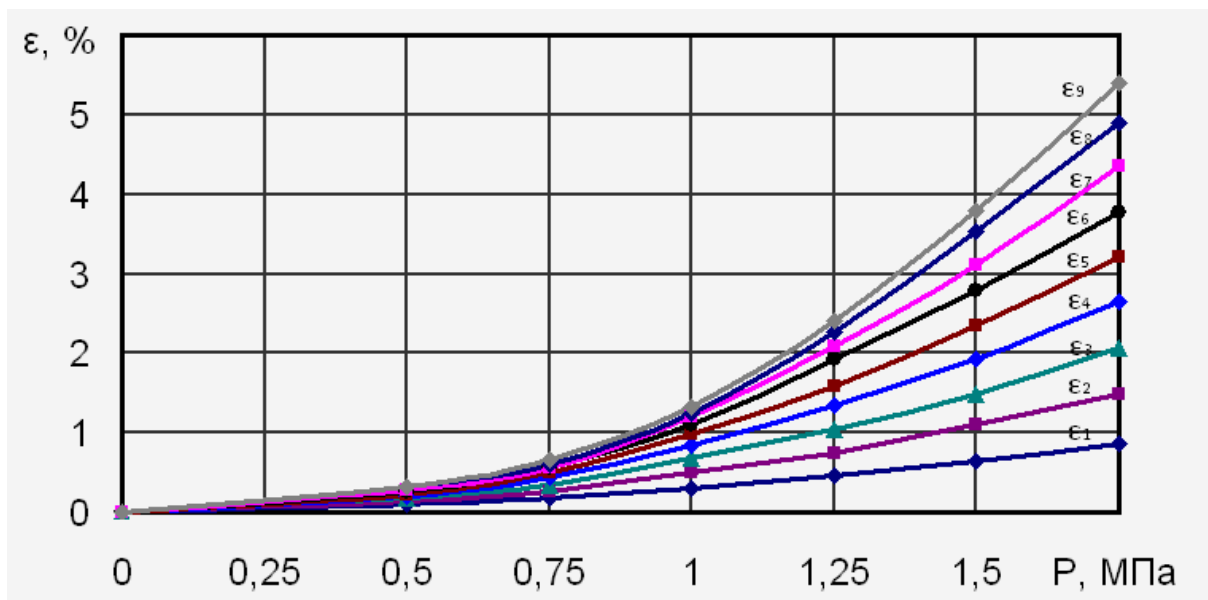
$$\varepsilon_{1,75} = -3 \cdot 10^{-9} t^2 + 6 \cdot 10^{-5} t + 0,0029. \quad (3.23)$$



$$P_1 = 0,5 \text{ МПа}; P_2 = 0,75 \text{ МПа}; P_3 = 1 \text{ МПа};$$

$$P_4 = 1,25 \text{ МПа}; P_5 = 1,5 \text{ МПа}; P_6 = 1,75 \text{ МПа}$$

Рисунок 3.6 – Криві повзучості для зразка з АМγ5 при різному питомому тиску,  $T=853 \text{ К}$



$$\varepsilon_1 - t = 100 \text{ c}; \varepsilon_2 - t = 200 \text{ c}; \varepsilon_3 - t = 300 \text{ c}; \varepsilon_4 - t = 400 \text{ c}; \varepsilon_5 - t = 500 \text{ c};$$

$$\varepsilon_6 - t = 600 \text{ c}; \varepsilon_7 - t = 700 \text{ c}; \varepsilon_8 - t = 800 \text{ c}; \varepsilon_9 - t = 900 \text{ c}$$

Рисунок 3.7 – Залежність деформації зразка з АМγ5 від питомого тиску при різному часі деформування,  $T=853 \text{ К}$

Аналітичний вигляд залежностей  $\varepsilon_i = f(P)$ , зображених на рис. 3.7:

$$\varepsilon_{100} = 0,0026P^2 - 0,0005P + 2,8 \cdot 10^{-5}; \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_{200} = 0,0047P^2 - 0,0002P + 3,1 \cdot 10^{-5}; \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_{300} = 0,006P^2 - 6 \cdot 10^{-5}P + 5 \cdot 10^{-5}; \quad (3.26)$$

$$\varepsilon_{400} = 0,0089P^2 - 0,0005P + 1,7 \cdot 10^{-5}; \quad (3.27)$$

$$\varepsilon_{500} = 0,0116P^2 - 0,0018P + 2 \cdot 10^{-5}; \quad (3.28)$$

$$\varepsilon_{600} = 0,0137P^2 - 0,0022P + 1,2 \cdot 10^{-5}; \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_{700} = 0,0188P^2 - 0,0086P + 4 \cdot 10^{-4}; \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_{800} = 0,0204P^2 - 0,0081P + 5 \cdot 10^{-4}; \quad (3.31)$$

$$\varepsilon_{900} = 0,0221P^2 - 0,0082P + 6 \cdot 10^{-4}. \quad (3.32)$$

Якщо прийняти, що більша частина деформації відбувається з постійною швидкістю, то, як було сказано вище, нехтуючи початковою деформацією і першою стадією повзучості, можна вважати швидкість повзучості функцією від напружень  $V = f(\sigma)$ .

Керуючись даними міркуваннями та використовуючи математичні методи перетворення функцій, із залежностей  $\varepsilon_i = f(t)$  на стадії усталеної повзучості було одержано залежності швидкості повзучості, як похідної від функції деформації, від питомого тиску на деталі при  $T = 853 \text{ K}$  для алюмінію АД00 та сплаву АМг5 (рис. 3.8-3.9).

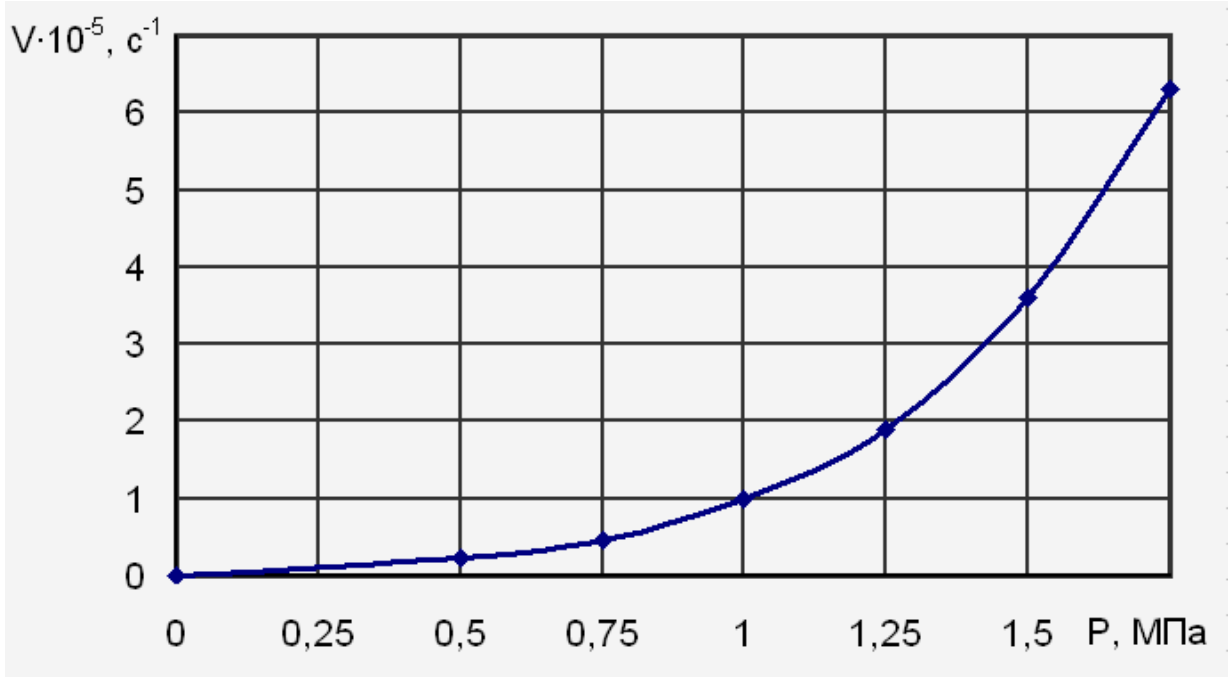


Рисунок 3.8 – Залежність швидкості повзучості АД00 від питомого тиску

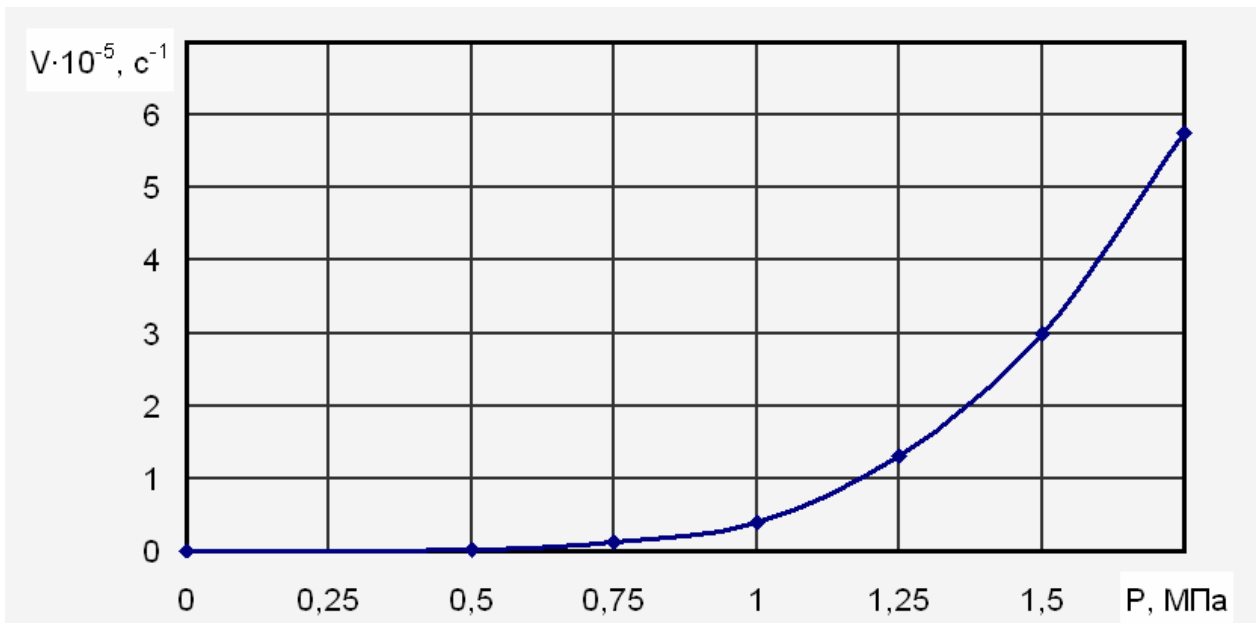


Рисунок 3.9 – Залежність швидкості повзучості АМГ5 від питомого тиску

Аналітичний вигляд залежностей  $V = f(P)$ , зображених на рис. 3.8 та 3.9, відповідно:

$$V = 8 \cdot 10^{-6} P^4 - 5 \cdot 10^{-6} P^3 + 5 \cdot 10^{-6} P^2 + 2 \cdot 10^{-6} P - 2 \cdot 10^{-9}; \quad (3.33)$$

$$V = 3 \cdot 10^{-6} P^4 - 2 \cdot 10^{-5} P^3 + 2 \cdot 10^{-5} P^2 - 7 \cdot 10^{-6} P - 2 \cdot 10^{-8}. \quad (3.34)$$

У результаті обробки одержаних функціональних залежностей (3.33) та (3.34) було встановлено закони швидкості повзучості у різному аналітичному вигляді для алюмінію марки АД00 та сплаву АМг5 відповідно, при діапазонах питомого тиску 0-0,5 МПа та 0,5-1,75 МПа (табл. 3.2, 3.3).

Таблиця 3.2

## Закони повзучості у різному математичному вигляді (АД00)

Функція повзучості	Питомий тиск, МПа	
	0-0,5	0,5-1,75
Лінійна	$V(P) = 4,4 \cdot 10^{-6} \cdot P - 3,3 \cdot 10^{-8}$	$V(P) = 4,65 \cdot 10^{-5} \cdot P - 2,98 \cdot 10^{-5}$
Експоненціальна	-	$V(P) = 6,23 \cdot 10^{-7} e^{2,68P}$
Гіперболічна	-	$V(P) = \frac{-3,33 \cdot 10^{-5}}{P} + 5,78 \cdot 10^{-5}$
Логарифмічна	-	$V(P) = 4,3 \cdot 10^{-5} \ln(P) + 2,1 \cdot 10^{-5}$
Степенева	-	$V(P) = 1,17 \cdot P^{2,68}$
Показникова	-	$V(P) = 6,23 \cdot 10^{-7} \cdot 14,7^P$
Поліноміальна	$V(P) = 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot P$	$V(P) = 4,84 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 6,23 \cdot 10^{-5} \cdot P + 2,26 \cdot 10^{-5}$

## Закони повзучості у різному математичному вигляді (АМг5)

Функція повзучості	Питомий тиск, МПа	
	0-0,5	0,5-1,75
Лінійна	$V(P) = 2,4 \cdot 10^{-7} \cdot P$	$V(P) = 4,37 \cdot 10^{-5} \cdot P - 3,16 \cdot 10^{-5}$
Експоненціальна	-	$V(P) = 2,27 \cdot 10^{-8} e^{4,76P}$
Гіперболічна	-	$V(P) = \frac{-3,04 \cdot 10^{-5}}{P} + 5 \cdot 10^{-5}$
Логарифмічна	-	$V(P) = 4 \cdot 10^{-5} \ln(P) + 1,63 \cdot 10^{-5}$
Степенева	-	$V(P) = 4,09 \cdot 10^{-6} P^{4,9}$
Показникова	-	$V(P) = 2,27 \cdot 10^{-8} \cdot 117,47^P$
Поліноміальна	$V(P) = 2,4 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 + 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot P$	$V(P) = 5,41 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 7,8 \cdot 10^{-5} \cdot P + 2,7 \cdot 10^{-6}$

Використовуючи одержані залежності, з'являється можливість спрогнозувати деформацію виробів у залежності від термодереформаційного навантаження процесу зварювання, а також вирішувати зворотну задачу – визначати необхідне зусилля притискання та тривалість його дії, якщо відомий допустимий рівень деформації виробу [100].

Таким чином, в умовах відсутності експериментальних даних одержані функціональні залежності для визначення деформації алюмінію під дією навантаження і температури дозволять у подальшому використовувати їх для комп'ютерного моделювання деформації

матеріалів. Аналогічна методика досліджень термодформаційної поведінки може бути застосована і для інших марок алюмінію та його сплавів.

### 3.2 Визначення залежностей пружно-пластичних характеристик матеріалів від температури

В основу деформаційної теорії пластичності покладено принцип уявлення про те, що при зростаючих напруженнях поведінка матеріалу в області пластичних деформацій принципово не відрізняється від його пружної поведінки у тому сенсі, що величини напружень та деформацій пов'язані між собою однозначними залежностями [87]. Для ізотропного тіла інтенсивність деформації дорівнює сумі інтенсивностей пластичних та пружних деформацій [79, 87]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^p + \varepsilon_i^e = \frac{2(1+\nu)}{3E} \sigma_i, \quad (3.40)$$

де  $\varepsilon_i^p$  – інтенсивність пластичної деформації;

$\varepsilon_i^e$  – інтенсивність пружної деформації;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$E$  – модуль пружності;

$\sigma_i$  – інтенсивність напружень.

Для визначення деформації за формулою (3.40) потрібне знання двох параметрів:  $\nu$  та  $E$ . Значення модуля пружності для більшості монокристалів та полікристалів у залежності від температури можна знайти у довідникових джерелах [82]. Однак стосовно зміни коефіцієнта Пуассона від температури в літературі міститься досить обмежений обсяг даних. Тому важливим завданням для дослідження пружних та пластичних властивостей алюмінію є визначення температурної залежності коефіцієнта Пуассона.



Одержані результати у пункті 3.1 дозволяють визначити одновісну деформацію матеріалу. Для отримання об'ємної картини деформування та визначення складових деформації за трьома напрямками необхідно знати коефіцієнт поперечної деформації, або коефіцієнт Пуассона. За фізичною сутністю коефіцієнт Пуассона характеризує прагнення матеріалу зберігати у процесі деформації свій першопочатковий об'єм [72, 82, 86, 87].

Одним зі шляхів вирішення проблеми адекватного визначення коефіцієнта Пуассона розрахунковими методами є встановлення нових залежностей між ним та деякими іншими характеристиками твердого тіла, що відображають властивості реального матеріалу та особливості його деформації [101]. Серед набору таких характеристик привертає увагу так званий параметр Грюнайзена, який характеризує ангармонізм коливань кристалічної решітки твердого тіла і, подібно до коефіцієнта Пуассона, широко використовується для опису властивостей кристалу, залежних від його об'єму [101-106].

Закон Грюнайзена, що використовує даний параметр, встановлює однакову температурну залежність теплоємності та коефіцієнта теплового розширення (КТР) і добре виконується для більшості чистих металів та ряду простих з'єднань [106-108].

У літературі наводяться різноманітні залежності для визначення коефіцієнта Пуассона  $\nu$  через параметр Грюнайзена  $\gamma$  [101-105].

Зокрема, у роботі [104] запропоновано формулу, що пов'язує коефіцієнт  $\nu$  та параметр  $\gamma$  наступною залежністю:

$$\gamma = A \left( \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} \right), \quad (3.41)$$

де  $A$  – емпіричний коефіцієнт, постійний для твердих тіл одного структурного типу.

Однак визначення коефіцієнта  $A$  викликає труднощі та потребує проведення експериментів.

Авторами роботи [101] представлено наступні співвідношення, які дозволяють визначати  $\nu$  при відомому  $\gamma$  і навпаки:

$$\nu = \frac{4/3\gamma - 1}{2\gamma + 1}; \quad (3.41)$$

$$\gamma = \frac{3(1 + \nu)}{2(2 - 3\nu)}. \quad (3.42)$$

На даний час рівняння (3.41) та (3.42) є найбільш широко вживаними при розгляданні питань стосовно взаємозв'язку коефіцієнта  $\nu$  та  $\gamma$ .

Для алюмінію при кімнатній температурі ( $T = 293 \text{ K}$ ) коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,34$  [37, 82], тоді при підстановці у (3.42) параметр Грюнайзена  $\gamma$  становить 2,051.

Відомі спроби співставлення коефіцієнта Пуассона з параметром Грюнайзена. Так, автори [85] наводять наступну залежність:

$$1 - 2\nu = \frac{E\alpha V}{\gamma C_V}, \quad (3.43)$$

де  $E$  – модуль пружності;

$\alpha$  – коефіцієнт теплового розширення;

$V$  – молярний об'єм;

$C_V$  – молярна теплоємність при сталому об'ємі.

Але для визначення коефіцієнта  $\nu$  дана формула потребує знання п'яти різних параметрів.

Згідно з [106] закон Грюнайзена подається у дещо іншому вигляді:

$$\alpha = \frac{\gamma C_V^{yd}}{3K}, \quad (3.44)$$

де  $C_V^{yd} = C_V/V$  – питома молярна теплоємність при постійному об'ємі;

$K$  – ізотермічний модуль усебічного (об'ємного) стиску, який вважається таким, що слабо залежить від температури, тобто для

інженерних розрахунків його значення можна приймати постійним. Для алюмінію при кімнатній температурі  $K = 7,5 \cdot 10^{10}$  Па.

Встановлено, що при будь-яких температурах для металів відношення КТР до питомої теплоємності дорівнює сталій величині [107]:

$$\frac{\alpha}{C_v^{y\delta}} = \frac{\gamma}{3K} = const \quad (3.45)$$

З урахуванням (3.45) формула (3.43) набуває вигляду:

$$1 - 2\nu = \frac{E\alpha}{\gamma C_v^{y\delta}} = \frac{E}{3K} \quad (3.46)$$

Звідси коефіцієнт Пуассона:

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{E}{3K} \right) \quad (3.47)$$

За виразом (3.47) було проведено розрахунок коефіцієнта Пуассона для алюмінію АД00 при відомих з літературних джерел значеннях модуля пружності та модуля об'ємного стиску. Одержані значення коефіцієнтів наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Значення коефіцієнта Пуассона алюмінію АД00 залежно від температури

Температура, $K$	293	373	473	573	673	773	873
$E$ , ГПа [82]	71	70	66	61	56	50	44
$\nu$	0,342	0,344	0,353	0,364	0,376	0,389	0,402

Таким чином, визначено температурну залежність коефіцієнта Пуассона алюмінію АД00, що дозволяє у більш повній мірі описати властивості матеріалу та здійснювати моделювання процесу деформування реальних виробів з урахуванням зміни температури.

### 3.3 Висновки

1. Досліджено термодформаційну кінетику та одержано рівняння повзучості для алюмінію АД00 та сплаву АМг5 при температурі утворення евтектики Al-Si.
2. Одержано функціональні залежності величини деформації алюмінію АД00 та сплаву АМг5 при температурі 853 К від величини навантаження та часу його дії.
3. Встановлено залежності зміни швидкості повзучості алюмінію АД00 та сплаву АМг5 від величини навантаження при температурі 853 К.
4. Визначено температурну залежність коефіцієнта Пуассона алюмінію АД00 в інтервалі 293-873 К.
5. Отримані залежності дозволяють у подальшому здійснювати прогнозування величини деформації виробів засобами комп'ютерного моделювання залежно від геометричних характеристик виробу, величини температури, зусиль при зварюванні та тривалості їх дії.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕЦИЗІЙНОГО ДИФУЗІЙНОГО З'ЄДНАННЯ У ВАКУУМІ АЛЮМІНІЮ ТА ЙОГО СПЛАВІВ

#### 4.1 Дослідження процесу деформування при утворенні евтектики алюміній-кремній

Як було вказано у першому розділі, для зменшення рівня пластичних деформацій та для отримання якісного з'єднання на поверхні алюмінію доцільно створювати евтектичні прошарки на основі системи Al-Si. Кремній має достатню хімічну спорідненість з алюмінієм і утворює евтектику, що містить 87,7% алюмінію (див. рис. 1.2) та має температуру плавлення 850 К.

Для отримання евтектики в зоні з'єднання спочатку необхідно забезпечити наявність кремнієвмісного матеріалу для утворення на поверхні евтектичного складу у процесі контактного плавлення. Тому, перш ніж розробити технологію дифузійного зварювання у вакуумі через евтектичний прошарок, спочатку було проведено дослідження зварювання з утворенням евтектики Al-Si.

Для цього здійснювали термічне вакуумне напилення шару кремнію товщиною 8 мкм на поверхню алюмінію та проводили наступне зварювання. Використовуючи діапазони питомих тисків, розглянутих у розділі 3, зварювання проводили на режимі, вказаному у таблиці 4.1. Оскільки для евтектичного плавлення достатньо простого контакту різнорідних речовин при температурі, дещо вищій за температуру плавлення евтектики [109], експерименти проводилися при температурі зварювання 853 К, що незначно перевищує температуру плавлення евтектики Al-Si [98].

Таблиця 4.1

## Параметри режиму ДЗВ алюмінію АД00 та АМг5

Питомий тиск $p$ , МПа	Температура зварювання $T$ , К	Ізотермічна витримка $t$ , хв.	Тиск у камері $p_{\text{кам}}$ , Па
0,25-2	853	15	0,0133

Змінюючи величину прикладеного питомого тиску від 0,25 до 2 МПа, визначили, що найменші деформації і найбільша швидкість утворення евтектики спостерігаються при тиску 1,75 МПа за час 900 с.

Така тривалість процесу, очевидно, пов'язана не тільки з високою стійкістю плівки оксиду алюмінію на поверхні металу, але і з високою механічною та хімічною стійкістю плівки оксиду кремнію (табл. 4.2, 4.3), для руйнування якої та проходження процесу не локально, а по всій площі з'єднання, слід застосовувати збільшені притискаючі зусилля [67].

Таблиця 4.2

## Механічні властивості оксидів [110]

Характеристика	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Границя міцності при розтягу, МН/м <sup>2</sup>	882	258,62
Коефіцієнт стискання, м <sup>2</sup> /Н	2,75	0,4

Таблиця 4.3

## Енергія розриву хімічних зв'язків оксидів [110]

Рівняння дисоціації	Теплота дисоціації, $\times 10^{-6}$ , кДж/моль
$\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Al}_2\text{O}_2 + \text{O}$	682
$\text{Al}_2\text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O} + \text{O}$	502,416
$\text{Al}_2\text{O} = 2\text{Al} + \text{O}$	1013,296
$\text{SiO}_2 = \text{SiO} + \text{O}$	464,735
$\text{SiO}_2 = \text{Si} + 2\text{O}$	1267,704

У результаті експериментів одержали рівень деформації  $\sim 8\%$  від висоти зразка. Підтвердження можливості прогнозування величини та характеру деформації виробів на основі залежностей, визначених у розділі 3, отримали при скінченно-елементному моделюванні процесу деформування з використанням програмного пакету ANSYS. Вигляд зразка та скінченно-елементна модель показані на рис. 4.1. Результати розрахунку в програмі представлені на рис. 4.2.

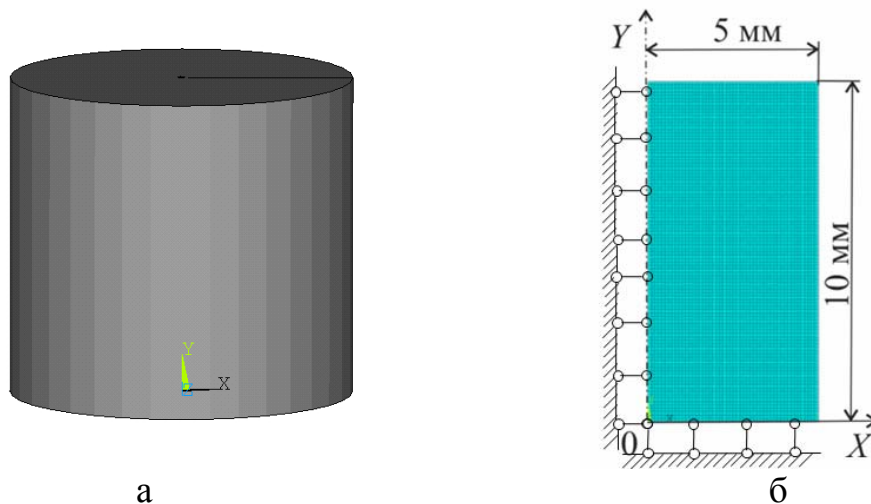


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд зразка (а) та переріз осесиметричної скінченно-елементної моделі (б)

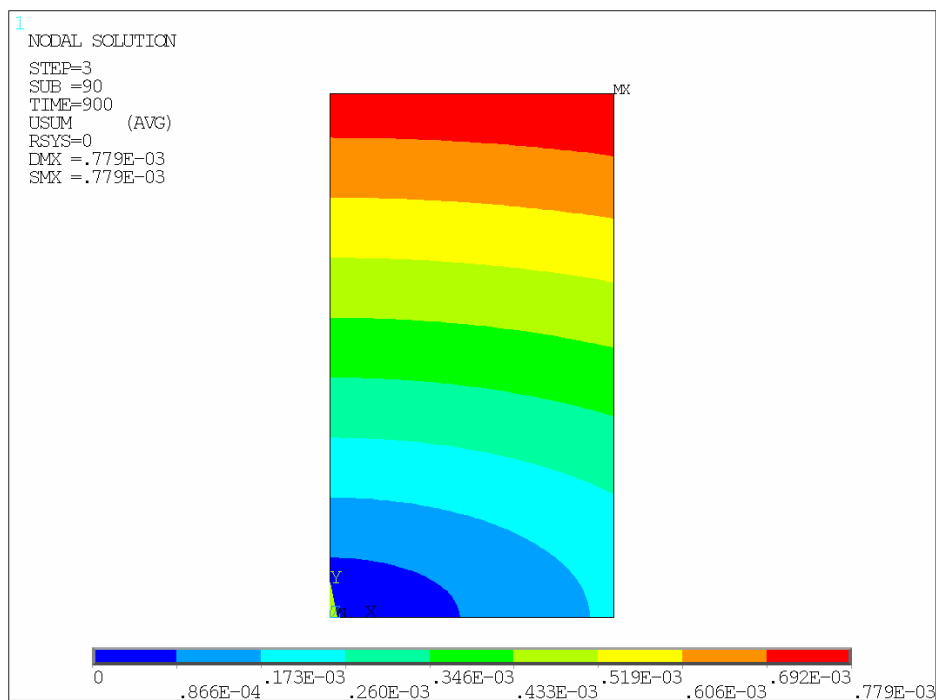


Рисунок 4.2 – Результати розрахунку – сумарне переміщення зразка

За результатами розрахунку сумарні переміщення зразка становлять 0,78 мм, відповідно, рівень залишкової деформації при цьому складає 7,8 % від висоти зразка, що з достатньою точністю корелює з експериментальними даними.

Одержані результати свідчать про необхідність зменшення питомих зусиль стиску деталей або зниження часу ізотермічної витримки.

Застосування замість напилення способу плакування силуміну на поверхні алюмінію, як вказано в розділі 1, не забезпечує рівномірного проміжного шару і в процесі контактного плавлення може спричинити надмірне розчинення основного металу.

Отже, застосування даних способів для утворення евтектичного шару при з'єднанні алюмінію недоцільне внаслідок довготривалості та трудомісткості процесу і не дозволяє отримати прецизійне з'єднання. Тому актуальним завданням при дифузійному зварюванні алюмінію та його сплавів є пошук інших шляхів отримання в зоні з'єднання евтектики Al-Si.

#### **4.2 Хімічна активація поверхонь деталей, що з'єднуються**

Оскільки процес контактного плавлення при дифузійному зварюванні відбувається подібно до того, як і при контактному-реактивному паянні, а рідкий прошарок виконує функцію припою, виникла необхідність проаналізувати вимоги до флюсів та припоїв для паяння алюмінію та сплавів з метою вибору оптимального хімічного складу евтектичного прошарку.

Через те, що до флюсів висувається ряд вимог (висока здатність до змочування поверхні металів, що паяються, та припоїв, і до розтікання по ним; низький поверхневий натяг; стійкість при транспортуванні; здатність легко видалятися після паяння; густина розплавленого флюсу повинна бути нижче густини розплавленого припою та ін.), ні одне з хімічних



з'єднань окремо не може забезпечити різноманітність властивостей, яким повинні задовольняти флюси.

Поєднання необхідних властивостей забезпечується застосуванням у якості флюсу багатокомпонентних сольових сумішей. Для створення флюсів використовують солі слабких кислот: соляної, плавикової, фосфорної [41, 42, 111-114].

Припої, у свою чергу, для отримання якісних паяних з'єднань повинні задовольняти наступним вимогам: температура плавлення припоїв повинна бути нижче температури плавлення металу, що паяється; розплавлений припой повинен добре змочувати основний метал та заповнювати зазор між деталями; припої повинні забезпечувати необхідну міцність та корозійну стійкість паяних з'єднань; коефіцієнти температурного розширення металу та припою повинні бути приблизно однакові; припої не повинні містити дефіцитних та високовартісних компонентів [41].

У результаті аналізу літературних джерел, проведеного у роботах [98, 114], було встановлено, що за основу флюсів для паяння алюмінію та його сплавів беруть хлориди лужних металів: літію, натрію або калію, які завдяки невисокому поверхневому натягу добре змочують поверхню алюмінію та його сплавів, а в якості припоїв найчастіше використовують силуміни (переважно евтектичний силумін АЛ2) завдяки високій рідкотекучості, які дозволяють отримувати достатньо міцні та корозійностійкі з'єднання.

Кремній, що міститься у складі силумінів, при затвердінні евтектики виділяється у вигляді грубих кристалів голчастої форми, які відіграють роль надрізів у пластичному алюмінії [96]. Для подрібнення структури та видалення надлишкових кристалів силуміни модифікують натрієм. У присутності натрію відбувається зміщення ліній діаграми стану (рис. 4.3), і заевтектичний сплав АЛ2 стає доевтектичним.

Евтектика при цьому стає більш тонкої структури і складається з дрібних кристалів кремнію та  $\alpha$ -структури, оскільки у процесі затвердіння кристали кремнію обволікаються плівкою силіциду натрію  $\text{Na}_2\text{Si}$ , що перешкоджає їх росту. Такі зміни покращують механічні властивості силумінів (рис. 4.4).

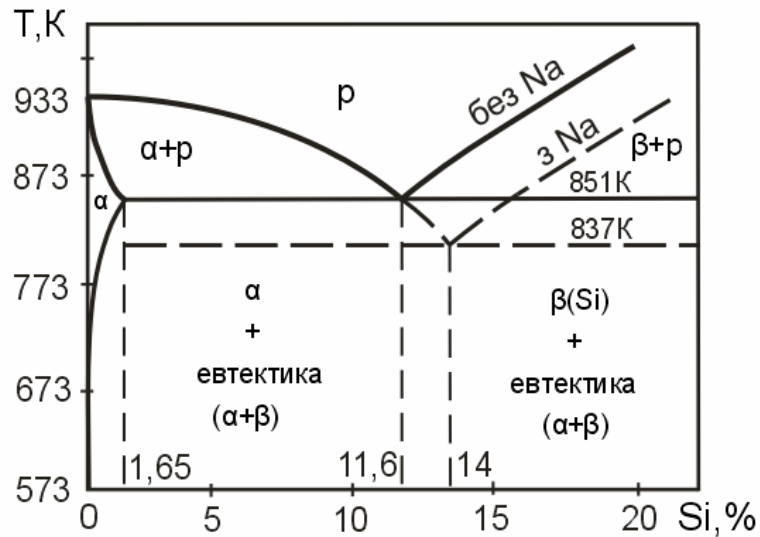


Рисунок 4.3 – Діаграма стану Al-Si [96]

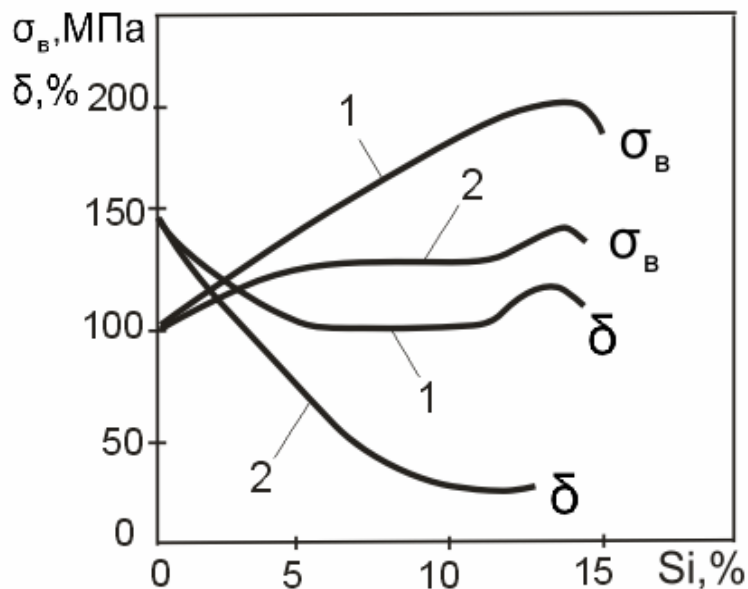
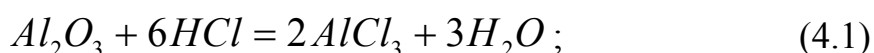


Рисунок 4.4 – Вплив кремнію на механічні властивості алюмінію (1 – модифікованого натрієм, 2 – не модифікованого натрієм) [96]

Доевтектичні сплави АЛ4 та АЛ9, додатково леговані магнієм, можуть зміцнюватися, окрім модифікування, термічною обробкою. При цьому зміцнюючою фазою слугує силіцид магнію  $Mg_2Si$  [67].

Щодо механізму дії флюсу на оксидну плівку алюмінію існують різні точки зору. Деякі дослідники вважають, що оксидну плівку, окрім її розчинення, можна відновити хлористим воднем. Газоподібний хлористий водень діє на оксидну плівку алюмінію, відновлюючи її до хлористого алюмінію [41]:



За іншою теорією оксидна плівка алюмінію видаляється в результаті утворення в процесі паяння їдкого натру  $NaOH$  при взаємодії хлориду натрію з залишками вологи, що завжди наявна у флюсі, у результаті чого утворюється розчинний у воді та флюсі алюмінат натрію [41]:



Існує точка зору, що наявність вологи, яка завжди міститься у флюсі та на поверхні деталей, що паяються, сприяє флюсуванню поверхні алюмінію [41]. Розплавлення флюсу та витримка його при 893 К не призводять до достатньо повного видалення вологи з флюсу, тому перед паянням виробів проводять зневоднення розплавленого флюсу у ванні за рахунок введення порошкоподібної лігатури  $Al-Mg$ . Проте волога у даному випадку вноситься разом з виробом, оскільки вона завжди є на поверхні деталей, що паяються. Підігрів виробів зменшує кількість вологи на поверхні деталей, проте не виключає її повністю.

Силуміни у якості припоїв використовують при паянні практично всіх алюмінієвих теплообмінників, переважно коли припой на деталі наносять у вигляді плакуючого шару. Міцність паяних з'єднань, за даними роботи [41], залежить від товщини плакуючого шару (рис. 4.5).

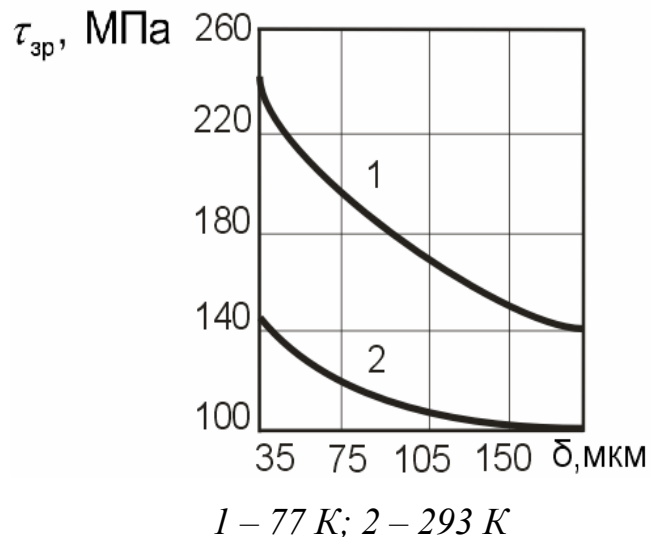


Рисунок 4.5 – Залежність міцності паяних з'єднань на зріз від товщини плакуючого шару силуміну (7,8 % Si) [41]

Крім того, міцність паяних з'єднань залежить значною мірою, при одному й тому ж припої, від марки металу, що паяється. За даними роботи [111] міцність з'єднань на зріз, паяних припоєм ПЗ4А, для сплаву АМц становить 90-120 МПа, а для АМг6 – 60-80 МПа.

Однак, як згадувалося вище, виробнича практика показує, що введення припою плакуванням при паянні алюмінію та його сплавів, особливо у крупносерійному та масовому виробництві, не забезпечує гарантійної технологічності в результаті трудомісткості процесу.

Отже, з вищесказаного випливає, що найкращі технологічні властивості працездатного паяного з'єднання забезпечуються за умови, коли у комплексі підібрано оптимальний склад флюсу та припою, які дозволять забезпечити ефективність видалення оксидної плівки [115], і при яких припой наноситься на поверхню перед паянням, утримується в зоні з'єднання, за рахунок чого складання під паяння деталей проводиться легко [116-117].

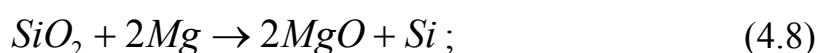
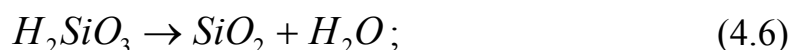
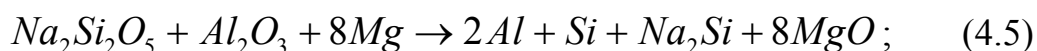
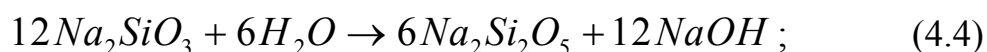
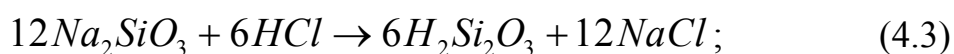
Керуючись вище викладеними міркуваннями, можна зробити висновок, що, як при високотемпературному паянні, так і при дифузійному зварюванні у вакуумі алюмінію через рідкий евтектичний прошарок, у зоні

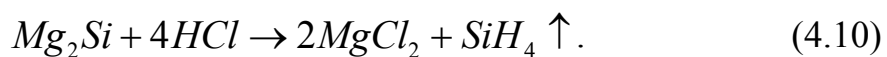
з'єднання потрібно забезпечити не лише утворення евтектики алюміній-кремній, а й введення у зону з'єднання натрію та магнію.

На основі наведених даних про флюси та припої для паяння алюмінію, ми дійшли до суміші складу, що відображений у роботі [98], при якому в зоні з'єднання забезпечується утворення евтектики Al-Si, хлориду натрію NaCl, зміцнюючих фаз Na<sub>2</sub>Si та Mg<sub>2</sub>Si та створюються додаткові умови для видалення оксидної плівки з поверхні металу.

Тому як прошарок для дифузійного зварювання алюмінію було використано суміш складу Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>-HCl-Mg. Вибір таких компонентів обґрунтовується наступними міркуваннями. За основу суміші було взято силікат натрію Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, або «рідке скло», як джерело кремнію та натрію. Для забезпечення комплексу хімічних реакцій по видаленню оксидної плівки до суміші додавався 2М розчин соляної кислоти HCl. Для зміцнення структури з'єднання та забезпечення умов для відновлення оксидної плівки додавався дрібнодисперсний порошок магнію з розміром частинок 25 мкм [98, 118].

Використовуючи теоретичний апарат неорганічної хімії було визначено, що при використанні запропонованої суміші при дифузійному зварюванні алюмінію та його сплавів у зоні з'єднання відбуваються наступні хімічні реакції [98, 118]:

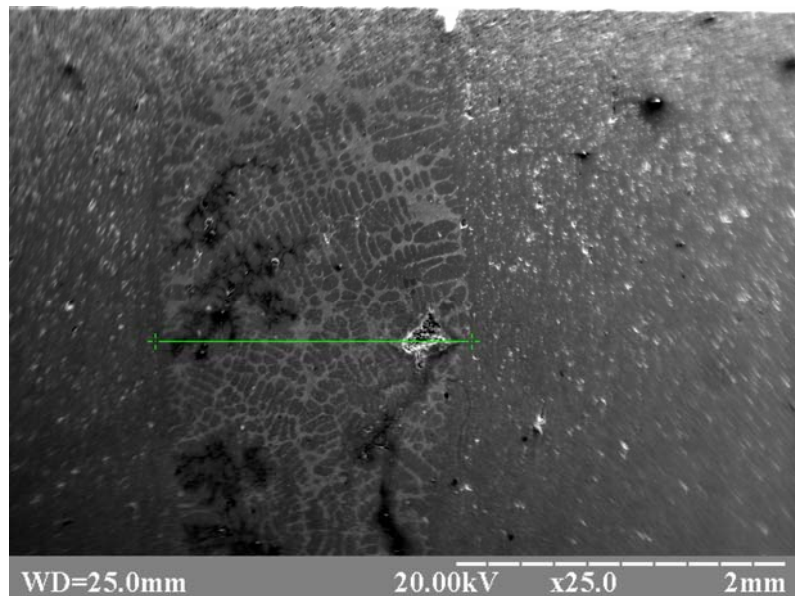




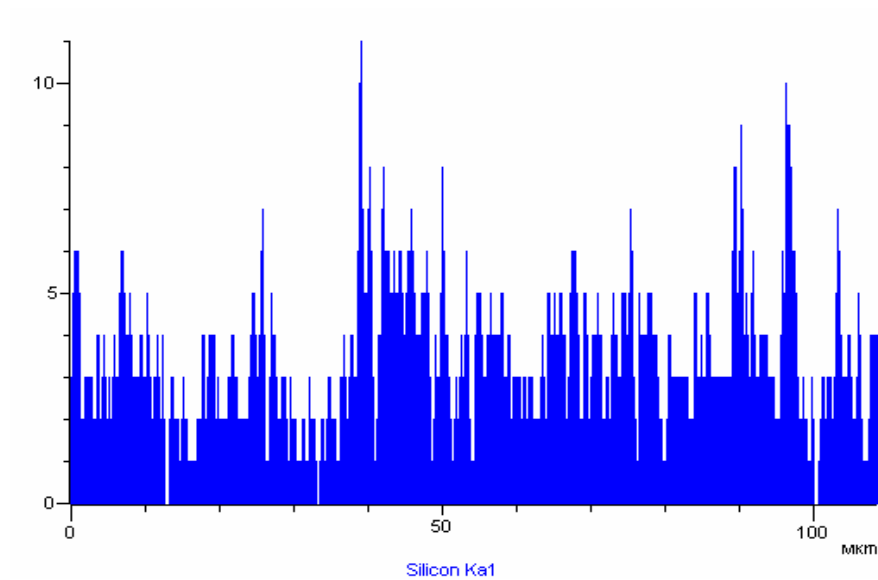
Співвідношення компонентів визначалося кількістю кремнію, що виділяється в результаті проходження вище наведених реакцій і бере участь в утворенні евтектичного сплаву Al-Si (88,3 % алюмінію та 11,7 % кремнію, мас. %), по відношенню до якого магній вводиться у кількості близько 2 % [119]. Враховуючи молярні маси речовин, було розраховано відсотковий вміст компонентів у суміші (мас. %): 75,3 % силікату натрію, 22,5 % хлористого водню та 2,2 % порошку магнію.

Отже, хімічні реакції показують, що у процесі зварювання в зоні з'єднання утворюється чистий кремній, який утворює евтектику з алюмінієм, зміцнююча фаза силіциду магнію  $Mg_2Si$  та натрій у вигляді силіциду  $Na_2Si$ . При реакції силікату натрію з хлористим воднем утворюється хлорид натрію  $NaCl$ , що сприяє змочуванню оксидної плівки, та гель силікатної кислоти  $H_2SiO_3$ , що дозволяє досягти потрібної консистенції суміші. Таким чином, запропонований рідкий прошарок дозволяє забезпечити технологічне нанесення його перед зварюванням на поверхні деталей, що з'єднуються. Утворення у процесі зварювання летючого силану  $SiH_4$  створює додаткові умови для відновлення алюмінію з оксидної плівки  $Al_2O_3$  [120].

Оскільки контактне плавлення відбувається вже при тисках порядку 0,1 МПа [66], перші спроби по зварюванню через запропонований прошарок проводили при температурі 853 К з прикладенням питомого тиску величиною 0,1 МПа. Результати зварювання показали утворення евтектики Al-Si з характерною структурою силуміну (рис. 4.6, а) та наведеною концентрацією кремнію в евтектиці (рис. 4.6, б). За даними мікрорентгеноспектрального аналізу концентрація елементів безпосередньо у шві складає 87,65Al - 10,87Si - 1,28Mg - 0,2Na (мас. %).



а



б

Рисунок 4.6 – Зона з'єднання (а) та розподілення кремнію в евтектиці (б)

В результаті досліджень встановлено, що контактне плавлення відбувається за час 480-520 с. При механічних випробуваннях зварних зразків з алюмінію АД00 на зріз руйнування з'єднань відбувалося із виривами по основному металу. Границя міцності складала значення 48-50 МПа, що становить 78-80 % від границі міцності на зріз основного

металу. Такий результат ми пояснюємо тим, що силуміни мають більшу границю міцності, ніж АД00.

У випадку з'єднання сплаву АМг5 зразки руйнувалися по зварних швах з границею міцності при випробуванні на зріз 72-84 МПа, що відповідає границі міцності на зріз силуміну марки АЛ2.

Як вказується в роботі [121], міцність зварних з'єднань залежить від співвідношення між товщиною та шириною шва: при його зменшенні міцність з'єднань при статичних навантаженнях дозволяє досягти міцності основного металу. Отже, щоб забезпечити міцність зварних з'єднань, виконаних через евтектичний прошарок, необхідно зменшувати товщину прошарку у з'єднанні.

Тому, окрім проходження контактного плавлення та утворення евтектики, необхідно забезпечити видалення її надлишку із зони з'єднання. Основною задачею при цьому для одержання прецизійного з'єднання залишається визначення умов, при яких кількість кремнієвмісного матеріалу в контакті шорстких поверхонь буде такою, щоб забезпечити формування евтектичного сплаву у кількості, яка пропорційна об'єму основного матеріалу, що знаходиться в шорстких поверхнях з'єднаних деталей, дозволяючи отримати мінімальну осадку при виготовленні прецизійних виробів.

#### **4.3 Контактне плавлення в об'ємі шорсткої поверхні**

При нанесенні кремнієвмісного рідкого прошарку і наступному складанні деталей під зварювання надлишок прошарку буде видавлюватися, а в контакті залишатиметься кількість суміші, яка відповідає об'єму мікрозазорів в контакті шорстких поверхонь. Тому для визначення кількості кремнію у рідкій суміші, що знаходиться в об'ємі шорсткого контакту, необхідно врахувати особливості контактування шорстких поверхонь.



У залежності від шорсткості контактуючих поверхонь при розрахунках властивостей контакту визначається подвоєна висота нерівностей  $2R_a$  [122]. Скористаємося розрахунковою схемою, зображеною на рис. 4.7, для визначення середньої товщини зазору у стику  $h_z$ , який заповнюється кремнієвмісним матеріалом.

При розрахунку властивостей контакту деталей машин у всіх випадках, за виключенням пластичного контакту без зміцнення матеріалу, необхідно мати дані по геометричним характеристикам контактуючих поверхонь [123].

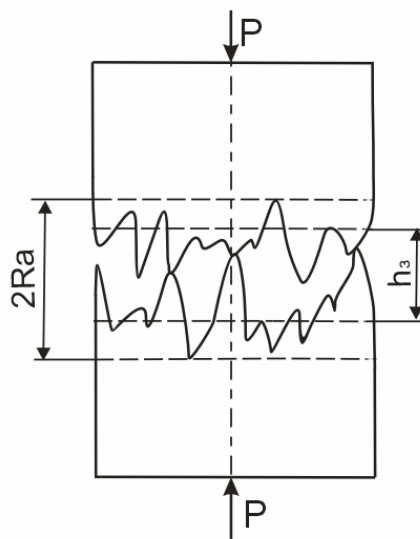


Рисунок 4.7 – Схема для розрахунку середньої товщини зазору у стику

До таких характеристик належать: максимальна висота нерівностей  $H_{\max}$ , коефіцієнти опорної кривої  $b$  та  $v$ , радіус заокруглень вершин нерівностей  $r$ . Максимальна висота нерівностей визначається за поперечними профілограмами, проте через значні труднощі при цьому, вона може бути визначена через середнє арифметичне відхилення  $R_a$  та висоту нерівностей  $R_z$ .

На основі досліджень експериментальних даних, отриманих різними авторами, була одержана залежність між  $H_{\max}$  та  $R_a$ :

$$\lg H_{\max} = 0,79 + 0,98 \lg R_a . \quad (4.11)$$

Значення, розраховані за формулою (4.11), наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Значення  $H_{max}$  в залежності від  $R_a$  [123]

$R_a$ , мкм	0,04	0,08	0,2	0,8	2	4	8	20
$H_{max}$ , мкм	0,27	0,59	1,1	5	12	25	50	116

Радіус заокруглень вершин нерівностей визначається на основі поздовжніх та поперечних профілограм. На профілограмах вимірюють для найбільш високих виступів довжину перерізу виступу  $d_i$  та відстань від вершини до даного перерізу  $a_i$ , радіус заокруглень знаходять за формулою  $r = d_i^2 / 8a_i$ . З урахуванням горизонтального і вертикального збільшення цю формулу можна представити у вигляді:

$$r_i \approx \frac{\lambda_2 d_i}{8\lambda_1^2 a_i}, \quad (4.12)$$

де  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  – горизонтальне та вертикальне збільшення профілограм.

Коефіцієнти  $b$  та  $v$  знаходять за допомогою поперечних профілограм або профілограм, знятих під кутом  $45^\circ$  до напрямку обробки.

При виборі розрахункової схеми слід розрізняти контакт пружний, пластичний, пружно-пластичний, пластичний зі зміцненням та пружний контакт при повторному навантаженні. Крім того, деякими особливостями володіє контакт при досить високих тисках.

Практично можна вважати деформацію виступів пластичною при розрахунку деформації контакту грубо оброблених металевих поверхонь (1-4 класи) та для приблизної оцінки площі контакту металевих поверхонь з середньою чистотою обробки (5-7 класи).

При пластичному контакті фактична площа контакту розраховується за формулою:

$$A_r = \frac{N}{C\sigma_T}, \quad (4.13)$$

де  $N$  – нормальне навантаження;

$C$  – коефіцієнт (для наклепаного матеріалу  $C \approx 3$ );

$\sigma_T$  – границя текучості.

У першому наближенні  $C\sigma_T \approx HB$ , тоді:

$$A_r = \frac{N}{HB}. \quad (4.14)$$

При пластичному контакті мікрогеометрія поверхні та номінальна площа контакту майже не впливають на фактичну площу контакту.

При пластичній деформації мікронерівностей для контакту шорсткої поверхні з хвилястою контурна площа контакту:

$$A_c = \left( \frac{A_a^v N b^{v-1}}{C\sigma_T} \right)^{\frac{1}{v+1}}, \quad (4.15)$$

де  $A_a$  – номінальна площа контакту.

Для двох хвилястих поверхонь:

$$A_c = \left( \frac{A_a^{\frac{v}{2}} N b^{\frac{v-2}{2}}}{C\sigma_T} \right)^{\frac{2}{v+2}}. \quad (4.16)$$

При контактуванні шорстких поверхонь у випадку пластичної деформації мікровиступів, об'єм зазору в стику становить

$$V_3 = \left[ \left( \frac{1}{2b} \right)^{\frac{1}{v}} - \left( \frac{q_c}{HB b} \right)^{\frac{1}{v}} \right] A_c H_{\max}, \quad (4.17)$$

а середня товщина зазору обчислюється наступним чином:

$$h_3 = \left[ \left( \frac{1}{2b} \right)^{\frac{1}{v}} - \left( \frac{q_c}{HB b} \right)^{\frac{1}{v}} \right] H_{\max}, \quad (4.18)$$

де  $q_c = \frac{N}{A_c}$  – контурний тиск.

У нашому випадку при обробці поверхонь алюмінієвих зразків використовувалося грубе шабріння, тому контакт вважаємо пластичним.

Спираючись на літературні дані авторів Дьомкін Н.Б., Лашко Н.В., Лашко С.В. та довідникові дані [37, 123], при розрахунку використовували наступні вихідні значення:  $C = 3$ ;  $b = 2$ ;  $\nu = 2$ ;  $\sigma_T = 40$  МПа (для АД00 при  $T = 293$  К).

Для грубого шабріння ( $R_a = 4$  мкм) з таблиці 4.3 максимальна висота нерівностей становить  $H_{\max} = 25$  мкм = 0,025 мм.

Оскільки  $C = 3$ , то  $H_B \approx 3\sigma_T$ .

Розрахунок проводили за формулами (4.16)-(4.18) при навантаженні  $N = 0,1$  Н та номінальній площі контакту  $A_a = 1$  мм<sup>2</sup>.

Контурна площа контакту:

$$A_c = \left( \frac{1^2 \cdot 0,1 \cdot 2^{\frac{2-2}{2}}}{3 \cdot 40} \right)^{\frac{2}{2+2}} = 0,0289 \text{ мм}^2.$$

Об'єм зазору в стику:

$$V_3 = \left[ \left( \frac{1}{2 \cdot 2} \right)^{1/2} - \left( \frac{0,1}{0,0289 \cdot 120 \cdot 2} \right)^{1/2} \right] \cdot 0,0289 \cdot 0,025 = 0,000274 \text{ мм}^3.$$

Середня товщина зазору в стику:

$$h_3 = \frac{V_3}{A_c} = \frac{0,000274}{0,0289} = 0,0095 \text{ мм} = 9,5 \text{ мкм}.$$

Знайдемо об'єм кремнію, який проникає в алюміній, у випадку зварювання алюмінію через прошарок силікату натрію. Розглянемо об'єм зразка площею 1 мм<sup>2</sup> (рис. 4.8), де заштрихована ділянка  $x$  – товщина алюмінію, що приймає участь в утворенні евтектики.

Вихідні дані для розрахунку:  $\rho_{Na_2SiO_3} = 1,36 \text{ г/см}^3$ ;  $M_{Na_2SiO_3} = 122 \text{ г/моль}$ ;  
 $\rho_{Al} = 2,71 \text{ г/см}^3$ ;  $M_{Si} = 28 \text{ г/моль}$  [124].

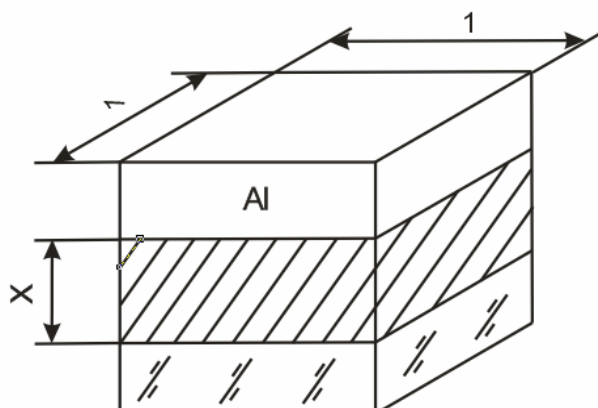


Рисунок 4.8 – Схема для розрахунку товщини алюмінію, що приймає участь в утворенні евтектики

Спочатку знаходимо, який об'єм займає 1 моль силікату:

$$V = \frac{m}{\rho_{Na_2SiO_3}} = \frac{\nu \cdot M_{Na_2SiO_3}}{\rho_{Na_2SiO_3}} = \frac{1 \cdot 122}{1,36} = 89,7 \text{ см}^3. \quad (4.19)$$

Оскільки  $M_{Si} = 28 \text{ г/моль}$ , то у  $89,7 \text{ см}^3$  ( $89,7 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$ ) силікату знаходиться 28 г кремнію. Звідси в  $1 \text{ мм}^3$  силікату:  $28/89,7 \cdot 10^{-3} = 0,312 \cdot 10^{-3} \text{ г}$  кремнію.

Використовуючи знайдене вище значення середньої товщини зазору  $h_z$ , визначимо об'єм силікату у зазорі:

$$V_{Na_2SiO_3} = 1 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3. \quad (4.20)$$

Знайдемо масу кремнію у об'ємі силікату з наступної пропорції:

$$\begin{aligned} 1 \text{ мм}^3 &- 0,312 \cdot 10^{-3} \text{ г}; \\ 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3 &- x \text{ г}. \end{aligned}$$

Звідси маємо:

$$x = m_{Si} = \frac{9,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,312 \cdot 10^{-3}}{1} = 2,96 \cdot 10^{-6} \text{ г.} \quad (4.21)$$

В евтектиці Al-Si міститься 88,3% алюмінію та 11,7% кремнію (ат. %). Обчислимо масу алюмінію в даній евтектиці, враховуючи знайдену масу кремнію, за пропорцією:

$$\begin{aligned} 2,96 \cdot 10^{-6} \text{ г Si} &- 11,7\%; \\ x \text{ г} &- 88,3\%. \end{aligned}$$

Звідси одержимо:

$$x = m_{Al} = \frac{2,96 \cdot 10^{-6} \cdot 88,3}{11,7} = 22,92 \cdot 10^{-6} \text{ г.} \quad (4.22)$$

Враховуючи, що  $\rho_{Al} = 2,71 \text{ г/см}^3$ , з наступної пропорції визначимо об'єм алюмінію, який приймає участь в утворенні евтектики:

$$\begin{aligned} 2,71 \cdot 10^{-3} \text{ г} &- 1 \text{ мм}^3; \\ 22,92 \cdot 10^{-3} \text{ г} &- x \text{ г.} \end{aligned}$$

Звідси одержимо:

$$x = V_{Al} = \frac{22,92 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{2,71 \cdot 10^{-3}} = 8,46 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3. \quad (4.23)$$

Отже, товщина алюмінію, що приймає участь в утворенні евтектики:

$$X = \frac{V}{S} = \frac{8,46 \cdot 10^{-3}}{1} = 8,46 \cdot 10^{-3} \text{ мм} = 8,46 \text{ мкм.} \quad (4.24)$$

Об'єм алюмінію у шорсткій зоні за рахунок стискання деталей, враховуючи, що  $V_{Ra} = 2R_a \cdot 1 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$ , становить:

$$V_{Al1} = V_{Ra} - V_z = 8 \cdot 10^{-3} - 0,274 \cdot 10^{-3} = 7,73 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3.$$

Аналогічні розрахунки було проведено для значень питомих тисків від 0,2 до 0,5 МПа, результати яких наведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Кількість алюмінію, що приймає участь в утворенні евтектики

	0,1 МПа	0,2 МПа	0,3 МПа	0,4 МПа	0,5 МПа
$V_{Al}, \times 10^{-3} \text{ мм}^3$	8,46	7,74	7,43	7,15	6,96
$V_{AlI}, \times 10^{-3} \text{ мм}^3$	7,73	7,64	7,57	7,52	7,48

Для обмеження величини осадки необхідно, щоб евтектика утворювалася тільки в шорсткій зоні. Як показує розрахунок, вже при величині тиску 0,3 МПа об'єму кремнію, що міститься в контакті у складі суміші та реагує з алюмінієм в шорсткій поверхні, достатньо лише для реакції з  $7,43 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$  алюмінію. Отже, повної взаємодії з алюмінієм в шорсткій поверхні не відбудеться, оскільки його об'єм в ній становить  $7,57 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$ .

Таким чином, при підготовці поверхні деталей до з'єднання шабрінням та з урахуванням топологічних особливостей контактування, утворення евтектики лише в об'ємі шорстких поверхонь буде забезпечуватися після нанесення запропонованої суміші на поверхню деталей та наступного складання з питомим тиском менше 0,3 МПа. У подальшому прийняли проводити експерименти при використанні питомого тиску 0,1 МПа. Як показують залежності на рис. 3.4 (див. п. 3.1), при такій величині тиску деформація повинна складати менше 1 %.

#### **4.4 Електрохімічні засоби інтенсифікації процесу дифузійного зварювання**

Порівняно із контактним плавленням у системі Al-Si, що відбувається при температурі 853 К за час 900 с, при використанні запропонованого прошарку отримуємо незначне підвищення

продуктивності процесу зварювання зі зменшенням часу контактного плавлення до 480-520 с. Тому для подальшого збільшення продуктивності процесу потрібно розробити шляхи інтенсифікації контактного плавлення.

Автори робіт [125, 126] вважають, що прискорення процесу контактного плавлення деталей, а, отже, і зменшення загального часу зварювання, можна досягти, пропускаючи постійний електричний струм через деталі, таким чином викликаючи, окрім дифузійних потоків, потоки електропереносу, тобто впливати на кінетику процесу.

За допомогою струму можна не тільки керувати кінетикою процесу, а й товщиною контактного шару. У роботі [127] показано, що додавання натрію до індію в системі (In + 0,1 ат.% Na) - Ві дозволяє збільшити протяжність контактних прошарків.

З огляду на електрохімічну теорію [114], видалення оксиду алюмінію відбувається за рахунок електродного процесу на границі алюмінію з оксидною плівкою, при якому іони алюмінію, відриваючись від поверхні металу, поступово руйнують зв'язок частинок оксидної плівки з металом. Таким чином, електрохімічний процес викликає розрихлення оксидної плівки, відрив її від металу та перехід у шлак.

Згідно теорії електролітичної дисоціації, солі лужних металів у розплавленому стані дисоціюють на катіони  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  та аніони  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$  тощо. Тому в системі метал-оксидна плівка-флюс при температурі паяння протікають складні електрохімічні процеси [114].

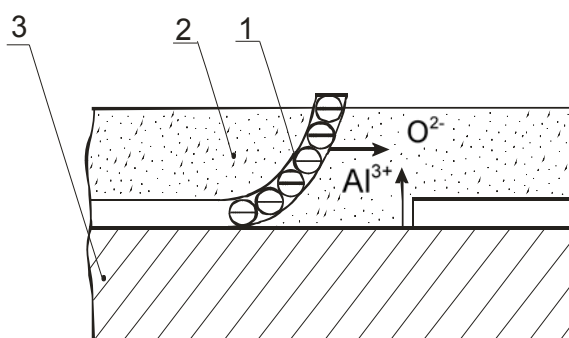
Електропровідність солей залежить від елементів їх структури. Електропровідні тільки ті розплави солей, в яких елементами структури є іони. Якщо такими елементами є молекули, то розплави майже не проводять електричного струму. Іонна будова розплавлених солей підтверджується різким зменшенням їх електропровідності при температурі кристалізації. Електропровідність іонних кристалів пов'язана з наявністю в них неупорядкованих іонів та не зайнятих місць у вузлах



кристалічної решітки, а електропровідність оксидів у флюсах типу скла – з наявністю вільних електронів та електронних «дірок» [111].

Як відомо з електрохімічної теорії, алюміній та його оксидна плівка утворюють гальванічну пару, в якій алюміній виступає анодом, а його оксид – катодом. Флюс при цьому відіграє роль електроліту. Причому додавання фтористого натрію та кріоліту прискорюють видалення плівки [41].

На аноді електричний струм підтримується у результаті переходу алюмінію у флюсі у вигляді іону, а на катоді – у результаті переходу іонів кисню  $O^{2-}$ . Іони алюмінію, відриваючись від поверхні металу, поступово руйнують зв'язок частинок оксидної плівки з металом. Таким чином, електрохімічний процес викликає розривлення оксидної плівки, відрив її від металу та перехід у шлак [111]. У результаті взаємодії іонів алюмінію та кисню у розплаві електроліту (флюсу) утворюється дисперсний оксид алюмінію. Необхідний для протікання даної реакції кисень, поступово надходить з атмосфери через плівку розплаву флюсу, деполяризує катод, тому електрохімічний процес у флюсі протікає неперервно. Схема механізму видалення оксидної плівки з алюмінію в результаті електрохімічних процесів показана на рис. 4.9.

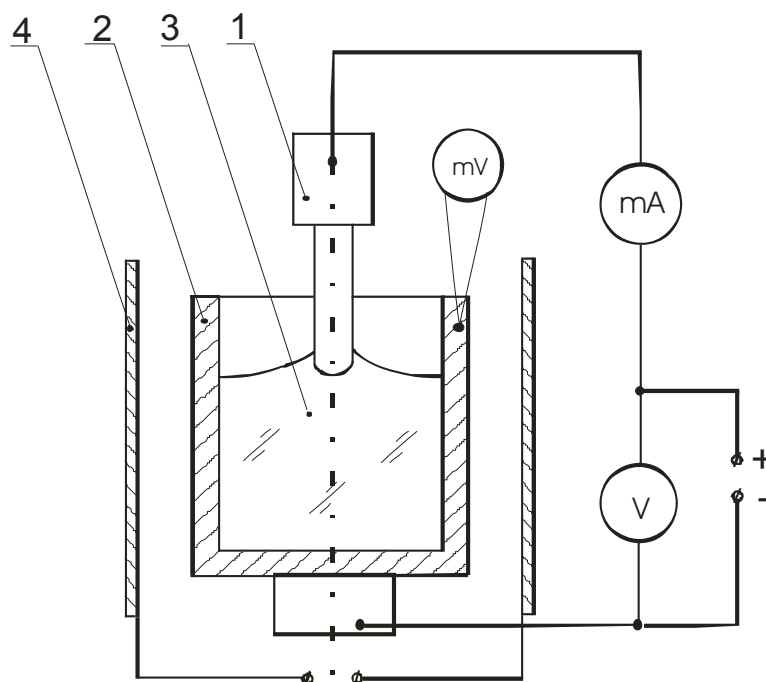


*1 – оксидна плівка; 2 – флюс; 3 – алюміній*

Рисунок 4.9 – Схема механізму видалення оксидної плівки при паянні алюмінію у результаті електрохімічних процесів [111]

Зважаючи на ці дані, виникла необхідність дослідити обрану нами суміш на основі силікату натрію на електропровідність. Дослід

виконувався на базі установки для ДЗВ. Схема проведення досліду представлена на рис. 4.10.



1 – електрод; 2 – стакан; 3 – суміш  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ -HCl-Mg; 4 – нагрівач

Рисунок 4.10 – Схема для дослідження електропровідності суміші

Експериментальним шляхом встановлено збільшення електропровідності суміші при підвищенні температури [128, 129]. Одержана у результаті досліджень залежність струму, що проходить через суміш, від температури, представлена на рис. 4.11.

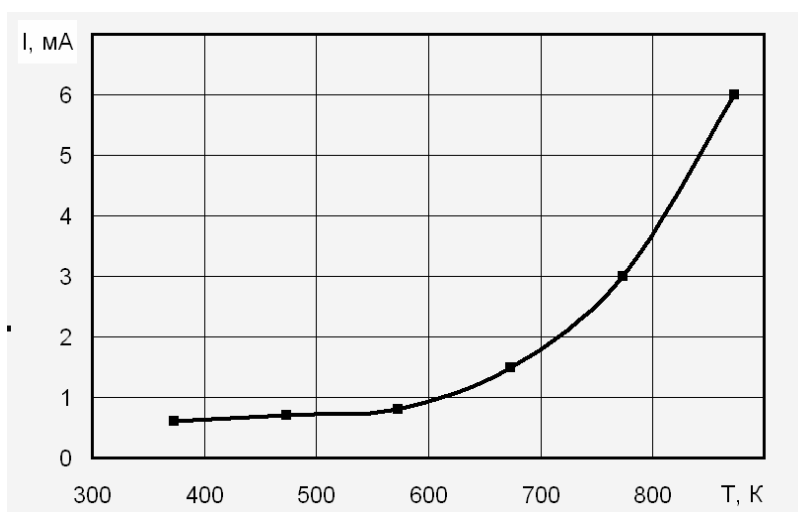


Рисунок 4.11 – Залежність електропровідності суміші  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ -HCl-Mg від температури

При електролізі у провідників кількість перенесених зі струмом речовин пропорційна кількості електрики, що пройшла через речовину у відповідності з законами Фарадея [130, 131]. Згідно першого закону Фарадея маса  $M$  перенесеної зі струмом речовини, що виділася на електроді, дорівнює [130]:

$$M = KQ, \quad (4.25)$$

де  $Q$  – кількість електрики, що пройшла, Кл;

$K$  – електрохімічний еквівалент речовини, кг/Кл.

Другий закон Фарадея, що дає можливість визначати значення  $K$  у виразі (4.25) для різних речовин, встановлює, що відношення кількості електрики, що пройшла через речовину, до кількості (у молях) речовини, що виділилася на електроді, є величина постійна – «число Фарадея» –  $F = 96485$  Кл/моль [130].

При дифузійних процесах повинна виконуватися умова, при якій розміри атомів матеріалів, що зварюються, не повинні відрізнятися більш ніж на 8-10%. Даний ефект описаний у роботі [132], а технологія його практичного виконання у роботі [133].

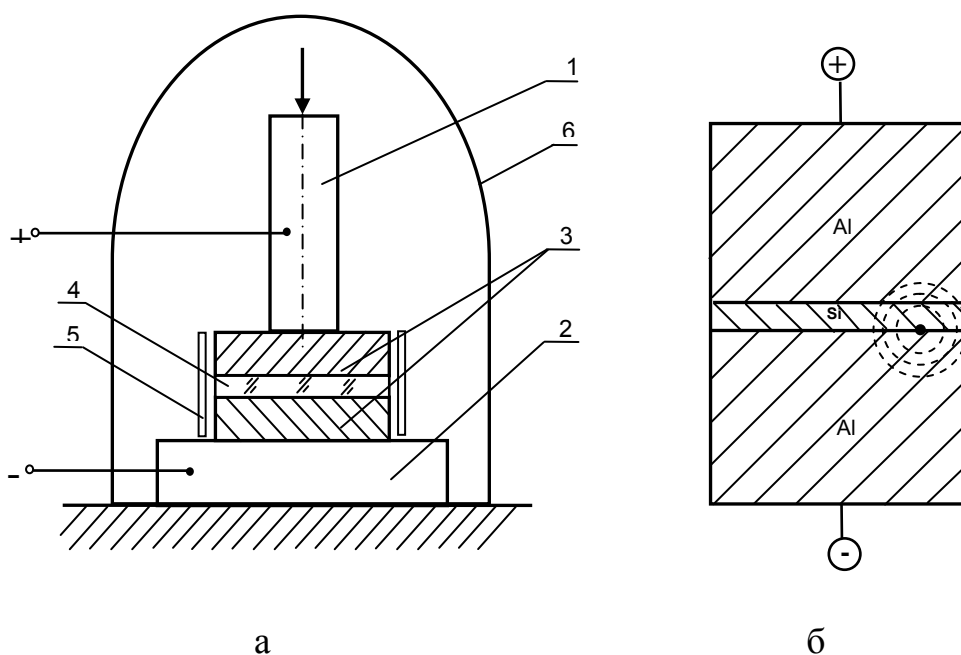
Процес контактного плавлення має більше прискорення, коли додатній потенціал прикладають до матеріалу, що має менший атомний радіус. Під дією електричного струму відбувається електродифузія атомів металу з більшим радіусом [134, 135].

Як вказується в роботі [127], пропускання струму через зону контакту дозволяє впливати на швидкість процесу контактено-реактивного плавлення. Розрахунки, проведені в роботі, показали, що величина електропереносу при порівняно невеликих густинах струму  $j \sim 0,1-0,2$  А/мм<sup>2</sup> є співрозмірною з дифузією при контактному плавленні.

Робота виходу алюмінію  $\chi_{Al} = 4,25$  еВ, робота виходу кремнію  $\chi_{Si} = 4,8$  еВ [136], тому під час контактування металу з напівпровідником n-типу електрони з металу переходять у напівпровідник, утворюючи в його

контактному шарі від'ємний заряд. При цьому бар'єрний шар не утворюється, оскільки контактний шар напівпровідника характеризується підвищеною провідністю в обох напрямках [137].

У зв'язку з вище викладеними міркуваннями було запропоновано наступну схему дифузійного зварювання у вакуумі через евтектичний прошарок із пропусканням постійного електричного струму густиною  $0,2 \text{ А/мм}^2$  (рис. 4.12, а).



1 – пуансон; 2 – зварювальний столик; 3 – деталі, що зварюються;  
4 – проміжний прошарок  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ ; 5 – нагрівач;  
6 – вакуумна камера

Рисунок 4.12– Схема ДЗВ із пропусканням електричного струму (а) та  
схема контактного плавлення (б)

Атомний радіус алюмінію (0,143 нм) більше, ніж атомний радіус кремнію (0,134 нм) [136]. У нашому випадку, якщо додатній потенціал прикласти до верхньої деталі, а від'ємний до нижньої, то кремній, що міститься у прошарку, по відношенню до нижньої деталі знаходитиметься під додатнім потенціалом, і електродифузія атомів алюмінію відбуватиметься на границі між нижньою деталлю та прошарком. При

цьому процес контактного плавлення, що починається у локальних місцях на границі між кремнієвмісним прошарком та алюмінієм, внаслідок високої активності евтектики, що утворюється, її здатності змочувати поверхню металу та диспергувати оксидну плівку, розповсюджується на обидві поверхні алюмінієвих деталей (рис. 4.12, б).

#### 4.5 Технологія дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів

У результаті проведених досліджень запропоновано технологію прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів з пропусканням постійного електричного струму за схемою на рис. 4.12 та представлено результати досліджень зварних з'єднань.

Дослідження процесу зварювання через запропонований прошарок системи  $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$  проводились у вакуумній камері модернізованої установки УВН-2М-1 при глибині розрідження  $10^{-2}\text{-}10^{-3}$  Па, температурі 853 К, питомому тиску 0,1 МПа та пропусканні електричного струму густиною до 0,2 А/мм<sup>2</sup> [138, 139].

Для дослідження кінетики утворення з'єднання використовували зразки з формою контактних поверхонь, що зображена на рис. 4.13.



Рисунок 4.13 – Схема для дослідження кінетики утворення з'єднання

Для забезпечення видалення евтектичного прошарку із зони стику було запропоновано наступну циклограму процесу ДЗВ із прикладенням одиничного імпульсу тиску (рис. 4.14). Найкращі результати було одержано при прикладанні одиничного імпульсу тиску у діапазоні від 0,8 до 1,2 МПа. Така величина вибрана із тих міркувань, що тиск не повинен перевищувати границю текучості алюмінію при температурі зварювання (відомо, що при  $T = 873 \text{ K}$   $\sigma_T = 1,5 \text{ МПа}$  [86]).

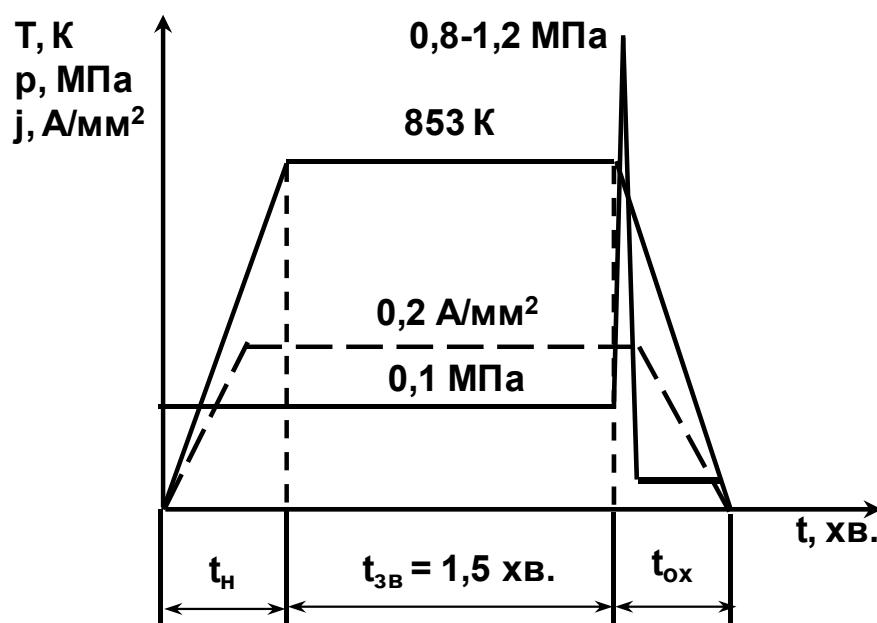


Рисунок 4.14 – Циклограма процесу ДЗВ

Навантаження на зразки створювалось за допомогою механічного приводу типу гвинт-гайка через пружину, що дозволило зафіксувати момент утворення рідкого прошарку за показаннями індикатора годинникового типу. Встановлено, що утворення евтектики відбувається за час 90 с.

Мікроструктура точок 1-6 з'єднання була сфотографована за допомогою електронного мікроскопа JSM-840. Визначено наступну стадійність утворення з'єднання при зварюванні алюмінію через прошарок (рис. 4.15).

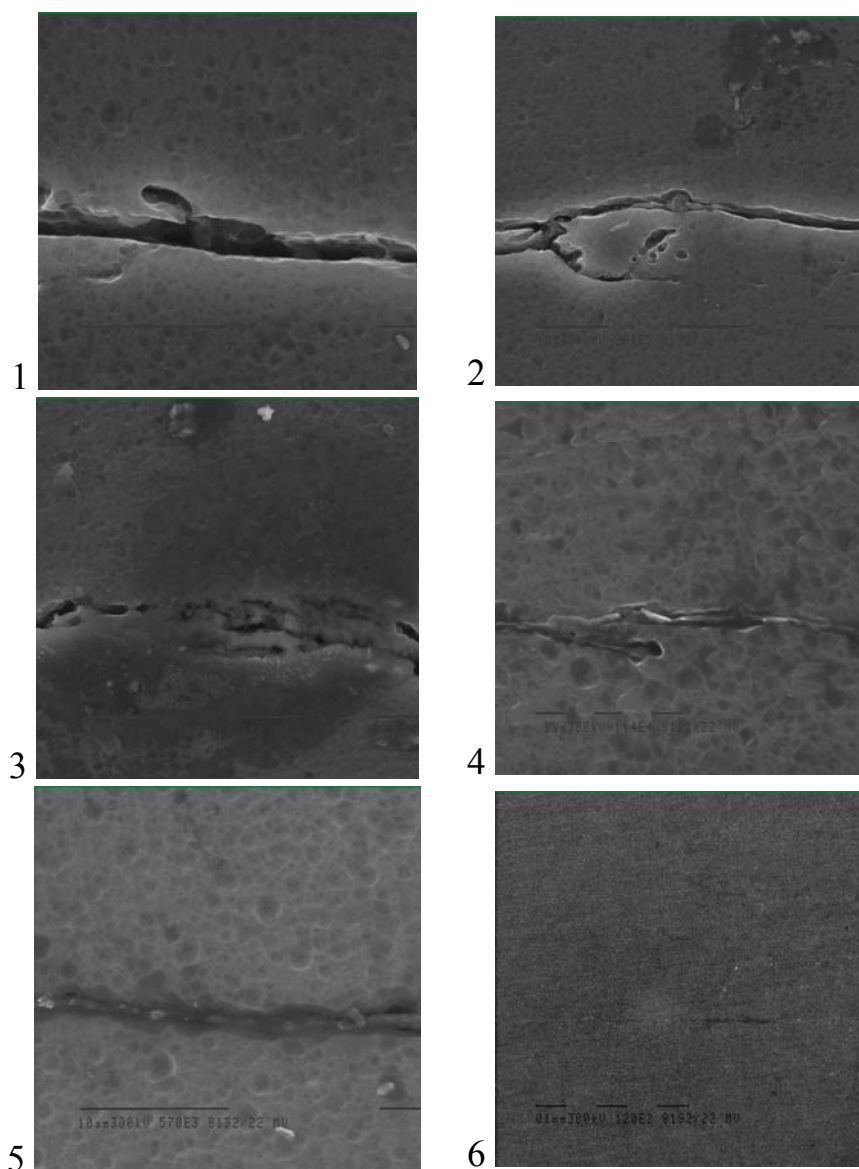


Рисунок 4.15 – Кінетика утворення з'єднання (у 6-ти точках)

На рис. 4.16 представлено мікроструктуру зони зварного з'єднання з АД00, одержаного за запропонованим режимом зварювання. Методом скануючої мікроскопії встановлено, що евтектична суміш, яка утворюється при виділенні вільного кремнію в результаті проходження описаних вище хімічних реакцій, заповнює зазор в стику та забезпечує якісне формування зони з'єднання. При цьому спостерігаються ділянки зрощування кристалів основного металу.

За даними мікрорентгеноспектрального аналізу концентрація елементів безпосередньо у шві (спектр 1 на рис. 4.16) складає 92,83Al - 5,62Si - 1,4 Mg - 0,15Na (мас. %).

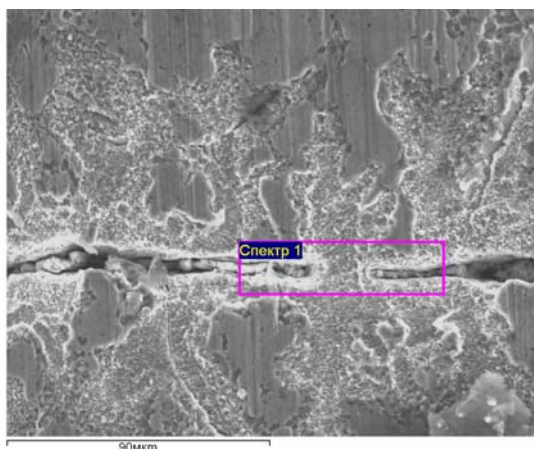


Рисунок 4.16 – Мікроструктура зварного з'єднання з АД00  
(растрова електронна мікроскопія)

На прикладі зварювання сплаву АМг5 результати досліджень показали, що в залежності від термодформаційного циклу можна одержати з'єднання різних типів. В одному випадку шов утворюється в результаті зрощування вершин кристалів та перехідних зон при майже повному видавлюванні рідкої фази з зони стика (рис. 4.17, а); в другому шов як такий відсутній, в місцях відсутності прошарку спостерігаються спільні зерна, які виникли в результаті захоплення випуклих ділянок мікрорельєфу, де утворились ювенільно чисті поверхні після повного видавлювання прошарку із зони стика (рис. 4.17, б).

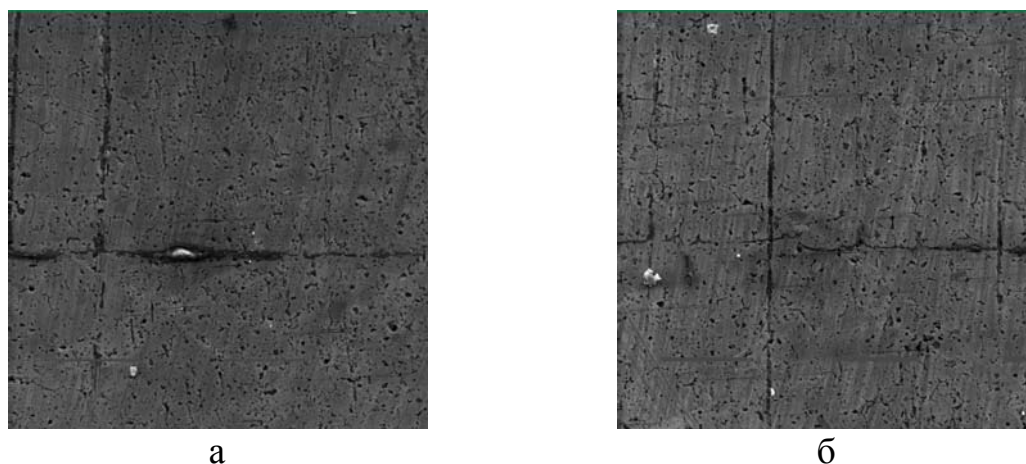


Рисунок 4.17 – Мікроструктура зварних з'єднань з АМг5  
(растрова електронна мікроскопія)



Результати механічних випробувань на зріз одержаних зварних зразків з алюмінію АД00 та сплаву АМг5 та вимірювань величини залишкової деформації  $\epsilon$  виробів представлені у табл. 4.6. Слід відзначити, що прикладення імпульсу питомого тиску наприкінці процесу зварювання дозволило досягти більших значень міцності.

Таблиця 4.6

## Результати механічних випробувань зварних зразків, одержаних ДЗВ

Марка алюмінію	$\tau$ , МПа	$\tau'$ , МПа	$(\tau'/\tau) \cdot 100\%$	$\epsilon$ , %
АД00	62	53-56	85-90	2-3
АМг5	240	215-217	89-90	2-2,5

Результати моделювання у скінченно-елементному комплексі ANSYS з використанням залежностей, визначених у розділі 3, та розрахункової схеми, зображеної на рис. 4.2, показали рівень деформації, близький до експериментальних значень – 3,18 % для алюмінію АД00 (рис. 4.18) та 1,91 % для АМг5 (рис 4.19).

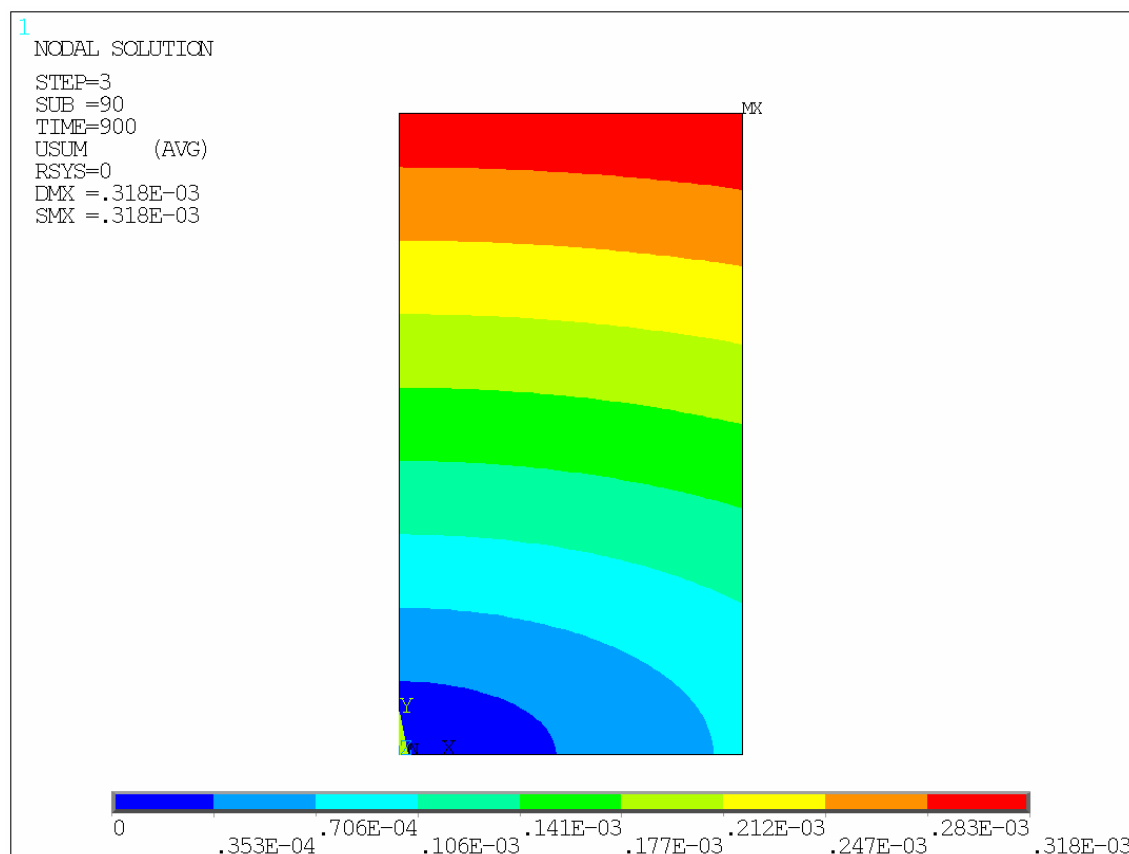


Рисунок 4.20 – Результати розрахунку – сумарне переміщення (АД00)

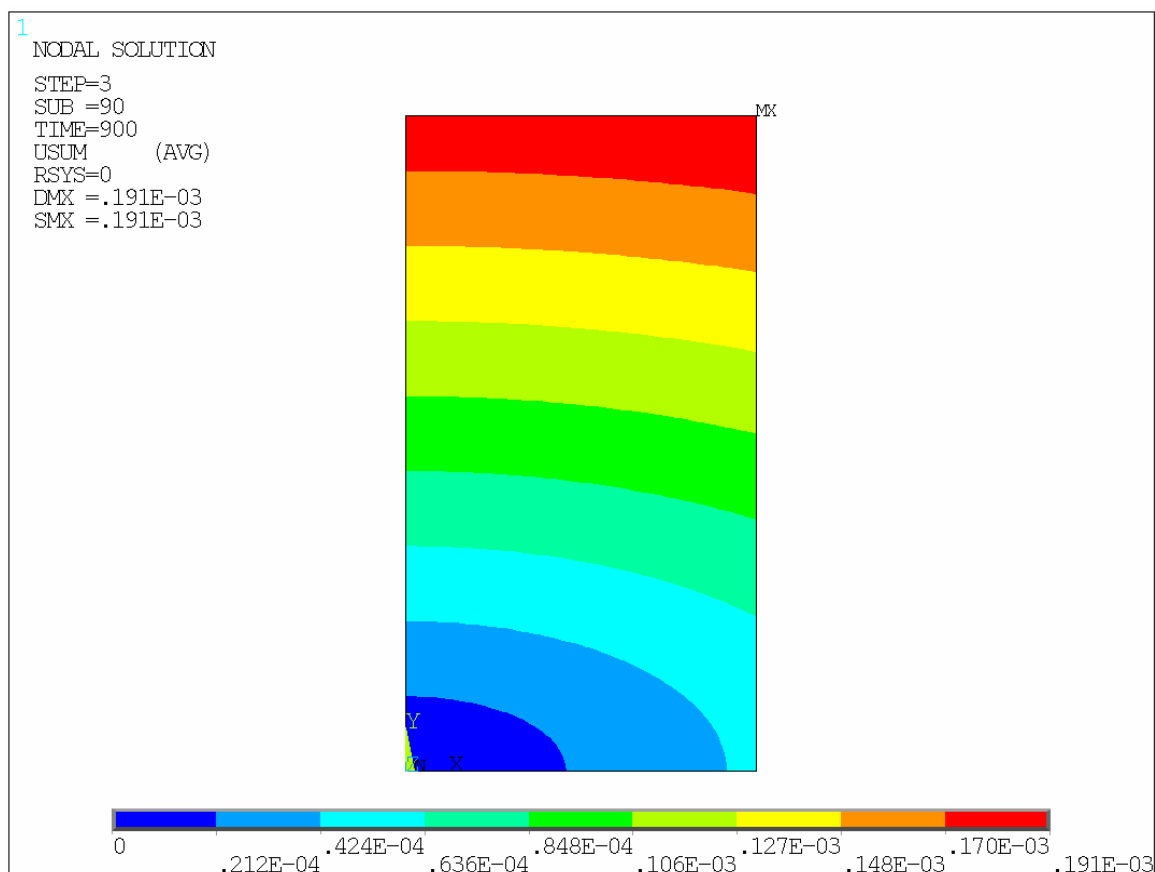


Рисунок 4.21 – Результати розрахунку – сумарне переміщення (АМг5)

На основі проведених досліджень було розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі для виготовлення прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення зі сплаву АМцМ (рис. 4.22) на ПАТ «Чернігівський завод радіоприладів», м. Чернігів.



Рисунок 4.22 – Спеціальний корпусний вузол

Конструкція даних 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 2-3 % (додаток В).

#### 4.6 Висновки

1. Використання прошарків системи  $75,3 \text{ Na}_2\text{SiO}_3 - 22,5 \text{ HCl} - 2,2 \text{ Mg}$  (мас. %) дозволяє отримувати у процесі дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію АД00 та сплаву АМг5 евтектичний прошарок системи Al-Si з подрібненою структурою і за рахунок клейових властивостей суміші спрощувати складання виробів.

2. Модифікація евтектики Al-Si натрієм, що подрібнює структуру евтектики, та утворення зміцнюючої фази  $\text{Mg}_2\text{Si}$  забезпечують високий рівень механічних властивостей зварного з'єднання. Наявність магнію у складі суміші чи магнію у сплаві, що з'єднується, створює можливість безпосереднього відновлення алюмінію з оксидної плівки парами магнію.

3. Підготовка поверхонь деталей до з'єднання шляхом шабріння та наступне нанесення суміші на них і складання дозволяє забезпечити утворення евтектики Al-Si у кількості, що забезпечує мінімальну осадку при питомому тиску 0,1 МПа.

4. Сіль  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  за рахунок збільшення електропровідності при підвищенні температури створює умови для інтенсифікації процесу видалення оксидної плівки шляхом пропускання постійного електричного струму густиною до  $0,2 \text{ A/mm}^2$ .

5. Розроблена технологія дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів через прошарок полягає у складанні деталей та їх фіксації в нагрівачі вакуумної камери, створенні розрідження  $10^{-2}-10^{-3} \text{ Па}$ ,

нагріванні до температури 853 К, прикладенні питомого тиску 0,1 МПа, пропусканні електричного струму густиною 0,2 А/мм<sup>2</sup>, часі зварювання 90 с та наступному охолодженні виробу.

6. Міцність зварних з'єднань на зріз з алюмінію марок АД00 та АМг5, отриманих дифузійним зварюванням у вакуумі, складає 53-56 МПа та 215-217 МПа відповідно, що складає до 90% від міцності основного матеріалу при величині деформації виробу по висоті до 2-3%.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СТИКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ОПОРОМ АЛЮМІНІЮ ТА СПЛАВІВ

#### 5.1. Дослідження процесу тепловиділення у контактній зоні деталей, що зварюються через прошарок

Як було вказано у розділі 1, прецизійне електроконтактне зварювання характеризується величиною залишкової пластичної деформації до 2 % від товщини (або діаметра) деталі. Необхідною умовою, що забезпечує утворення прецизійного з'єднання при електроконтактному зварюванні, є зосередження тепловиділення у приконтактній зоні з'єднання та збільшення опору у контактній зоні деталь-деталь. Саме контактний опір між деталями є ключовим фактором у нагріві деталей при електроконтактному зварюванні, оскільки залежить від стану поверхні та зварювального тиску і у 2-3 рази перевищує опір самих деталей [140].

Завдання одержання прецизійного з'єднання алюмінію та сплавів електроконтактним зварюванням суттєво ускладнюється внаслідок притаманних їм високих термопластичних властивостей, тепло- та електропровідності. Це, у свою чергу, перешкоджає локалізації тепловиділення у вузькій зоні контакту, внаслідок чого вироби мають високий рівень залишкової деформації.

Аналіз літератури, проведений у розділі 1, показав, що ефективним засобом інтенсифікації процесу тепловиділення у контактній зоні деталей і, відповідно, зменшення деформації виробів, при електроконтактному зварюванні алюмінію та сплавів є використання тонких проміжних прошарків зі зварювального матеріалу або матеріалу, близького за

хімічним складом до основного металу, зокрема з алюмінієвої фольги [54, 78].

Розміщення такого прошарку з декількох шарів фольги дозволяє зосередити тепловиділення у зоні з'єднання внаслідок утворення між прошарком та деталями більшої кількості контактних опорів, на яких локалізується виділення теплової енергії значної величини при проходженні електричного струму. Це дозволяє збільшити температуру в контакті деталь-деталь, зменшити час нагріву та рівень залишкових деформацій за рахунок зниження об'єму розплавленого металу та утворення зв'язків між матеріалом проміжного шару і основним металом.

Електроконтактне зварювання основане на використанні джоулевого тепла. Загальна кількість теплоти, що виділяється електричним струмом у провіднику, визначається за законом Джоуля-Ленца, Дж [49, 74, 75, 141-146]:

$$Q = I^2 R t, \quad (5.1)$$

де  $R$  – омичний опір провідника;

$I$  – струм;

$t$  – час.

Теплова потужність електричного ланцюга визначається за формулою, Вт [74, 75, 141]:

$$w = I^2 R. \quad (5.2)$$

Оскільки при електроконтактному зварюванні струм та опір не залишаються постійними, закон Джоуля-Ленца часто виражають у диференціальній формі [74, 75, 141]:

$$Q = \int I^2 R dt. \quad (5.3)$$

Загальний опір зварювального ланцюга при електроконтактному зварюванні складається із опору  $R_d$  ділянок основного металу, що

нагріваються, опору контакту між деталями  $R_k$  та опору контакту між електродом і деталлю  $R_{ед}$  [74, 75, 141, 144]:

$$R = 2R_d + R_k + 2R_{ед}. \quad (5.4)$$

Однак при стиковому зварюванні контактний опір між електродом та деталями відносно низький і практично не впливає на нагрів зони з'єднання [75, 144, 146].

Тоді кількість теплоти, що виділяється під час проходження струму, і теплова потужність визначаються за формулами [141-146]:

$$Q = \int_0^t I^2 (2R_d + R_k) dt, \quad (5.5)$$

$$w = I^2 (2R_d + R_k). \quad (5.6)$$

У процесі зварювання опір основного металу та опір контакту не залишаються постійними.

Власний опір деталей дорівнює [74, 75, 141-146]:

$$2R_d = \frac{2\rho_0 l_0}{S}, \quad (5.7)$$

де  $\rho_0$  – питомий електричний опір металу;

$2l_0$  – установча довжина деталей;

$S$  – площа поперечного перерізу деталей.

Опір металу проходженню струму неперервно зростає з підвищенням температури, оскільки питомий опір залежить від температури. Для алюмінію ця залежність представлена на рис. 5.1.

Контактний електричний опір змінюється у процесі зварювання по-іншому. Поверхня металу у будь-якому випадку має нерівності, і при стисканні металевих деталей дійсний дотик відбувається лише в окремих фізичних точках, розподілення яких по торцевій поверхні має випадковий характер [141-144]. Опір таких одиничних контактів та їх кількість

визначає величину опору  $R_k$ . Причому у результаті різкого зменшення дійсного перерізу металу, через який проходить струм в зоні контакту, відбувається звуження ліній струму та виникнення дуже високих густин струму (рис. 5.2, б).

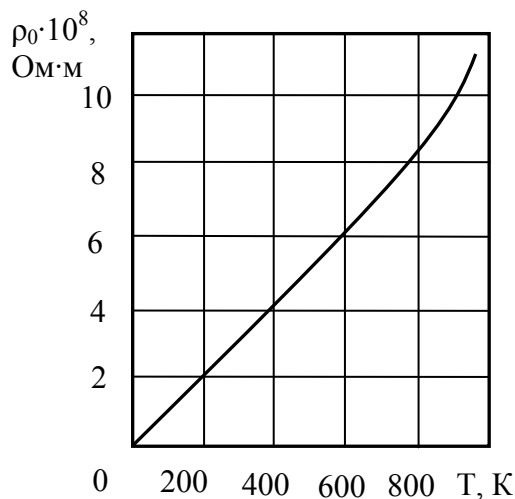


Рисунок 5.1 – Температурна залежність питомого електричного опору алюмінію [147]

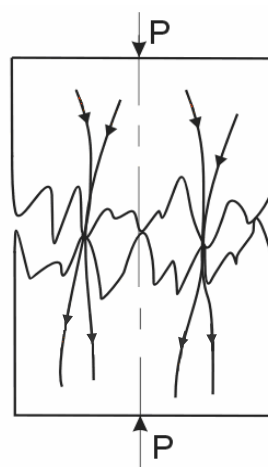


Рисунок 5.2 – Звуження ліній струму через одиничні контакти поверхонь

Підвищення контактного опору викликається, окрім вказаних двох факторів, також наявністю на поверхні металу плівки оксидів та забруднень з малою електропровідністю. Тому поверхні деталей потребують очищення перед процесом зварювання.

Контактний опір суттєво залежить від прикладеного до контакту тиску. З підвищенням тиску опір контакту падає, оскільки при цьому



виступи на поверхні зминаються, площа дійсного контакту збільшується, а висота виступів зменшується [141, 142].

Теоретично встановлена та експериментально підтверджена залежність між тиском, прикладеним до контакту, та його електричним опором [141, 142]:

$$R_k = \frac{r_k}{P^\alpha}, \quad (5.8)$$

де  $P$  – зусилля, що діє в контактї, кг;

$r_k$  – одиничний контактний опір при зусиллі  $P = 1$  кг;

$\alpha$  – експериментальний коефіцієнт, змінюється у межах 0,5-1.

Одиничний опір  $r_k$  залежить від марки металу і стану його поверхні, та, як правило, зменшується для м'яких металів та матеріалів з високою теплопровідністю. Для алюмінієвих сплавів  $r_k$  змінюється в межах 0,001-0,002 Ом, а коефіцієнт  $\alpha$  від 0,75 до 0,85 [142].

Для дослідження процесу тепловиділення у зоні контакту при стиковому ЕКЗ опором алюмінієвого сплаву марки АД31 було проведено розрахунок кількості теплової енергії, що виділяється на контактному опорі та в об'ємі деталей. Вхідні параметри для розрахунку наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Вхідні дані для розрахунку теплової енергії у стику при ЕКСЗ

Діаметр деталі $d$ , мм	Довжина вильоту $l_0$ , мм	Питомий тиск $p$ , МПа	Питомий електроопір $\rho_0$ , Ом·м	Струм $I$ , А
12	15	8	$3,44 \cdot 10^{-8}$	8000

Для зручності розрахунку припустимо, що об'єм металу, в якому здійснюється виділення тепла на контактному опорі, – це об'єм металу в шорсткій поверхні, на якій відбувається звуження ліній струму (рис. 5.2,б).

Як вказується в [122, 148], у шорстких поверхонь при підготовці на токарному верстаті величина  $R_a \approx 2,5$  мкм, а висота нерівностей контактуючих поверхонь становить  $2R_a$ . При цьому повнота заповнення контактуючих поверхонь металом  $C_x$  становить  $(0,2-0,4)$  від вихідної концентрації  $C_0$  (рис. 5.3).

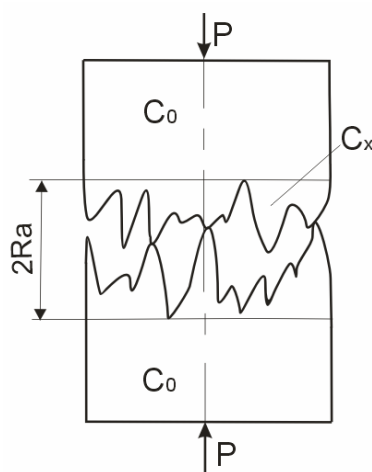


Рисунок 5.3 – Схема контактування шорстких поверхонь [122]

Після змінання шорсткої поверхні розрахункову схему можна представити у вигляді, зображеному на рис. 5.4, де  $V_{ш}$  – об'єм металу шорсткої зони, деформованого до повного змінання мікровиступів.

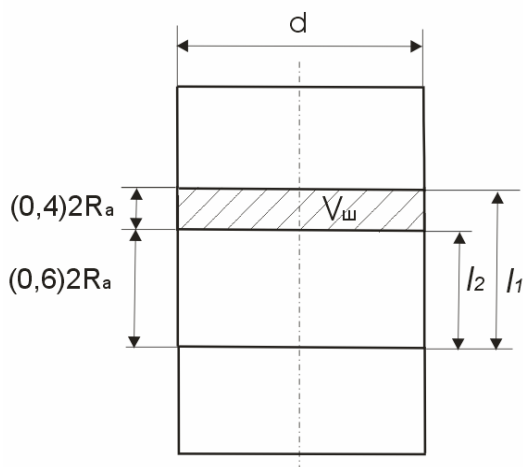


Рисунок 5.4 – Розрахункова схема для визначення об'єму металу в шорсткому контакті

Визначимо об'єм металу в шорсткій поверхні  $V_{ш}$ . Приймемо, що частка об'єму металу в шорсткій поверхні становить  $(0,4) C_0$ . Враховуючи,

що діаметр деталей 12 мм,  $R_a = 2,5$  мкм, а об'єм всього шорсткого шару  $\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 2R_a$ , для випадку зварювання через два шари фольги (всього виникає три контакти) отримаємо:

$$V_{ш} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 2R_a \cdot 0,4 \cdot 3 = \frac{\pi \cdot (12 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 \cdot 3 = 678,58 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3.$$

При цьому величина деформації після змінання шорсткої поверхні становить:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_2}{l_1} = \frac{2R_a - 0,4 \cdot 2R_a}{2R_a} = 0,6.$$

Контактний опір для алюмінієвих механічно очищених токарною обробкою поверхонь, розрахований за виразом (5.8) при зусиллі стиску 90 кг,  $r_k = 0,0015$  Ом та  $\alpha = 0,8$ , складає:

$$R_k = \frac{r_k}{P^\alpha} = \frac{0,0015}{90^{0,8}} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

Як вказано у роботі [142], для розрахунку кількості теплоти на ранній стадії нагріву приконтатне джерело вважають миттєвим і прикладеним у момент початку нагріву  $t = 0$ .

При цьому теплота при критичній швидкості деформування  $v = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  [34] у контакті деталей протягом його змінання виділяється за

$$\text{час } t = \frac{v}{\varepsilon} = \frac{10^{-2}}{0,6} = 0,017 \text{ с}.$$

Безпосередньо кількість теплоти, що виділяється в контакті між деталями за секунду під час стикового зварювання, визначається за формулою [143]:

$$q = m_1 \cdot I^2 R_k, \quad (5.9)$$

де  $m_1$  – коефіцієнт, що враховує зміну контактного опору у процесі нагріву контакту,  $m_1 \approx 0,4$ .

Тоді, враховуючи, що величина зварювального струму 8000 А, а контактних опорів при розміщенні між деталями двох шарів фольги виникає три, одержимо:

$$q = m_1 I^2 3R_k = 0,4 \cdot 8000^2 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 3,07 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

Питому кількість тепла (або теплову потужність) у контакті на одиницю об'єму металу  $V_{ш}$  у шорсткій поверхні визначимо наступним чином:

$$w_k = \frac{q}{V_{ш}} = \frac{3,07 \cdot 10^3}{678,58 \cdot 10^{-12}} = 4,53 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

При стиковому ЕКЗ опором теплота, що виділяється у контакті між торцями деталей по мірі нагрівання з'єднання швидко зменшується [74], тому після досягнення часу  $t > 0,017$  с теплота виділяється тільки у об'ємі деталей на їх власному електричному опорі  $2R_d$ .

Враховуючи, що площа поперечного перерізу деталі  $\frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,012^2}{4} = 113 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , власний опір деталей за формулою (5.7):

$$2R_d = 2 \frac{\rho_0 l_0}{S} = 2 \cdot \frac{3,44 \cdot 10^{-8} \cdot 0,015}{113 \cdot 10^{-6}} = 9,125 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

Кількість теплоти, що виділяється в об'ємі деталей у початковий момент виділення в них тепла при проходженні електричного струму, можна визначити за формулою:

$$Q = I^2 2R_d = 8000^2 \cdot 2 \cdot 9,125 \cdot 10^{-6} = 1168 \text{ Вт}.$$

Об'єм деталей, що зварюються:

$$2V_d = \frac{\pi \cdot (d \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 2l_0 = \frac{\pi \cdot (12 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 2 \cdot 0,015 = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Питома теплова потужність на одиницю об'єму деталей у початковий момент виділення в них тепла:

$$w_{\partial} = \frac{Q}{2V_{\partial}} = \frac{1168}{3,4 \cdot 10^{-6}} = 3,44 \cdot 10^8 \frac{Вт}{м^3}.$$

Аналогічний розрахунок було проведено для випадку стикового ЕКЗ через чотири та шість шарів алюмінієвої фольги. Результати розрахунків наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Результати розрахунку кількості теплової енергії при стиковому ЕКЗ через прошарок

Величина	2 шари	4 шари	6 шарів
$V_{ш}, \times 10^{-12} м^3$	678,58	1130,9	1583,36
$R_{к}, \times 10^{-6} Ом$	120	200	280
$q, \times 10^3 Вт$	3,07	5,12	7,17
$w_{к}, \times 10^{12} Вт/м^3$	4,53		
$Q, Вт$	1168		
$w_{\partial}, \times 10^8 Вт/м^3$	3,44		

Отримані результати було використано для скінченно-елементного моделювання процесу нагріву при стиковому ЕКЗ алюмінію АД31 через два, чотири та шість шарів алюмінієвої фольги у проміжному прошарку.

Розрахункова схема стержня для моделювання тепловиділення у процесі нагріву під час зварювання двох циліндричних стержнів зі сплаву АД31 діаметром 12 мм через проміжний прошарок, що складається з двох шарів алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм, зображена на рис. 5.5. Розрахункові схеми для моделювання процесу нагріву при зварюванні через чотири та шість прошарків аналогічні. Результати скінченно-елементного моделювання представлено на рис. 5.6.

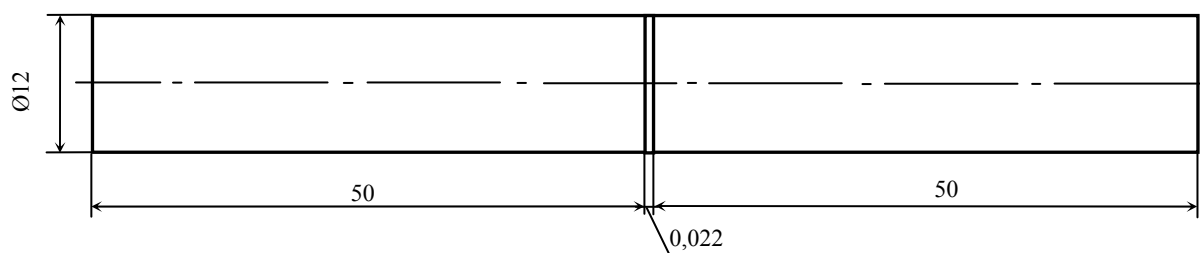
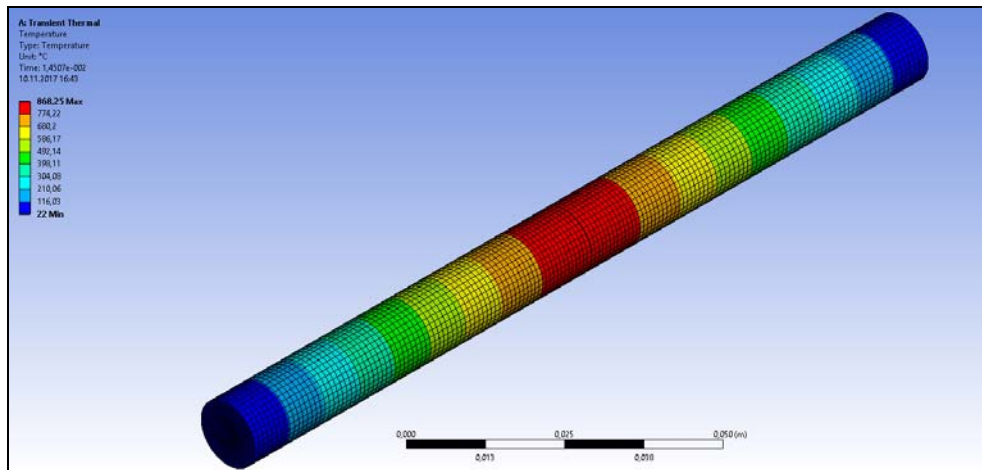
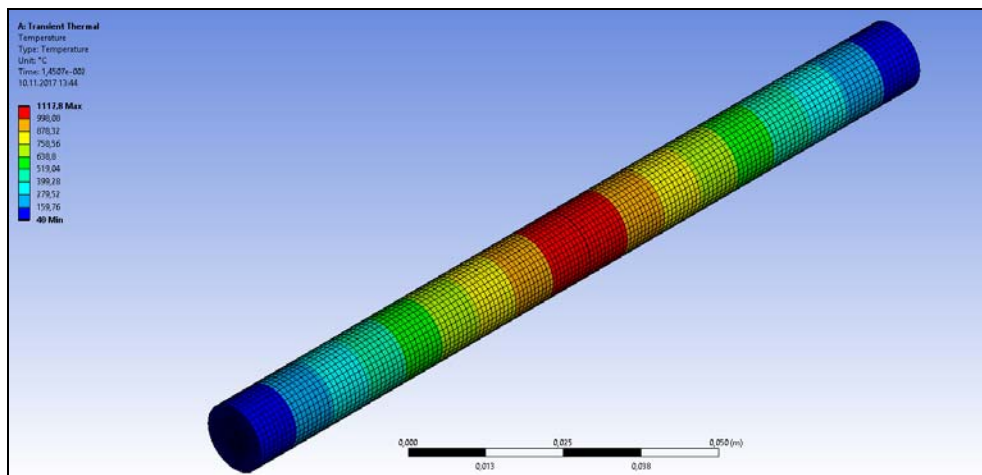


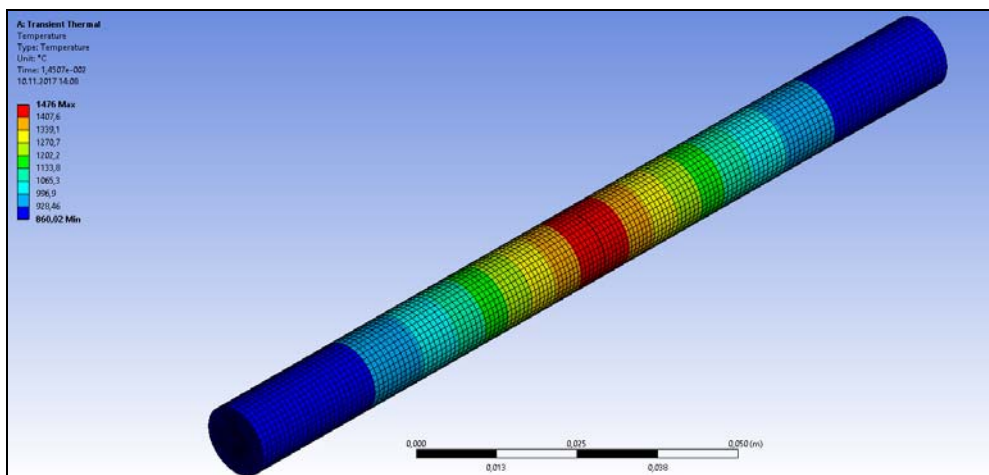
Рисунок 5.5 – Розрахункова схема стержня



а



б



в

*а – 2 прошарки; б – 4 прошарки; в – 6 прошарків*

Рисунок 5.6 – Розподілення температури вздовж стержня в залежності від кількості проміжних прошарків

Як показали результати моделювання, зі збільшенням кількості шарів фольги у початковий момент нагріву відбувається більше тепловиділення деталей у більш вузькій приконтактній зоні порівняно з використанням меншої кількості шарів (табл. 5.3, рис. 5.7).

Таблиця 5.3

Результати моделювання процесу нагріву при стиковому ЕКЗ  
через прошарок

Величина	Кількість шарів у прошарку		
	2 шари	4 шари	6 шарів
Миттєва температура у приконтактній зоні, К	1111,25	1390,8	1749
Ширина зони температурного впливу, мм	26	20	12

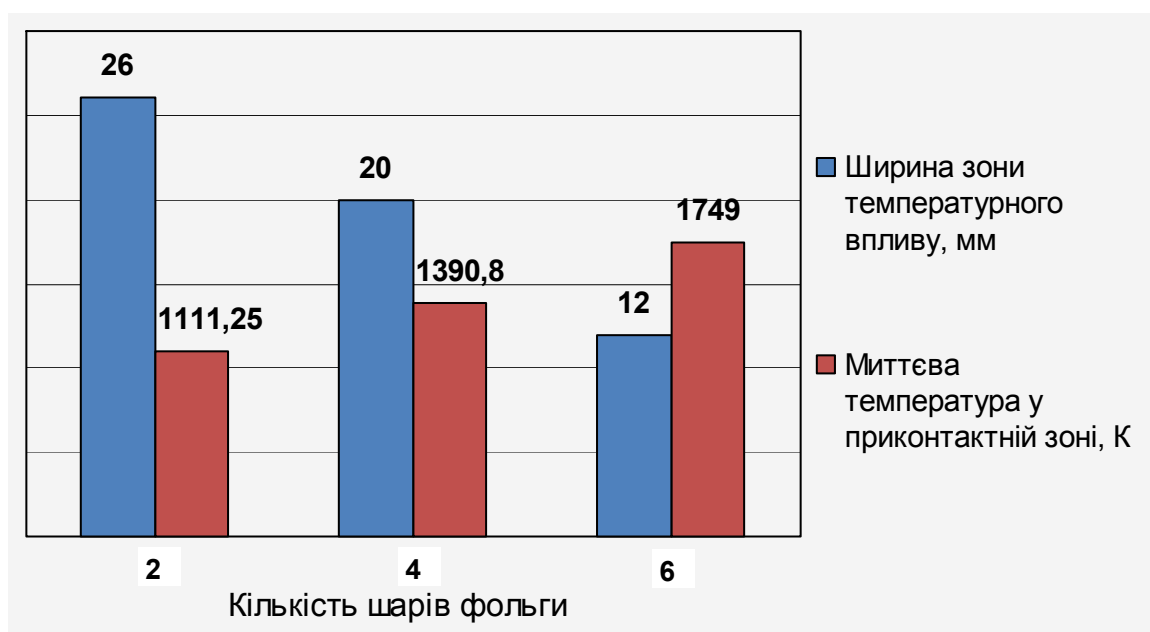


Рисунок 5.7 – Результати моделювання процесу нагріву при ЕКЗ через прошарок

Зростання температури в контактї, очевидно, пов'язується зі збільшенням кількості контактних опорів, що виникають між шарами фольги. Зменшення зони температурного впливу можна пояснити тим, що з підвищенням температури теплопровідність алюмінію зменшується.

## 5.2 Технологія електроконтактного стикового зварювання опором

Для підтвердження ефективності запропонованого засобу інтенсифікації тепловиділення у зоні контакту були проведені експериментальні дослідження зі стикового ЕКЗ опором алюмінію марки АД31 на циліндричних зразках діаметрами 6-12 мм. Мікроструктуру основного матеріалу представлено на рисунку 5.8.



Рисунок 5.8 – Мікроструктура сплаву АД31 у вихідному стані  
(оптична мікроскопія після хімічного травлення,  $\times 250$ )

Процес зварювання проводився на універсальній машині для електроконтактного стикового зварювання МС-802У. Густина струму змінювали від 70 до 300 А/мм<sup>2</sup> шляхом зміни діаметру циліндричних зразків. Питомий тиск змінювали від 2 до 10 МПа, час зварювання від 0,5 до 1,5 с. Як проміжний прошарок використовувалися шари алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм. Кількість шарів фольги змінювали від 1-го до 8-ми.

Експериментальним шляхом було визначено оптимальний режим процесу зварювання при використанні тонких проміжних прошарків з алюмінієвої фольги: густина струму 300 А/мм<sup>2</sup>, тиск зварювання – 8 МПа, час зварювання – 0,5-0,7 с [149-151].



Слід відмітити, що з'єднання алюмінієвих зразків напряду, без використання проміжного прошарку, на вказаних режимах не відбулося.

Після проведення серії експериментів із зразків діаметром 6-12 мм, було встановлено залежність міцності та прецизійності нероз'ємних з'єднань від кількості шарів фольги тонкого проміжного прошарку. На рис. 5.9 у вигляді гістограми зображені узагальнені результати вимірювання деформації зварних зразків та механічних випробувань на розрив залежно від кількості шарів фольги [151].

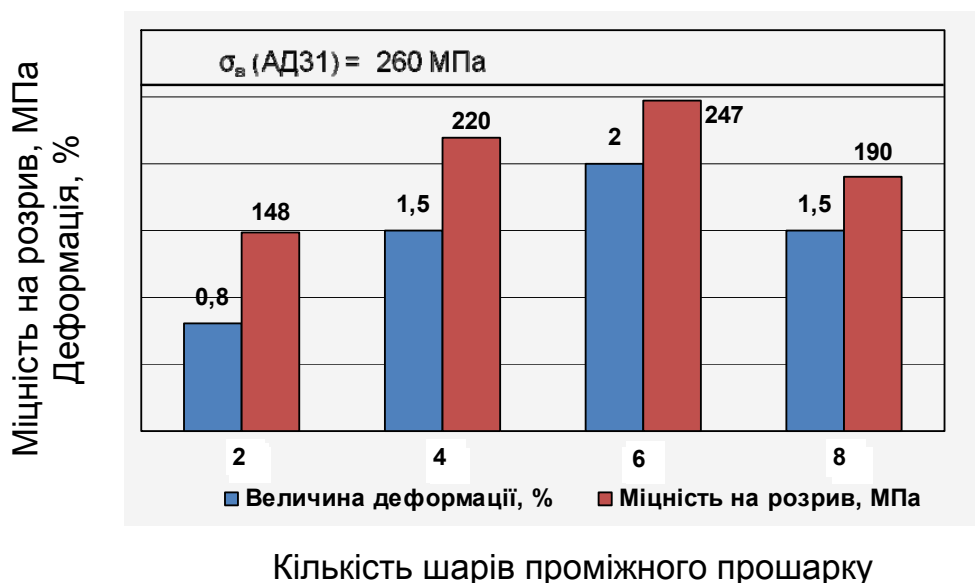


Рисунок 5.9 – Гістограма залежності деформації та міцності зварного зразка з АД31 від кількості шарів проміжного прошарку  
( $j = 300 \text{ А/мм}^2$ ;  $p = 8 \text{ МПа}$ ;  $t = 0,5 \text{ с}$ )

З представленою рисунку видно, що величина деформації для всіх випадків використання фольги знаходиться у допустимих межах прецизійності. При цьому міцність зварних з'єднань при збільшенні кількості шарів тонкого проміжного прошарку спочатку зростає, а потім зменшується. Найбільша міцність зварних з'єднань досягається при використанні 6-ти шарів тонкого проміжного прошарку з алюмінієвої фольги – 247 МПа, що складає 95 % від міцності основного металу [151].

На нашу думку, зменшення міцності при кількості шарів алюмінієвої фольги більше 6-ти пов'язано з тим, що при інших рівних умовах, зростання контактного опору призводить до зменшення сили струму, що проходить через контакт деталь-деталь, згідно закону Ома, та, відповідно, до зменшення кількості теплової енергії, яка локалізується в стику.

Вплив співвідношення контактного опору деталь-деталь та величини сили струму на генерування і локалізацію потрібної кількості теплової енергії було підтверджено і при дослідженні процесів масоперенесення, які були проведені спільно з інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України [152-154].

За допомогою методу авторадіографії, проведено вивчення впливу кількості проміжних прошарків на процеси масоперенесення при електроконтактному точковому зварюванні алюмінієвого сплаву АМц із використанням проміжних шарів з фольги алюмінію АД0 товщиною 11 мкм.

Для аналізу характеристик масоперенесення в зоні контакту на один із зразків, який зварюється, здійснювалося нанесення радіоактивного ізоотопу кобальту  $^{60}\text{Co}$  з максимальною енергією поглинання  $\beta$ -випромінювання 0,067 МеВ та іонізуючою здатністю  $1,48 \text{ см}^2/\text{м}^2$ .

Після зварювання зразки 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 ізоотопу кобальту в алюмінії.

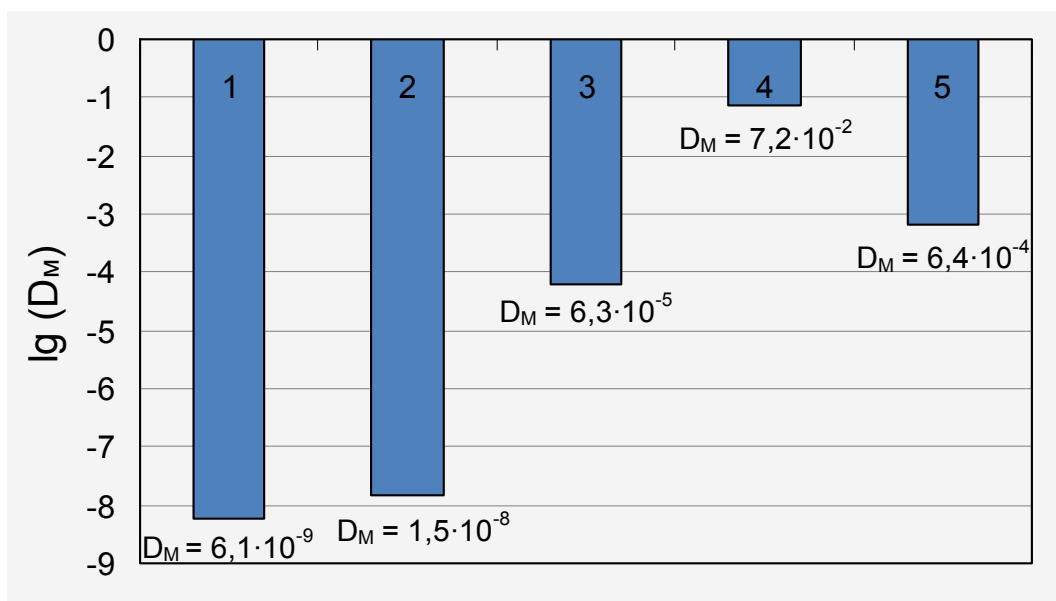
На підставі аналізу концентраційних кривих була проведена оцінка величин коефіцієнтів дифузії  $D_m$  за формулою [155]:

$$D_m = \frac{x^2}{2\tau}, \quad (5.11)$$

де  $x$  – глибина проникнення ізоотопу, см;

$\tau$  – тривалість процесу зварювання, с.

Вплив кількості шарів тонких проміжних прошарків на коефіцієнти дифузії зображено у вигляді гістограми на рисунку 5.10.



1 – коефіцієнт самодифузії Al при температурі 873 K [156];

2 – коефіцієнт дифузії Co в Al при температурі 873 K [156];

3 – коефіцієнт дифузії Co в Al при зварюванні через 2 шари;

4 – коефіцієнт дифузії Co в Al при зварюванні через 4 шари;

5 – коефіцієнт дифузії Co в Al при зварюванні через 6 шари;

Рисунок 5.10 – Гістограма залежності коефіцієнтів дифузії від кількості шарів тонких проміжних прошарків з алюмінію при електроконтактному точковому зварюванні сплаву АМц

Результати досліджень показали, що максимальне значення коефіцієнта дифузії спостерігається при електроконтактному зварюванні через чотири шари алюмінієвої фольги, що свідчить про найбільш ефективне проходження дифузійних процесів у зоні з'єднання. Коефіцієнт масоперенесення при зварюванні через оптимальну кількість шарів фольги на 2-3 порядки вище, ніж при використанні іншої кількості шарів. Слід відзначити, що одержані значення коефіцієнтів приблизно на 4-6 порядків є вищими порівняно із коефіцієнтом самодифузії алюмінію. Результат такого пришвидшеного масоперенесення можна пояснити протіканням при

зварюванні явища аномального масоперенесення в металах та сплавах, яке спостерігається при імпульсних впливах [157, 158].

Таким чином, вибір кількості шарів (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.

Дослідження мікроструктури зварних з'єднань підтвердили результати механічних випробувань. На рис. 5.11-5.13 зображено знімки мікроструктури зварних з'єднань, одержаних на оптимальному режимі.



Рисунок 5.11 – Мікроструктура з'єднання сплаву АДЗ1, отриманого на оптимальному режимі через 2 шари алюмінієвої фольги (оптична мікроскопія після хімічного травлення,  $\times 250$ )



Рисунок 5.12 – Мікроструктура з'єднання сплаву АДЗ1, отриманого на оптимальному режимі через 4 шари алюмінієвої фольги (оптична мікроскопія після хімічного травлення,  $\times 250$ )

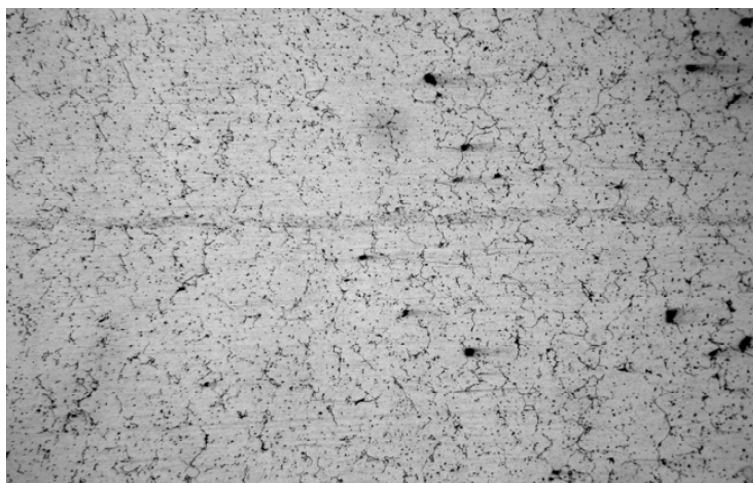


Рисунок 5.13 – Мікроструктура з'єднання сплаву АД31, отриманого на оптимальному режимі через 6 шарів алюмінієвої фольги (оптична мікроскопія після хімічного травлення,  $\times 250$ )

Як видно з представлених результатів, суцільна зона взаємного розплавлення утворюється при використанні 6-ти шарів тонкого проміжного прошарку з алюмінієвої фольги. При використанні 2-х та 4-х шарів зона взаємного розплавлення містить непровари, що свідчить про недостатній рівень локалізації теплової енергії в стику при зварюванні на вказаних режимах. Крім цього, необхідно відмітити, що структура сплаву в зоні термічного впливу для випадку зварювання через 6 шарів практично не відрізняється від мікроструктури сплаву АД31 у вихідному стані (рис. 5.8), що також свідчить про суттєвий рівень локалізації енергії в стику.

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що вибір оптимальної кількості шарів у кожному конкретному випадку залежить насамперед від густини струму та, відповідно, від кількості теплової енергії, яка генерується на контактних опорах прошарків.

Зовнішній вигляд зварного зразка, одержаного на оптимальному режимі через 6 шарів алюмінієвої фольги, представлено на рис. 5.14.



Рисунок 5.14 – Зовнішній вигляд зварного зразка з АДЗ1, одержаного на оптимальному режимі через 6 шарів алюмінієвої фольги

Після зварювання було проведено вимірювання мікротвердості зварного з'єднання зі сплаву АДЗ1, отриманого на оптимальних режимах через 6 шарів алюмінієвої фольги (рис. 5.15). Вимірювання проводилися на мікротвердомірі М400 методом Віккерса при навантаженні 0,1 Н на площу поверхні пірамідального відбитка. За одержаними результатами побудовано гістограму (рис. 5.16).

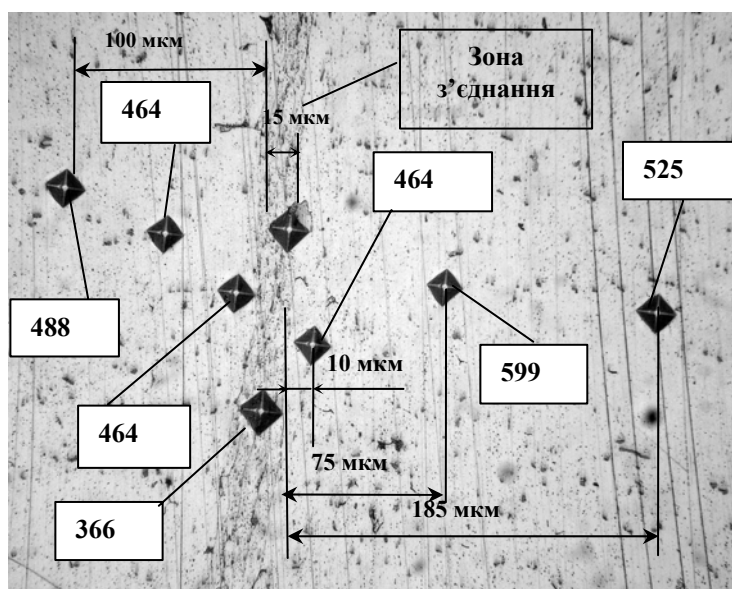


Рисунок 5.15 – Мікроструктура та мікротвердість (МПа) зварного з'єднання зі сплаву АДЗ1 (через 6 шарів фольги),  $\times 500$

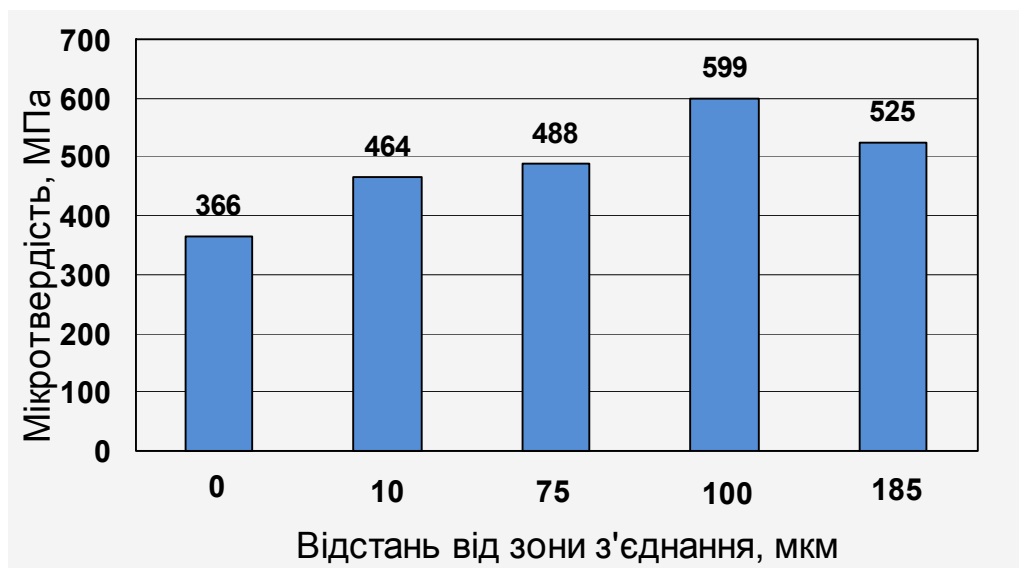


Рисунок 5.16 – Значення мікротвердості основного металу та зварного з'єднання

Як видно з представлених рисунків, мікротвердість зони контакту в середньому на 25-30 % менше, ніж мікротвердість основного матеріалу. Це свідчить про те, що метал зварного шва більш пластичний, ніж оточуючий його метал. Оцінюючи працездатність отриманих з'єднань, можна встановити, що більш пластичний в порівнянні з основним металом прошарок у з'єднанні не є причиною її зниження, оскільки, як вказується у [121], при невеликій товщині більш міцний оточуючий основний метал утруднює розвиток пластичних деформацій і втягується в роботу по утворенню шийки при розтягу зразка.

### 5.3 Висновки

1. Розміщення тонких проміжних прошарків з алюмінієвої фольги при електроконтактному стиковому зварюванні опором алюмінію дозволяє локалізувати виділення теплової енергії в стику.

2. Встановлено, що рівень локалізації теплової енергії в стику залежить від співвідношення контактного опору деталей-деталь (кількості проміжних шарів) та щільності зварювального струму. Показано, що при

електроконтактному зварюванні алюмінію через оптимальну кількість тонких проміжних прошарків, коефіцієнт масоперенесення на 2-3 порядки вище, ніж при зварюванні з іншою кількістю шарів.

3. Розроблена технологія електроконтактного стикового зварювання опором алюмінієвого сплаву АД31 за наступним оптимальним режимом: густина струму  $300 \text{ А/мм}^2$ , час зварювання 0,5-0,7 с, тиск зварювання 8 МПа, кількість проміжних шарів алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм – 6 шарів.

4. Міцність на розрив зварних з'єднань зі сплаву АД31 становить 95 % від міцності основного металу з величиною деформації не більше 2 % від початкового діаметру деталі.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення та нове вирішення наукового завдання, що виявляються у розробці технологій прецизійного нероз'ємного з'єднання тиском алюмінію та його сплавів з високими показниками міцності.

1. Досліджено термодформаційну кінетику, одержано рівняння повзучості для алюмінію АД00 та сплаву АМг5 та визначено температурну залежність коефіцієнта Пуассона алюмінію АД00 в інтервалі температур 293-873 К. Отримані дані дозволяють здійснювати прогнозування величини деформації виробу з використанням скінченно-елементних програмних комплексів залежно від геометричних характеристик виробу, величини температури, зусиль при зварюванні та тривалості їх дії.

2. Внесення у контакт між деталями суміші складу 75,3  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  - 22,5  $\text{HCl}$ -2,2  $\text{Mg}$  (мас. %) при дифузійному зварюванні у вакуумі алюмінію АД00 та сплаву АМг5 дозволяє отримувати з'єднання за рахунок утворення евтектичного сплаву системи  $\text{Al-Si}$ . Модифікація евтектики натрієм, що подрібнює структуру евтектики, та утворення зміцнюючої фази  $\text{Mg}_2\text{Si}$  забезпечують високий рівень механічних властивостей зварного з'єднання.

3. Ефективним засобом інтенсифікації процесу дифузійного зварювання у вакуумі є пропускання через деталі, що зварюються, постійного електричного струму густиною  $0,2 \text{ A/mm}^2$ , що дозволяє скоротити час утворення з'єднання до 90 с.

4. Розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів через прошарок, яка полягає у складанні деталей та їх фіксації в нагрівачі вакуумної камери, створенні розрідження  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  Па, нагріванні до температури 853 К, прикладенні питомого тиску 0,1 МПа, пропусканні електричного струму густиною  $0,2 \text{ A/mm}^2$ , часі зварювання 90 с та охолодженні виробу.

5. Міцність зварних з'єднань на зріз з алюмінію марок АД00 та АМг5, отриманих дифузійним зварюванням у вакуумі, складає 53-56 МПа та 215-217 МПа відповідно, що складає до 90% від міцності основного матеріалу при деформації виробу до 2-3% від початкової висоти деталей.

6. Встановлено ефективність використання тонких проміжних багатошарових прошарків з алюмінієвої фольги для отримання прецизійних з'єднань при електроконтактному стиковому зварюванні опором алюмінію та його сплавів. Розміщення тонкого проміжного багатошарового прошарку дозволяє зосередити тепловиділення у зоні з'єднання внаслідок утворення між шарами фольги та деталями більшої кількості контактних опорів, на яких локалізується виділення теплової енергії значної величини при проходженні електричного струму.

7. Розроблено технологію електроконтактного стикового зварювання опором алюмінієвого сплаву АД31. Визначено оптимальний режим зварювання: густина струму  $300 \text{ А/мм}^2$ , час зварювання 0,5-0,7 с, тиск зварювання 8 МПа, кількість проміжних шарів алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм – 6 шарів. Показано, що міцність на розрив зварних з'єднань зі сплаву АД31 становить 95 % від міцності основного металу з величиною деформації не більше 2 % від початкового діаметру деталі.

8. На основі комплексу проведених досліджень розроблено технологію прецизійного зварювання тиском алюмінію та його сплавів стосовно виготовлення прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення.

## ПОСИЛАННЯ

- [1] A. Norlin, «A century of aluminium – a product of the future», *Svetsaren. Focus Aluminium. Sweden, Göteborg: ESAB AB*, Vol. 54, no. 2, pp. 31-33, 2000.
- [2] R. Rajan, P. Kah, B. Mvola, and J. Martikainen, «Trends in aluminium alloy development and their joining methods», *Rev. Adv. Mater. Sci*, no. 44, pp. 383-397, 2016.
- [3] T. Anderson, «The advancement of aluminium within the welding fabrication industry and its many product design applications», *Svetsaren. Focus Aluminium. Sweden, Göteborg: ESAB AB*, Vol. 54, no. 2, pp. 3-5, 2000.
- [4] 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. Чернігів: ЧДТУ, № 12, С. 43-45, 2010.*
- [5] Ю. В. Борисоглебский, Н. М. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис, и Г. А. Сиразутдинов, *Металлургия алюминия. Учебное пособие.* Новосибирск: Наука, 1999.
- [6] В. А. Рогов, В. В. Соловьев, В. В. Копылов, *Новые материалы в машиностроении: учебное пособие.* Москва: РУДН, 2008.
- [7] Гелин В. Д. *Металлические материалы: Справочник.* Минск: Высшая школа, 1987.
- [8] М. И. Гуреева, и О. Е. Грушко, «Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях транспортных средств», *Машиностроение и инженерное образование*, 2009. С. 27-41. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://viam.ru/public/files/2008/2008-205182.pdf>.
- [9] А. К. Горлов, Е. П. Рогачев, С. Н. Лашко, и А. В. Келеберда, *Основы технологии сварки в аэрокосмической технике: учебное пособие.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Ч. 2, 2008.

- [10] Н. Х. Андреев, А. И. Малахов, и Л. С. Фуфаев, *Новые материалы в технике: учеб. пособие для вузов*. Москва: Высшая школа, 1968.
- [11] И. Н. Фридляндер, «Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе», *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 7, 2002. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://viam.ru/public/files/2002/2002-203509.pdf>.
- [12] І. О. Мікульонок, *Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]*. Київ: НТУУ «КПІ», 2012.
- [13] О. Е. Грушко, «Алюминиевые сплавы для радиаторов», *Все материалы. Энциклопедический справочник*, № 2, 2007. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://viam.ru/public/files/2006/2006-204647.pdf>.
- [14] А. Р. Луц, А. А. Суслина, *Алюминий и его сплавы: Учебное пособие*. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013.
- [15] В. В. Бирюк, А. П. Толстоногов, и И. В. Коломин, *Системы охлаждения двигателей летательных аппаратов. Электронное учебное пособие*. Минобр. науки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). Электрон. текстовые и граф. дан. (1.8 Мбайт). Самара, 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
- [16] K. S. Ramesh and P. S. Dusan, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. 2003, 976 p. ISBN: 978-0-471-32171-2.
- [17] А. П. Солодов, «Тепломассообмен в энергетических установках» [Электронный ресурс]. Доступно: [http://tw.t.mpei.ac.ru/solodov/hmt-ebook\\_2009/](http://tw.t.mpei.ac.ru/solodov/hmt-ebook_2009/).
- [18] А. Сорокин, «Системы водного охлаждения групп компьютеров и сервисных центров», 2012. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.electrosad.ru/Ohlajd/water2.htm>.
- [19] Л. Г. Петрова, М. А. Потапов, и О. В. Чудина, *Электротехнические материалы: Учебное пособие*. Москва: МАДИ (ГТУ), 2008.

- [20] А. М. Семчинов, *Токопроводы промышленных предприятий, 3-е изд., перераб. и доп.* Ленинград: Энергоиздат, 1982.
- [21] О. Г. Мартыненко и др., *Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ.* Москва: Энергоатомиздат, 1987.
- [22] А. М. Архаров и др. *Криогенные системы. Том 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем.* Москва: Машиностроение, 1999.
- [23] G. Venkatarathnam, S. Sarangi, «Matrix heat exchangers and their application in cryogenic systems». *Cryogenics*, no. 30(11), pp. 907-918, 1990.
- [24] «Микроканальные теплообменники Danfoss», *Холодильная техника*, № 8, С. 37-38, 2011. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.holodteh.ru/UserFiles/File/Xt-8-11/37-38.pdf>.
- [25] М. Фримантл, *Химия в действии. В 2-х ч. Ч. 2: Пер. с англ.* Москва: Мир, 1998.
- [26] B. Sunden, «High Temperature Heat Exchangers (HTHE)» on *Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, Vol. 29, 2005, pp. 226-238.*
- [27] Н. В. Барановский, Л. М. Коваленко, и А. Р. Ястребенецкий, *Пластинчатые и спиральные теплообменники.* Москва: Машиностроение, 1973.
- [28] D. Fortuna, S. Rangaswamy, «Innovations for the manufacture of industrial heat exchangers», *Oerlicon Metco*, 2014.
- [29] «Алюминий – материал будущего для теплообменников газовых конденсационных котлов средней и большой мощности», *Grand Calor*, 2012. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://grandcalor.com.ua/tehnologii/aluminiy-material-buduschego/>.
- [30] D. Westphalen, K. W. Roth, and J. Brodrick, «Microchannel Heat Exchangers», *ASHRAE Journal*, pp. 107-108, 2003.

- [31] В. В. Шишов, М. Ю. Клоков, и С. И. Веселков, «Алюминиевые теплообменники – микроканальная технология», *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*, № 2, 2007.
- [32] А. В. Бараненко, Ю. А. Лаптев, и Д. М. Ховалыг, «Миниканальные теплообменники в холодильной технике», *Научный журнал НИУ ИТМО, Серия «Холодильная техника и кондиционирование»*, № 3, С. 1-8, 2014.
- [33] А. В. Чичиндаев, *Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Часть 1. Теоретические основы: Учебное пособие*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
- [34] М. Д. Банов, В. В. Масаков, и Н. П. Плюснина, *Специальные способы сварки и резки: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования*. Москва: Академия, 2009.
- [35] Рабкин Д. М., Лозовская А. В., и Склабинская И. Е., Отв. ред. В. Н. Замков, *Металловедение сварки алюминия и его сплавов*. Киев: Наук. Думка, 1992.
- [36] М. В. Ханпетов, *Сварка и резка металлов, 3-е изд., перераб. и доп.* Москва: Стройиздат, 1987.
- [37] Б. Н. Арзамасов, В. А. Бростем, Н. А. Буше и др., *Конструкционные материалы: Справочник*. Москва: Машиностроение, 1990.
- [38] Д. Л. Глизманенко, *Сварка и резка металлов, 3-е изд., перераб. и доп.* Москва: Высшая школа, 1985.
- [39] Под ред. Э. Л. Макарова, *Сварка и свариваемые материалы: ВЗ-х т. Т. 1. Свариваемость материалов. Справ. Изд.* Москва: Металлургия, 1991.
- [40] Под ред. А. И. Акулова, *Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. Т.2*, Москва: Машиностроение, 1978.
- [41] А. М. Никитинский, *Пайка алюминия и его сплавов*. Москва: Машиностроение, 1983.

- [42] С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко, *Пайка металлов, 4-е изд., перераб. и доп.* Москва: Машиностроение, 1988.
- [43] В. В. Квасницький, *Спеціальні способи зварювання: Навчальний посібник.* Миколаїв: УДМТУ, 2003.
- [44] Г. Д. Никифоров, *Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов.* Москва: Машиностроение, 1972, 264 с.
- [45] В. А. Саликов, М. Н. Шушпанов, В. В. Пешков, и А. Б. Коломенский. *Специальные методы сварки и пайки: учеб. пособие.* Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000, 214 с.
- [46] Г. П. Болотов, І. С. Бондаренко, «Прецизійне дифузійне паяння алюмінієвих сплавів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету: зб.*, Чернігів: ЧДТУ, № 2(65), С. 98-102, 2013.
- [47] Н. П. Литвиненко, В. Ф. Шиханов, Способ пайки алюминия и его сплавов. *Патент RU 2 285 593 C1 В 23 К 1/19, В 23 К 35/02, В 23 К 103/10, 20.10.2006.*
- [48] P. Wilson, «Eutectic diffusion brazing process for joining aluminum laminae with macro- and micro-scale features». PhD thesis, University of Texas, Arlington, 2013.
- [49] А. С. Гельман, *Основы сварки давлением.* М.: Машиностроение, 1970.
- [50] С. М. Гуревич, *Справочник по сварке цветных металлов (2-е изд., перераб. и доп.).* Киев: Наукова думка, 1990.
- [51] A. A. Shirzadi, «Diffusion bonding aluminium alloys and composites: new approaches and modeling». PhD thesis, King's College, Cambridge, 1997.
- [52] T. Dang, Th. Nguen, Tr. Nguyen, «An Experimentatl Study on Heat Transfer Behaviors of A Welded – Aluminum Minichannel Heat Exchanger», *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, Vol. 5, Issue 2, 2015, pp. 39-35.
- [53] Н. В. Абабков и М. В. Пимонов, *Технология и оборудование контактной сварки: учеб. пособие для студентов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства».*

[Электронный ресурс]. Кемерово: КузГТУ, 2011.–1 электрон. опт. диск (CD–ROM); зв.; цв.; 12 см.– Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 256 Мб; Windows XP; (CD–ROM–дисковод); мышь.– Загл. с экрана.

- [54] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, І. В. Завальна, та Є. В. Половецький, «Прецизійне електроконтактне точкове зварювання металевих матеріалів», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 2, С. 104-111, 2014.
- [55] Под ред. Н. Ф. Казакова, *Диффузионная сварка материалов: Справочник*. Москва: Машиностроение, 1981.
- [56] А. В. Люшинский, *Диффузионная сварка разнородных материалов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений*. Москва: Академия, 2006.
- [57] В. А. Бачин, *Теория, технология и оборудование диффузионной сварки*. Москва: Машиностроение, 1991.
- [58] Ю. В. Фальченко, А. Н. Муравейник, Г. К. Харченко, В. Е. Федорчук, и Г. Н. Гордань, «Сварка давлением микродисперсного композиционного материала  $AMg5 + 27\% Al_2O_3$  с применением быстрозакристаллизованной прослойки эвтектического состава  $Al + 33\% Cu$ », *Автоматическая сварка*, № 2, 2010, С. 10-14.
- [59] E. Akca and A. Gursel, «The importance of interlayers in diffusion welding», *Periodicals of engineering and natural sciences*. Vol. 3, no. 2, 2010, pp. 12-15. [Online]. Available: <http://pen.ius.edu.ba>.
- [60] Г. К. Харченко, А. Я. Ищенко, Ю. В. Фальченко, А. Н. Муравейник, и Г. Н. Гордань, «Сварка давлением композита  $AMg5 + 23\% SiC$ », *Автоматическая сварка*, № 6, 2007, С. 27-30.
- [61] Э. С. Каракозов, *Сварка металлов под давлением*. Москва: Машиностроение, 1986.



- [62] А. Л. Тернавский, «Диффузионная сварка с принудительным формированием (аналитический обзор)», *Сварочное производство*, № 9 (647), 1988, С. 1-4.
- [63] D. S. Gertsriken et al., «Determining the duration of mass transfer and the temperature of metal subjected to pulsed deformation», *Physics of Metals and Metallography*, vol. 99, no. 2, pp. 187-193, 2005.
- [64] Р. А. Мусин, В. Н. Анциферов, и В. Ф. Квасницкий, *Диффузионная сварка жаропрочных сплавов*. Москва: Металлургия, 1979.
- [65] J. R. Terrill, «The R-260 alloy bonding process for joining Aluminium», *Welding Journal*. American Welding Society, Vol. 4, № 9, 1962, pp. 99-804.
- [66] Н. Ф. Лашко и С. Ф. Лашко, «Контактно-реактивная пайка», *Сварочное производство*, № 11, 1969, С. 34-37.
- [67] Н. Ф. Лашко и С. В. Лашко, *Контактные металлургические процессы при пайке*. Москва: Металлургия, 1977.
- [68] Под общ. ред. Н. П. Лякишева, *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3-х т.: Т. 3. Кн. I*, Москва: Машиностроение, 2001.
- [69] W. Holland-Moritz и Н. Mehlhorn, «Способ и устройство для диффузионной сварки через промежуточные прокладки / Verfahren und Vorrichtung zum Diffusionsschweißen mit Zwischenschichten», *ГДР патент №2512602*; 21.11.84.
- [70] G. K. Kharchenko, Yu. V. Fal'chenko, T. G. Taranova, O. A. Novomlinets, and E. V. Polovetskij, «Sublimation of metals under conditions of autovacuum heating», *Problemy Spetsyal'noj Electrometallurgii*, no. 2, 2002.
- [71] G. K. Kharchenko, Yu. V. Fal'chenko, O. A. Novomlinets, and V. F. Gorban', «Diffusion vacuum welding of chromim with copper», *The Paton Welding Journal*, no. 7, pp. 51-53, 2002.

- [72] Y. Miva, K. Noishiki, T. Suzuki, and K. Takatsuki, «Manufacturing technology of diffusion bonded heat exchangers (DCHE)». *Kobelco technology review*, No. 32, 2013. P. 51-56.
- [73] T. Bowdery, «LNG applications of diffusion bonded heat exchangers» in *6th Topical Conference on Natural Gas Utilization*. Orlando, April 23-27, 2006.
- [74] А. И. Гуляев, *Технология и оборудование контактной сварки*. Москва: Машиностроение, 1985.
- [75] Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев и др. *Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для машиностроительных вузов*. Москва: Машиностроение, 1986.
- [76] В. С. Федянин, «Способ контактной точечной сварки», *Патент № 2004 116787/02 Россия*, Оpubл. 20.02.2006.
- [77] В. С. Кучук-Яценко, В. И. Швец, А. Г. Сахацкий, и А. А. Наконечный, «Особенности контактной стыковой сварки алюминиевых сплавов с использованием наноструктурных алюминиево-никелевых и алюминиево-медных фольг», *Сварочное производство*, № 9, 2007, С. 12-14.
- [78] О. О. Новомлинець, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, Л. В. Петрушинець, «Спосіб електроконтактного точкового зварювання металевих деталей через прошарок», *Патент №89671 Україна*, Оpubл. 25.04.2014 р.
- [79] И. А. Биргер и Р. Р. Мавлютов, *Сопротивление материалов: Учебное пособие*, Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
- [80] И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, и Г. Б. Иосилевич, *Расчет на прочность деталей машин: Справочник, 4-е изд., перераб. и доп.* Москва: Машиностроение, 1993.
- [81] В. Т. Сапунов, *Основы теории пластичности и ползучести: Учебное пособие*. Москва: МИФИ. – 2008.

- [82] И. Х. Бадамшин, *От четырех к одному. Силы внутриатомного взаимодействия и прочность материалов*. Москва: Академия естествознания, 2014.
- [83] В. П. Радченко и М. Н. Саушкин, *Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях*. Москва: Машиностроение-1, 2005.
- [84] R. V. Hetnarski and M. R. Eslami. *Stresses – Advanced Theory and Applications (Solid Mechanics and Its Applications)*. Springer. 2009.
- [85] Ф. Гарофало, *Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов: научное издание: пер. с англ. Ю. Г. Андреева; ред. В. М. Розенберг*. – Москва: Металлургия, 1968.
- [86] Я. Б. Фридман, *Механические свойства металлов, изд. 3-е, перераб. и доп. Ч.1. Деформация и разрушение*. Москва: Машиностроение, 1974.
- [87] Ю. Н. Работнов. *Сопротивление материалов*. Москва: Физматгиз, 1963.
- [88] К. Л. Леонтьев, «О связи упругостных и тепловых свойств веществ», *Акустический журнал*, Т. XVII, Вып. 4, 1981, С. 554-561.
- [89] T. Jaglinski and R. Lakes. «Creep behaviour of Al-Si Die-Cast Alloys», *Journal of Engineering Materials and Technology*. Vol. 126, 2004, P. 378-383.
- [90] J. M. Ogola. *Study of Creep Properties in Metallic Materials, B.Sc.*, [Online]. Available: <http://mechanical.uonbi.ac.ke/sites/default/files/cae/engineering/mechanical/Study%20of%20Creep%20Properties%20in%20Metallic%20Materials.pdf>. 2014.
- [91] G. Bencivenni, L. Bucci, G. Finocchiaro, and C. Forti, «Creep measurement on aluminum-5056 wires», *KLOE memo*, No. 138, 1998.
- [92] A. A. Mir, «The creep properties of a series of zinc-rich zinc-aluminium alloys». PhD thesis, The University of Aston, Birmingham, 1998.

- [93] В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, и А. М. Якушев, *Общая металлургия: учебник для вузов, 6-е изд., перераб. и доп.* Москва: ИКЦ «Академкнига», 2005.
- [94] А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов и др., *Металловедение алюминия и его сплавов: Справ, изд. 2-е изд., перераб. и доп.* Москва: Металлургия, 1983.
- [95] М. Д. Щипков. *Сварка сплавов на основе алюминия и тугоплавких высокоактивных металлов. Учебное пособие.* Ленинград: ЛПИ, 1983.
- [96] Ю. М. Лахтин и В. П. Леонтьева, *Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений, 3-е изд., перераб. и доп.* Москва: Машиностроение, 1990.
- [97] О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев, *Обработка результатов наблюдений.* Москва: Наука, 1970.
- [98] 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*, № 2, С. 84-87, 2013.
- [99] 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), 2015, С. 67-72.
- [100] Ющенко С. М, «Оптимізація термодформаційного циклу при контактнo-реактивному паянні алюмінію АД00 через кремній», *Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі. Т.1. Технічні та економічні науки*, 2012, С. 120-121.
- [101] В. Н. Беломестных, Е. П. Теслева, «Коэффициент Пуассона и параметр Грюнайзена твердых тел», *Известия Томского политехнического университета*. Т. 306, № 5, 2003, С. 8-12.

- [102] В. Н. Беломестных, Е. П. Теслева, «Взаимосвязь ангармонизма и поперечной деформации квазиизотропных поликристаллических тел», *Журнал технической физики*. Т. 74, вып. 8, 2004, С. 140-142.
- [103] Д. С. Сандитов, С. Б. Мункуева, Д. З. Батлаев, и С. Ш. Сангадиев, «Параметр Грюнайзена и скорости распространения акустических волн в стеклообразных твердых телах», *Физика твердого тела*, Т. 54, вып. 8, 2012, С. 1540-1544.
- [104] Д. С. Сандитов, В. В. Мантатов, Б. Д. Сандитов, «Ангармонизм колебаний решетки и поперечная деформация кристаллических и стеклообразных твердых тел», *Физика твердого тела*, Т. 51, вып. 5, 2009, С. 947-951.
- [105] М. В. Дармаев, «Ангармонизм колебаний решетки и поперечная деформация стеклообразных и кристаллических материалов», автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника», Улан-Удэ, 2009.
- [106] Под ред. А. М. Прохорова, *Физическая энциклопедия: в 5-ти томах*. Москва: Советская энциклопедия, Т. 1, 1988.
- [107] В. А. Кириллин, В. В. Сычев, и А. Е. Шейндлин, *Техническая термодинамика*. Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 407 с.
- [108] Л. Жирифалько, *Статистическая физика твердого тела*, Москва: Мир, 1975.
- [109] Л. Н. Лариков, В. Р. Рябов, В. М. Фальченко, *Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке*, Москва: Машиностроение, 1975.
- [110] Под ред. Г. В. Самсонова, *Физико-химические свойства окислов*. Москва: Metallurgy, 1978.
- [111] И. Е. Петрунин, С. Н. Лоцманов, Г. А. Николаев, *Пайка металлов*, 2-е изд. Москва: Metallurgy, 1973.
- [112] Е. И. Сторчай, *Флюсовая пайка алюминия*. Москва: Metallurgy, 1980.

- [113] Н. П. Лякишев, *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Том 3. Кн. 2*, Москва: Машиностроение, 2001.
- [114] И. Е. Петрунин, *Физико-химические процессы при пайке*. Москва: Высшая школа, 1972.
- [115] С. В. Олексієнко, О. М. Савченко, та С. М. Ющенко, «Флюсове видалення оксидних плівок при паянні алюмінію та сплавів на його основі (літературний огляд)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 1, 2013, С. 119-124.
- [116] 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.
- [117] С. М. Ющенко, «Мікроканальні теплообмінники: особливості конструкції та виготовлення», на *Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 12-14.
- [118] 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>.
- [119] С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко, та О. О. Новомлинець, «Спосіб прецизійного дифузійного з'єднання алюмінію та його сплавів», *Патент № 94095 Україна*, 27.10.2014, Бюл. № 20.
- [120] Л. В. Майер, О. П. Орлова, и Т. Б. Мошкова, *Химия элементов: учеб. пособие*. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2009.

- [121] Н. О. Окерблом, В. П. Демянцевич и И. П. Байкова, *Проектирование технологии изготовления сварных конструкций*. Ленинград: Судпромгиз, 1963.
- [122] Е. К. Ковшиков, Г. А. Маслов, *Новое в технологии диффузионного соединения материалов: Учеб. пособие для слушателей заочных курсов повышения квалификации ИТР по технологии и оборудованию сварочного производства*. Москва: Машиностроение, 1990.
- [123] Н. Б. Демкин, *Контактирование шероховатых поверхностей*. Москва: Наука, 1970.
- [124] Под ред. Б. П. Никольского, *Справочник химика. 2-е изд., перераб. и доп. В 7-ми томах. Т. I Общие сведения. Строение вещества. Свойства важнейших веществ. Лабораторная техника*, Москва: Химия, 1996.
- [125] И. В. Рогов, А. А. Ахкубеков, П. А. Савинцев, и В. И. Рогов, «Влияние электропереноса на кинетику контактного плавления», *Металлы*, № 2, 1983. – С.66-68.
- [126] А. А. Акхубеков, Н. В. Далакова, О. Л. Еналдиева, Т. А. Орквасов, В. А. Созаев, и Т. Х. Тамаев, «Влияние примесей щелочных, щелочноземельных металлов и постоянного тока на кинетику контактного плавления металлов», *Электронный журнал «Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы»*, 2006. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.ptosnm.ru/catalog/s/7>.
- [127] А. А. Акхубеков, Н. В. Далакова, О. Л. Еналдиева, Т. А. Орквасов, В. А. Созаев, и Т. Х. Тамаев, «Кинетика контактного плавления твердого раствора  $\text{In} + 0.1 \text{ \% ат. Na}$  с висмутом и кадмием при наличии электропереноса», *Электронный журнал «Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы»*, 2006. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.ptosnm.ru/catalog/s/7> - 2006.
- [128] С. В. Олексиенко, О. А. Новомлинец, 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.

- [129] С. В. Олексієнко та С. М. Ющенко, «Спосіб паяння алюмінію та сплавів на його основі», на *Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі»*, Чернігів: ЧДТУ, 2013, С. 111-113.
- [130] Б. М. Тареев, *Физика диэлектрических материалов*. Москва: Энергоиздат, 1982.
- [131] С. В. Олексієнко, «Зварювання в твердій фазі монокристалічного кремнію з боросилікатним склом», Дисертація на здобуття ступеня канд. техн. наук. Київ, НАН Укаїни, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2005.
- [132] Казаков Н. Ф., и Золотых Б. Н. «Способ соединения керамических и металлических деталей», *А. с. № 124781 СССР*, 1959, Кл. 49, 34. Бюл. №23.
- [133] Kramez I. R., Burrows Ch. F, «Diffusions bonding» *США. Пат.№ 3256598*; 21.06.66, Кл. 29-484.
- [134] М. Л. Финкельштейн, Е. И. Феликсон, А. В. Андрюшкин и др., «Способ получения сварного соединения сваркой давлением в твердом состоянии», *А. с. 332975 СССР*, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 21/00, 24.04.1972, Бюл. №11.
- [135] С. В. Олексієнко, В. О. Мартиненко, та Р. А. Куликовський, «Вплив електропереносу на дифузійну кінетику в системі Al-Si-Al», *Вісник Черніг. держ. технол. ун-ту*, № 4 (69), 2013, С. 91-95.
- [136] Под ред. В. Г. Барьяхтара, *Физика твердого тела: Энциклопедический словарь: [в 2-х т.]. Т. 1*. Київ: Наук. думка, 1996.
- [137] Т. И. Трофимова, *Курс физики: учеб. Пособие для вузов. 2-е узд., перераб. и доп.* Москва: Высшая школа, 1990.



- [138] С. В. Олексієнко та С. М. Ющенко, «Технологія з'єднання алюмінію та його сплавів через прошарок при дії постійного електричного струму», на *Науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці»*, Маріуполь: ПГТУ, 2013, С. 107-109.
- [139] С. В. Олексієнко та С. М. Ющенко, «Електрохімічна активація при паянні алюмінію та його сплавів силумінами», на *III Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2013, С. 117.
- [140] К. А. Кочергин, *Контактная сварка*. Ленинград: Машиностроение, 1987.
- [141] К. К. Хренов, *Сварка, резка и пайка металлов*. Москва: Машиностроение, 1973.
- [142] А. С. Гельман, *Технология контактной электросварки*. Москва: Машгиз, 1952.
- [143] Ред. кол.: Г. А. Николаев и др., *Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. Т. 1. под ред. Н.А. Ольшанского*. Москва: Машиностроение, 1978.
- [144] К. А. Кочергин, *Сварка давлением*, Москва: Машиностроение. 1972.
- [145] *Тепловые процессы при контактной сварке. Сборник трудов лаборатории сварки металлов*. Москва: Академия наук СССР, 1959.
- [146] В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др.; под ред. В. В. Фролова, *Теория сварочных процессов: учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр.-ва»*. Москва: Высш. шк., 1988.
- [147] В. Е. Зиновьев, *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник*. Москва: Металлургия, 1989.
- [148] О. В. Мартыненко, *Точность в машиностроении. Учеб. пособие*. Волгоград: РПК «Политехник», 2005.
- [149] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, та С. М. Ющенко, «Способи зварювання тиском алюмінієвих сплавів з обмеженням рівня деформації»,

in *II International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 371-373.

- [150] 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, Бюл. № 11.
- [151] О. Новомлинець, С. Олексієнко, С. Ющенко, та Є. Половецький, «Прецизійне зварювання тиском алюмінієвих сплавів», *Технічні науки та технології*, № 4(10), С. 67-76, 2017.
- [152] В. Мазанко, О. Новомлинець, С. Олексієнко, та С. Ющенко, «Дослідження процесів масоперенесення у процесі прецизійного електроконтактного зварювання алюмінію», *Технічні науки та технології*, № 2(8), 2017, С. 75-81.
- [153] В. Ф. Мазанко, О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, та С. М. Ющенко, «Особливості дифузійної взаємодії при електроконтактному зварюванні алюмінію» на *VII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧНТУ, 2017, С. 70.
- [154] О. О. Novomlynets, S. V. Oleksiienko, V. F. Mazanko, and S. M. Yushchenko, «The investigation of mass-transfer processes during electric resistance welding of aluminium» in *XI International conference of young scientists «Welding and related technologies»*, Kyiv, 2017, С. 298. [Online]. Available: [http://wrtys.com.ua/2017/wp-content/uploads/Paton\\_Proceedings\\_2017\\_Small\\_New.pdf](http://wrtys.com.ua/2017/wp-content/uploads/Paton_Proceedings_2017_Small_New.pdf).
- [155] Дж. Маннинг, *Кинетика диффузии атомов в кристаллах: пер. с англ; под ред. Б. Я. Любова*. Москва: Мир, 1971.
- [156] Н. Mehrer, *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Luxemburg: Springer Science & Business Media, 2007.

- [157] С. І. Сидоренко, О. В. Філатов, та С. М. Волошко, *Аномальне масоперенесення. Закономірності та механізми: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей вищих закладів освіти*. Київ: Політехніка, 2008.
- [158] 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.

## Додаток А

Програма для розрахунку залежностей  $\varepsilon_i = f(P)$  для сплаву АД00 за допомогою математичного пакету Mathcad

$$f1(x) := -3 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0.0007 \cdot x + 0.1238$$

$$f2(x) := -3 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0.0011 \cdot x + 0.1727$$

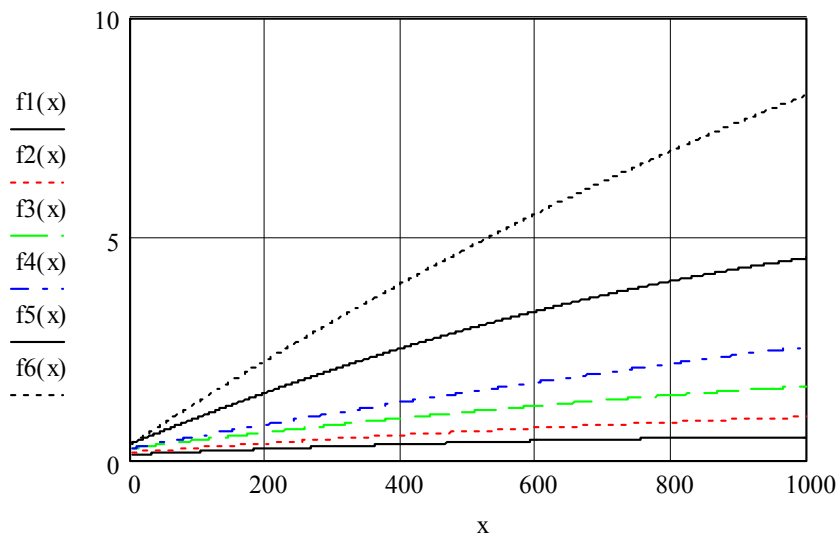
$$f3(x) := -5 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0.0019 \cdot x + 0.2683$$

$$f4(x) := -5 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0.0028 \cdot x + 0.2659$$

$$f5(x) := -2 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0.0062 \cdot x + 0.3712$$

$$f6(x) := -2 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0.0099 \cdot x + 0.3598$$

$$x := 0 .. 1000$$

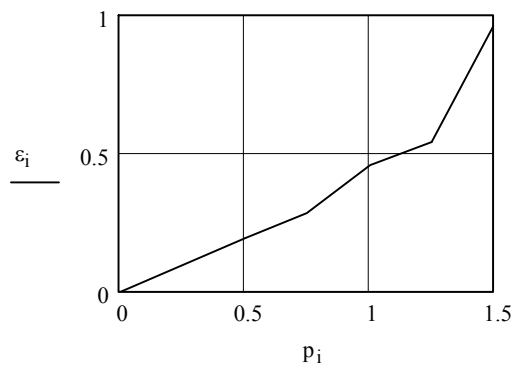


$$i := 1 .. 7$$

$$t := 100$$

$$\varepsilon_i := p_i :=$$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



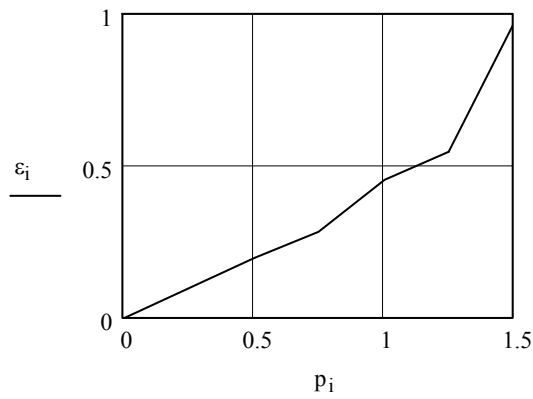
$$\varepsilon_i =$$

0
0.191
0.28
0.453
0.541
0.971
1.33

t := 200

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



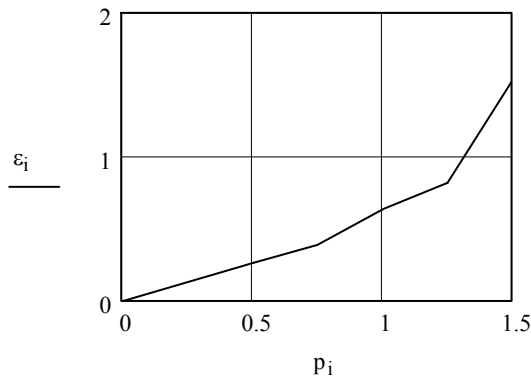
$\varepsilon_i =$

0
0.252
0.381
0.628
0.806
1.531
2.26

t := 300

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



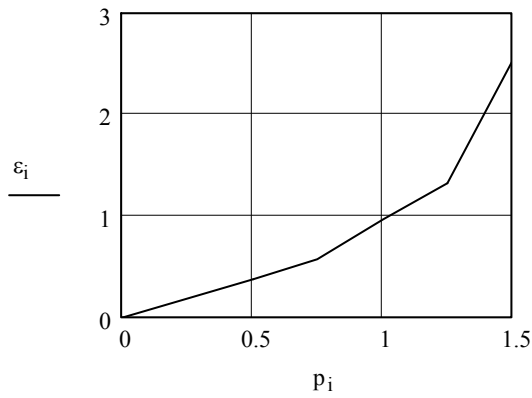
$\varepsilon_i =$

0
0.307
0.476
0.793
1.061
2.051
3.15

t := 400

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



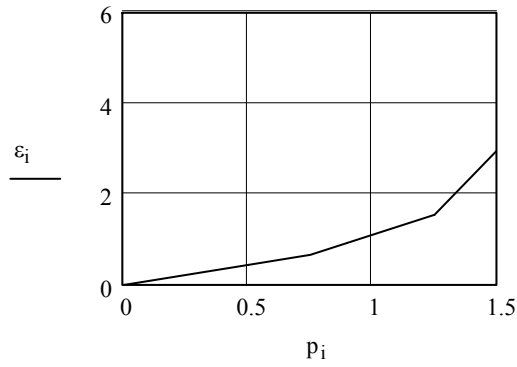
$\varepsilon_i =$

0
0.356
0.565
0.948
1.306
2.531
4

t := 500

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



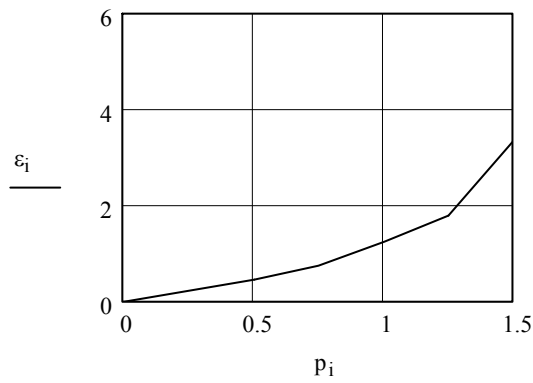
$\varepsilon_i =$

0
0.399
0.648
1.093
1.541
2.971
4.81

t := 600

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



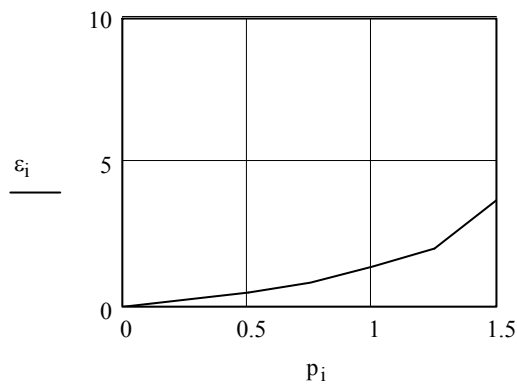
$\varepsilon_i =$

0
0.436
0.725
1.228
1.766
3.371
5.58

t := 700

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



$\varepsilon_i =$

0
0.467
0.796
1.353
1.981
3.731
6.31

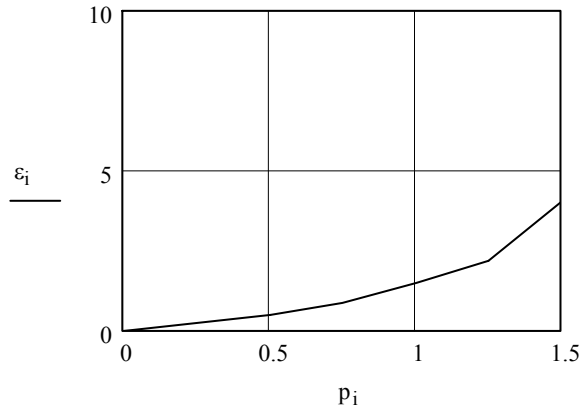
t := 800

$\varepsilon_i :=$

0
f1(t)
f2(t)
f3(t)
f4(t)
f5(t)
f6(t)

$p_i :=$

0
0.5
0.75
1
1.25
1.5
1.75



$\varepsilon_i =$

0
0.492
0.861
1.468
2.186
4.051
7

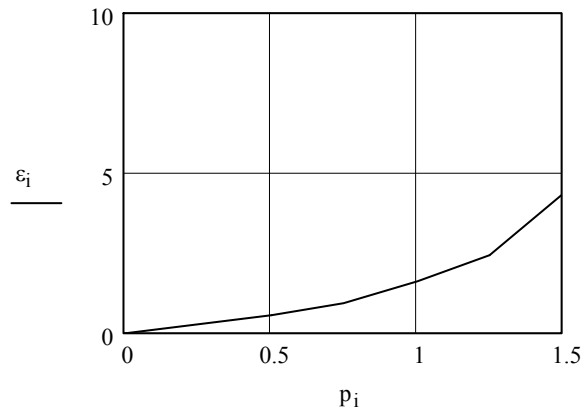
t := 900

$\varepsilon_i :=$

0
f1(t)
f2(t)
f3(t)
f4(t)
f5(t)
f6(t)

$p_i :=$

0
0.5
0.75
1
1.25
1.5
1.75



$\varepsilon_i =$

0
0.511
0.92
1.573
2.381
4.331
7.65

Додаток Б

Програма для розрахунку залежностей  $\epsilon_i = f(P)$  для сплаву АМг5 за допомогою математичного пакету Mathcad

$$f1(x) := -3 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot x + 0.00037$$

$$f2(x) := -5 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 9 \cdot 10^{-6} \cdot x + 0.0011$$

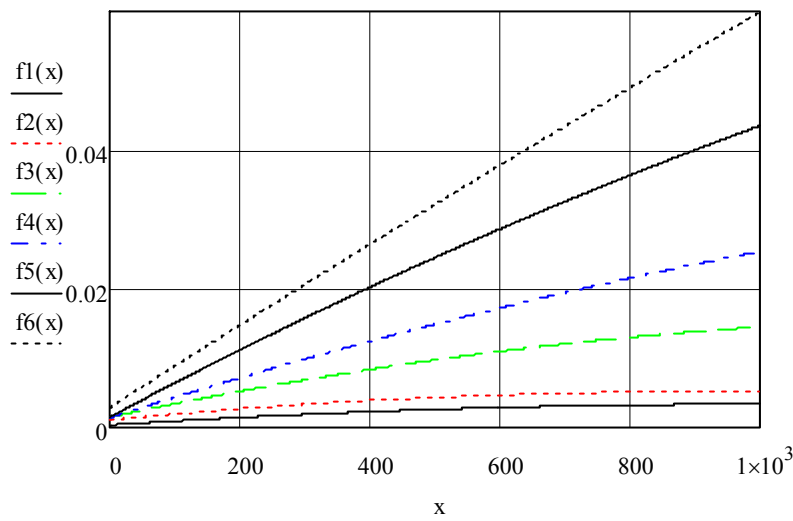
$$f3(x) := -7 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot x + 0.0015$$

$$f4(x) := -6 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot x + 0.0014$$

$$f5(x) := -8 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot x + 0.0015$$

$$f6(x) := -3 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot x + 0.0029$$

x := 0..1000



i := 1..7

t := 100

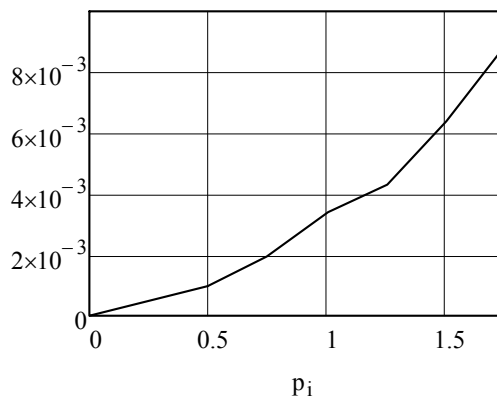
$\epsilon_i :=$

0
f1(t)
f2(t)
f3(t)
f4(t)
f5(t)
f6(t)

$p_i :=$

0
0.5
0.75
1
1.25
1.5
1.75

$\epsilon_i$



$\epsilon_i =$

0
$9.4 \cdot 10^{-4}$
$1.95 \cdot 10^{-3}$
$3.43 \cdot 10^{-3}$
$4.34 \cdot 10^{-3}$
$6.42 \cdot 10^{-3}$
$8.87 \cdot 10^{-3}$



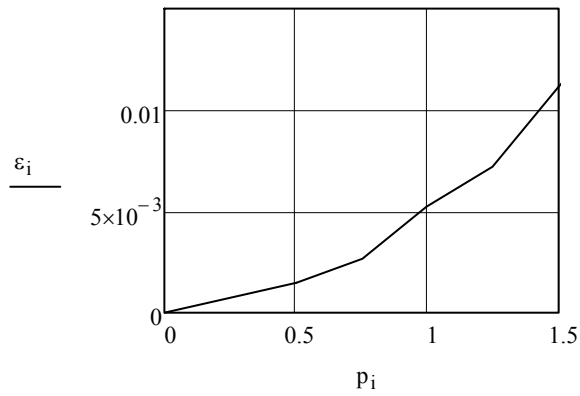
$t := 200$

$\varepsilon_i :=$

0
f1(t)
f2(t)
f3(t)
f4(t)
f5(t)
f6(t)

$p_i :=$

0
0.5
0.75
1
1.25
1.5
1.75



$\varepsilon_i =$

0
$1.45 \cdot 10^{-3}$
$2.7 \cdot 10^{-3}$
$5.22 \cdot 10^{-3}$
$7.16 \cdot 10^{-3}$
0.0112
0.0148

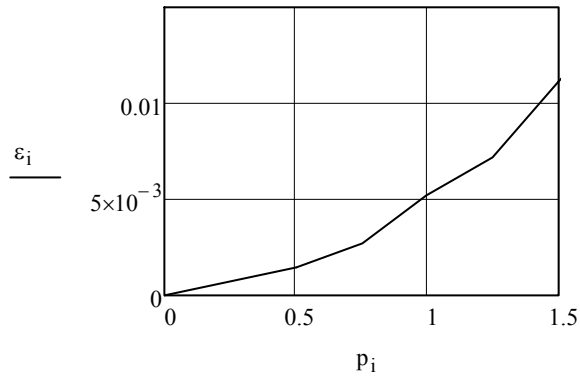
$t := 300$

$\varepsilon_i :=$

0
f1(t)
f2(t)
f3(t)
f4(t)
f5(t)
f6(t)

$p_i :=$

0
0.5
0.75
1
1.25
1.5
1.75



$\varepsilon_i =$

0
$1.9 \cdot 10^{-3}$
$3.35 \cdot 10^{-3}$
$6.87 \cdot 10^{-3}$
$9.86 \cdot 10^{-3}$
0.0158
0.0206

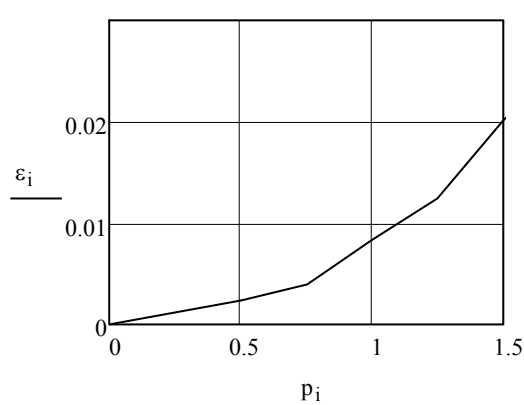
$t := 400$

$\varepsilon_i :=$

0
f1(t)
f2(t)
f3(t)
f4(t)
f5(t)
f6(t)

$p_i :=$

0
0.5
0.75
1
1.25
1.5
1.75



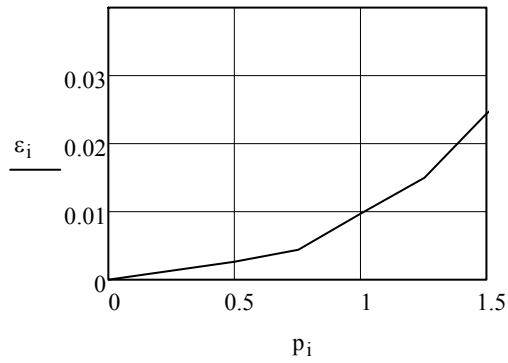
$\varepsilon_i =$

0
$2.29 \cdot 10^{-3}$
$3.9 \cdot 10^{-3}$
$8.38 \cdot 10^{-3}$
0.0124
0.0202
0.0264

$t_w := 500$

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



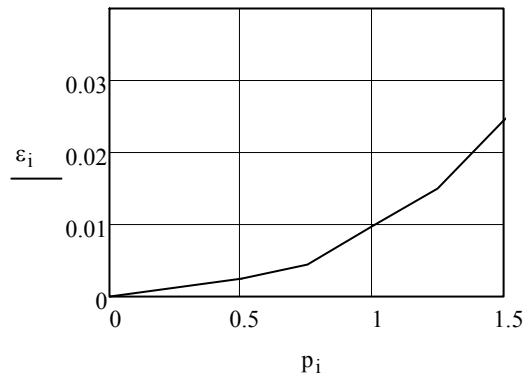
$\varepsilon_i =$

0
$2.62 \cdot 10^{-3}$
$4.35 \cdot 10^{-3}$
$9.75 \cdot 10^{-3}$
0.0149
0.0245
0.0322

$t_w := 600$

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



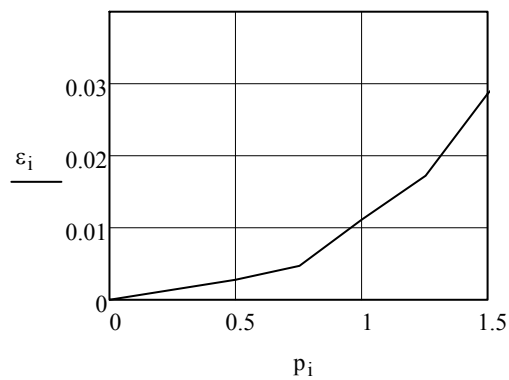
$\varepsilon_i =$

0
$2.89 \cdot 10^{-3}$
$4.7 \cdot 10^{-3}$
0.011
0.0172
0.0286
0.0378

$t_w := 700$

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



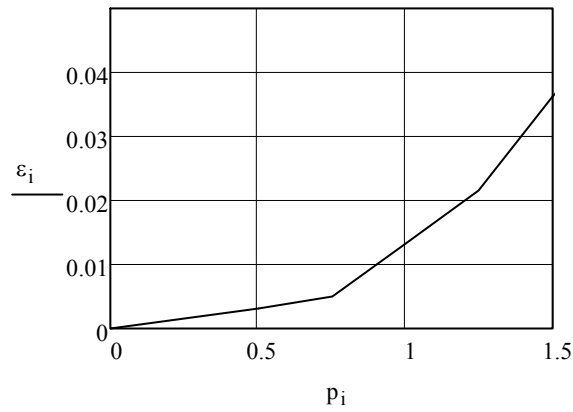
$\varepsilon_i =$

0
$3.1 \cdot 10^{-3}$
$4.95 \cdot 10^{-3}$
0.0121
0.0195
0.0326
0.0434

$t := 800$

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



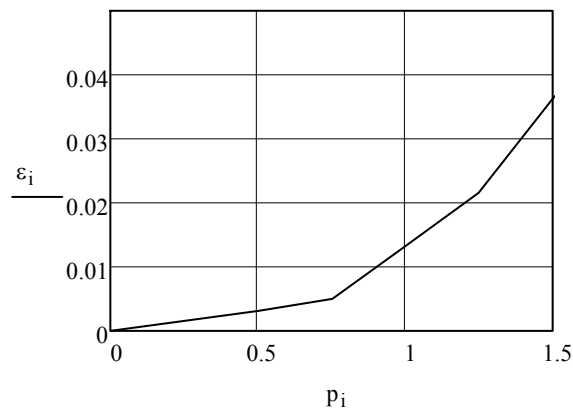
$\varepsilon_i =$

0
$3.25 \cdot 10^{-3}$
$5.1 \cdot 10^{-3}$
0.013
0.0216
0.0364
0.049

$t := 900$

$\varepsilon_i :=$        $p_i :=$

0	0
f1(t)	0.5
f2(t)	0.75
f3(t)	1
f4(t)	1.25
f5(t)	1.5
f6(t)	1.75



$\varepsilon_i =$

0
$3.34 \cdot 10^{-3}$
$5.15 \cdot 10^{-3}$
0.0138
0.0235
0.04
0.0545

## 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 Г



## 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 зрошування 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

Від Чернігівського національного  
технологічного університету:

Головний інженер

Завідувач кафедри ЗВ та АПБК  
к.т.н., доцент

В. О. Алейников

І.О. Прибытько  
к.т.н., доцент кафедри ЗВ та АПБК

О.О. Новомлинець  
асистент кафедри ЗВ та АПБК

С.М. Ющенко

## Додаток Г

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: [estu@ctu.cn.ua](mailto:estu@ctu.cn.ua)  
[www.ctu.cn.ua](http://www.ctu.cn.ua)  
Код ЄДРПОУ 05460798

CHERNIHIV NATIONAL  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14027,  
Україна

95, Shevchenko str., Chernihiv, 14027,  
Ukraine

*Н.Р. 2019 № 10/10-1535*

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

### ДОВІДКА

про впровадження результатів кандидатської дисертації  
асистента Ющенко С.М. у навчальний процес

Наукові розробки та практичні рекомендації дисертаційної роботи асистента кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій Ющенко С.М. впроваджено в навчальний процес підготовки здобувачів вищої освіти освітнього ступеню бакалавр та магістр за спеціальністю 131 – Прикладна механіка (освітня програма: Технології та устаткування зварювання):

- в лекційні курси з дисциплін: «Технології та устаткування зварювання тиском», «Спеціальні способи зварювання», «Прогресивні технології з'єднання матеріалів» – засоби інтенсифікації процесу зварювання тиском; особливості процесу контактного плавлення металу у процесі зварювання;

- в лабораторні роботи з дисциплін: «Технології та устаткування зварювання тиском», «Спеціальні способи зварювання», «Прогресивні технології з'єднання матеріалів» – використання при дифузійному зварюванні у вакуумі проміжних хімічно активних прошарків; використання при електроконтактному стиковому зварюванні багат шарових прошарків з матеріалів, близьких до складу основного металу.

Проректор



В.В. Кальченко

## Додаток Д

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] С. В. Олексієнко, О. М. Савченко, та С. М. Ющенко, «Флюсове видалення оксидних плівок при паянні алюмінію та сплавів на його основі (літературний огляд)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, №1 (63), С. 119-124, 2013. [фахове видання] (0,5 друк.арк.)
- [2] 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*, № 2, С. 84-87, 2013. [фахове видання] (0,25 друк.арк.)
- [3] 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.)
- [4] 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.)
- [5] О. Новомлинець, С. Олексієнко, С. Ющенко, та Є. 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] (0,6 друк. арк.)
- [6] С.В. Олексієнко, та С.М. Ющенко, «Електрохімічна активація при паянні алюмінію та його сплавів силумінами», на *III Міжнародній*

науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», Чернігів: ЧДТУ, 2013, С. 117. (0,1 друк.арк.)

- [7] 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.)
- [8] С.В. Олексієнко, та С.М. Ющенко, «Спосіб паяння алюмінію та сплавів на його основі» на *Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі»*, Чернігів: ЧДТУ, 2013, С. 111-113. (0,15 друк.арк.)
- [9] С.В. Олексієнко, та С.М. Ющенко, «Технологія з'єднання алюмінію та його сплавів через прошарок при дії постійного електричного струму» на *Науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці»*, Маріуполь: ПГТУ, 2013, С. 107-109. (0,15 друк.арк.)
- [10] 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.)
- [11] 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. (0,1 друк.арк.)
- [12] С.М. Ющенко «Мікроканальні теплообмінники: особливості конструкції та виготовлення», на *Всеукраїнській науково-практичній*



конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі», Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 12-14. (0,15 друк.арк.)

- [13] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, та С. М. Ющенко, «Способи зварювання тиском алюмінієвих сплавів з обмеженням рівня деформації», in *II International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 371–373. (0,15 друк.арк.)
- [14] В.Ф. Мазанко, О.О. Новомлинець, С.В. Олексієнко, та С.М. Ющенко, «Особливості дифузійної взаємодії при електроконтактному зварюванні алюмінію», на *VII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧНТУ, 2017, С. 70. (0,1 друк.арк.)
- [15] O. O. Novomlynets, S. V. Oleksiienko, V. F. Mazanko, and S. M. Yushchenko, «The investigation of mass-transfer processes during electric resistance welding of aluminium» in *XI International conference of young scientists «Welding and related technologies»*, Kyiv, 2017, С. 298. [Online]. Available: [http://wrtys.com.ua/2017/wp-content/uploads/Paton\\_Proceedings\\_2017\\_Small\\_New.pdf](http://wrtys.com.ua/2017/wp-content/uploads/Paton_Proceedings_2017_Small_New.pdf). (0,05 друк.арк.)
- [16] 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.
- [17] 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.