

*Study on laser welding of a copper material and stainless steel***Badanie laserowego spawania miedzi i stali nierdzewnej**

DOI: 10.15199/62.2024.9.2

Do spawania płyt z miedzi i stali nierdzewnej użyto komercyjnego lasera światłowodowego. Moc lasera wynosiła 2,2 kW, prędkość spawania 2,5 mm/s, średnica plamki ok. 0,5 mm, prędkość podawania drutu 2–3,5 mm/s, a natężenie przepływu argonu 10 L/min. Uzyskana spoina była gładka i wolna od wad, rozkład ziarna był równomierny. Spoina miała dobre właściwości mechaniczne. Średnia wytrzymałość na rozciąganie spoin spawanych wynosiła 984 MPa, a średnia granica plastyczności spoin to 351,4 MPa. Udowodniono potencjał spawania laserowego w spawaniu różnych metali.

Słowa kluczowe: miedź, stal nierdzewna, spawanie laserowe, właściwości spoiny, struktura, wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności

A com. fiber laser was used to weld Cu and stainless steel plates. The laser power was 2.2 kW, the welding speed 2.5 mm/s, the spot diam. about 0.5 mm, and the wire feeding speed 2–3.5 mm/s. Ar gas flow rate was 10 L/min. The weld produced was smooth and defect-free, the grain distribution was uniform and the mech. properties of the joint were high. The av. tensile strength of the welded joints was 984 MPa, and the av. yield strength of the joints was 351.4 MPa. The superiority and potential of laser welding in dissimilar metal welding was evidenced.

Keywords: copper, stainless steel, laser welding, weld property, structure, tensile strength, yield strength

W zakładach chemicznych miedź i stal nierdzewna są szeroko stosowane ze względu na ich wyjątkowe właściwości fizyczne i chemiczne. Miedź odgrywa ważną rolę ze względu na doskonałą przewodność elektryczną i cieplną, podczas gdy stal nierdzewna jest szeroko stosowana w budownictwie ze względu na doskonałą odporność na korozję i wytrzymałość mechaniczną^{1, 2)}. Wraz z ciągłym rozwojem nowoczesnych technologii przemysłowych rosną również wymagania dotyczące właściwości materiałów. Do tworzenia struktur kompozytowych zbudowanych z różnych metali niezbędna jest technologia spawania różnych materiałów metalowych.

Technologia spawania laserowego, odkąd pojawiła się w latach 60. ubiegłego wieku, jest często wykorzystywana w obróbce metali ze względu na jej wysoką precyzję i wydajność. W porównaniu z tradycyjnym spawaniem, spawanie laserowe charakteryzuje się mniejszą strefą wpływu ciepła, niższym współczynnikiem odkształcenia i większą wytrzymałością spoiny^{3, 4)}.

W przypadku spawania różnych metali, takich jak miedź i stal nierdzewna, tradycyjne metody napotykały problemy (mała wytrzymałość spoiny, łatwość powstawania wad), podczas gdy spawanie laserowe ma potencjalne zalety⁵⁾. W ostatnich latach metoda ta była badana pod kątem spawania

In the field of chemical plant construction, copper materials and stainless steel are widely used because of their unique physical and chemical properties. Copper plays an important role because of its excellent electrical and thermal conductivity, while stainless steel is widely used in construction because of its excellent corrosion resistance and mechanical strength^{1, 2)}. However, with the continuous progress of modern industrial technology, the requirements for material properties are also increasing, so dissimilar metal welding technology is necessary for creating composite structures with various excellent properties by welding different metal materials.

Laser welding technology is often used in metal processing because of its high precision and high efficiency since it appeared in the 1960s. Compared with traditional welding, laser welding has smaller heat affected zone, lower deformation rate and higher joint strength^{3, 4)}.

In the dissimilar metal welding of copper and stainless steel, traditional methods meet problems such as low joint strength and easy defects, while laser welding has potential advantages⁵⁾. In recent years, laser welding has been studied for dissimilar metal welding. The studies showed that laser welding can achieve a good connection between copper and stainless steel, and the joint has high strength and good corrosion resistance⁶⁾. But there are still some problems in laser welding, such as residual stress, deformation, corrosion resistance and equipment cost. Welding of dissimilar metals is a technical problem,

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

School of Materials Science and Engineering, Shanxi Institute of Science and Technology, Jincheng 048011, China; e-mail: wrp520@sina.com

różnych metali. Badania pokazały, że spawanie laserowe może zapewnić dobre połączenie między miedzią a stalą nierdzewną, a spoina ma wysoką wytrzymałość i dobrą odporność na korozję⁶). Jednak nadal nie opanowano wszystkich problemów związanych ze spawaniem laserowym (naprężenia szczątkowe, odkształcenia, odporność na korozję i koszty sprzętu). Właściwości miedzi i stali nierdzewnej są zupełnie inne, co łatwo prowadzi do pęknięć na gorąco i niskiej wytrzymałości spoiny⁷). Dlatego ważne jest dalsze badanie nowych metod poprawy wydajności spawania różnych metali.

Celem przeprowadzonych badań było zastosowanie spawania laserowego do spawania różnych metali, takich jak miedź i stal nierdzewna, oraz analiza właściwości spoin, tak aby zapewnić podstawy teoretyczne i wsparcie techniczne dla praktycznego zastosowania tej metody w praktyce przemysłowej. Dzięki temu badaniu można było dokładnie zrozumieć zalety i ograniczenia spawania laserowego różnych metali. Podano również kilka przydatnych odniesień do doskonalenia procesów i innowacji materiałowych w powiązanych dziedzinach. Jednocześnie oczekuje się, że wyniki badań będą promować zastosowanie technologii spawania laserowego w szerszym zakresie dziedzin i umożliwią poprawę poziomu produkcji przemysłowej.

Część doświadczalna

Materiały i urządzenia

Zastosowano czerwoną miedź (czystość 99,99%) ze względu na jej doskonałą przewodność elektryczną i ciepłą oraz łatwość obróbki. Miedziana płytka miała grubość 2 mm, szerokość 50 mm i długość 100 mm. W badaniu wykorzystano austenityczną stal nierdzewną 304 o dobrej odporności na korozję i dobrych właściwościach mechanicznych⁸). Głównymi składnikami stali były żelazo, chrom i nikiel. Wymiary płyty stalowej były takie same jak płyty miedzianej. Jako gaz osłonowy wybrano argon, aby zapobiec utlenianiu i poprawić jakość spawania. Do precyzyjnego spawania wykorzystano komercyjny laser światłowodowy Light WELD 1500.

Metodyka badań

Powierzchnie płytek z miedzi i stali nierdzewnej 304 wypolerowano papierem ściernym o ziarnistości 600 i oczyszczono etanolem. Parametry spawania zostały ustawione zgodnie z danymi przedeksperymentalnymi i z literatury^{9, 10}). Moc lasera wynosiła 2,2 kW, prędkość spawania 2,5 mm/s, a średnica plamki ok. 0,5 mm. Jako gaz osłonowy wybrano argon o natężeniu przepływu 10 L/min. Spawarka laserowa była obsługiwana automatycznie po wstępnym podgrzaniu, proces spawania był monitorowany w czasie rzeczywistym, spoina była naturalnie chłodzona i oczyszczona po zakończeniu procesu.

Aby pokazać makroskopową morfologię spoin spawanych, wykonano odpowiednie fotografie. W celu zbadania ich mikrostruktury obszar spoiny obserwowano za pomocą

and the properties of copper and stainless steel are quite different, which easily leads to hot cracks and low joint strength⁷). Therefore, it is important to explore new methods to improve the welding performance of dissimilar metals.

The purpose of this study was to explore the application of laser welding in the welding of dissimilar metals like copper and stainless steel, and analyze the properties of welded joints, so as to provide theoretical basis and technical support for practical application in industrial practice. Through this study, the advantages and limitations of laser welding of dissimilar metals can be deeply understood. Some useful references for process improvement and material innovation in related fields were also provided. At the same time, the research results are expected to promote the application of laser welding technology in a wider range of fields and promote the improvement of industrial manufacturing level.

Experimental

Materials and equipment

Red copper (purity 99.99%) was used because of its superior electrical and thermal conductivity and easy processing. The copperplate was 2 mm thick, 50 mm wide and 100 mm long. Austenitic 304 stainless steel with good corrosion resistance and mechanical properties⁸) was used in the study. The steel was mainly composed of iron, chromium and nickel. The plate dimensions were the same as that of red copper. Ar was selected as shielding gas to prevent oxidation and improve welding quality. Commercial Light WELD 1500 fiber laser was used for precision welding.

Methods

Copper and 304 stainless steel plate surfaces were polished with 600 mesh sandpaper and cleaned with ethanol. The welding parameters were set according to the pre-experiment and the literature data^{9, 10}). The laser power was 2.2 kW, welding speed was 2.5 mm/s, and spot diameter was about 0.5 mm. Argon selected as shielding gas had flow rate 10 L/min. The laser welding machine was operated automatically after preheating, the welding process was monitored in real time, the joint was naturally cooled and cleaned after completion.

In order to show the macroscopic morphology of the welded joints, corresponding photos were taken. In order to further explore their microstructure, the weld area was observed by using a metallographic microscope. In order to evaluate the mechanical properties of the laser welded joints, their tensile strength and yield strength were determined by standard test methods by



Fig. 1. Macroscopic morphology of welded joints

Rys. 1. Makroskopowa morfologia spoin spawanych

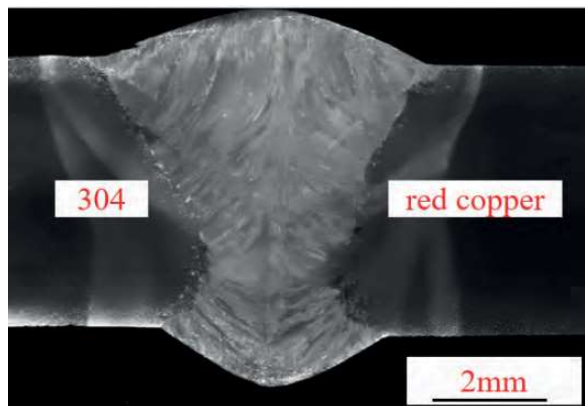


Fig. 2. Micromorphology of weld area

Rys. 2. Mikromorfologia obszaru spoiny

mikroskopu metalograficznego. W celu oceny właściwości mechanicznych spoin laserowych, ich wytrzymałość na rozciąganie i granicę plastyczności określono za pomocą standardowych metod badawczych przy użyciu uniwersalnej maszyny do testowania materiałów. Próbkę testową (spoiny miedzi i stali nierdzewnej po spawaniu laserowym) miały standardowy rozmiar, aby zapewnić dokładność i porównywalność wyników testu. Wytrzymałość na rozciąganie wyznaczano jako stosunek maksymalnej siły F_b , jaką materiał może wytrzymać w procesie rozciągania do pierwotnego pola przekroju poprzecznego S_0 .

Wyniki badań

Spoiny miały płaski i jednolity wygląd bez widocznych wad, takich jak pęknięcia i pory. Przejście między obszarem spoiny a metalem podstawowym było naturalne, co wskazuje na dobre połączenie metalurgiczne. Morfologię makroskopową spoiny spawanej pokazano na rys. 1. Po powiększeniu wyraźnie widoczna była struktura ziarna i rozkład faz (mikromorfologia) spoiny (rys. 2). Spoiny wykazały dobrą jakość zarówno na poziomie makro, jak i mikro. Obszar spoiny był gładki i wolny od wad, a rozkład wielkości ziarna był jednolity.

Wyniki testu wytrzymałości na rozciąganie zostały zebrane w tabeli 1. Średnia wytrzymałość na rozciąganie spoin spawanych wynosiła 984 MPa, co wskazuje na ich wysoką nośność. Spawanie laserowe skutecznie łączy miedź i stal nierdzewną o wysokiej wytrzymałości. Jednak w strefie spawania, strefie wpływu ciepła i strefach występowania metalu nieszlachetnego obecne były pęknięcia, ujawniając wszystkie te obszary jako potencjalne słabe ogniwa. Ogólnie rzecz biorąc, złącza wykazały wysoką nośność, ale z potencjalnymi słabościami.

Dane dotyczące granicy plastyczności spoin, reprezentujące wartość naprężenia, przy której rozpoczyna się odkształcenie plastyczne, zostały zestawione w tabeli 2. Średnia granica plastyczności spoin wyniosła 351,4 MPa, co wskazuje na dobrą stabilność pod naprężeniem. Spawanie laserowe pozwoliło uzyskać wysoką granicę plastyczności połączenia. Pęknięcia występowały w strefach spawania, wpływu ciepła i metalu nieszlachetnego, co sugeruje, że

using a universal material testing machine. The test samples were joints of copper and stainless steel after laser welding, and the samples were processed according to the standard size to ensure the accuracy and comparability of the test results. The tensile strength was the ratio of the maximum force F_b that a material could bear in the process of stretching to the original cross-sectional area S_0 .

Results

From a macro point of view, the welded joints presented a flat and uniform appearance without any obvious defects such as cracks and pores. The transition between the weld area and the base metal was natural, showing a good metallurgical combination. The macroscopic morphology of the welded joint was shown on Fig. 1. Under magnification, the grain structure and phase distribution (micromorphology) of the weld was clearly seen on Fig. 2. The welded joints hence showed a good quality at both macro and micro levels. The weld area was smooth and defect-free, and the grain size distribution was uniform.

Tensile strength test results were collected in Table 1. The average tensile strength of the welded joints was 984 MPa, indicating high bearing capacity. Laser welding effectively connected copper and stainless steel with high strength. Fractures occurred in the weld zone, heat-affected zone, and base metal zones, revealing all areas as potential weak links. Overall, the joints showed high bearing capacity but with potential weaknesses.

The yield strength data of the welded joints, representing the stress value at which plastic deformation began, were collected in Table 2. The average yield strength of the joints was 351.4 MPa, indicating good stability under stress. Laser welding achieved high yield strength in this connection. Fractures occur across weld, heat-affected, and base metal zones, suggesting all parts may yield under

Table 1. Results of tensile strength test at 25°C

Tabela 1. Wyniki testu wytrzymałości na rozciąganie w 25°C

Sample number/ Nr próbki	F_b , N	S_0 , m ²	Tensile strength/ Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Fracture position/ Pozycja pęknięcia	Remarks/Uwagi
S1	19600	20	980	weld zone/obszar spoiny	no obvious defects/ brak widocznych wad
S2	20100	20	1005	weld zone/obszar spoiny	weld microcrack/ mikropęknięcie spoiny
S3	19300	20	965	heat-affected zone/ strefa oddziaływania ciepła	no obvious defects/ brak widocznych wad
S4	19900	20	995	copper side base metal/ materiał podstawy bocznej z miedzi	base metal necking/ przewężenie metalu nieszlachetnego
S5	19500	20	975	stainless steel side base material/ materiał podstawy bocznej ze stali nierdzewnej	fracture of base metal/ pęknięcie metalu nieszlachetnego

Table 2. Results of yield strength test at 25°C

Tabela 2. Wyniki testu granicy plastyczności w 25°C

Sample number/ Nr próbki	Yield force/ Siła plastyczności, N	Yield stress value/ Wartość granicy plastyczności, MPa	Yield displacement/ Przemieszczenie granicy plastyczności, mm	Fracture position/ Pozycja pęknięcia	Remarks/Uwagi
S1	10500	350	0.25	weld zone/ obszar spoiny	no obvious defects/ brak widocznych wad
S2	10800	360	0.27	weld zone/ obszar spoiny	weld microcrack/ mikropęknięcie spoiny
S3	10300	343	0.24	heat-affected zone/strefa oddziaływania ciepła	no obvious defects/ brak widocznych wad
S4	10700	357	0.26	copper side base metal/ materiał podstawy bocznej z miedzi	slight necking/male przewężenie
S5	10400	347	0.25	stainless steel side base material/ materiał podstawy bocznej ze stali nierdzewnej	no obvious defects/ brak widocznych wad

wszystkie te obszary mogą ulec odkształceniu pod wpływem naprężeń. Strefa spawania była bardziej podatna ze względu na złożoność i koncentrację naprężeń. Spoiny zachowały stabilność i wysoką granicę plastyczności, ale lokalne obszary wymagają uwagi w celu zapewnienia długoterminowej funkcjonalności.

Zwiększenie mocy lasera może zwiększyć wytrzymałość na rozciąganie i granicę plastyczności spoin poprzez pełne stopienie materiałów w celu uzyskania mocniejszych połączeń. Nadmierna moc może jednak spowodować przegrzanie obszaru spawania i wystąpienie wad, dlatego moc należy dobrać rozsądnie. Większa prędkość spawania może ograniczyć topienie, wpływając na wytrzymałość i powodując odkształcenia lub pęknięcia. Wybór odpowiedniej prędkości był kluczem do uzyskania najlepszej jakości spoiny.

Prędkość podawania drutu może również wpływać na jakość spoiny. Większa prędkość może powodować nierówne spoiny i wady, a mniejsza prędkość może zmniejszyć wydajność spawania. Równoważenie jakości i efektywności miało kluczowe znaczenie przy wyborze prędkości.

Mała prędkość podawania drutu zapewniała dobrą jakość spoiny (ponieważ materiały stapały się równomiernie), ale niską wydajność. Nadmierna prędkość może spowodować nierównomierne topienie i obniżenie jakości. Wydajność

stress. The weld zone was more prone due to complexity and stress concentration. The joints maintained stability and high yield strength, but local areas required attention for long-term performance.

Laser power increase might enhance tensile and yield strengths of the welded joints by fully melting materials for stronger connections. However, excessive power could overheat the weld area and cause defects, so power must be chosen judiciously. Faster welding speed could reduce melting, affecting strength; and cause deformations or cracks. Choosing the right speed was the key for best welding.

Wire feeding speed could also impact the welded joint performance. Faster speed could cause uneven welds and defects; slower one could reduce the welding efficiency. Balancing quality and efficiency was crucial in selecting speed.

Low wire feeding speed yielded high weld quality but low efficiency, as materials melt evenly. Speed of 2 to 3.5 mm/s optimized weld quality. Excessive speed could cause uneven melting and reducing quality. Efficiency increased with increasing speed, but declined past a threshold due to complexity. Laser power, welding speed, and wire feeding speed significantly impacted joint performance. The

rosła wraz ze wzrostem prędkości, ale spadała po przekroczeniu pewnego progu. Prędkość 2–3,5 mm/s dawała optymalną jakość spoiny.

Moc lasera, prędkość spawania i prędkość podawania drutu znacząco wpłynęły na właściwości spoiny. Parametry muszą zostać zoptymalizowane w celu uzyskania wysokiej jakości spoin. Przyszłe badania pomogą określić wpływ innych parametrów spawania.

Wnioski

Techniką spawania laserowego można skutecznie łączyć takie materiały jak miedź i stal nierdzewna o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności. W dziedzinie inżynierii materiałowej jest to niezawodna metoda uzyskiwania połączeń różnych metali. Uzyskano płaskie i wolne od wad spoiny o jednolitej wielkości ziarna. Zwiększenie mocy lasera spowodowało poprawę wytrzymałości ze względu na większą energię i całkowite stopienie. Optymalizacja prędkości spawania pozwoliła uniknąć niedostatecznego lub nadmiernego nagrzewania, podczas gdy prędkość podawania drutu musiała równoważyć jakość i wydajność. W ten sposób udowodniono potencjał spawania laserowego w spawaniu różnych metali. Badanie to ma jednak pewne ograniczenia i nie ma pełnego zastosowania do wszystkich materiałów i procesów.

parameters have to be optimized to achieve high-quality welds. Future research can explore other welding parameters' impact.

Conclusions

Laser welding effectively connected copper and stainless steel with high tensile and yield strengths, providing a reliable method for dissimilar metal connections in material engineering. Flat and defect-free welds and uniform grain sizes were produced. Increasing laser power will result in improving strengths due to more energy and complete melting. Optimizing welding speed will avoid insufficient or excessive heat, while wire feeding speed had to balance quality and efficiency. The superiority and potential of laser welding in dissimilar metal welding was hence evidenced. However, this study has some limitations, and is not fully applicable to all materials and processes.

Received/Otrzymano: 25-06-2024

REFERENCES/LITERATURA

- [1] N. Visniakov, G. Mikalauskas, O. Cernasejus, J. Skamat, *Materialwiss. Werkstofftech.* 2019, **50**, No. 5, 646.
- [2] H. Nguyen, C.K. Lin, P.C. Tung, J.R. Ho, *Ceramics Int.* 2024, **50**, No. 12, 21788.
- [3] K.U. Ashok, P. Laxminarayana, *Solid State Technol.* 2020, **63**, No. 5, 889.
- [4] N. Ackerl, K. Wegener, *J. Laser Appl.* 2020, **32**, No. 2, 22049.
- [5] L.A. Efimenko, O.E. Kapustin, I.Y. Utkin, A.P. Derkach, E.M. Shamov, I.A. Begunov et al., *Weld. Int.* 2020, **34**, No. 1–3, 101.
- [6] C.W. Lee, S.Y. Kim, S.G. Jang, G.Y. Shin, J.H. Yoo, *ISIJ Int.* 2019, **59**, No. 1, 136.
- [7] Y. Zou, K. Zuo, L. Fang, P. Li, *Trans. China Weld. Inst.* 2019, **40**, No. 2, 77.
- [8] Q. Wang, Z. Liu, P. Huang, P. Zhu, *J. Shanghai Jiaotong Univ.* 2019, **53**, No. 1, 62.
- [9] Y. Zhang, Z. Liang, Z. Zhang, R. Lu, H. Wei, *J. Hunan Univ. Nat. Sci.* 2019, **46**, No. 2, 51.
- [10] Y. Sun, K. Zhang, C. Tan, H. Zhao, *Trans. China Weld. Inst.* 2019, **40**, No. 2, 47.