

**Зільке Аугустин, Фрєліх Томас ,
Краф Гюнтер, Жан-Пьер Бергманн,
Гретцель Михаель, Геркен Ян Ансгар ,
Шмідт Кирил**

Технічний університет Ільменау, інститут технологічних
вимірювань і технології датчиків, 100565, 98684
Ільменау, Німеччина, e-mail: silke.augustin@tu-ilmenau.de

ПРОБЛЕМИ ВИМІРУ ТЕМПЕРАТУРИ В ПРОЦЕСІ РОТАЦІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ

Точне визначення температури технологічної зони набуває все більш важливу роль в процесі контролю і моніторингу ротаційного зварювання тертям. В даний час вимірювання температури здійснюється за допомогою вбудованого в інструмент давача температури (зазвичай термопари). Оскільки її не можна прикріпити безпосередньо до області з'єднання, розсіювання тепла всередині інструменту і в навколишнє середовище викликає відхилення в вимірах, а також затримку вимірювання температури в часі. У статті описано процес і пов'язані з ним проблеми. Показано, що пряме вимірювання температури в ході процесу може бути здійснене за рахунок використання термоелектричного ефекту між інструментом і деталлю без заміни інструменту шляхом введення додаткових давачів температури. Бібл. 12, рис. 7.

Ключові слова: ротаційне зварювання тертям, пряме вимірювання температури, ефект Зеебека, похибки вимірювання

Вступ

Ротаційне зварювання тертям (РЗТ) було розроблено і запатентовано Wayne Thomas в Інституті зварювання Великобританії в 1991. Воно належить до групи процесів твердотілого зварювання. На відміну від зварювання тертям, робочий принцип РЗТ заснований не на відносному переміщенні деталей, а на зносостійкості ротаційного інструменту. Одним з найбільш важливих параметрів процесу є осьове зусилля між інструментом та компонентом. Ця сила діє перпендикулярно напрямку зварювання і змушує інструмент повністю зануритися в зону з'єднання і залишатися в ній. Цей процес зварювання характеризується порівняно низькими температурами з'єднання нижче температури плавлення і чудовими механічними властивостями зварного шва в порівнянні з традиційними зварювальними процесами, такими як дугове і лазерне зварювання [1]. Ротаційне зварювання тертям використовується в авіакосмічній галузі, суднобудуванні, медицині та автомобілебудуванні. Однак проблеми можливого прямого вимірювання температури, заснованого на ефекті Зеебека, пов'язані зі швидкістю шпинделя зварювального інструменту і силами, що діють в процесі зварювання. Таким чином, необхідно висувати високі вимоги до конструкції вимірювального пристрою і постійної передачі електричної напруги [2]. Температура зони з'єднання під час процесу – це показник, який все більше піддається кількісній оцінці, оскільки дозволяє робити висновки про підведене тепло, і,

отже, про термомеханічну напругу у мікроструктурі [2–4]. В даний час температура вимірюється термографом або термопарами, вбудованими в зварювальний інструмент [5].

Однак останній метод дуже дорогий і неточний, оскільки термопара не стикається з точкою тертя між заплечиком інструменту та заготовкою. Крім того, в різних публікаціях повідомляється, що термопари були або зруйновані, або їх положення під час процесу зварювання змінилось, так що точне вимірювання температури було неможливе [3]. Відхилення в вимірах і тимчасові затримки можуть виникати через теплопровідність інструменту або теплопередачу в навколишнє середовище. Альтернативою введенню термопар в інструмент є метод «інструмент-деталь-термопара» (метод ІДТ), при якому виникає термоелектрична напруга, яка виникає між інструментом і деталлю, може бути виміряна, а потім перетворено в значення температури. Однак цей метод висуває високі вимоги до використовуваних схем вимірювання і експериментального визначення різних додаткових параметрів, оскільки вони які справляють визначальний вплив на похибку вимірювання температури. Далі на прикладі роботизованої системи ротаційного зварювання тертям описано застосування цього методу, а також представлено і обговорено досягнуті результати.

Основи вимірювання температури термопарами

Якщо існує різниця температур $T = T_1 - T_2$ на кінцях металевого провідника ($T_1 > T_2$), електрони на теплом кінці мають більш високу теплову енергію, ніж електрони на холодному кінці. В результаті відбувається дифузія електронів, яка є причиною виникнення різниці потенціалів E уздовж провідника.

$$E = \oint \frac{dU}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dx \quad (1)$$

Похідна $\frac{dU}{dT}$, яка характеризує диференціальну термоелектричну напругу U вздовж провідника, залежить від матеріалу і називається коефіцієнтом Зеебека $S(T)$ матеріалу. Абсолютну термоелектричну ЕРС провідника можна виміряти не безпосередньо, а лише відносно абсолютної термоелектричної ЕРС провідника з іншого матеріалу. Це можна пояснити впливом з'єднувальних проводів вольтметра (в основному мідних), які проходять від гарячого і холодного кінця провідника через невідоме температурне поле, створюючи додаткову невідому диференціальну термоелектричну ЕРС. Отже, два електричних провідника з відомими коефіцієнтами Зеебека з'єднуються, утворюючи термопарне вимірювальне коло. Фізична суть ефекту Зеебека (рис. 1), полягає в тому, що електричний струм генерується в контурі з двох різних провідників A і B , коли спаї цих провідників перебувають при різних температурах T_1 і T_2 .

Для вимірювання результуючої термоелектричної напруги замкнутий ланцюг розмикається в одній точці (рис. 3) і у розрив вмикається вольтметр. У найпростішому випадку, тобто за малих перепадів температур і однорідному коефіцієнті Зеебека по всій довжині провідника, вимірювана термоелектрична ЕРС визначається так:

$$U = (S_A - S_B) \cdot \Delta T \quad (2)$$

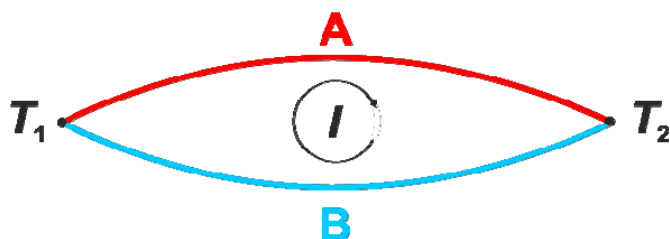


Рис. 1. Схематичне зображення ефекту Зеебека [6].

Довжина і поперечний переріз відповідних провідників в цьому випадку не відіграють ролі. Також можна припустити, що в неоднорідних провідниках зі сталими коефіцієнтами Зеебека по всій довжині провідника виникає термоелектричне напруження, яке залежить лише від різниці температур між двома спаями. Градієнти температури уздовж однорідних провідників не впливають на вимірювану термоЕРС, оскільки результуючі диференціальні парціальні напруження вздовж двох провідників компенсують одна одну. [6, 7]. З іншого боку, однак, додаткова термоелектричне напруження виникає при зміні коефіцієнта Зеебека, наприклад, внаслідок механічних або хімічних впливів на матеріал провідника, якщо зумовлені цими впливами неоднорідності в матеріалі провідника розташовані в зоні температурного градієнта [8, 9, 10].

Для основної схеми вимірювання температури за допомогою термопар, яка найчастіше використовується в техніці, ланцюг розмикається на спаї, а вольтметр підключається до розриву мідними дротами (рис. 2).

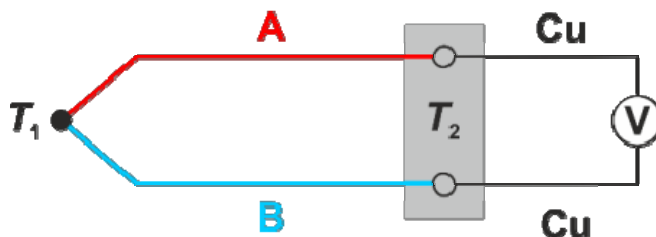


Рис. 2. Основна схема вимірювання температури термопарами.

Температура T_2 повинна бути відомою і незмінною протягом періоду вимірювання. При визначенні характеристичної кривої термопар, стандартизованих на міжнародному рівні, в якості опорної температури використовується температура T_2 , також відома, як температура еталонного спаю, $T_V = 0^\circ \text{C}$. Якщо температура цього холодного спаю відхиляється від 0°C , необхідно внести відповідну поправку при перетворенні термоелектричної напруги в температуру. Коли немає можливості підвести кабелі термопар до холодного спаю, на практиці використовуються компенсаційні або термоелектричні кабелі. Ці кабелі мають такі ж термоелектричними властивостями, як і кабелі для термопар, які використовуються в обмеженому діапазоні температур (приблизно до 200°C). В ідеалі при використанні компенсуючих кабелів не повинно виникати додаткових внесків у термоЕРС, навіть якщо вони знаходяться в зоні температурного градієнта. На практиці, однак, виникають додаткові внески в похибки вимірювання, які необхідно враховувати як складові підсумкової похибки вимірювання.

Проілюстрований основний принцип вимірювання температури за допомогою термопар можна також використовувати для прямого вимірювання температури між інструментами і деталями у виробничому устаткуванні [6].

Метод інструмент-деталь-термопара (ІДТ)

У даній статті пряме вимірювання електричного термоелектричного напруги між деталлю і інструментом досліджується на прикладі роботизованої системи ротаційного зварювання тертям (рис. 3). Середня температура реєструється по всій поверхні контакту між інструментом і деталлю.

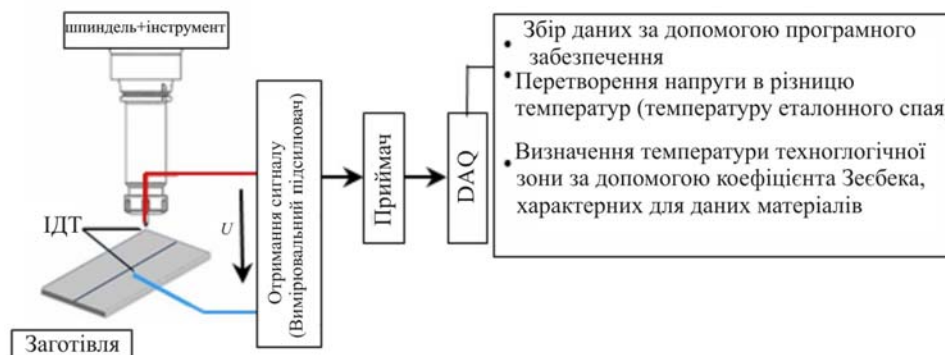


Рис. 3. Основний принцип методу інструмент-деталь-термопара (ІДТ) [11]

По-перше, необхідно досліджувати, які термоелектричні або компенсуючі кабелі можуть бути підключені до двох основних елементів термоелектричного кола в зварювальному роботі, щоб утворилась термоелектричне коло, підключене до вимірювального пристрою. Слід очікувати, що в системі виникнуть пов'язані з технологічним процесом градієнти температури, які можуть викликати додаткові термоелектричні напруги між різними комбінаціями матеріалів. Production Technology Group [11] розробила систему для випробувань, адаптовану до роботизованою системі РЗТ (ротаційного зварювання тертям) (рис. 4 вище). Електрична напруга має зніматися безпосередньо з ротаційного інструменту і підводитись до термоелектричного кабелю. Система шліфування за допомогою електронних пристроїв ізолювалась від вимірювальної системи, щоб уникнути перешкод. Використовуваний інструмент для ротаційного зварювання тертям виготовляється із загартованої інструментальної сталі (1.2344), а з'єднувані цим шляхом заготовки склалися з алюмінієвого сплаву EN AW 6060 T66 з товщиною листа 5 мм, довжиною 300 мм і шириною 50 мм. З'єднання деталей здійснювалося встик. Окремі компоненти, які передають термоелектричну напругу від зонда до мідного кабелю, зроблені з того ж матеріалу (1.2344), щоб не порушувати правила для термоелектричних ланцюгів.

Для наступних досліджень інструмент або заготовки для ротаційного зварювання тертям спочатку були доповнені термоелектричними кабелями для зняття термоелектричної напруги, виготовленими з тих же матеріалів, що інструмент і заготовка. До цих термоелектричних кабелів за схемою, аналогічною до базової схеми на рис. 2, було підключено мідні кабелі для передачі сигналу на вимірювальний прилад (рис. 4).

Ця конструкція вимагає, щоб еталонна точка термоелектричного кола розташовувалася в різних точках системи. Не гарантується, що температура еталонного спаяний в обох точках контакту з плином часу буде однаковою. Розсіювання тепла через термоелектричні лінії було заздалегідь оцінене для теплопровідності за допомогою аналітичних розрахунків і розраховане таким чином, щоб в кінцевому підсумку на еталонних спаях переважала така ж температура. При перших вимірах в системі температура еталонних спаяв контролювалася за допомогою

застосовуваних термопар для підтвердження раніше розрахованих мінімальних довжин. Вимірювання підтвердили правильність зроблених припущень, температура на еталонних спаях була однаковою.

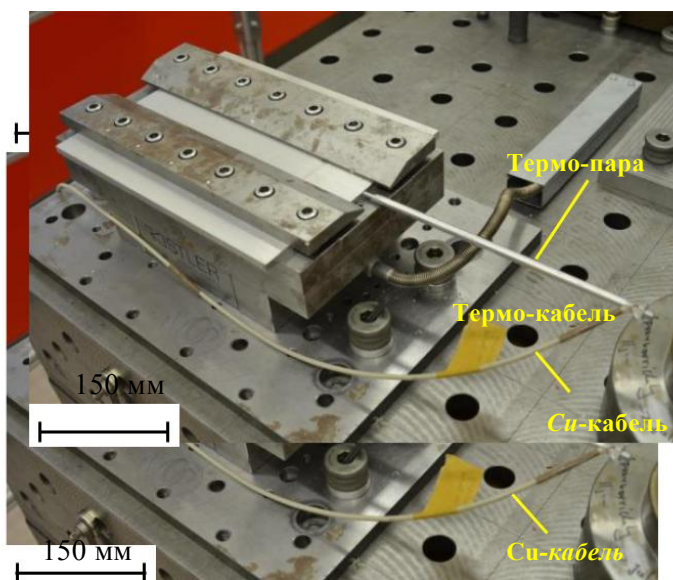
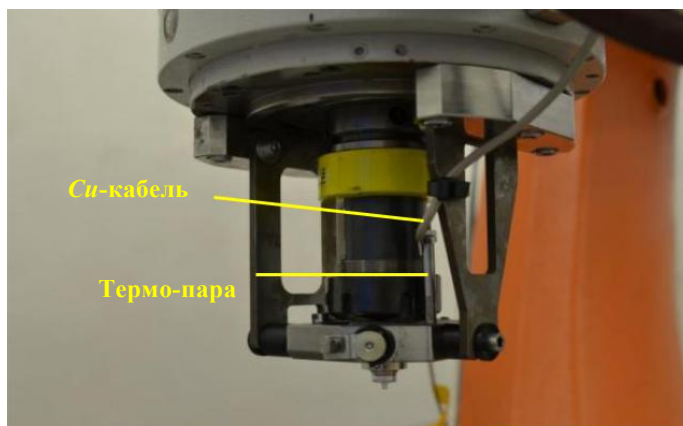


Рис. 4. Кріплення термального та мідного кабелю до інструменту (зверху) або тзаготовки (знизу)

Ця конструкція вимагає, щоб еталонна точка термоелектричного кола розташовувалася в різних точках системи. Не гарантується, що температура еталонного спаяний в обох точках контакту з плинм часу буде однаковою. Розсіювання тепла через термоелектричні лінії було заздалегідь оцінене для теплопровідності за допомогою аналітичних розрахунків і розраховане таким чином, щоб в кінцевому підсумку на еталонних спаях переважала така ж температура. При перших вимірах в системі температура еталонних спаїв контролювалася за допомогою застосовуваних термопар для підтвердження раніше розрахованих мінімальних довжин. Вимірювання підтвердили правильність зроблених припущень, температура на еталонних спаях була однаковою.

Результати

Калібрування комбінації матеріалів

Використовувана комбінація матеріалів з інструментальної сталі (1.2344) і алюмінієвого сплаву EN AW 6060 T66 не належить до міжнародних стандартизованих комбінацій матеріалів термопар. Тому спочатку була визначена T - U -характеристика або коефіцієнт Зеєбека пари матеріалів. Калібрування проводилася в термостатованому випробувальному стенді з використанням каліброваної термопари. На рис. 5 показані результати для комбінації матеріалів 1.2344 / EN AW 6060 T66.

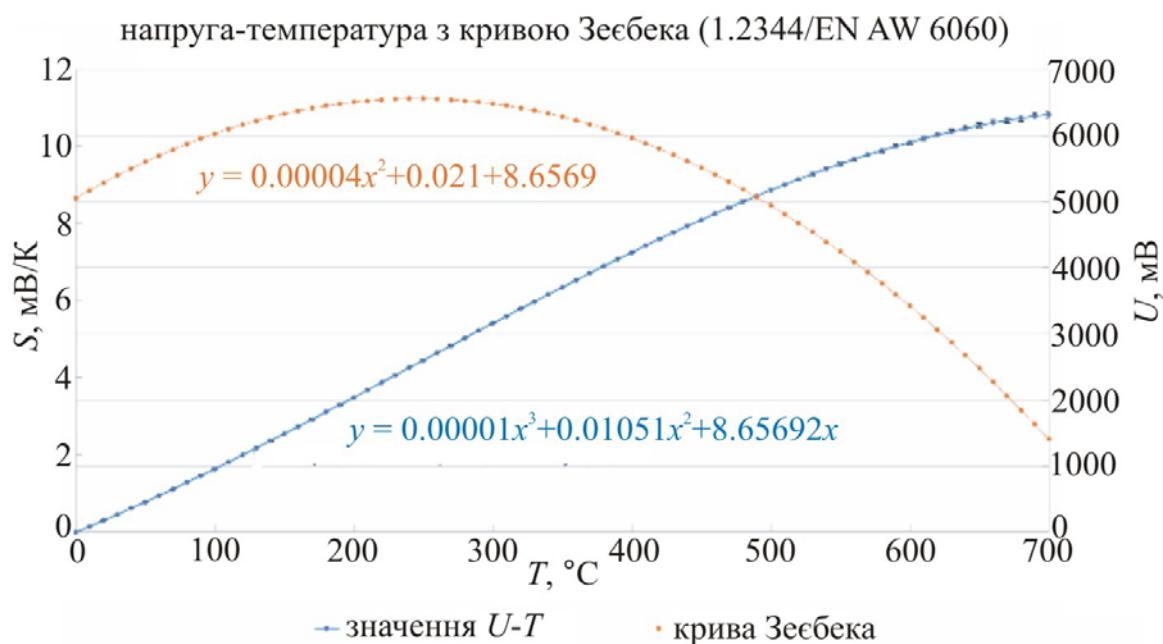


Рис. 5. Результат калібрування для 1.2344 і EN AW 6060 [11]

Ліва вісь ординат показує певний коефіцієнт Зеєбека (помаранчева крива), а протилежна - вісь термонапруги (синя крива). Коефіцієнт Зеєбека був визначений за допомогою спрощеного рівняння 2. Різниця температур в опорних точках становила 10 К. Результати були спочатку використані для розрахунку температур під час процесу зварювання, щоб довести придатність вимірювальної установки в цілому. Крива комбінації матеріалів повинна бути визначена більш точно в ході подальших випробувань в калібрувальній лабораторії Інституту технологічних вимірювань і сенсорної техніки.

Вимірювання на роботизованій установці ротаційного зварювання тертям

Експерименти з вимірювання температури проводяться на серійному кінематичному 6-осьовому роботі з шарнірнозчленованою рукою KUKA KR 500 MT 3. Робот оснащений модифікованим шпинделем РЗТ від MAG, який оснащений системою затискання інструменту для конусів з порожнистим хвостовиком (HSK. 63). Інструмент і деталь для ротаційного зварювання тертям були інтегровані в систему, як описано в розділі 3. Результуючі сили реєструються багатокомпонентним динамометром від KISTLER, який розташований під утримувачем компонентів (рис. 6).

Система працювала з такими параметрами зварювання:

- швидкість зварювання: 1000 мм/хв
- частота обертання: 5000 хв⁻¹
- осьове зусилля: 4000 Н
- діаметр заплечика: 13 мм
- діаметр зонда: 5 мм
- довжина зварного шва: 250 мм
- глибина врізання: 4.5 мм

Для підтвердження розрахункових температур на основі коефіцієнтів Зеебека, визначених під час калібрування, термопари типу К були вбудовані в центр зони зварювання (зона перемішування). Тому в заготовці були підготовлені канавки, в які без пошкоджень вставлялися термопари (рис. 6). Мета полягала в тому, щоб довести, що температура в зоні зварювання, виміряна за встановленою системою, була майже на тому ж рівні, що і у термопар. Термопари розташовувалися на 2 мм нижче поверхні зварювання в зазорі між деталями.

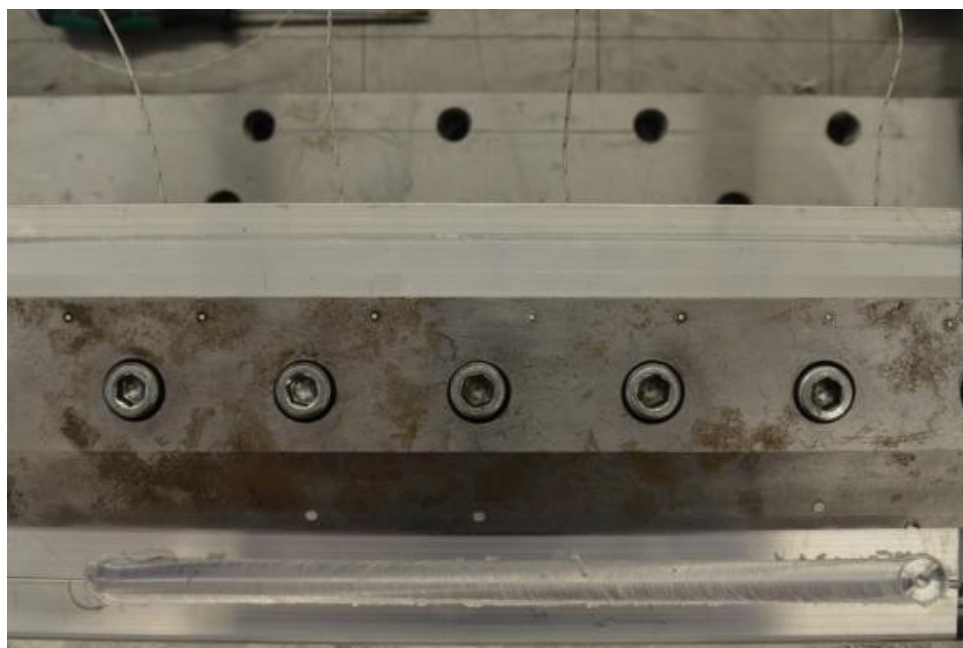


Рис. 6. Позіціонування термопар уздовж зварного шва (зліва TE1 - TE4)

Виміряні термоелектричні напруги фільтрувалися пасивним фільтром нижніх частот 1-го порядку 1 Гц. На рис. 7 показано збільшення температури (червона крива) та осьового зусилля (синя крива) комбінації матеріалів 1.2344 і EN AW 6060 T66 протягом всього часу зварювання. Можна чітко помітити, що температура підвищується під час фази занурення і досягає максимуму 450 ° С при приблизно 12 с. У той же час можна помітити зменшення осьового зусилля майже до 1000 Н, що пов'язано зі зменшенням межі текучості алюмінієвого сплаву.

Після того, як інструмент достатньо пластифікував матеріал деталі, контактна поверхня, на якій створюється термоелектрична напруга, збільшується. Через контакт зі ще холодним корпусом інструменту і пластифікованою деталлю можна визначити зниження температури приблизно на 125 ° С. Під час фази зварювання (починаючи з $t = 15$ с) осьове зусилля (4000 Н) і температура (близько 500 ° С) залишаються майже незмінними. Останній критерій відповідає

близько 75 % температури ліквідусу EN AW 6060 T66. Безпосередньо перед відведенням інструменту сила і температура короткочасно підвищуються, перш ніж зварювальний інструмент вийде із зони з'єднання. Це можна пояснити коротким часом очікування перед відведенням інструменту, в результаті чого відбувається зміна орієнтації шпинделя в залежності від процесу. Температурні криві термопар (TE1 - TE4), які також показані на рис. 7, слід використовувати для перевірки результатів прямого виміру термоелектричної напруги (позначається на схемі як Tweld_ThermV), завжди вказують на максимум нижче температурних кривих. Це може бути пов'язано як з розташуванням трохи нижче поверхні [7], так і з періодами затримки термопар. Після вимірювання було визначено, що термопара 3 не встановлена точно, що можна використовувати для обґрунтування відхилення температурної кривої, так і з періодами затримки термопар.

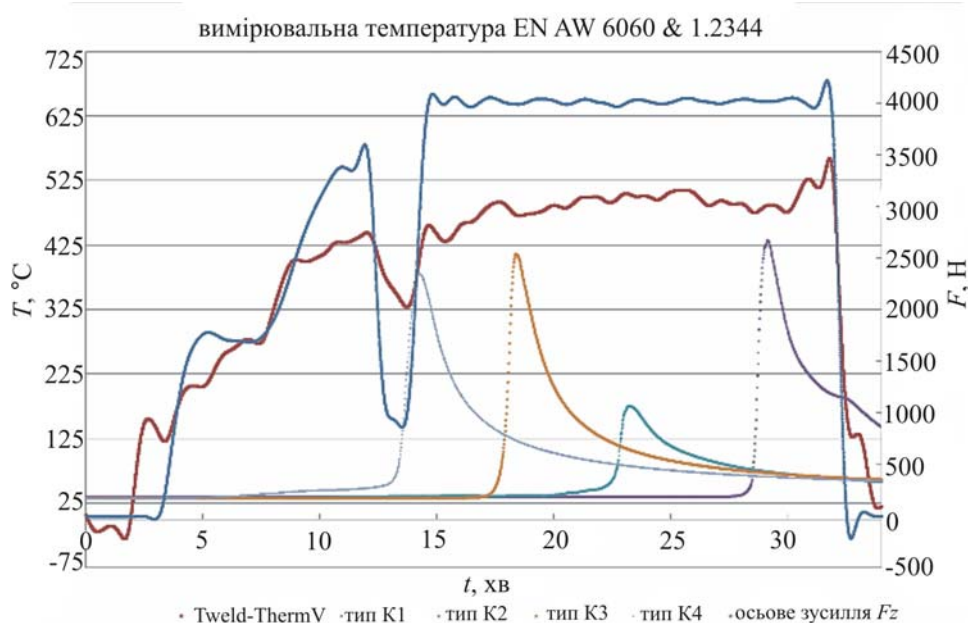


Рис. 7. Результати в процесі зварювання [11]

Також було помічено, що сигнали перешкод реєструються вже до і після зварювання, тобто в той час, коли термоелектричне коло розімкнене. В основному це пояснюється збурюючими змінними, наприклад частотою мережі 50 Гц (коректованою за допомогою фільтра нижніх частот), частотою обертання обертового шпинделя або пов'язане з системою навантаження ЕМС (електромагнітної сумісності). Отже, як значення отримані під час калібрування, так і результати, отримані в процесі зварювання, повинні підтверджуватися повторними вимірами.

Резюме і перспективи

Результати вимірювань, представлені в статті, показали, що пряме вимірювання температури може бути виконано з використанням методу ІДТ (інструмент-деталь-термопара). Градувальна характеристична крива була визначена для використовуваної комбінації матеріалів і застосована для вимірювання температури технологічної зони під час процесу з'єднання. Досягнуті вимірювальні значення калібрування повинні бути додатково підтверджені точної лабораторної калібруванням. Під час перших вимірів на роботизованому зварювальному роботі

РЗТ (ротаційної зварювання тертям) були виявлені наступні фактори впливу на результати вимірювань і їх похибка:

- похибка визначення характеристичної кривої,
- навантаження електромагнітної сумісності через периферії системи,
- знос зонда в процесі зварювання,
- ще не виявлені градієнти температури в області переходів матеріалів, що викликають додаткові термоелектричні напруги

В рамках майбутньої співпраці між Production Technology Group та Інститутом вимірювання технологічних процесів і сенсорної техніки в Технічному університеті Ільменау, можливості прямого виміру температури на основі ефекту Зеєбека як для ротаційної зварювання тертям, так і для інших зварювальних процесів повинні бути додатково досліджені і перевірені. Процеси теплопередачі також повинні бути заздалегідь розраховані за допомогою чисельного моделювання [12], а результати розрахунків згодом підтверджені за допомогою вимірювальної техніки.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують, що можливих фінансових чи інших конфліктів з приводу роботи немає.

Література

1. D. Schmid: Reibrührschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie, Dissertation, TU München, Herbert Utz Verlag GmbH, 2015.
2. A. Fehrenbacher, C. Smith, N. Duffie, N. Ferrier, F. Pfefferkorn, M. Zinn: Combined Temperature and Force Control for Robotic Friction Stir Welding, ASME, J. Manuf. Sci. Eng 136 (2), 021007 (Jan 15, 2014 року), Paper No: MANU-12-1357; DOI: 10.1115 / 1.4025912.
3. ACF Silva, J. De Backer, G. Bolmsjö: Temperature measurements during friction stir welding, University West, Trollhättan, Sweden, Springerlink.com, 2016. DOI 10.1007 / s00170-016-9007-4.
4. E. Cole, A. Fehrenbacher, N. Duffie, M. Zinn, F. Pfefferkorn, N. Ferrier: Weld temperature effects during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys 6061-t6 and 7075-t6, Int J Adv Manuf Technol (2014 року) 71: 643-652. DOI 10.1007 / s00170-013-5485-9.
5. A. Fehrenbacher, N. Duffie, N. Ferrier, F. Pfefferkorn, M. Zinn: Effects of tool-workpiece interface temperature on weld quality and quality improvements through temperature control in friction stir welding, The Int. Journ. Adv. Manuf. Techn., Vol. 71, pp. 165-179, 2014/03/01, 2014.
6. F. Bernhard (Hrsg.): Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2014.
7. M. Javurek, A. Mittermair: Wo in einem Thermolement herrscht die gemessene Temperatur? Analyse mittels FE- Simulation, Technisches Messen, Heft 11, 2016, De Gruyter Oldenbourg. DOI 10.1515 / teme-2016-0028.
8. P. Germanow: Messtechnische Untersuchung der Kennlinienstabilität von Thermolementen, TU Ilmenau, Masterarbeit, 2019.
9. ES Webster: Low-Temperature Drift in MIMS Base-Metal Thermocouples, Springer Verlag, Int J Thermophys (2014 року) 35: 574-95. DOI 10.1007 / s10765-014-1581-9.

10. AD Greenen, ES Webster: Thermal Recovery from Cold-Working in Type K Bare-Wire Thermocouples, Springer Verlag, Int J Thermophys (2017) 38: 179. DOI 10.1007 / s10765-017-2316-5.
11. M. Baranowski, K. Schmidt, MK Stobrawa: Anwendung des Seebeck-Effekts zur Messung der Prozesszonentemperatur beim Reibrührschweißen, Dokumentation Projektseminar, TU Ilmenau, 2018.
12. MZH Khandkar, JA Khan, AP Reynolds: Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model, Sc. and Techn. of Welding & Joining, 8 (3): 165-174, 2003. DOI: 10.1179 / 136217103225010943

Надійшла до редакції 22.04.2020

**Зильке Аугустин,
Фрёліх Томас ,
Крапф Гюнтер,
Жан-Пьер Бергманн,
Грэтцель Михаэль,
Геркен Ян Ансгар ,
Шмидт Кирил**

Технический университет, Ильменау, Германия,
e-mail: silke.augustin@tu-ilmenau.de

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Точное определение температуры технологической зоны приобретает все более важную роль в процессе контроля и мониторинга ротационной сварки трением. В настоящее время измерение температуры осуществляется с помощью встроенного в инструмент датчика температуры (обычно термопары). Поскольку их нельзя прикрепить непосредственно к области соединения, рассеяние тепла внутри инструмента и в окружающую среду вызывает отклонения в измерениях, а также задержку измерения температуры во времени. В статье описан процесс и связанные с ним проблемы, как прямое измерение температуры в ходе процесса может быть достигнуто за счет использования термоэлектрического эффекта между инструментом и деталью, без замены инструмента путем введения дополнительных датчиков температуры. Библ. 12, рис. 7.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, прямое измерение температуры, эффект Зеебека, погрешности измерения

**Silke Augustin,
Thomas Fröhlich,
Gunter Krapf,
Jean-Pierre Bergmann,
Michael Grätzel,
Jan Ansgar Gerken,
Kiril Schmidt**

Technical University, Ilmenau, Germany,
e-mail: silke.augustin@tu-ilmenau.de

CHALLENGES OF TEMPERATURE MEASUREMENT DURING THE FRICTION STIR WELDING PROCESS

The exact determination of the process zone temperature can be considered as an increasingly important role in the control and monitoring of the friction stir welding process (FSW). At present, temperature measurement is carried out with the aid of a temperature sensor integrated into the tool (usually thermocouples). Since these cannot be attached directly to the joining area, heat dissipation within the tool and to the environment cause measurement deviations as well as a time delay in the temperature measurement. The article describes a process and the challenges that arise in this process, how a direct temperature measurement during the process can be achieved by exploiting the thermoelectric effect between tool and workpiece, without changing the tool by introducing additional temperature sensors. Bibl. 12, Fig. 7.

Keywords: Friction stir welding, Direct temperature measurement, Seebeck-Effect, Measurement errors

References

1. D. Schmid: Reibrührschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie, Dissertation, TU München, Herbert Utz Verlag GmbH, 2015.
2. A. Fehrenbacher, C. Smith, N. Duffie, N. Ferrier, F. Pfefferkorn, M. Zinn: Combined Temperature and Force Control for Robotic Friction Stir Welding, ASME, J. Manuf. Sci. Eng 136 (2), 021007 (Jan 15, 2014), Paper No: MANU-12-1357; DOI: 10.1115 / 1.4025912.
3. ACF Silva, J. De Backer, G. Bolmsjö: Temperature measurements during friction stir welding, University West, Trollhättan, Sweden, Springerlink.com, 2016. DOI 10.1007 / s00170-016-9007-4.
4. E. Cole, A. Fehrenbacher, N. Duffie, M. Zinn, F. Pfefferkorn, N. Ferrier: Weld temperature effects during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys 6061-t6 and 7075-t6, Int J Adv Manuf Technol (2014) 71: 643-652. DOI 10.1007 / s00170-013-5485-9.
5. A. Fehrenbacher, N. Duffie, N. Ferrier, F. Pfefferkorn, M. Zinn: Effects of tool-workpiece interface temperature on weld quality and quality improvements through temperature control in friction stir welding, The Int. Journ. Adv. Manuf. Techn., Vol. 71, pp. 165-179, 2014/03/01, 2014.
6. F. Bernhard (Hrsg.): Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2014.

7. M. Javurek, A. Mittermair: Wo in einem Thermoelement herrscht die gemessene Temperatur? Analyse mittels FE- Simulation, Technisches Messen, Heft 11, 2016, De Gruyter Oldenbourg. DOI 10.1515 / teme-2016-0028.
8. P. Germanow: Messtechnische Untersuchung der Kennlinienstabilität von Thermoelementen, TU Ilmenau, Masterarbeit, 2019.
9. ES Webster: Low-Temperature Drift in MIMS Base-Metal Thermocouples, Springer Verlag, Int J Thermophys (2014) 35: 574-95. DOI 10.1007 / s10765-014-1581-9.
10. AD Greenen, ES Webster: Thermal Recovery from Cold-Working in Type K Bare-Wire Thermocouples, Springer Verlag, Int J Thermophys (2017) 38: 179. DOI 10.1007 / s10765-017-2316-5.
11. M. Baranowski, K. Schmidt, MK Stobrawa: Anwendung des Seebeck-Effekts zur Messung der Prozesszonentemperatur beim Reibrührschweißen, Dokumentation Projektseminar, TU Ilmenau, 2018.
12. MZH Khandkar, JA Khan, AP Reynolds: Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model, Sc. and Techn. of Welding & Joining, 8 (3): 165-174, 2003. DOI: 10.1179 / 136217103225010943.

Submitted 22.04.2020