

STRESZCZENIE

Celem pracy doktorskiej było opracowanie innowacyjnej technologii spawania doczołowego dwuwarstwowych rur kompozytowych z wykorzystaniem metod laserowych oraz hybrydowych (laser + MAG), umożliwiającej uzyskanie złączy spełniających wymagania jakościowe określone w PN-EN ISO 13919-1:2020, PN-EN ISO 12932, a także wymagania eksploatacyjne przemysłu energetycznego. Opracowana metoda pozwala na wytwarzanie spoin o wysokiej jakości metalurgicznej, jednorodnej mikrostrukturze oraz wymaganych właściwościach mechanicznych, odpowiadających rygorystycznym normom jakościowym i eksploatacyjnym. Proces został zakwalifikowany zgodnie z PN-EN ISO 15614-11 oraz PN-EN ISO 15614-14, a rozwiązanie objęto ochroną patentową (P.435026), co podkreśla jego innowacyjny charakter i potencjał wdrożeniowy.

Rozprawa składa się z dwóch głównych części. W części pierwszej dokonano przeglądu literatury krajowej i zagranicznej, obejmującego podstawy teoretyczne spawania laserowego i technologii hybrydowych, charakterystykę materiałów stosowanych w rurach kompozytowych oraz opisano inne metody spawania rur kompozytowych oraz nakładania powłok na rury. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z mikrostrukturą, właściwościami mechanicznymi, odpornością korozyjną i pęczaniem, kluczowymi dla elementów pracujących w środowiskach wysokotemperaturowych i agresywnych chemicznie.

W części drugiej, badawczej, sformułowano tezę i cele pracy, opracowano metodykę badań oraz przeprowadzono kompleksową ocenę technologii spawania laserowego i napawania hybrydowego. Badania obejmowały:

- **badania nieniszczące**, w tym:
 - oględziny wizualne i badania penetracyjne, umożliwiające ocenę powierzchni spoin,
 - badania radiograficzne, pozwalające na detekcję nieciągłości wewnętrznych,
 - badania prądami wirowymi,
 - analizę naprężeń w złączu spawanym metodą radiograficzną.
- **badania niszczące**, w tym:
 - próby rozciągania, pozwalające określić wytrzymałość i plastyczność złączy,
 - próby zginania, oceniające ciągłość metalurgiczną i podatność na odkształcenia,
 - pomiary twardości w przekroju spoin i stref wpływu ciepła,
 - obserwacje mikro i makrostruktury przy użyciu mikroskopii świetlnej oraz skaningowej (SEM/EDS),

Przeprowadzona analiza pozwoliła ocenić jakość złączy pod kątem wymagań normatywnych oraz wskazała obszary wymagające dalszej optymalizacji. Złącza wykonane metodą laserową i hybrydową charakteryzowały się wysoką powtarzalnością, wąską strefą wpływu ciepła oraz stabilnością strukturalną, co ma istotne znaczenie dla ich zastosowania w przemyśle energetycznym i chemicznym.

Wnioski z pracy potwierdziły, że zastosowanie technologii laserowych i hybrydowych umożliwia uzyskanie złączy spełniających rygorystyczne wymagania jakościowe i eksploatacyjne. Opracowana metoda może znaleźć szerokie zastosowanie w instalacjach energetycznych i chemicznych, przyczyniając się do wydłużenia ich żywotności, obniżenia kosztów eksploatacji oraz zwiększenia bezpieczeństwa pracy urządzeń ciśnieniowych. W

dalszych badaniach należy skoncentrować się na ocenie trwałości zmęczeniowej i korozyjnej złączy w warunkach długotrwałej eksploatacji, optymalizacji materiałów dodatkowych oraz rozwoju adaptacyjnych systemów sterowania procesem.

Słowa kluczowe: spawanie laserowe, napawanie hybrydowe, rury kompozytowe, mikrostruktura, właściwości mechaniczne, badania niszczące, badania nieniszczące, przemysł energetyczny, badanie technologii spawania,