

## Реферати статей з журналу

«Welding in the World», №5, 2020 р.\*

**Вплив поверхневих шарів на опору контактної приєднання частково затверділої сталі 22MnB5 з алюмінієво-кремнієвим та цинковим покриттям.** *O. Sherepenko, V. Schreiber, I. Schischin, M. Wohnner, P. Wernlein, N. Mitzschke & S. Jüttner*, pp. 755–771

Одним із методів досягнення локальної зміни властивостей матеріалу при виробництві деталей високої міцності з урахуванням механічних властивостей є зміна температури в печі до гарячого тиснення. Це спричиняє зміни в розвитку поверхневих шарів сталі з покриттям і, отже, різниці в контактних опорах, які визначають розвиток тепла в процесі зварювального опору. Для більш глибокого розуміння впливу поверхневі шари на процес зварювання досліджували деталі з температурними історіями, типові для промислово виготовлених деталей з гарячим штампуванням і алюмінієво-кремнієвим та цинковим покриттям. Визначено статичний контактний опір; проведено вимірювання динамічних опорів у зварювальному процесі. Діапазони струмів зварювання визначалися для різних термічно оброблених заготовок. Не виявлено кореляції між статичним контактним опором та діапазоном зварювального струму; однак для покриття з Zn діапазон зварювального струму переміщувався до менших зварювальних струмів і скорочувався для вимірюваного загального статичного контактного опору близько 4000 мкОм. Для алюмінієво-кремнієвого покриття не було видно залежності між діапазоном зварювального струму та опором статичного контакту. Для сталі з покриттям Al–Si був розроблений новий критерій, заснований на частці резистивних фаз у поверхневому шарі, визначеній металографічними дослідженнями, що дозволяє визначити придатність матеріалу.

**Вплив параметрів процесу зварювання тертям з перемішуванням на мікроструктуру, теплові поля та утворення дефектів у стикових з'єднаннях сплаву AA7075-T6.** *D. Ambrosio, V. Wagner, C. Garnier, D. Jacquin, A. Tongne, M. Fazzini, O. Cahuc & G. Desein*, pp. 773–784

У цьому дослідженні зосереджено увагу на впливі параметрів процесу на дефектність, теплове поле та розмір зерен при зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву 7075-T6. Зварні зразки були отримані при різних швидкостях обертання інструмента та швидкостях зварювання. У першій частині аналізу якість швів

\* «Welding in the World», Vol. 64, Issue 5

оцінювали за допомогою мікроскопічного спостереження поперечних перерізів з'єднань для дослідження зміни форми перемішаних зон та виникнення внутрішніх порожнеч. Після цього вимірювали температуру та розмір зерна швів, отриманих зі швидкістю зварювання 60 мм/хв., для вивчення впливу швидкості обертання інструмента на тепловиділення. Вимірювання температури проводилось за допомогою термопар та інфрачервоної камери. Еволюція розміру зерна матеріалу була проаналізована за допомогою оптичних спостережень поперечних перерізів з'єднань, а середній розмір зерна в зоні ядра (NZ) був оцінений за допомогою дифракції зворотного розсіювання електронів. В цілому результати досліджень свідчать, що початкові внутрішні дефекти виникають в зоні набігання між робочою поверхнею бурта і ядром шва. У швах, отриманих при швидкостях обертання інструмента від 800 до 1400 об/хв., максимальна температура підвищилася на 5...15 % залежно від зони вимірювання, в той час як розмір зерна в зоні перемішування збільшився від 2,0 до 3,6 мкм. В цілому показано, що умови для виникнення дефектів обумовлені низьким тепловкладенням, яке й спричиняє в процесі зварювання неправильний потік матеріалу.

**Вплив глибини занурення та часу перебування на мікроструктуру та механічні властивості алюмінієвого сплаву 6061, звареного методом контактної зварювання тертям.** *O. Zareie, S.M. Mousavizade, H.R. Ezatpour, H. Zareie & N. Farmanbar*, pp. 785–805

Штифтовий інструмент, застосовуваний при звичайному зварюванні при фрикційному контактному зварюванні, створює замкову щілину, яка знижує якість поверхні зварних швів і негативно впливає на корозійну стійкість та механічні властивості. У цій роботі для зварювання тонких аркушів AA6061 товщиною 1 мм застосовується простий метод зварювання при фрикційному терті, що дозволяє запобігти утворенню замкових щілин. Швидкість обертання інструменту є постійною, а час перебування встановлюється як 4, 6 та 8 с з різною глибиною занурення 0,1, 0,14 та 0,18 мм. Макроструктура, мікроструктура та механічні дослідження використовуються для вказівки оптимальних умов обробки. На механічні властивості впливають середній розмір зерна СЗ та геометричні параметри, такі як глибина СЗ, довжина та площа стику, товщина стику та ефективна товщина верхнього листа зварних зразків. Результати вказу-

ють на максимальне пікове навантаження при 8 с – 0,18 мм (4495 Н) та максимальну енергію відмови при 4 с – 0,1 мм (5,5 Дж) та 8 с – 0,18 мм (5,6 Дж).

**Вплив зварювальних напружень на схильність до розтріскування при термообробці стійкої до повзучості сталі 13CrMoV. Частина II: механізми розтріскування при знятті напружень при термообробці після зварювання.** *A. Kromm, T. Lausch, D. Schroepfer, M. Rhode & T. Kannengiesser*, pp. 819–829

Зварювання ванадієвої сталі 13CrMoV9-10 вимагає обережності через підвищену сприйнятливості до розтріскування при знятті напружень під час післязварювальної термообробки. Попередні дослідження утворення тріщин в стійких до повзучості сталях були зосереджені на термічних і металургійних факторах; однак було зібрано мало знань про тріщиноутворення під час післязварювальної термообробки з урахуванням обмежених умов. Ця робота складається з двох частин. У частині I показано, що збільшення теплового потоку при дуговому зварюванні під флюсом в умовах обмеження усадки призводить до підвищення рівня напруження в з'єднанні до термічної обробки після зварювання. Величина розтріскування при знятті напружень, що спостерігається в зоні термічного впливу після післязварювальної термообробки, залежить від підведеного тепла. У частині II цієї роботи були вивчені тріщини і пов'язана з ними мікроструктура, що виникли в умовах релаксації напружень. Застосування спеціального акустико-емісійного аналізу показало, що тріщини утворюються в діапазоні температур від 300 до 500 °C в процесі післязварювальної термообробки. Ударна в'язкість в зоні термічного впливу оброблених швів залежала від зварювального тепла, що підводилося. Мікроструктурний аналіз всіх зразків виявив прискорене старіння за рахунок осадження карбідів при післязварювальної термообробці в умовах релаксації напружень.

**Вплив конструкції екрануючої газової насадки на розподіл щільності потужності в зварювальних дугах низького струму.** *S. Egerland, P. Colegrove & S. Williams*, pp. 831–845

Досліджено зміну діаметра екрануючого газового сопла та її вплив на анодний розподіл потужності дуг низького струму вольфрамових інертних газів, зберігаючи або захисну швидкість потоку газу, або постійну швидкість потоку. Крім того, були вивчені ефекти стану анодної поверхні та типу поведінки потоку (ламінарного або турбулентного), спричиненого застосованим екрануючим газовим соплом. Було встановлено, що дуги зварювального струму потужністю 50 А були дуже нестабільними для розгортання використуваних умов, тоді як збільшення електрич-

ного струму дуги до 100 А призвело до поліпшення стійкості дуги. Як було виявлено в попередніх дослідженнях, негаусські профілі розподілу мали місце при 50 А, навіть при вдосконаленому екрануванні. Максимальні щільності потужності були виявлені зміщеними від осі дуги.

**Вплив детермінованої випаровуванням моделі дуго-катодного зв'язку на формування басейну зварного шва при моделюванні процесу GMAW.** *O. Mokrov, M. Simon, R. Sharma & U. Reisgen*, pp. 847–856

В даний час використовуються підходи для моделювання катодного введення тепла при моделюванні дугового зварювання (GMAW), які, як правило, базуються на дуже спрощених підходах, використовуючи або розподілений тепловий потік Рікалін-Розенталь, або підхід теплопровідності, який не відображає глибокого фізичного залучення у процес. У цій роботі представлений новий підхід до розрахунку дуго-катодного з'єднання при GMAW та досліджено вплив зміни параметрів на формування зварного басейну. Модель, що визначається випаровуванням, для дуго-катодного з'єднання (EDACC) враховує останні дані про температуру плазми в дузі GMAW, в якій переважають пари металу, а також випаровування металу, яке легко іонізується в області катода. Він визначає залежність між температурою поверхні зварного басейну і потоком тепла, а також розподілом щільності струму. В результаті тепловий потік, а також розподіл щільності струму не є осесиметричним. У цій роботі модель була поєднана зі спрощеним моделюванням басейну зварних швів, а також досліджено вплив таких параметрів моделі, як розподіл температури плазми та швидкість зварювання. Крім того, було вивчено також вплив крапель на розподіл температури поверхні зварного басейну та його вплив на прикріплення дуги-катода, визначене моделлю.

**Застосування методу зварювання MIG імпульсної плазми для з'єднання Al/сталь.** *Sarizam Bin Mamat, Shinichi Tashiro, Mohamad Najmi Masri, Seong Min Hong, Hee-Seon Bang & Manabu Tanaka*, pp. 857–871

Дугове зварювання з'єднань алюмінію та сталі зазвичай супроводжується утворенням крихких інтерметалічних сполук (ІМК) на межі алюмінієвої сталі. Оскільки утворення ІМК тісно пов'язане з надходженням тепла в основні метали, існує гіпотеза, що здатність регулювати вхід тепла дозволить контролювати товщину ІМК. У даній роботі пропонується використовувати імпульсну плазмову систему MIGW для регулювання подачі тепла в процесі зварювання. Для порівняння стійкості крапель зварної плазми MIGW з імпульсною системою MIGW використувався тіннограф. Було

встановлено, що плазмовий MIGW генерував регулярний вхід тепла в основний метал завдяки гладкості відшарування крапель і призводив до утворення ІМК рівномірної товщини. Приєднання Al/сталі проводилося з використанням як імпульсних плазмових MIGW, так і імпульсних систем MIGW, і отримані ІМК утворення та товщини оцінювали. Було встановлено, що утворення та товщина ІМС в зварюванні, що відрізняється від Al/сталь, можна контролювати за допомогою імпульсної плазми MIGW. Його нижча температура крапель і знижена швидкість охолодження під час зварювання пригнічували б утворення  $Fe_2Al_5$  та  $FeAl_3$ , і, таким чином, зменшували б загальну товщину ІМС на з'єднувальній поверхні.

**Розробка високопродуктивного процесу гарячого дроту GMAW з використанням двовимірного відхилення дуги.** *E. Spaniol, M. Trautmann, T. Ungethüm, M. Hertel, U. Füssel, P. Henckell & J. P. Bergmann*, pp. 873–883

Процеси газового дугового зварювання (GMAW) застосовуються в широкому діапазоні застосувань завдяки їх високій продуктивності та гнучкості. Тим не менш, поставлений плавильний провідний електрод призводить до з'єднання матеріалу та введення тепла. Тому збільшення швидкості плавлення співвідноситься із збільшенням тепловіддачі дуги одночасно. Можливість відокремити подачу матеріалу та тепла – використовувати додатковий провід, що зменшує проникнення та погіршує поведінку змочування. Отже, можуть виникати нерівності валика, також дефекти з'єднання або недостатнє зварювання кореня. У контексті цієї статті представлена система керування двовимірним відхиленням магнітної дуги, що дозволяє впливати на положення дуги, а також на передачу матеріалу. Проаналізований процес гарячого дроту GMAW характеризується високою швидкістю плавлення, одночасно усвідомлюючи достатню глибину проникнення та змочування.

**Дослідження високошвидкісного GMAW за допомогою складеного зовнішнього магнітного поля.** *Qiang Chen, Ji Chen, Sufen Lu, Yanteng Zhang & Chuansong Wu*, pp. 885–901

Для регулювання поперечного та зворотного потоку зварного басейну для високошвидкісного газового дугового зварювання (GMAW) запропоновано магнітогенеруючий пристрій. Сполучне зовнішнє магнітне поле (ЕРС) моделювалось для перевірки доцільності розробленого магнітогенеруючого пристрою. Найвища швидкість зварювання з гарним виглядом зварювального шару складала 1,7 м/хв при швидкості подачі дроту 9,0 м/хв при застосуванні суміші ЕМП. Вплив сполуки ЕРС на рух дуги та краплі було вивчено системою збору зображень. Проаналізовано механізм придушення скла-

дової ЕРС на підрізному дефекті високошвидкісного GMAW. Механізм впливу застосовуваної суміші ЕРС на різні швидкості зварювання та зварювальні струми вивчався за допомогою застосування зварюваного технологічного процесу зварювання за допомогою ЕРС, а також реалізована недорога, якісна та швидкісна технологія зварювання.

**Оцінка результатів випробувань та критерії ранжування для Vareststraint випробування аустенітного високотемпературного сплаву.** *M.M. Johansson, P. Stenvall, L. Karlsson & J. Andersson*, pp. 903–912

Тестування Vareststraint зазвичай використовується для оцінки сприйнятливості матеріалів до гарячого розтріскування. У цій роботі вивчається залежність операторів та методики оцінки результатів випробувань для високотемпературної аустенітної нержавіючої сталі (UNS S31035). Зразки тестували на шести різних рівнях деформації, коливаючись від 0,7 до 3,8%. Чотири різні оператори оцінювали одні й ті ж зразки, дотримуючись тих же інструкцій щодо вимірювання тріщин вручну в оптичному мікроскопі при збільшенні  $\times 25$ . Найбільша розбіжність серед оцінок операторів була виявлена для низьких рівнів деформації, де було виявлено мало невеликих тріщин. Крім того, один з чотирьох операторів використовував аналіз зображення для оцінки зразків при збільшенні  $\times 50$ . Середня загальна довжина тріщин та загальна кількість тріщин у зоні плавлення та зоні ураження теплом були приблизно в 1,5 рази вищими при використанні аналізу зображень порівняно з ручним оцінюванням. Аналіз зображення при  $\times 50$  дозволив виявити менші тріщини порівняно з ручним оцінюванням при збільшенні  $\times 25$ , сприяючи збільшенню кількості виявлених тріщин. Максимальна довжина тріщини за допомогою аналізу зображень при  $\times 50$  була схожа на ручну оцінку, зроблену при збільшенні  $\times 25$ , і був критерієм, який показав найменші зміни в цьому дослідженні. Однак необхідні подальші порівняння з використанням інших збільшень для перевірки відповідності ручного оцінювання та аналізу зображень, виявленого в цьому дослідженні. Перевага при оцінці за допомогою аналізу зображень полягає в тому, що він забезпечує простежувані результати. Гармонізований стандарт для тестування Vareststraint, і особливо для оцінки, зменшить розходження між операторами та лабораторіями.

**Поверхневе та об'ємне дослідження впливу різних параметрів Vareststraint випробувань та хімічних складів на кристалізаційне розтріскування у LTT присадних металах.** *M. Thomas, F. Vollert, J. Weidemann, J. Gibmeier, A. Kromm & T. Kannengießer*, pp. 913–923

Предметом цього дослідження є те, як і в якій мірі результати тесту Vareststraint/Transvareststraint залежать як від параметрів тестування, так і від ха-



рактистик методів оцінювання. Кілька різних високолегованих мартенситних ЛТТ (низької температури трансформації) наповнювачів, типу CrNi та CrMn, були відібрані для дослідження через їх досить характерну поведінку тріщиноутворення при затвердінні, яка викликала інтерес після попередніх досліджень. По-перше, вплив різних наборів параметрів процесу на реакцію розтріскування при твердінні вимірювався за допомогою стандартних підходів. Згодом на зразках було проведено мікрофокусну рентгенівську комп'ютерну томографію ( $\mu$ СТ). Отриманні результати показують значне підповерхнє розтріскування, але різного ступеня. Було виявлено різні типи первинного за-

твердіння за допомогою дисперсійного рентгенівського (WDX) дисперсійного аналізу, проведеного на металевих наповнювачах із різними еквівалентними співвідношеннями Cr/Ni. Цей аспект розглядається як головна відмінність матеріалів типу CrNi- і CrMn у питаннях розтріскування. Результати показують, що, якщо мова йде про випробування сучасних високоефективних сплавів, один набір стандартних параметрів тестування Varestraint може бути не однаково придатним для всіх матеріалів. Крім того, для правильного пристосування різних типів затвердіння необхідно враховувати підповерхнє розтріскування.

## Реферати статей з журналу

### «Welding in the World», №6, 2020 р.\*

**Вплив параметрів геометрії крайки шва на клас FAT, отриманих за допомогою моделювання на основі механіки руйнування.** *B. Schork, Uwe Zerbst, Y. Kiyak, M. Kaffenberger, M. Madia & M. Oechsner*, pp. 925–936

Підхід IBESS, заснований на механіці руйнування, застосовується для визначення класів FAT стикових швів з ініціюванням тріщин уздовж крайки шва. Метою є дослідження впливу геометричних параметрів шва - радіусу переходу на основний метал, кут нахилу (змочування), посилення та вторинних виїмок, таких як шорсткість або підрізи. Вплив цих параметрів обговорюється як індивідуально, так і в поєднанні; однак виключаючи статистичні розподіли їх та суттєві дані. Результати, порівняні зі звичайними класами FAT для стикових швів, є обнадійливими щодо потенційного внеску IBESS у обговорення більш просунутих критеріїв якості зварних швів. Для цього пропонуються вимоги до подальших досліджень.

**Вплив числової апертури на характеристики розплавленої ділянки при мікроз'єднанні скла пікосекундним імпульсним лазером.** *Y. Okamoto, Z. Ouyang, T. Fujiwara & A. Okada*, pp. 937–947

Скляні вироби з точними та витонченими формами дуже затребувані в галузі MEMS завдяки своїм чудовим властивостям. Очікується, що ультракороткий імпульсний лазер буде потужним і надійним інструментом для мікрозварювання скла. Умови фокусування, такі як числова апертура (N.A.), є критичним параметром, який контролює, як ультракороткі лазерні імпульси взаємодіють і поширюються у склі, і він має великий вплив на характеристики лазерного мікрозварювання скла. Для того, щоб дослідити якість зварювального процесу, важливо зрозуміти залежність механічної міцності розплавленої площі, створеної в зразку скла при різній числовій апертурі. Тому механічну міц-

ність розплавленої ділянки з різними числовими апертурами оцінювали при мікрозварюванні скла пікосекундним імпульсним лазером. Більш високу міцність на вигин можна отримати при відповідному співвідношенні об'єму розплавленої площі та зразка скла, коли утворюються безперервні розплавлені ділянки. Крім того, висока щільність і великий розмір розплавленої ділянки без тріщин призвели до більш високого напруження розриву. Зроблено висновок, що покращені характеристики фокусування, такі як N.A. 0,65, сприяють утворенню довгої області високої щільності потужності на осі променя, яка може забезпечити як високу механічну міцність, так і високу швидкість обробки.

**Дослідження впливу шорсткості поверхні на мікроструктурні та механічні властивості дифузійного з'єднання між різними магнієвими AZ91-D та алюмінієвими AA6061 сплавами.** *M. Rezaei, A. H. Jabbari & M. Sedighi*, pp. 949–962

Вивчено вплив шорсткості поверхні на мікроструктурні та механічні властивості дифузійного з'єднання у твердій фазі між двома різнорідними сплавами магнію AZ91-D та алюмінію 6061 за допомогою гарячого пресування. Хоча прикладені тиск, температура та тривалість дифузійного з'єднання відомі як найбільш ефективні параметри, шорсткість поверхні може помітно змінити механічні та мікроструктурні властивості, якими зазвичай нехтують. Для дослідження впливу шорсткості поверхні в діапазоні 0,06...0,15 мкм було проаналізовано ширину дифузійного з'єднання в зоні міжфазного переходу та наявність інтерметалідних фаз. Крім того, оцінювали мікротвердість, міцність на зріз та поверхню руйнування. Результати показують, що в дослідженому діапазоні шорсткості ширина та мікротвердість з'єднань поліпшуються за рахунок збільшення шорсткості поверхні обох металів; однак сила зрізу зменшилась. Це може

бути пов'язано з більшим руйнуванням оксидних плівок на металевих поверхнях у більш грубих зразках, а також збільшенням ефективної площі взаємодії під час процесу. Отже, було більше вірогідності на алюмінієво-магнієві контакти, що призведе до більшої дифузії, подальшого утворення крихких інтерметалідних фаз (таких як  $Al_{12}Mg_{17}$  та  $Al_{13}Mg_2$ ), а отже, більшої твердості та меншої міцності на зріз.

**Експериментальні дослідження контролю параметрів технологічного процесу при зварюванні тертям різнорідних матеріалів суднобудівної сталі DH36 – сталі AISI 1008.** *Pardeep Pankaj, Avinish Tiwari, Pankaj Biswas, A. Gourav Rao & Sukhomay Pal*, pp. 963–986

У цій роботі листи сталі DH36 та сталі AISI 1008 були з'єднані за допомогою процесу зварювання тертям з перемішуванням (FSW) для дослідження впливу швидкості обертання, швидкості руху та зміщення інструменту на розподіл температури, z-зусилля, мікроструктуру та механічні властивості зварних зразків. При швидкості переміщення ( $v$ ) 50 мм/хв зі швидкістю обертання ( $\omega$ ) 600 об/хв і зміщенні інструменту 2 мм максимальна ударна в'язкість і твердість були отримані за рахунок більшого подрібнення зерна. Поперечні зразки для випробування на розтяг руйнувалися на більш слабкому матеріалі (тобто сталь AISI 1008) і демонстрували граничні значення міцності на розрив принаймні на рівні більш слабого матеріалу. Ударна в'язкість і твердість сильно залежали від зміни розміру зерна. Ефект на зміну розміру зерна був більшим порівняно з впливом на зміщення інструменту. Збільшення співвідношення ( $\omega/v$ ) зменшило розмір зерна та покращило ударну в'язкість і твердість. В зоні перемішування утворився голчастий ферит на сталі DH36 та зерна відманштеттового фериту на сталі AISI 1008. Більш високі показники твердості спостерігалися в обох сталях в зоні, яка пройшла термомеханічну обробку через значне подрібнення зерна. Збільшення швидкості обертання та зменшення швидкості пересування призводять до підвищення температури зварювання, що знижує z-зусилля.

**Порівняння випробувань на схильність до утворення кристалізаційних тріщин феритних нержавіючих сталей за допомогою двох методів.** *D.S. Konadu & P. G.H. Pistorius*, pp. 987–997

Схильність до утворення кристалізаційних тріщин нестабілізованих і стабілізованих феритних нержавіючих сталей була досліджена з використанням проб Houldcroft та модифікованої Vareststraint-Transvareststraint (MVT). У цьому дослідженні було використано дев'ять марок сталі нестабілізованих і стабілізованих феритних нержавіючих сталей. Сім сталей, що охоплюють нестабілізовану,

дві моностабілізовані (Ti і Nb відповідно), три подвійно стабілізовані (Ti + Nb) і подвійно стабілізовану, що містить Mo, були використані для проби Houldcroft. Моностабілізована Nb та подвійно стабілізовані (Ti + Nb) (експериментальні сплави) та комерційні марки нестабілізованих та подвійно стабілізованих (Ti + Nb) феритних нержавіючих сталей були використані у випробуванні MVT. Проби Houldcroft і MVT зварювали в захистних газах неплавким електродом зі швидкістю 6, 3, 1 та 6 і 3 мм/с, відповідно. Результати випробувань оцінювали шляхом вимірювання довжини тріщини, враховуючи мікроструктуру та використовуючи множинний лінійний регресійний аналіз довжини тріщини. Метод MVT був успішний при демонстрації згубного впливу Nb на феритних нержавіючих сталях. Розтріскування проб Houldcroft залежало від вмісту Ti, параметрів зварювання та геометрії зварного шву.

**Високопродуктивний процес GMAW для застосувань з глибоким проплавленням.** *Jair Carlos Dutra, Régis Henrique Gonçalves e Silva, Kauê Correa Riffel & Cleber Marques*, pp. 999–1009

Це дослідження присвячене суперечливим аспектам вискоефективного MIG/MAG зварювання, пов'язаним з проплавленням. Воно демонструє, що більш простий варіант з регулюванням напруги дозволяє отримати хороші результати, доки підтримуються деякі параметри джерела живлення. Розплавлена ванна в даному випадку є порожниною в зразку, що викликається станом, який називається «занурена дуга». У цій техніці неминуче коротке замикання і потрібні динамічні характеристики використаного джерела живлення, щоб стабільність дуги підтримувалася за допомогою зміни значення струму при різних швидкостях його підйому і падіння. Також було проаналізовано використання різних газових сумішей, включаючи версію, названу Т.І.М.Е. Незважаючи на те, що вона вплинула на геометрію розплавленої зони, ця газова суміш не забезпечує значного покращення зануреної дуги по відношенню до інших сумішей. Порівняння з точки зору динамічної морфології ванни між процесом з керуванням напругою та варіантом Rapid Arc (імпульсний струм) також показує ефективність більш простої версії для глибокого проплавлення. Використання менш дорогих сумішей, таких як 50 %  $CO_2$  в аргоні, технічно досягає тих же цілей при високопродуктивному зварюванні.

**Експериментальне дослідження фрикційного зварювання PLA.** *Ankit Kumar R. Sharma, Mridusmita Roy Choudhury & Kishore Debnath*, pp. 1011–1021

Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) – це твердотільна технологія зварювання, яка часто застосовується для зварювання термопластичних

та металевих сплавів у автомобільній та космічній промисловості. Полімолочна кислота (PLA) – термопластичний полімер, здатний до біодеструкції. PLA може замінити полімери на основі нафти у багатьох сферах застосування шляхом застосування ЗТП для зварювання інженерних компонентів на основі PLA. У даному дослідженні було проведено ЗТП для з'єднання листів PLA з метою дослідження впливу вхідних параметрів, а саме швидкості інструменту та швидкості пересування, на міцність на розрив зварних зразків з використанням різних штифтових профілів. Для здійснення зварювання було вибрано швидкості інструменту 700, 1400 та 2000 об/хв та швидкості пересування 20, 30 та 40 мм/хв. Для вивчення їх впливу на міцність та ефективність з'єднання застосовували штифтові профілі, такі як циліндричні, різьбові та конічні штири інструменту. Для виявлення дефектів зварювання було проведено візуальний огляд зварних зразків. Температура, яка індукується під час зварювання, та поведінка зварних зразків під час переміщення навантаження були вивчені для розуміння поведінки зварювання біодеградабельного PLA.

**Корозійна поведінка в паяному шві Al/Cu різьбованих з'єднань, що паяні сплавами Zn–Al.** *Zheng Ye, Jihua Huang, Wenjing Yang, Hao Yang, Jian Yang & Shuhai Chen*, pp. 1023–1031

Cu/Al композиції конструкцій мають значні перспективи для застосування в холодильній, автомобільній, енергетичній і аерокосмічній промисловості. Корозійна стійкість з'єднань Cu/Al має вирішальне значення для цих застосувань. В даній статті приведена корозійна поведінка з'єднань Cu/Al, що паяні трьома типами комерційних припоїв Zn–Al, в сольовому тумані. Досліджено та порівняно мікроструктуру та склад паяного шва до та після корозії. Результати показали, що в з'єднаннях існує два типу корозії, тобто точкова корозія на відкритому паяному шві і корозійні тріщини всередині паяного шва. Точкова корозія відбувається в масивах, що збагачені цинком, їй може перешкоджати фаза  $\text{CuAl}_2$ . Корозійні тріщини поширюються вздовж дифузійного шару, або збагачених цинком включень. Товстий дифузійний шар і масивні включення, що збагачені цинком, прискорили поширення корозійної тріщини. З'єднання, що паяне припоєм Zn–15Al, Zn–22Al та Zn–28Al, втратило 45, 38 та 30 % від вихідної міцності після 36-годинної корозії в сольовому тумані, відповідно. В цілому підвищення вмісту Zn в припої призвело до різкого зниження корозійної стійкості з'єднань.

**Оцінка обробки зварних швів шліфуванням за допомогою методу ефективних напружень в надрізі.** *B. J. Meccséri & B. Kövesdi*, pp. 1033–1046

Експериментальна та чисельна програма досліджень проводилася для визначення збільшення

втомної довговічності зварних з'єднань, до яких застосовували післязварювальну обробку шліфуванням. Зразки таврових зварних з'єднань і зварних з'єднань у вигляді пластини з привареними з двох сторін повздовжніми ребрами жорсткості випробовували на втому, досліджували за допомогою чисельного моделювання та математичних статистичних інструментів. Ефективність застосування шліфування для збільшення втомної довговічності досліджених типів зварних з'єднань добре відома дослідникам. Однак встановлені раніше значення збільшення втомної довговічності в основному базуються на експериментальних результатах. В даній програмі досліджень ефективність застосування шліфування для збільшення втомної довговічності встановлюється чисельним моделюванням зварних з'єднань до та після обробки за допомогою методу ефективних напружень в надрізі (ЕНН). Випробування на втому проводили на зразках як у вихідному стані, так і після обробки, а потім експериментально встановлені результати порівнювалися з результатами чисельних розрахунків. Підтверджено, що втомна довговічність зварних з'єднань, оброблених шліфуванням, може бути визначена з високою точністю за допомогою модифікування геометрії шва в чисельній моделі та методу ЕНН. На підставі проведених досліджень встановлено, що основним фактором, який призводить до підвищення втомної довговічності зварних з'єднань після шліфування є модифікування геометрії шва в найбільш небезпечній зоні. Результати також показують, що при розрахунках до зварних з'єднань як у вихідному стані, так і після шліфування може бути застосована одна крива втоми, якщо в чисельній моделі реалізована модифікована геометрія зварного шва.

**Вплив дифузійних процесів на структуру паяних з'єднань та припою після розтікання по сплаву на основі  $\text{Ni}_3\text{Al}$ .** *С.В. Максимова, В.В. Мясойд*, pp. 1047–1052

В даній роботі представлені результати досліджень зі змочування припоєм системи Pd–Ni–Cr (Me)–Ge чистого нікелю і високотемпературного сплаву на основі алюмініду нікелю ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ). Мікрорентгеноспектральні дослідження показали, що розтікання припою системи Pd–Ni–Cr(Me)–Ge по поверхні підкладки з чистого нікелю, що не містить алюмінію, забезпечує кристалізацію припою в вигляді твердого розчину паладій – нікель і одиничних дисперсних включень фази (PdNiCr)–14,13Ge. Ці включення виділяються по границях зерен твердого розчину і можуть сприяти зміцненню сплаву. При розтіканні даного припою по жароміцному сплаву на основі  $\text{Ni}_3\text{Al}$  (Ni–Al–Mo–B), що містить біля 10 мас.% алюмінію, спостерігається інший склад і інша морфологія закристалі-



зованого припою. Твердий розчин формується на підкладці основного металу. В ньому кристалізуються часточки на основі паладію (60,59 %), що насичуються алюмінієм (12,3 %). При паянні сплаву на основі Ni3Al (Ni–10Al–14Mo–B) з застосуванням даного припою висока концентрація алюмінію в основному металі і наявність градієнту концентрацій на границі розділу сприяє активній дифузії останнього з основного металу в паяний шов. Дифузійні процеси призводять до заміщення германію на алюміній в фазі (PdNiCr)xGe<sub>y</sub>. В результаті в паяному шві формується інтерметалідна фаза (PdNiCr)xAl<sub>y</sub>, концентрація Al в якій відповідає концентрації Al в основному металі. Виділяється вона в центральній зоні паяного шву і сприяє крихкому руйнуванню паяних з'єднань. Застосування припою системи Ni–Cr–Al–Me для паяння алюмініду нікелю призводить до формування структури, що не містить інтерметалідних фаз і евтектик в центральній зоні паяного шва.

**Рівноканальне кутове пресування зварного з'єднання зі сплаву AA6061, отриманого аргонодуговим зварюванням неплавким електродом.** *N. Sadasivan & M. Balasubramanian*, pp. 1053–1064

Термообробка після зварювання – це найпоширеніша методика відновлення міцності алюмінієвих зварних швів шляхом перекристалізації зміцнюючих часток і часто вимагає громіздкої, енергоємної та трудомісткої термічної обробки. Рівноканальне кутове пресування (РККП) вперше запропоновано як альтернативу термічній обробці зварних зразків сплаву AA6061, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом. Обробка РККП виконувалась в двох різних орієнтаціях заготовки відносно положення зварного шва. При обох варіантах заготовок під час РККП спостерігаються значні зміни механічних та металографічних властивостей металу. Властивості зразків після РККП свідчать, що використання РККП як альтернативи термічній обробці є життєздатним, а другий варіант РККП виявляється більш ефективним, ніж перший. РККП відновлює міцність металу швів до рівня термічної обробки, але з кращою пластичністю і займає менше часу, а відтак, більш привабливе, ніж термообробка після зварювання.

**Вплив Ni на корозійну стійкість та мікроструктуру металу зварного шва, виконаного електродами E8018-G.** *Majid Fakheri, Hamid R. Zare, Zahra Mohammadpour & Masoud Mosallae*, pp. 1065–1075

У зв'язку з важливістю корозії металу зварного шва, це дослідження спрямоване на визначення впливу легування Ni металу зварних швів на їх параметри корозії та мікроструктури. У зв'язку з цим досліджено вплив незначних кількостей Ni до 8,0 мас. % в металі зварних швів, виконаних

електродами типу E8018-G в умовах, рівних промисловим стандартам. Параметри корозії металу зварних швів оцінювалися методами потенціодинамічної поляризації та електрохімічної імпедансної спектроскопії в корозійному розчині 3,5 % NaCl. Морфологію металу зварних швів досліджували за допомогою польової емісійної скануючої електронної та оптичної мікроскопії. За результатами оцінки морфології, густини корозійного струму ( $J_{corr}$ ), швидкості корозії (CR) та поляризаційного опору металу швів з різною кількістю Ni показано, що Ni відіграє важливу роль у створенні антикорозійних властивостей. Мікроструктурні дослідження свідчать, що метал зварного шва, що містить 2,91 мас. % Ni, є однорідним, а його основна фаза – голчатий ферит (AF). Результати також показують, що оптимальна кількість 2,91 мас. % Ni в металі зварного шва забезпечує найбільшу корозійну стійкість в корозійному розчині.

**Гарячий крекінг при автогенному зварюванні алюмінієвого сплаву 6061-T6 Nd: YAG лазером з імпульсом прямокутної форми.** *Hossain Ebrahimzadeh, Hassan Farhangi & Seyed Ali Asghar Akbari Mousavi*, pp. 1077–1088

Завдяки високій схильності сплавів Al–Mg–Si до утворення гарячих тріщин, автогенне зварювання лазерним променем з імпульсом прямокутної форми в цілому не було успішним для усунення тріщин. У цій роботі було досліджено вплив параметрів імпульсу Nd: YAG лазера та попереднього підігріву на утворення гарячих тріщин в алюмінієвому сплаві 6061-T6. Зразок, виготовлений за допомогою лазерного зварювання на режимі 1 Гц, 0,12 мм/с, 10 мс і без попереднього підігріву, мав найвищу швидкість охолодження та найменшу відстань між осями дендритів, але гарячих тріщин виявлено не було. Зразки при випробуванні на розтяг руйнувались у місці, далекому від металу шва, а зменшення кремнію та магнію в міждендритному просторі та зменшення теплових напружень призвели до усунення гарячих тріщин. Однак, згідно з макромасштабними моделями утворення гарячих тріщин, попередній підігрів зменшив напруження при розтягуванні в ВТР (температурний діапазон окрихчення), але підвищення температури попереднього підігріву призвело до збільшення, а не до зменшення довжини гарячої тріщини. У цьому випадку важливими параметрами, що впливають на ініціювання та зростання гарячої тріщини, були утворення водневої пористості, сегрегація кремнію та магнію та утворення сполук з низькою температурою плавлення.

**Вплив ніобію на мікроструктуру та властивості швів при зварюванні під флюсом HSLA сталей.** *T. Patterson & J.C. Lippold*, pp. 1089–1105

Високоміцні низьколеговані або мікролеговані сталі виготовляються з контрольованою термо-

механічною обробкою (ТМСП) для досягнення бажаних мікроструктур і механічних властивостей, а добавки мікролегуючих елементів є критичними для отримання оптимальних властивостей. Сталь, яка є об'єктом у цьому дослідженні, є мікролегованою з приблизно 0,1 мас.% Nb, тобто на рівні, характерному для трубних сталей типу X70. Дугове зварювання під флюсом (SAW) – це спосіб, що широко використовується при виготовленні трубчатих конструкцій поздовжніми швами. Представлене дослідження складалося з двох частин. У частині 1 проаналізовано контрольовані рівні розчинення при використанні наявних у продажу дротів для SAW та сталі, мікролегованою Nb, у пропорціях для імітації металу шва при зварюванні під флюсом. В частині 2 цього дослідження оцінювали реальні шви при зварюванні під флюсом низьколегованих сталей. Були виконані наплавлення, в яких вміст Nb постійно збільшувався шляхом додавання феро-ніобію безпосередньо до флюсу. Двошарові зварні шви, що використовуються при виробництві трубопроводів, також оцінювались за допомогою тих самих добавок феро-ніобію до флюсу, щоб збільшити вміст Nb у металі зварного шва. На основі цієї роботи та літературних публікацій дана оцінка еволюції мікроструктури та відповідних механічних властивостей зі збільшенням Nb.

**Релаксація залишкової напруги у зварювальних фільтрах, оброблених HFMI, після піків одного перевантаження.** *Jan Schubnell, Eva*

*Carl, Majid Farajian, Stefanos Gkatzogiannis, Peter Knödel, Thomas Ummenhofer, Robert Wimpory & Hamdollah Eslami, pp. 1107–1117*

Індукція залишкової напруги, що стискається біля поверхні, є важливим фактором для покращення термінів втомлення зварних з'єднань, оброблених HFMI. Однак послаблення цих корисних залишкових напружень при піках одного перевантаження (при різній амплітуді та навантаженнях) може значно зменшити покращення цикла втоми. З цієї причини існує декілька рекомендацій щодо обмеження максимальної напруги навантаження для такого типу зварних з'єднань після обробки. У цій роботі експериментально досліджено вплив перевантажень одноразового натягу та стиснення на поведінку релаксації залишкових напружень, викликаних HFMI, методами рентгенівських та нейтронних дифракцій, доповнених чисельним моделюванням на поперечних жорсткостях із м'якої сталі S355J2 та високої міцності сталі S960QL. Навантаження застосовувались наближеними до реальної межі текучості основного матеріалу. Значно різна поведінка релаксації спостерігалася для сталі S355J2 та S960QL. Крім того, великі навантаження при стисненні призводять до повного розслаблення залишкової напруги в корні зварного шва S960QL і помірного розслаблення для S355J2. Навантаження з високою напругою призводять лише до незначного розслаблення.

## С.В. МАКСИМОВА – ЗАСЛУЖЕНИЙ ДІЯЧ НАУКИ І ТЕХНІКИ УКРАЇНИ



Колектив Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, редколегія та редакція журналу «Автоматичне зварювання» щиро вітають доктора технічних наук, завідувача відділу «Фізико-хімічні процеси паяння» ІЕЗ, Світлану Василівну Максимову з присвоєнням почесного звання «Заслужений діяч науки і техніки України».

З УКАЗУ ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ

№ 186/2020 від 15 травня 2020 р.

«Про відзначення державними нагородами України з нагоди Дня науки»

За вагомий особистий внесок у розвиток вітчизняної науки, зміцнення науково-технічного потенціалу України, багаторічну сумлінну працю та високий професіоналізм постановляю:

Присвоїти почесне звання «Заслужений діяч науки і техніки України» завідувачеві відділу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, доктору технічних наук Максимовій Світлані Василівні.

Президент України  
В. Зеленський