

The issue of journal contains:

Proceedings of the III Correspondence
International Scientific and Practical Conference

SCIENCE IN MOTION: CLASSIC AND MODERN TOOLS AND METHODS IN SCIENTIFIC INVESTIGATIONS

held on August 2nd, 2024 by

NGO European Scientific Platform (Vinnytsia, Ukraine)

LLC International Centre Corporative Management (Vienna, Austria)

Nº42
AUGUST, 2024

ISSN 2710-3056

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL

GRAIL OF SCIENCE

№ **42** (August, 2024)

with the proceedings of the:

III Correspondence International
Scientific and Practical Conference

**SCIENCE IN MOTION: CLASSIC AND
MODERN TOOLS AND METHODS
IN SCIENTIFIC INVESTIGATIONS**

held on August 2nd, 2024 by

NGO European Scientific Platform
(Vinnytsia, Ukraine)

LLC International Centre Corporative
Management (Vienna, Austria)

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ГРААЛЬ НАУКИ

№ **42** (серпень, 2024)

за матеріалами:

III Міжнародної науково-
практичної конференції

**НАУКА В РУСІ: КЛАСИЧНІ ТА
СУЧАСНІ ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

що проводилася 02.08.2024

ГО «Європейська наукова
платформа» (Вінниця, Україна)

ТОВ «International Centre Corporative
Management» (Відень, Австрія)



Вінниця – Відень, 2024

ГРААЛЬ НАУКИ : міжнар. наук. журнал. – Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2024. – No 42. – 518 с.

Видання розраховане на науковців, викладачів, аспірантів, студентів, усіх, хто прагне отримати ґрунтовні знання теоретичного і прикладного характеру.

**Рекомендовано до видання Вченою Радою Наукової установи
«Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці». Протокол № 47 від 01.08.2024.**

Головний редактор: Танасійчук Альона Миколаївна, д-р. екон. наук, доцент (Україна)
Заступник головного редактора: Ємельянов Олександр Юрійович, д-р. екон. наук, професор (Україна)
Голова оргкомітету конференції: Голденблат Марія (Україна)
Заступник голови оргкомітету конференції: Рейчел Апаро (Австрійська Республіка)
Відповідальний секретар: Рабей Настасія Романівна (Україна)

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Квасницька Раїса Степанівна - д-р. екон. наук, професор (Україна); **Jakhongir Shaturaev** - канд. екон. наук, доцент (Республіка Узбекистан); **Бойко Світлана Василівна** - канд. екон. наук, доцент (Україна); **Заднепровська Ганна Ігорівна** - канд. екон. наук (Україна); **Занора Володимир Олександрович** - канд. екон. наук, доцент (Україна); **Маркович Ірина Богданівна** - канд. екон. наук, доцент (Україна); **Яковенко Роман Валерійович** - канд. екон. наук, доцент (Україна); **Поливана Людмила Анатоліївна** - канд. екон. наук, доцент (Україна); **Гевчук Анна Вікторівна** - д-р. екон. наук, професор (Україна); **Маслій Олександра Анатоліївна** - канд. екон. наук, доцент (Україна); **Євтушенко Наталія Миколаївна** - канд. екон. наук, доцент (Україна); **Москвічова Олена Сергіївна** - канд. екон. наук, доцент (Україна); **Ясишена Валентина Валеріївна** - д-р. екон. наук, професор (Україна); **Михайлишин Лілія Іванівна** - д-р. екон. наук, професор (Україна).

НАУКОВІ КОНСУЛЬТАНТИ:

Онкієнко Сергій Володимирович - д-р. екон. наук, професор (Україна); **Marko Timchev** - д-р. екон. наук, доцент (Республіка Болгарія); **Khatuna Tabagari** - д-р. екон. наук, професор (Сакартвело); **Грень Лариса Миколаївна** - д-р. наук з держ. управління, професор (Україна); **Михаліцька Наталія Ярославівна** - канд. наук з держ. управління, доцент (Україна); **Ткаченко Павло Ігорович** - аспірант (Україна); **Купріянова Дарина Сергіївна** - практикуючий юрист (Польща); **Губаль Галина Миколаївна** - канд. фіз.-мат. наук, доцент (Україна); **Козуб Галина Олександрівна** - канд. техн. наук, доцент (Україна); **Козьма Антон Антонович** - канд. хім. наук (Україна); **Морозова Тетяна Василівна** - канд. біол. наук, доцент (Україна); **Купріянова Лариса Сергіївна** - канд. мед. наук, доцент (Україна); **Лисенко Дмитро Андрійович** - канд. мед. наук, доцент (Україна); **Цубанова Наталя Анатоліївна** - д-р. фарм. наук., професор (Україна); **Олійник Світлана Валентинівна** - канд. фарм. наук, доцент (Україна); **Полежаєв Юрій Григорович** - канд. наук із соц. ком., доцент (Україна); **Mukhabbat Khakimova** - д-р. пед. наук, професор (Республіка Узбекистан); **Куліченко Алла Костянтинівна** - д-р. пед. наук, доцент (Україна); **Фурман Тарас Юрійович** - канд. пед. наук, доцент (Україна); **Бажан Станіслав Миколайович** - д-р. філософії (Україна); **Ямполь Юрій Віталійович** - аспірант (Україна); **Антипова Жанна Ігорівна** - старший викладач (Україна); **Яцик Мар'яна Романівна** - канд. пед. наук, доцент (Україна); **Корбозерова Ніна Миколаївна** - д-р. філол. наук, професор (Україна); **Ковальська Наталя Аркадіївна** - канд. філол. наук, доцент (Україна); **Присяжнюк Оксана Ярославівна** - канд. філол. наук, доцент (Україна); **Мелех Галина Богданівна** - канд. філол. наук, доцент (Україна); **Корнус Анатолій Олександрович** - канд. геогр. наук, доцент (Україна); **Фомін Андрій Володимирович** - канд. іст. наук, доцент (Україна); **Гірна Наталія Мирославівна** - канд. іст. наук, доцент (Україна); **Устінова Ірина Ігорівна** - д-р. арх., професор (Україна); **Катерина Діденко** - канд. арх. (Україна); **Воскобойнікова Юлія Василівна** - д-р. мист. (Україна); **Крипчук Микола Володимирович** - канд. мист., доцент (Україна); **Лугова Тетяна Анатоліївна** - канд. мист., доцент (Україна)

Верстальник: Білоус Тетяна (Україна). **Дизайнер:** Казьміна Надія (Україна). **Коректор:** Дудник Григорій (Україна).

«Грааль науки» є офіційно зареєстрованим мультидисциплінарним науковим виданням з міжнародною сферою поширення, що підтримує політику відкритого доступу. **Ідентифікатор медіа R30-02704** (рішення № 430 від 22.02.2024 Національної Ради України з питань телебачення і радіомовлення).

Наказом МОН України № 582 від 24.04.2024 виданню «Грааль науки» присвоєно Категорію Б фахових видань України з питань економіки (051 «Економіка»).

«Грааль науки» індексується в міжнародних реферативних та наукометричних базах даних:

Index Copernicus Journals Master List; «Наукова періодика України» (Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського НАН України); Національний репозитарій академічних текстів; Google Scholar; WorldCat; Open Ukrainian Citation Index; CrossRef; Mendeley; Scite; Semantic Scholar; Scilit; OpenAIRE, PubPeer.

Конференція зареєстрована УкрІНТЕІ (Посвідчення № 367 від 12.06.2024) та сертифікована Euro Science Certification Group (Сертифікат № 22672 від 28.06.2024).

За точність викладених фактів та коректність цитування відповідальність несе автор.



GRAIL OF SCIENCE : inter. scientific journal. – Vinnytsia : NGO «European Scientific Platform»; SI «Institute of Scientific and Technical Integration and Cooperation», 2024. – No 42. – 518 p.

The publication is intended for scientists, teachers, graduate students, students, all those who seek to obtain thorough knowledge of a theoretical and applied nature.

Recommended for publication by the Academic Council of the Institute of Scientific and Technical Integration and Cooperation. Protocol № 47 from August 1, 2024.

Editor-in-chief: Alona Tanasiichuk, D.Sc. in Economics, Associate professor (Ukraine)
Deputy editor-in-chief: Olexandr Yemelyanov, D.Sc. in Economics, Professor (Ukraine)
Chairman of the Organizing Committee: Miriam Goldenblat (Ukraine)
Deputy Chairman of the Organizing Committee: Rachael Aparo (Austria)
Responsible secretary: Nastasiia Rabei (Ukraine)

EDITORIAL BOARD:

Raisa Kvasnytska - D.Sc. in Economics, Professor (Ukraine); **Jakhongir Shaturaev** - Ph.D. in Economics, Associate professor (Republic of Uzbekistan); **Svitlana Boiko** - Ph.D. in Economics, Associate professor (Ukraine); **Hanna Zadnieprovsk** - Ph.D. in Economics (Ukraine); **Volodymyr Zanora** - Ph.D. in Economics, Associate professor (Ukraine); **Iryna Markovych** - Ph.D. in Economics, Associate professor (Ukraine); **Roman Yakovenko** - Ph.D. in Economics, Associate professor (Ukraine); **Liudmyla Polyvana** - Ph.D. in Economics, Associate professor (Ukraine); **Anna Hevchuk** - D.Sc. in Economics, Professor (Ukraine); **Oleksandra Maslii** - Ph.D. in Economics, Associate professor (Ukraine); **Nataliia Yevtushenko** - Ph.D. in Economics, Associate professor (Ukraine); **Olena Moskvichova** - Ph.D. in Economics, Associate professor (Ukraine); **Valentyna Yasysheva** - D.Sc. in Economics, Professor (Ukraine); **Liliia Mykhailyshyn** - D.Sc. in Economics, Professor (Ukraine).

EDITORIAL CONSULTANTS:

Serhii Onikiienko - D.Sc. in Economics, Professor (Ukraine); **Khatuna Tabagari** - D.Sc. in Economics, Professor (Georgia); **Marko Timchev** - D.Sc. in Economics, Associate professor (Republic of Bulgaria); **Larysa Hren** - D.Sc. in Public administration, Professor (Ukraine); **Nataliia Mykhalitska** - Ph.D. in Public administration, Associate professor (Ukraine); **Pavlo Tkachenko** - Ph.D. student (Ukraine); **Daryna Kupriianova** - lawyer (Republic of Poland); **Halyna Hubal** - Ph.D. in Physics and Maths, Associate professor (Ukraine); **Halyna Kozub** - Ph.D. in Technical sciences, Associate professor (Ukraine); **Anton Kozma** - Ph.D. in Chemistry (Ukraine); **Tetiana Morozova** - Ph.D. in Biology, Associate professor (Ukraine); **Larysa Kupriianova** - Ph.D. in Medicine, Associate professor (Ukraine); **Dmytro Lysenko** - Ph.D. in Medicine, Associate professor (Ukraine); **Natalia Tsubanova** - D.Sc. in Pharmacy, Professor (Ukraine); **Svitlana Oliinyk** - Ph.D. in Pharmacy, Associate professor (Ukraine); **Yuriy Polyezhaev** - Ph.D. in Social Communications, Associate professor (Ukraine); **Mukhabbat Khakimova** - D.Sc. in Pedagogy, Professor (Republic of Uzbekistan); **Alla Kulichenko** - D.Sc. in Pedagogy, Associate professor (Ukraine); **Taras Furman** - Ph.D. in Pedagogy, Associate professor (Ukraine); **Stanislav Bazhan** - Doctor of Philosophy (Ukraine); **Yurii Yampol** - Ph.D. student (Ukraine); **Zhanna Antypova** - Senior Lecturer (Ukraine); **Yatsyk Mariana** - Ph.D. in Pedagogy, Associate professor (Ukraine); **Nina Korbozerova** - D.Sc. in Philology, Professor (Ukraine); **Natalia Kovalska** - Ph.D. in Philology, Associate professor (Ukraine); **Oksana Prysiachniuk** - Ph.D. in Philology, Associate professor (Ukraine); **Melekh Halyna** - Ph.D. in Philology, Associate professor (Ukraine); **Anatolii Kornus** - Ph.D. in Geography, Associate professor (Ukraine); **Andrii Fomin** - Ph.D. in History, Associate professor (Ukraine); **Nataliia Hirna** - Ph.D. in History, Associate professor (Ukraine); **Iryna Ustinova** - D.Sc. in Architecture, Professor (Ukraine); **Kateryna Didenko** - Ph.D. in Architecture (Ukraine); **Yuliia Voskoboinikova** - D.Sc. in Arts (Ukraine); **Mykola Krypchuk** - Ph.D. in Arts, Associate professor (Ukraine); **Tetiana Luhova** - Ph.D. in Arts, Associate professor (Ukraine)

Responsible for e-layout: Tetiana Bilous (Ukraine). **Designer:** Nadiia Kazmina (Ukraine). **Proofreader:** Hryhorii Dudnyk (Ukraine).

The journal «Grail of Science» is an officially registered in Ukraine multidisciplinary and internationally disseminated scientific edition that supports the policy of open access for scientific publications. **Media identifier R30-02704** (decision № 430 dated 22.02.2024 of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting).

By order of the Ministry of Education and Culture of Ukraine № 582 of April 24, 2024, the journal «Grail of Science» was assigned Category B of specialized publications of Ukraine on economics (051 «Economics»).

The journal «Grail of Science» is indexed in international reference and scientometric databases:

Index Copernicus Journals Master List; «Наукова періодика України» (Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського НАН України); Національний репозитарій академічних текстів; Google Scholar; WorldCat; Open Ukrainian Citation Index; CrossRef; Mendeley; Scite; Semantic Scholar; Scilit; OpenAIRE, PubPeer.

The conference is approved by UKRISTEI (Certificate № 367 dated June 12th, 2024) and certified by Euro Science Certification Group (Certificate № 22672 dated June 28th, 2024).

The author is responsible for the accuracy of the facts presented and the correctness of citations.





РОЗДІЛ XIV. БІОЛОГІЯ ТА БІОТЕХНОЛОГІЇ

СТАТТІ

БІБЛІОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ БІОГАЗОВОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ МІСКАНТУСУ	
Науково-дослідна група: Тетерюк Р.С., Сахно Т.В., Корінний С.М., Семенов А.О.	299

РОЗДІЛ XV. АГРАРНІ НАУКИ ТА ПРОДОВОЛЬСТВО

СТАТТІ

МОДЕЛЮВАННЯ В АГРОНОМІЇ: ПОТОЧНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	
Лиховид П.В., Біднина І.О.	308

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

ФОРМУВАННЯ БІОМЕТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОСЛИН ПШЕНИЦІ ТУРАНСЬКОЇ (TRITICUM TURANICUM JAKUBZ.) ЗА РІЗНІ ТЕРМІНИ СІВБИ В УМОВАХ СХІДНОЇ ЧАСТИНИ ПІВНІЧНОГО СТЕПУ УКРАЇНИ	
Бутенко О.М.	316

РОЗДІЛ XVI. ХІМІЯ, ХІМІЧНА ТА БІОІНЖЕНЕРІЯ

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

NI(OH) ₂ THIN FILMS FOR OPTICAL ANALYSIS OF CHLORINE CONTENT IN AIR	
Fomanyuk S.	319

РОЗДІЛ XVII. ЗАГАЛЬНА МЕХАНІКА ТА МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

СТАТТІ

ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА СУЧАСНИХ МЕТАЛОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ	
Пауліс Бейнорас, Капустинський О., Вишняков Н.	321

DOI 10.36074/grail-of-science.02.08.2024.044

ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА СУЧАСНИХ МЕТАЛОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Пауліс Бейнорас

докторант кафедри механічної інженерії та матеріалознавства
Вільнюський технічний університету імені Гедимінаса, Литва

Олександр Капустинський

доктор технічних наук, лектор кафедри механічної інженерії та
матеріалознавства
Вільнюський технічний університету імені Гедимінаса, Литва

Ніколай Вишняков

доктор технічних наук, старший науковий співробітник Інституту
механічних наук
Вільнюський технічний університету імені Гедимінаса, Литва

Анотація. Процес зварювання під тиском полягає в утворенні з'єднань через спільну пластичну деформацію матеріалів з використанням нагріву як допоміжного фактору. Дифузійне зварювання, яке відбувається при температурах нижче точки плавлення, дозволяє уникати проблем, таких як тріщини та залишкові напруження. Зварювання зазвичай проводиться у вакуумі або контрольованій атмосфері для запобігання окисленню. Використовуються дві основні схеми: вільного та примусового деформування. Різні техніки, як-от циклічне змінення тиску, розтягуючі зусилля та ультразвукові коливання, можуть інтенсифікувати процес зварювання. Особливо ефективним є застосування проміжних шарів, як плавких, так і неплавких. Незважаючи на досягнення, залишаються виклики у зварюванні таких матеріалів, як магнітні сплави та п'єзокераміка, що потребує подальших досліджень у напрямку низькотемпературного дифузійного зварювання.

Ключові слова: зварювання під тиском, дифузійне зварювання, низькотемпературне зварювання

Вступ

При зварюванні під тиском утворення з'єднання здійснюється завдяки спільній пластичній деформації матеріалів, тобто механічній активації контактних поверхонь у зоні їх контактування [1, 2, 3]. При цьому нагрів



виступає лише як супутній фактор, який сприяє розвитку стадії взаємодії поверхонь (термічна активація). Ця стадія включає низку важливих фізичних процесів, зокрема руйнування оксидних шарів (очищення поверхонь), а також підвищення енергії поверхневих атомів до рівня, при якому можлива їх хімічна взаємодія та утворення міжатомних зв'язків (схоплювання). Процес з'єднання при наявності підігріву не закінчується схоплюванням, оскільки в даному випадку відбувається дифузійне переміщення атомів через межу контакту (стадія об'ємної взаємодії) [2, 3].

Обговорення

На практиці вибір способу зварювання під тиском здійснюється залежно від властивостей та сумісності з'єднуваних матеріалів, яке визначається, передусім, ймовірністю утворення інтерметалідів [4, 5]. Методи зварювання під тиском без підігріву (зварювання вибухом, магнітно-імпульсна, холодна зварка) найбільш придатні для з'єднання різнорідних матеріалів при небезпеці утворення інтерметалідів у контакті [6, 7, 8]. Методи зварювання з супутнім підігрівом (дифузійне зварювання) кода утворення з'єднань супроводжується об'ємною взаємодією та утворенням спільних зерен у зоні контакту найбільш застосовні для матеріалів у однорідних комбінаціях.

Дифузійне зварювання входить до групи способів зварювання під тиском, при яких з'єднання відбувається за рахунок пластичної деформації нижче температури плавлення (у твердій фазі) при відносно невеликій пластичній залишковій деформації [9]. Це виключає проблеми, пов'язані з ліквідацією, тріщин та залишковими напруженнями. Це дозволяє отримувати з'єднання, що не потребують подальшої механічної обробки. Нагрів може здійснюватися з використанням різних теплових джерел (індукційний, радіаційний, електронно-променевий нагрів протікаючим струмом, тліючим розрядом у печі, а також у розплаві солей). Контакт з'єднуваних деталей виконується або безпосередньо, або через прокладки [10]. Якщо процес зварювання під тиском з нагрівом здійснювати у вакуумі, то поверхня металу буде не тільки захищатися від подальшого окислення, але й очищатися в результаті процесів десорбції або дифузії в глибокі з'єднані метали. Даним способом легше досягти встановлення металевого зв'язку по поверхні контакту. Тому частіше за все дифузійне зварювання проводиться у вакуумі або в середовищі захисних чи відновлювальних газів і їхніх сумішей (у контрольованій атмосфері). А в разі зварювання матеріалів, що мають мале споріднення з киснем, процес може вестися навіть на повітрі. В практиці дифузійного зварювання застосовуються дві схеми процесу, які відрізняються характером прикладання навантаження або напруження впродовж циклу зварювання. В одній найбільш широко поширеній використовується постійне навантаження за величиною нижче межі текучості. Процеси, що розвиваються у зварюваних матеріалах, аналогічні повзучості. Така технологія називається дифузійним зварюванням за схемою вільного деформування. За іншою схемою навантаження та пластична деформація відбувається з певною контрольованою швидкістю (зварювання за схемою примусового деформування) [9,10].

При зварюванні за схемою примусового деформування цикл зварювання можна чітко обмежити макроеластичною стадією I або припинити в будь-який момент стадії пластичного деформування II або на стадії витримки та релаксації

напружень III (коли немає істотного приросту пластичної деформації), тобто зварку з примусовим деформуванням можливо проводити і при механічних напруженнях, що перевищують межу текучості (Рис. 1).

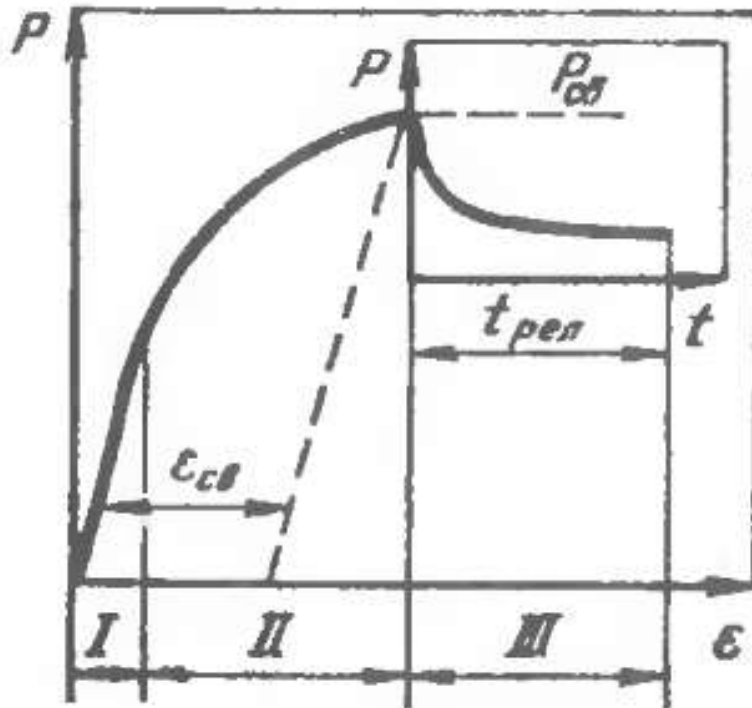


Рис. 1. Діаграма деформування матеріалу

Інтенсифікація процесу зварювання

Ще однією з найбільш ефективних схем з точки зору інтенсифікації процесу утворення фізичного контакту є циклічна зміна зварювального тиску [1, 4, 9]: 1) стискання з певним тиском P_1 та витримка тривалістю t_1 ; зняття тиску P_1 на час t_2 ; 2) повторне стискання $P_2=P_1$, $t_3=t_1$; зняття тиску P_2 на час $t_4=t_2$ і т.д. Така схема навантаження суттєво збільшує ступінь пластичної деформації металу в порівнянні зі статичним впливом навантаження.

Додатковими методами інтенсифікації дифузійних процесів у зоні зварювання можуть бути застосування до зварюваних деталей перпендикулярно дії зварювального тиску розтягувальних зусиль, а також використання вібраційних коливань ультразвукової частоти або ударного зварювального тиску або іонізуючих випромінювань (потокелектронів) [10]. Кожен з цих додаткових методів інтенсифікації процесу зварювання має ряд переваг, проте ці методи потребують наявності дуже складного та дорогого спеціалізованого обладнання. На практиці ще одним найбільш ефективним способом інтенсифікації процесу дифузійного зварювання, який дозволяє вирішувати цілий комплекс проблем з'єднання, є застосування проміжних прошарків.

Для керування структурою і властивостями зварного з'єднання можна застосовувати і термомеханічну обробку, поєднану з процесом зварювання або після зварювання (наприклад, гомогенізуюче відпалювання) [11, 12]. Зварювані



поверхні перед зварюванням повинні бути механічно оброблені з чистотою поверхні $R_a \leq 1.25 \mu\text{m}$. Безпосередньо перед зварюванням деталі проходять очистку від жирових та інших забруднень, а також оксидів методами електрохімічної або хімічної обробки (травлення, знежирення, електрополірування). Такій же обробці повинні піддаватися і матеріали використовуваних проміжних шарів із фольги. Ефективним методом є використання електричного розряду безпосередньо в робочій камері перед зварюванням.

Наразі за допомогою дифузійного зварювання вже можна з'єднувати більшість конструкційних металів та їх сплавів, як однорідних, так і різнорідних, включаючи матеріали з різко відмінними властивостями [13, 14, 15]. Вже опрацьовані технології з'єднання понад 800 видів пар різних матеріалів. При з'єднанні дифузійним зварюванням однакових матеріалів структура і властивості з'єднання не відрізняються від основного матеріалу. Композитні матеріали, зміцнені дисперсними частинками або волокнами можна піддавати дифузійному зварюванню, не порушуючи структуру зміцнюючої фази і не знижуючи ефективність зміцнення, а також максимально зберігаючи початкову структуру. При з'єднанні пар різних і композиційних матеріалів дуже часто використовуються проміжні прошарки на основі високоактивних енергонасичених металевих матеріалів. Проміжні прошарки (фольгові, порошкові, гальванічні та напилени покриття) можуть бути плавкими і не плавкими. Застосування проміжних прошарків дозволяє знизити температуру процесу та полегшити стискання мікровиступів у контакті та з'єднуваних активацію поверхонь. При зварюванні матеріалів, що утворюють у контакті при температурі процесу зварювання інтерметалічні фази в першу чергу необхідно застосування особливих бар'єрних прошарків. Міцність усього з'єднання визначається міцністю фольги. Для цього використовуються досить товсті 100-500 μm (одношарові та багатошарові) фольгові прошарки і покриття, а також їх комбінації, сумісні з кожним із з'єднуваних матеріалів, і служать для запобігання утворенню інтерметалідів у зоні з'єднання. Проміжні прошарки з пластичних матеріалів (Ni, Cu, Ti, Al та інші) частіше використовуються для інтенсифікації пластичної деформації, коли з'єднувані матеріали дуже жорсткі та мають обмежену деформаційну здатність у інтервалі режимів зварювання (жароміцні матеріали, а також коли з'єднувані поверхні недостатньо добре сполучаються. Та ж мета досягається застосуванням порошкових прошарків, виготовлених попереднім формуванням у вигляді закладних елементів (стрічок, прокладок) з промислових порошків (наприклад Cu, Ni, Ti та ін. з розміром частинок 50-100 μm) або ультрадисперсних порошків (частинки $\leq 1 \mu\text{m}$). Більш товсті пластичні проміжні шари необхідні і у випадку, коли з'єднувані матеріали мають дуже різне теплове розширення. Такі прошарки компенсують залишкові напруги і попереджають самовільне руйнування з'єднань після охолодження. У процесі дифузійного зварювання можуть застосовуватися і спеціальні плавкі прошарки (у вигляді покриттів, фольги та порошкових сумішей) з температурою плавлення нижче температури плавлення зварюваних матеріалів. Наявність рідкої фази у зоні контакту дозволяє знизити деформуюче навантаження та температуру зварювання, що актуально при з'єднанні важкодеформованих та жароміцних, а також складнолегованих матеріалів. Як матеріали для плавких

проміжних шарів в основному використовуються припої та оксиди лужних металів, що взаємодіють з оксидною плівкою та поверхнею з'єднуваного матеріалу. У більшості випадків рідка фаза сприяє очищенню поверхні (відділенню, диспергуванню та розчиненню оксидних плівок, а також вичавлюванню їх із зони контактування) як при пайці, а також змочуванню з'єднуваних поверхонь. Основним недоліком даної методики є низька якість і міцність з'єднання, що відповідає за властивостями паяним з'єднанням. Існує ще один спосіб створення з'єднання через рідкий проміжний шар, що утворюється при евтектичній температурі в результаті сплавлення матеріалу, що входить до його складу і приконттактних обсягів зварюваних матеріалів. У цьому випадку в системі основний матеріал-евтектичний проміжний шар немає явної межі поділу структури та фізико-хімічних та механічних властивостей, характерних системі основний матеріал-припій. Евтектичний сплав основного матеріалу з проміжним шаром має властивості обох матеріалів. Як проміжні прошарки у вигляді покриттів також в основному застосовуються тонкі 5-10 μm покриття, нанесені гальванічним, хімічним або термовакуумним методами на одну або обидві деталі. Якість з'єднань, отриманих з використанням проміжних гальванічних або напилених покриттів, багато в чому залежить від їхньої адгезії до основного матеріалу. У свою чергу, рівень адгезії визначається якістю підготовки поверхні під покриття. Для забезпечення необхідного зчеплення важливим є схожість структур основного і осаджуваного металів. Більше того, взаємна дифузія металів основи і покриття сприяє їх надійному зчепленню як при нанесенні шару, так і в процесі зварювання, якщо дифузія супроводжується утворенням твердого розчину. За електропровідністю, твердістю, наявністю внутрішніх напруг, магнітними та іншими властивостями гальванічні покриття відрізняються від металів, отриманих кристалізацією з розплавів. Шари, осаджені гальванічним методом, зазвичай мають волокнисту, ниткоподібну або стовпчасту структуру. Дані покриття можуть застосовуватися в основному для захисту з'єднуваних матеріалів (до складу яких входять активні по відношенню до кисню елементи Cr, Al та інші) від окиснення у процесі нагріву. Для цього найчастіше застосовують Cu або Ag покриття. Для запобігання приварюванню до оснастки можуть застосовуватися покриття на основі оксиду алюмінію або сумішей на основі акрилової смоли і полівінілового спирту, бензолу, ацетону та інших розчинників. Як ізолюючі прошарки також можуть застосовуватися слюда, алунд, карбо нітрид бору, кераміка, термостійкі ткани матеріали та склотканини.

Висновки

Робочими середовищами в залежності від зварюваних матеріалів ступінь розрідження у вакуумній камері вибирається в межах $1,3-1,6 \cdot 10^{-4}$ Па. При зварюванні сплавів на основі міді та нікелю вимоги до залишкового тиску бувають найменш жорсткими. Присутність хрому, алюмінію, титану, вольфраму та інших активних елементів призводить до необхідності зниження залишкового тиску. Як контрольовані атмосфери в основному застосовують аргон або гелій, очищений та осушений водень або суміш азоту з 6-8 % водню. Склад сольових ванн для дифузійного зварювання визначається необхідною температурою процесу, наприклад NaCl використовується при температурі 850-870° C, BaCl₂ – 1000-1150° C, 70% BaCl₂+ 30% KCl – 700-950° C.



При зварюванні за схемою примусового деформування основними параметрами зварювання є температура T , швидкість зростання навантаження P , швидкість деформування ϵ , час деформування t або ступінь накопиченої деформації ϵ . При зварюванні за схемою вільного деформування основними параметрами, що впливають на міцність з'єднання є робоча температура T , тиск p , час витримки t або ступінь залишкової деформації ϵ . Температуру зварювання вибирають у межах $0,7-0,8 T$ плавлення, іноді і більш низьку $0,5 T$ плавлення. Швидкості нагріву та охолодження залежать від джерела тепла і у більшості випадків не регламентуються. При зварюванні різномірних матеріалів швидкість охолодження доцільно зменшувати до $10-15 \text{ C/хв}$. Розгерметизацію камери після зварювання кольорових і активних металів рекомендується проводити при температурах нижче 60° C . Тиск стиснення в основному вибирається у діапазоні $0,8-0,9$ межі плинності при температурі зварювання. Час витримки вибирається в залежності від температури, тиску, допустимої залишкової деформації, чистоти обробки контактних поверхонь. Час дифузійного зварювання може коливатися від кількох секунд до кількох годин.

Незважаючи на очевидні значні успіхи в розвитку дифузійного зварювання, ще є багато невирішених питань, які складно, а в ряді випадків і неможливо вирішити в рамках традиційних схем і підходів. Це стосується, наприклад, з'єднання магнітних і аморфних сплавів, п'єзо- і оптокераміки, а також напівпровідникових і композитних структур, коли вплив температур вище $0,7 T$ плавлення і зварювальних тисків понад $0,8$ межі плинності призводить до необоротних змін вихідних властивостей зварюваних матеріалів або їх руйнування. Тому основним напрямком досліджень у галузі розробки нових технологій дифузійного зварювання сучасних матеріалів є пошук методів інтенсифікації процесу дифузійного зварювання, які дозволили б отримувати високоякісні зварні з'єднання і при нижчих температурах ($0,2-0,3 T$ плавлення і зварювальних тисках, що виключають макропластичну деформацію приконттактних областей. Ці напрями досліджень є дуже актуальними та перспективними для вирішення таких важливих завдань, як нероз'ємне з'єднання найновіших мікро- та нанокомпозитних суперміцних провідників та надпровідників.

Список використаних джерел:

- [1] Dodin, M. G. (1981). Welding Mechanisms of Plastics: A Review. *The Journal of Adhesion*, 12(2), 99–111. <https://doi.org/10.1080/00218468108071192>
- [2] Williams, N. T., & Parker, J. D. (2004). Review of resistance spot welding of Steel Sheets Part 1 modelling and control of Weld Nugget Formation. *International Materials Reviews*, 49(2), 45–75. <https://doi.org/10.1179/095066004225010523>
- [3] Uday, M. B., Ahmad Fauzi, M. N., Zuhailawati, H., & Ismail, A. B. (2010). Advances in friction welding process: A Review. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(7), 534–558. <https://doi.org/10.1179/136217110x12785889550064>
- [4] Messler, R. W. (2004). Joining of materials and structures: From pragmatic process to enabling technology. Elsevier.
- [5] Messler, & Savage, W. (2014). Joining of advanced materials. Elsevier Science.
- [6] K. Jassim, "Magnetic pulse welding technology," 2010 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ), Basrah, Iraq, 2010, pp. 363-373.



- [7] Kang, B.-Y. (2015). Review of Magnetic Pulse Welding. *Journal of Welding and Joining*, 33(1), 7–13. <https://doi.org/10.5781/jwj.2015.33.1.7>
- [8] Kapil, A., & Sharma, A. (2015). Magnetic Pulse Welding: An efficient and environmentally friendly multi-material joining technique. *Journal of Cleaner Production*, 100, 35–58. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.042>
- [9] Owczarski, W. A. (1965). Diffusion Welding. *SAE Transactions*, 73, 537–548. <http://www.jstor.org/stable/44553831>
- [10] Aydin, K., Kaya, Y., & Kahraman, N. (2012). Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper. *Materials & Design*, 37, 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.026>
- [11] Zavdoveev, A., Poznyakov, V., Baudin, T., Heaton, M., Kim, H. S., Acquier, P., Skory, M., Rogante, M., & Denisenko, A. (2021). Welding thermal cycle impact on the microstructure and mechanical properties of Thermo–Mechanical Control Process Steels. *Steel Research International*, 92(6). <https://doi.org/10.1002/srin.202000645>
- [12] Górka, J. (2018). Assessment of steel subjected to the thermomechanical control process with respect to weldability. *Metals*, 8(3), 169. <https://doi.org/10.3390/met8030169>
- [13] Kolařík, L., Janovec, J., Kolaříková, M., & Nachtnebl, P. (2015). Influence of diffusion welding time on homogenous steel joints. *Procedia Engineering*, 100, 1678–1685. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.543>
- [14] Jafarian, M., Khodabandeh, A., & Manafi, S. (2015). Evaluation of diffusion welding of 6061 aluminum and AZ31 magnesium alloys without using an interlayer. *Materials & Design* (1980–2015), 65, 160–164. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.020>
- [15] Zhang, J., Shen, Q., Luo, G., Li, M., & Zhang, L. (2012). Microstructure and bonding strength of diffusion welding of Mo/cu joints with Ni interlayer. *Materials & Design*, 39, 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.032>

OVERVIEW OF THE FEATURES AND POSSIBILITIES OF DIFFUSION WELDING OF VARIOUS MATERIALS AND MODERN METAL COMPOSITE MATERIALS

Paulius Beinoras

PhD student, Faculty of Mechanics

Vilnius Gediminas Technical University. Lithuania

Oleksandr Kapustynskyi

Dr., Faculty of Mechanics

Vilnius Gediminas Technical University. Lithuania

Nikolaj Višniakov

Dr., Institute of Mechanical Science

Vilnius Gediminas Technical University. Lithuania

Summary. The process of pressure welding involves the formation of joints through the combined plastic deformation of materials, with heat acting as an auxiliary factor. Diffusion welding, a subset of pressure welding methods, operates below the melting temperature and avoids issues such as cracks and residual stresses. It is often performed in a vacuum or controlled atmosphere to prevent oxidation. Two main approaches are used: free deformation and forced deformation. Various techniques, such as cyclic pressure variation, application of stretching forces, and use of ultrasonic vibrations, can intensify the welding process. The application of intermediate layers, both fusible and non-fusible, is particularly effective. Despite advancements, challenges remain in welding materials like magnetic alloys and piezoceramics, necessitating further research into low-temperature diffusion welding methods.

Keywords: pressure welding, diffusion welding, low-temperature welding

The scientific periodical

GRAIL OF SCIENCE

№ 42 (August, 2024)

with the proceedings of the
III Correspondence International Scientific
and Practical Conference «Science in motion:
classic and modern tools and methods in scientific
investigations» held on August 2nd, 2024
by NGO European Scientific Platform (Vinnytsia,
Ukraine) and LLC International Centre
Corporative Management (Vienna, Austria).

Journal's frequency: monthly

*All materials are reviewed. The editorial office did not
always agree with the position of authors. Authors are
responsible for the accuracy of the material.*

Contacts of the editorial offices:

1. 21037, Ukraine, Vinnytsia, Zodchykh str. 18, office 81;
NGO «European Scientific Platform» *[Owner of the journal]*
Tel.: +38 098 1948380; +38 098 1526044
E-mail: info@ukrlogos.in.ua
Certificate of the subject of the
publishing business: ДК № 7172 of 21.10.2020.
2. 24004, Ukraine, Mohyliv-Podilskyi,
Nezalezhnosti avenue 301, office 117;
SI «Institution of Scientific and Technical
Integration and Cooperation» *[Owner of the journal]*
3. 1110, Österreich, Wien, Simmeringer Hauptstraße 24;
LLC «International Centre Corporative Management»
E-mail: rachael.a@iccm.org

Signed for publication 02.08.2024.
Format 70×100/16. Offset paper.
Arial & Open Sans typefaces.
Digital printing. Circulation of 100 copies.
Conventionally printed sheets 42,09.

Order № 24/008.

Printed from the finished original layout.

Publisher [printed copies]:
LLC «UKRLOGOS Group».
21037, Ukraine, Vinnytsia, Zodchykh str. 18, office 81.
Certificate of the subject of the
publishing business: ДК № 7860 of 22.06.2023.

Наукове періодичне видання

ГРААЛЬ НАУКИ

№ 42 (серпень, 2024)

за матеріалами III Міжнародної науково-
практичної конференції «Science in motion:
classic and modern tools and methods
in scientific investigations»,
що проводилася 2 серпня 2024 року
ГО «Європейська наукова платформа»
(Вінниця, Україна) та ТОВ «International Centre
Corporative Management» (Відень, Австрія).

Щомісячне видання

*Всі матеріали пройшли рецензування.
Редакція не завжди поділяє позицію авторів. За точність
викладеного матеріалу відповідальність несуть автори.*

Контактна інформація редакції:

1. 21037, Україна, м. Вінниця, вул. Зодчих, 18/81;
ГО «Європейська наукова платформа» *[власник журналу]*
Тел.: +38 098 1948380; +38 098 1526044
E-mail: info@ukrlogos.in.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої
справи: ДК № 7172 від 21.10.2020.
2. 24004 Україна, м. Могилів-Подільський,
пр-т. Незалежності, 301/117;
НУ «Інститут науково-технічної
інтеграції та співпраці» *[власник журналу]*
3. 1110, Österreich, Wien, Simmeringer Hauptstraße 24;
LLC «International Centre Corporative Management»
E-mail: rachael.a@iccm.org

Підписано до друку 02.08.2024.
Формат 70×100/16. Папір офсетний.
Гарнітура Arial & Open Sans.
Цифровий друк. Тираж: 100 примірників.
Умовно-друк. арк. 42,09.

Замовлення № 24/008.

Віддруковано з готового оригінал-макету.

Виготовлювач [друкованої продукції]:
ТОВ «УКРЛОГОС Груп»
21037, Україна, м. Вінниця, вул. Зодчих, 18, офіс 81.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 7860 від 22.06.2023.