

Hybrydowe spawanie stali 41Cr4 z wykorzystaniem promieniowania laserowego i nagrzewania indukcyjnego

Hybrid welding of 41Cr4 steel using laser beam and induction heating

Streszczenie

Technologia spawania laserowego jest jedną z najbardziej rozwijających się metod łączenia materiałów. Pomimo wielu zalet, takich jak wysoka jakość uzyskiwanych spoin, dobre właściwości mechaniczne, wąska strefa wpływu ciepła, w wybranych przypadkach, z uwagi na wysoki gradient temperatury, wyniki są niekorzystne, gdyż dochodzi do pęknięcia spoin na zimno. Rozwiązaniem tego problemu jest użycie hybrydowych metod spawalniczych, które, oprócz wiązki lasera, wykorzystują dodatkowe źródło energii, np. nagrzewanie indukcyjne. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania nagrzewania indukcyjnego skojarzonego ze spawaniem stali oraz wyniki pomiarów rozkładów temperatury dla opracowanego wzbudnika indukcyjnego. Zaprezentowano również wyniki badań połączeń spawanych hybrydowo ze stali 41Cr4 (Nr 1.7035).

Abstract

Laser beam welding is one of the most evolving methods of joining materials. Except for many advantages of this solution, such as high quality of the obtained seams, good mechanical properties, narrow heat affected zone, in particular cases, regarding high temperature gradient, the results are unsatisfying, because of cold seams cracking. The solution to this problem is the application of the hybrid welding methods, which, apart from laser irradiation, use additional source of energy, e.g. an induction coil. This article presents the potential for using inductive/induction heating associated with steel welding and shows the results of temperature distribution research for the developed induction coil. Additionally, it demonstrates the effects of laser hybrid welding for 41Cr4 (Nr 1.7035) steel.

Wstęp

Współcześnie istnieje wiele sposobów łączenia materiałów, wśród których bez wątpienia jedną z najważniejszych jest spawanie. Coraz większą rolę odgrywa spawanie wiązką promieniowania laserowego, zwłaszcza w lotnictwie, motoryzacji i przemyśle stoczniowym. Przemawia za tym wysoka jakość uzyskiwanych spoin, dobre właściwości mechaniczne złącza, wąska strefa wpływu ciepła (SWC), możliwość spawania szerokiego zakresu materiałów (metale, polimery, kompozyty, ceramika), łatwość automatyzacji

oraz robotyzacji procesu [1]. Jednakże w niektórych zastosowaniach wysoki gradient temperatury okazuje się istotną przeszkodą w uzyskaniu prawidłowych spoin [2]. Spowodowane jest to dużą gęstością energii w jeziorce spawalniczym, szczególnie podczas spawania z głębokim przetopem, podczas którego dochodzi do parowania materiału. Efektem tego jest duża dynamika chłodzenia, co prowadzi do powstawania twardej i kruchej struktury martenzytu w przypadku stali o zwiększonej zawartości węgla i składników stopowych, a wskutek tego do pęknięć wzdłuż i na granicy płytek martenzytu lub ziaren byłego austenitu. Mikropęknięcia mogą początkowo obejmować kilka ziaren, ale w ich następstwie pojawia się zagrożenie pęknięcia zmęczeniowego lub kruchej. Jest to szczególnie widoczne w materiałach skłonnych do hartowania, a więc stalach niestopowych o zawartości węgla powyżej 0,25% wag., stalach

Inż. Tomasz Wojno, mgr inż. Jakub Kędzia, prof. dr hab. inż. Zbigniew Mirski, dr inż. Jacek Reiner – Politechnika Wrocławska.



Rys. 1. Pęknięcia na zimno w spoinie stali C45 spawanej promieniem lasera [3]

Fig. 1. Cold cracks inside seam in C45 steel welded with laser beam [3]

stopowych o zawartości węgla powyżej 0,20% wag. i stopach na bazie niklu. Na rysunku 1 przedstawiono przykładową makrostrukturę spoiny, wewnątrz której powstały pęknięcia na zimno.

Problem pęknięcia na zimno w złączach spawanych można eliminować przez zastosowanie technologii spawania hybrydowego, która oprócz promieniowania laserowego wykorzystuje dodatkowe źródło energii, np. nagrzewanie indukcyjne. Pierwsze takie rozwiązanie zostało opracowane przez Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik w Dreźnie, na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego dla firmy Mercedes-Benz [4]. Idea tej metody polega na zastosowaniu induktora, którego cewka generuje szybkozmienne pole elektromagnetyczne. Prowadzi to do powstania prądów wirowych wewnątrz materiałów (prawo indukcji Faradaya), a więc zgodnie z prawem Joule'a-Lenza generowane jest ciepło. Wzbudnik powoduje podgrzanie większej objętości materiału do zadanej temperatury, zatem oddziaływanie wiązki lasera nie jest tak selektywne. Graficzną prezentację całego procesu spawania hybrydowego pokazano na rysunku 2.

Technologia laserowego spawania hybrydowego jest ciągle rozwijana [2, 5, 7]. Rozwiązanie takie pozwala na eliminację pęknięć na zimno w spoinie w wyniku wydłużenia czasu chłodzenia, co prowadzi do uzyskania struktury o wytrzymałości nie gorszej od materiału rodzimego. Co więcej, nie istnieje obawa o zmianę twardości zahartowanych materiałów w wyniku wyżarzania, gdyż strefa oddziaływania cewki induktora ogranicza się tylko do obszaru przyszłego złącza. Tym samym rozszerza się zakres dostępnych materiałów do spawania laserowego. Obejmuje on wszystkie materiały, które wymagają podgrzewania wstępnego lub wygrzewania po procesie. Ponadto, dzięki dodatkowej energii wprowadzanej do procesu od induktora mogą być spawane grubsze arkusze blach, a przygotowanie łączonych krawędzi nie jest tak krytyczne. Zwiększa się również prędkość spawania, podobnie jak w innych metodach hybrydowych [7]. Kolejnym czynnikiem przemawiającym za takim rozwiązaniem jest zmniejszenie zapotrzebowania na energię od wiązki laserowej, która w stosunku do energii od induktora wynosi od 1:8 do 1:20 [2]. Wskazane jest, aby materiały wykazywały właściwości ferromagnetyczne, a więc nagrzewanie indukcyjne może być stosowane do temperatury poniżej temperatury Curie, która jest różna dla każdego z materiałów.

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów rozkładu temperatury generowanej przez opracowany wzbudnik w funkcji jego odległości od materiału, wpływu szybkości przesuwania oraz mocy. Przedstawiono również wyniki laserowego spawania hybrydowego stali 41Cr4 do ulepszania cieplnego. Pierwszy eksperyment potwierdził jej pęknięcie podczas spawania laserowego, kolejne hybrydowe spawanie wykonano bez osłony i z zastosowaniem gazu osłonowego.

Nagrzewanie indukcyjne

Nagrzewanie indukcyjne jest jedną z najczęściej stosowanych metod bezkontaktowego grzania materiałów dzięki wykorzystaniu indukcji elektromagnetycznej. Jest ona zarówno w przemyśle (spawanie, lutownice, obróbka cieplna powierzchni materiału, produkcja stopów), jak i coraz powszechniej w gospodarstwach domowych – kuchenki indukcyjne. Zaletą takiego



Rys. 2. Schemat procesu spawania hybrydowego z zastosowaniem nagrzewania indukcyjnego [5]

Fig. 2. Scheme of hybrid welding process using induction heating [5]

rozwiązania jest bardzo duża szybkość osiągnięcia zadanej temperatury, ze względu na dużą moc oraz dużą gęstość strumienia pola elektromagnetycznego.

Zasadniczym elementem nagrzewania indukcyjnego jest induktor zbudowany z układu zasilającego, głowicy wzbudnika oraz cewki. Najistotniejsze parametry induktorów dotyczą zakresu częstotliwości prądu przepływającego przez wzbudnik oraz mocy wyjściowej, stąd też można wyróżnić dwa rodzaje induktorów [8]:

- pracujące w zakresie fal radiowych (*Radio Frequency Range*) – częstotliwość wynosi od 100 kHz do 10 MHz, moc od 2,5 do 40 kW,
- pracujące w zakresie średnich częstotliwości (*Medium Frequency Range*) – częstotliwość wynosi od 1 do 10 MHz, a moc od 50 do 500 kW.

O ile układ zasilający oraz głowica są stałymi elementami, o tyle wzbudnik jest elementem wymiennym i ma największe znaczenie w adaptacji do procesu grzania indukcyjnego. Jego kształt decyduje o sprawności układu i rozkładzie pola temperaturowego wewnątrz materiału [9, 10]. Stąd też ważne jest dobre zaprojektowanie tej części, dokładnie pod określony proces lub stanowisko. Z elektromagnetycznego punktu widzenia związek cewki z materiałem roboczym jest podobny do relacji pomiędzy uzwojeniami w transformatorze, co oznacza, że natężenie pola elektromagnetycznego maleje z kwadratem odległości. Stąd zwiększanie odległości wzbudnika od materiału powoduje zmniejszanie ilości generowanego ciepła [7, 11]. Dlatego cewka powinna być jak najbliżej materiału, co nie zawsze może być zrealizowane zarówno ze względu na specyfikę procesu technologicznego, jak i kształt nagrzewanego elementu. Zaleca się, aby dla materiałów ferromagnetycznych odległość ta wynosiła 6,4÷9,5 mm [11]. Ponadto, bardzo istotne jest, aby nie następowało zjawisko wzajemnego neutralizowania się pola magnetycznego przez przeciwne strony uzwojenia cewki. Kolejną kwestią jest geometria nagrzewanej powierzchni, gdyż determinuje ona średnicę solenoidu. Jeżeli oba rozmiary są porównywalne, to można zastosować jednozwojową cewkę. Gdy powierzchnia przedmiotu jest znacznie większa niż średnica wzbudnika, to lepiej sprawdzi się wielozwojowa cewka, która zapewni lepszy rozkład ciepła. Realizowane jest to przez zwiększanie liczby uzwojeń zapewniające większe pole grzewcze. Problem powstaje w chwili, gdy długość wzbudnika jest 4÷8 razy większa od jego średnicy, ponieważ przy dużych mocach następuje zaburzenie jednorodności rozkładu ciepła wewnątrz nagrzewanego elementu. Rozkład pola elektromagnetycznego, a więc i temperatury, może być kształtowany również przez koncentratory i ekrany. Cechą szczególną zastosowania koncentratorów jest zwiększenie gęstości mocy poniżej cewki, co przekłada się na wyższą temperaturę ogrzewanego materiału [10, 12, 13]. Przedstawione zagadnienia mają za zadanie zwrócić uwagę na najważniejsze aspekty przy projektowaniu wzbudników. Bardziej szczegółowo przedstawiono to w pracach [9, 11].

Współcześnie projektowanie wzbudników odbywa się za pomocą programów CAD/CAM/CAE, które pozwalają na symulowanie rozkładu pola elektromagnetycznego i rozkładu temperatury wewnątrz badanego materiału. Jest to duże udogodnienie, ponieważ można już na etapie projektowania wykryć wady i błędy zastosowanego rozwiązania. Jak w przypadku każdej symulacji termicznej, osiągnięcie przydatnych wyników wymaga od projektanta dużej wiedzy i doświadczenia. Optymalny projekt wzbudnika pozwala jednak osiągnąć wyraźne korzyści ekonomiczne, dzięki większej szybkości procesu, zmniejszeniu mocy lasera oraz zapotrzebowania na energię.

Badanie rozkładu temperatury generowanego przez induktor

Celem zadania badawczego była analiza rozkładu temperatury generowanej przez zaprojektowany wzbudnik, a szczegółowo – sprawdzenie rozkładu pola temperaturowego na powierzchni materiału w zależności od mocy induktora, odległości cewki od materiału, prędkości przemieszczania solenoidu i nastaw regulatora pirometru. Podstawą do zaprojektowania wzbudnika był kształt i przestrzeń robocza głowicy laserowej obrabiarki CNC. Założono, że wzbudnik zostanie przymocowany w taki sposób, aby wiązka promieniowania laserowego trafiała w materiał współosiowo przez otwór wzbudnika, w postaci cewki jednozwojowej wykonanej z rurki miedzianej o przekroju kwadratowym 6x6 mm. W celu koncentrowania pola elektromagnetycznego, tak aby indukcja zachodziła tylko bezpośrednio pod uzwojeniem, eliminacji strat energii i uzyskania możliwie skupionego rozkładu temperatury wewnątrz materiału, część aktywną cewki pokryto materiałem ferrytycznym. Wymiary zaprojektowanej cewki to: średnica zewnętrzna 42 mm, średnica wewnętrzna 20 mm, wysokość 6,5 mm.

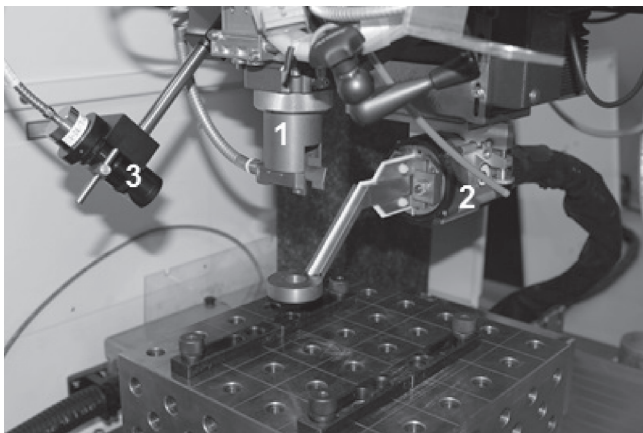
Do badań zastosowano następujące urządzenia i przyrządy pomiarowe:

- obrabiarkę 5-osiową CNC model TruLaser Cell 3010 (Trumpf),
- nagrzewnicę indukcyjną Minac 25/50 o mocy 25 kW (EFD Induction),
- kamerę termowizyjną TVS-200 (NEC),
- pirometr dwubarwny model QP003 (LASCON).

Kamera termowizyjna została zainstalowana w taki sposób, aby jej pole widzenia obejmowało przestrzeń wokół oraz częściowo pod cewką. Wzbudnik umieszczono w osi optycznej układu głowicy do spawania laserowego. Widok stanowiska pokazano na rysunku 3.

Do badań związanych z oddziaływaniem wzbudnika użyto blach ze stali niestopowej dostarczonych w stanie surowym. Ich wymiary to 50x50x10 mm i 50x70x10 mm.

Do kalibracji współczynnika emisyjności dla kamery termowizyjnej zastosowano pirometr dwubarwny.



Rys. 3. Stanowisko spawania hybrydowego: 1 – głowica lasera, 2 - wzbudnik, 3 – pirometr

Fig. 3. The hybrid welding test stand: 1 – laser head, 2 – induction coil, 3 – pyrometer

Pomiar metodą dwubarwną nie wymaga kalibracji emisyjności dla ciała szarego, gdyż dzięki dwukanałowemu pomiarowi wyznaczany jest punkt pracy na krzywej Wiena.

W pierwszej kolejności sprawdzono jak moc induktora oraz wysokość nad powierzchnią roboczą wpływają na maksymalną temperaturę na powierzchni materiału. W tym celu dokonano serii pomiarów dla różnych mocy wyjściowych induktora oraz odległości cewki nadgrzewanego elementu. Zmiany temperatury były rejestrowane kamerą termowizyjną, która zapisywała dane co 15 s.

Kolejnym etapem badań była analiza, jak prędkość przemieszczającego się wzbudnika wpływa na rozkład temperatury. Był to istotny punkt badań, ponieważ informacja ta pozwoliła na dobór optymalnej prędkości nagrzewania materiału, przed i po procesie spawania. W tym celu ustalono stałą odległość cewki od powierzchni roboczej materiału $h = 5 \text{ mm}$ i stałą moc induktora $P = 5 \text{ kW}$, a parametrem sterowanym była prędkość posuwu roboczego.

Ostatnim etapem badań było sterowanie mocą induktora na podstawie sygnału referencyjnego z pirometru. W poprzednich etapach badań moc była stała, stąd też podczas procesu grzania materiału uzyskiwana temperatura rosła. Wynika to z akumulacji ciepła w materiale i malejącego przewodnictwa do otoczenia. Do utrzymania stałej temperatury wykorzystano pomiar pirometryczny oraz sterowanie mocą induktora przez regulator PI. Regulator zestrojono, przyjmując wzmocnienie $K = 0,80$ i stałą czasową $T = 10 \text{ ms}$, przy których wartość maksymalnej oscylacji temperatury nie przekroczyła 10°C .

Tablica I. Skład chemiczny stali 41Cr4 w % wag. (reszta Fe), $C_e = 0,77\%$ [14]

Table I. Chemical composition of steel 41Cr4 in % of grade (rest Fe), $C_e = 0,77\%$ [14]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Co	Cu
0,36÷0,45	0,5÷0,9	0,17÷0,37	max 0,035	max 0,035	0,8÷1,2	max 0,3	max 0,1	max 0,2	max 0,05	-	max 0,25

Technologia hybrydowego spawania laserowego stali 41Cr4

Celem badań technologicznych była analiza procesu hybrydowego spawania laserowego stali 41Cr4 (Nr 1.7035). Jest to stal niskostopowa chromowa przeznaczona do ulepszania cieplnego i hartowania powierzchniowego. Stosowana jest na części o grubości do 40 mm, takie jak: silnie obciążone wały, korbowody, tuleje, osie, przekładnie zębate, tarcze ściernicze, korpusy przyrządów oraz formy o większej trwałości. Materiał jest trudno spawalny, stąd przed spawaniem konieczne jest jego podgrzewanie, a po spawaniu obróbka cieplna. W tablicy I przedstawiono skład chemiczny analizowanego materiału. Do badań użyto płaskowników o wymiarach 60x16x10 mm dostarczonych w stanie surowym.

Stanowisko badawcze przedstawione wcześniej poszerzono o laser dyskowy TruDisk 4002 (Trumpf) o mocy 2 kW i jakości wiązki 26 mm·mrad oraz głowicę optyczną ze światłowodem o średnicy rdzenia 600 μm ($f_{\text{kolim}} = 200 \text{ mm}$, $f_{\text{skup}} = 200 \text{ mm}$).

W pierwszej części badań przeprowadzono próbę spawania laserowego wybranej stali, oczekując pęknięcia spoiny. Dobrano moc lasera 2 kW i prędkość posuwu 600 mm/min. Celem badań było uzyskanie maksymalnego przetopu przy minimalnej szerokości SWC. W trakcie procesu spawania ognisko wiązki (średnica przewężenia wiązki 0,6 mm, długość Rayleigha 3 mm) ustawiono na powierzchni materiału obrabianego. Następnie wykonano zgląd metalograficzny w celu określenia szerokości SWC i głębokości wtopienia.

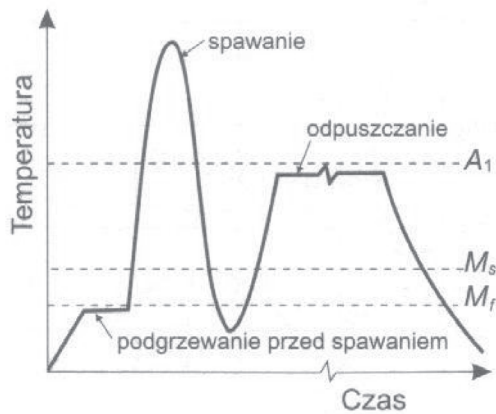
Technologia spawania stali niskostopowych do ulepszenia cieplnego zaleca następujący schemat (rys. 4): najpierw materiał należy podgrzać do temperatury poniżej końca przemiany martenzytycznej M_f , po spawaniu ochłodzić go poniżej temperatury M_f (zahartować), a następnie poddać odpuszczaniu wysokiemu ($500 \div 650^\circ\text{C}$) – nagrzanie poniżej temperatury A_1 .

Minimalną temperaturę podgrzewania wstępnego T w $^\circ\text{C}$ i jednocześnie temperaturę międzyścięgową dla płaskownika o grubości 16 mm wykonanego ze stali 41Cr4 obliczono z zależności Seferiana:

$$T = 350 \cdot [C_e \cdot (1 + 0,005g) - 0,25]^{0,5} \quad (1)$$

gdzie: C_e – ekwiwalent węgla, g – grubość spawanego elementu, mm.

Według zależności (1) minimalna wartość temperatury podgrzewania wstępnego dla badanych próbek



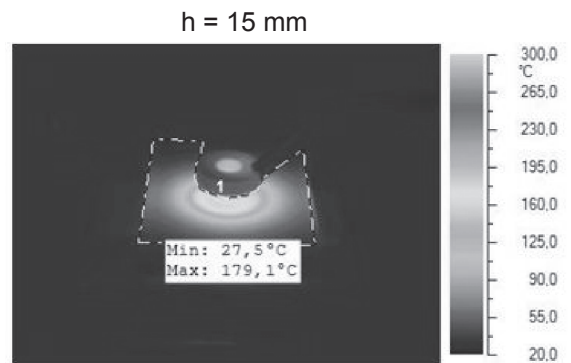
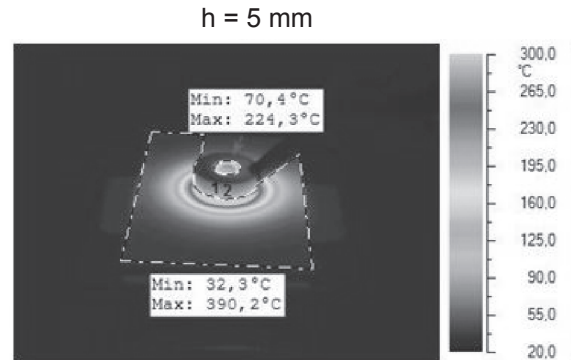
Rys. 4. Schemat obróbki cieplnej stali 41Cr4 [13]
Fig. 4. Scheme of heat treatment 41Cr4 steel [13]

wynosi 276,7°C. Ponieważ używany pirometr ma dolną granicę pomiarową 286,7°C, przyjęto, że temperatura ta będzie wynosić 300°C. Jest to jednocześnie zalecana temperatura międzyścięgowa przy spawaniu stali niskostopowych [1]. Prędkość przemieszczającego się wzbudnika wynosiła 300 mm/min, w celu zapewnienia jednorodnego rozkładu temperatury w materiale. Znając etapy poszczególnych faz procesu spawania stali niskostopowej przeznaczonej do obróbki cieplnej, wykonano niezbędne zabiegi cieplne przed i po spawaniu, stosując do tego induktor, a następnie spawano próbki wiązką lasera w sposób hybrydowy. Wykonano dwie spoiny: pierwszą – bez gazu osłonowego, drugą – w osłonie argonu (przepływ gazu 2 dm³/min). Następnie przygotowano zgłady metalograficzne uzyskanych połączeń w celu określenia szerokości SWC i głębokości wtopienia. Dodatkowo, wykonano pomiary twardości dla złącza uzyskanego w osłonie argonu.

Rozkład temperatury na powierzchni stali nagrzewanej indukcyjnie

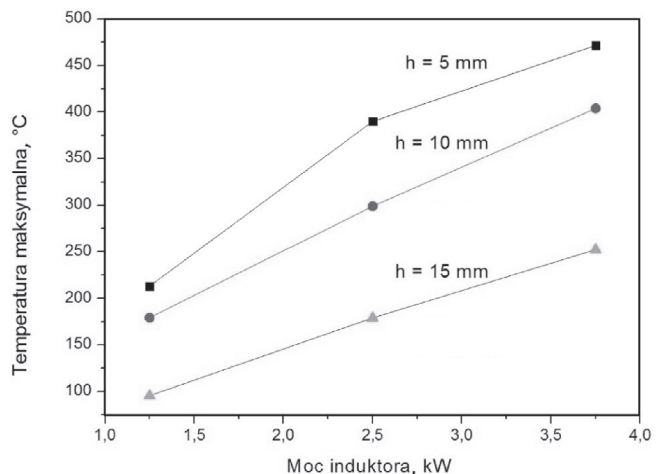
Zdjęcia z kamery termowizyjnej pozwalają potwierdzić, że kształt pola temperaturowego na powierzchni materiału dokładnie odzwierciedla wygląd części aktywnej wzbudnika (rys. 5). Dzięki zastosowaniu koncentratora pole elektromagnetyczne nie ulega rozproszeniu na boki. Nie dochodzi również do strat pochodzących od doprowadzeń do części aktywnej cewki.

Na podstawie przedstawionego na rysunku 6 wykresu można stwierdzić, że zwiększanie odległości wzbudnika od powierzchni roboczej (h) powoduje zmniejszanie natężenia indukowanego prądu wewnątrz nadgrzewanego materiału, czego skutkiem jest spadek maksymalnej temperatury. W efekcie, aby nagrzać materiał do temperatury ok. 390°C w odległości 5 mm, potrzeba 2,5 kW mocy, a w odległości 10 mm już 1,5 razy więcej. Natomiast zwiększanie mocy wyjściowej induktora powoduje, że częstotliwość prądu w obwodzie cewki rośnie, co przekłada się na wzrost częstotliwości zmian pola magnetycznego. To z kolei powoduje



Rys. 5. Rozkład temperatury na powierzchni stali, przy mocy induktora o mocy 2,5 kW

Fig. 5. Distribution of temperature field on steel surface for inductor power 2,5 kW

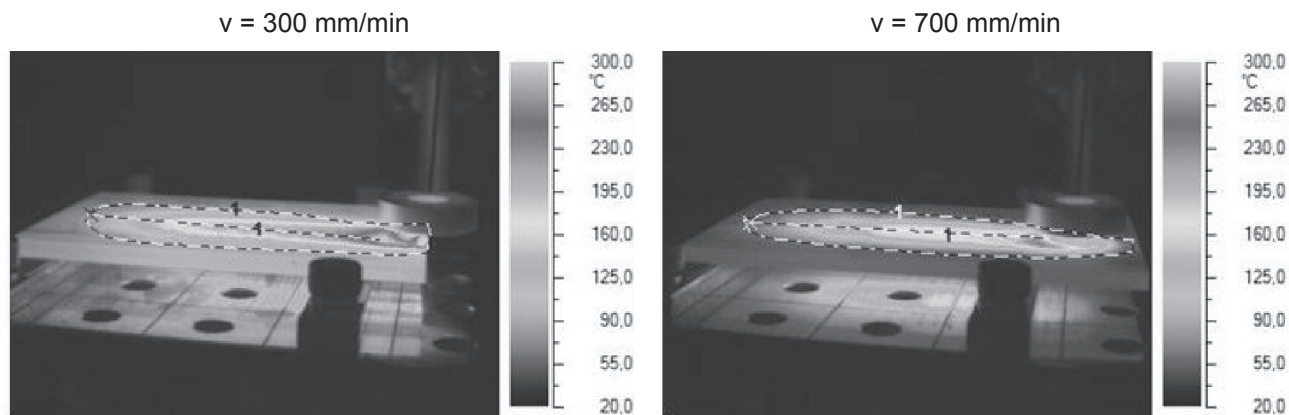


Rys. 6. Zależność maksymalnej temperatury w funkcji mocy induktora dla różnych odległości wzbudnika od materiału

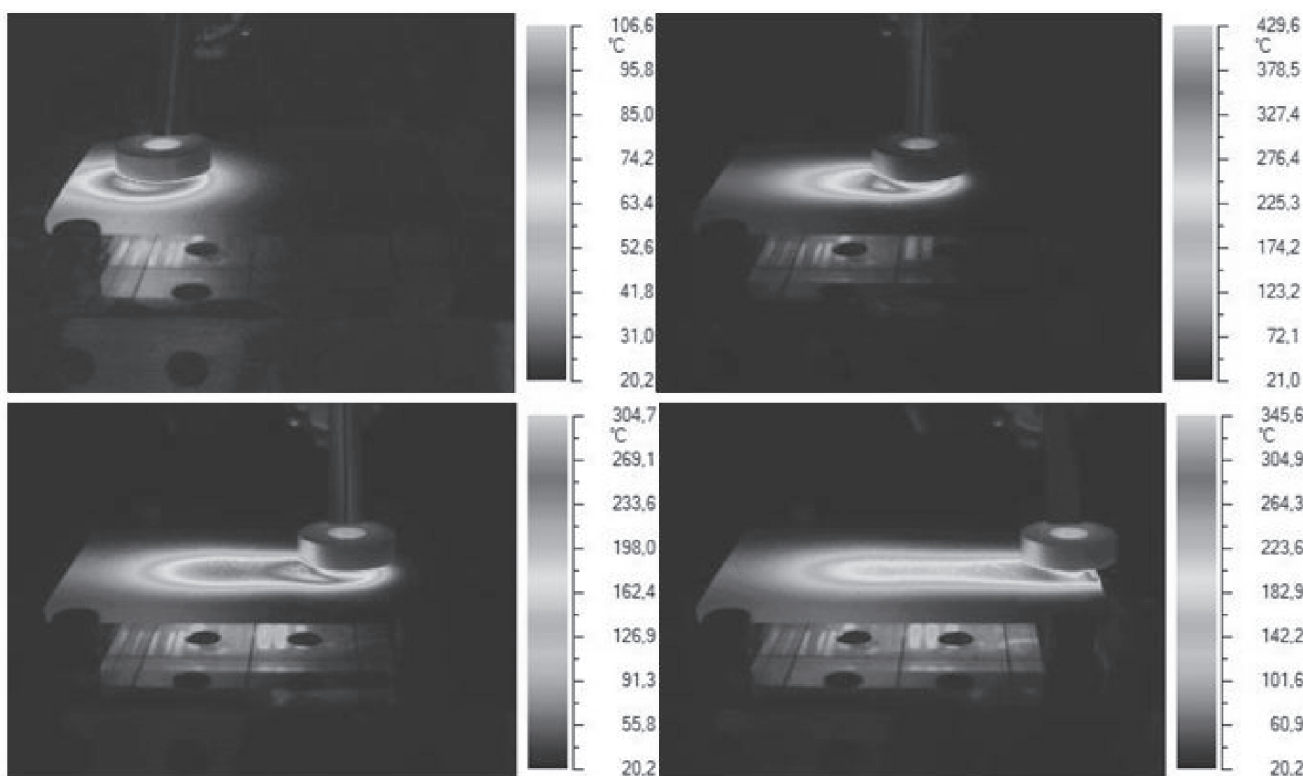
Fig. 6. Dependence of maximum temperature in function of inductor power for different coil height over material

indukowanie się prądów wirowych o większym natężeniu, a więc generowanie większej ilości ciepła, czego efektem jest większa maksymalna temperatura nagrzania materiału dla tej samej odległości.

Na podstawie rysunku 7, przedstawiającego rozkład temperatury na powierzchni materiału, można zauważyć, że zmiana posuwu roboczego przy tej samej mocy powoduje zmianę powierzchni nagrzanego obszaru. Przy zwiększaniu prędkości pole to staje się węższe. Wynika to z oddziaływania pola elektromagnetycznego na materiał nagrzewany. Szybkozmiennne pole powoduje indukowanie się prądów wirowych o dużej



Rys. 7. Rozkład temperatury na powierzchni materiału podczas ruchu wzbudnika z mocą $P = 5 \text{ kW}$
Fig. 7. Distribution of temperature field on the surface during coil movement with power $P = 5 \text{ kW}$



Rys. 8. Rozkład pola temperatury na powierzchni materiału przy sterowaniu regulatorem PI na bazie pomiarów pirometrem
Fig. 8. Temperature distribution field on the material surface using control by pyrometer signal

gęstości, co prowadzi do nagrzania się elementu do wyższej temperatury. Na skutek zmian właściwości materiału w funkcji temperatury natężenie indukowanych prądów jest większe na początku przemieszczającej się cewki. Doprowadza to do zmniejszania się gęstości prądów wirowych w obszarze, gdzie materiał został już nagrany. Mniejszy posuw powoduje podgrzanie materiału do wyższej temperatury, stąd ta strefa jest szersza.

Analiza zdjęć przedstawionych na rysunku 8 pokazuje, że dobrane parametry regulatora PI pirometru pozwoliły na uzyskanie stałej szerokości pola temperaturowego, co widać w kolejnych etapach procesu nagrzewania. Ponadto uzyskana temperatura za wzbudnikiem jest stała, co ma istotne znaczenie podczas

grzania, przed i po spawaniu, gdyż materiał zostanie podgrzany na całej długości spoiny do zadanej wartości temperatury.

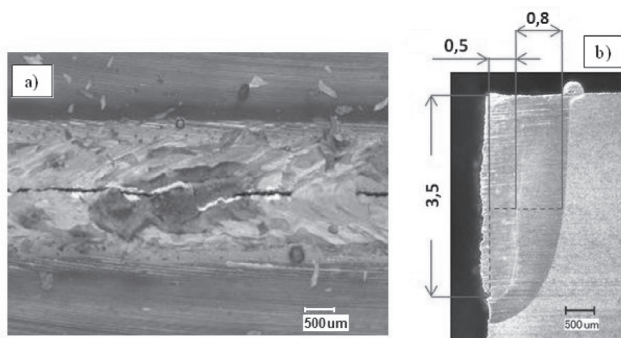
Badanie połączeń spawanych stali 41Cr4

Na rysunku 9 pokazano lico i przekrój spoiny po procesie spawania wiązką lasera bez użycia gazu osłonowego. Zgodnie z oczekiwaniami, spoina pękła zaraz po spawaniu. Mogło to nastąpić w wyniku działania naprężeń skurczowych (pęknięcie na gorąco), które spowodowały pęknięcie wzdłużne, a także dużej

hartowności materiału, prowadzącej do wystąpienia twardej i kruchej struktury martenzytycznej, czyli pęknięcia na zimno. Pomiar wykonany za pomocą mikroskopu świetlnego wykazały głębokość wtopienia równą 3,5 mm, szerokość spoiny 1,0 mm, a szerokość SWC równą 0,8 mm.

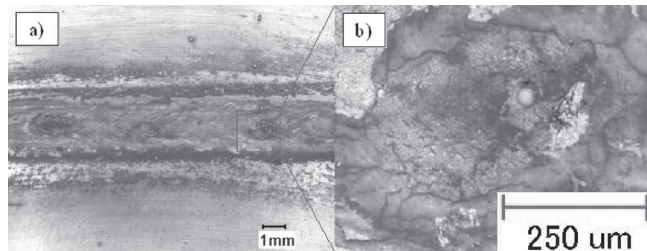
Po zastosowaniu obróbki cieplnej, której schemat przedstawiono na rysunku 4, przeprowadzono spawanie bez osłony oraz w osłonie argonu. Stwierdzono, że w obydwu spoinach nie wystąpiły pęknięcia wzdłużne, tak jak poprzednio bez nagrzewania indukcyjnego. W przypadku braku osłony gazowej na licu spoiny dostrzegalne są jednak mikropęknięcia i mikropory, związane z absorpcją gazów z atmosfery (rys. 10).

Na rysunku 11 widać, że w obu uzyskanych spoinach i SWC nie zaobserwowano pęknięć na zimno. Nie udało się uzyskać pełnego przetopu ze względu na zbyt małą moc lasera, głębokość wtopienia wyno-



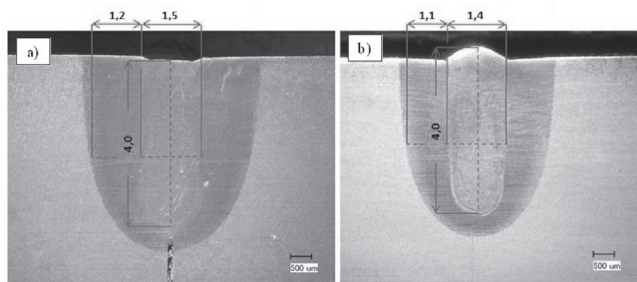
Rys. 9. Pęknięcie w spoinie stali 41Cr4 wykonanej bez użycia induktora (a), makrostruktura pękniętej spoiny, trawiono chemicznie Nital (b)

Fig. 9. Cracks in 41Cr4 steel seam made without inductor (a), a macrostructure, chemically etched by Nital (b)



Rys. 10. Lico spoiny w złączu stali 41Cr4, spawanie bez gazu osłonowego (a, b)

Fig. 10. Weld face of 41Cr4 steel, welding without shielding gas (a, b)

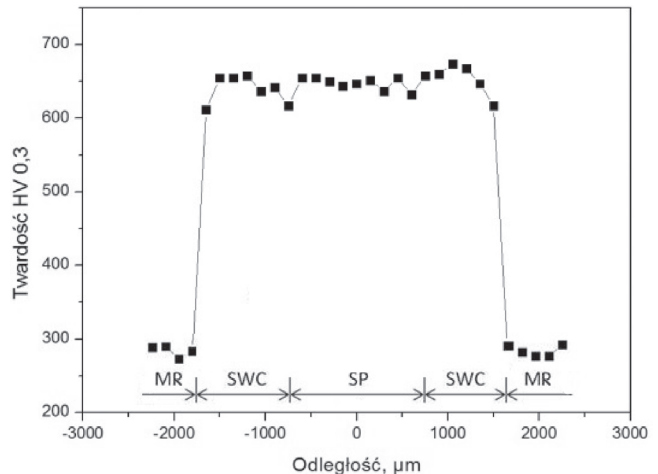


Rys. 11. Makrostruktura spoin w złączach stali 41Cr4: a) bez osłony argonu, (b) w osłonie argonu, trawiono chemicznie Nital

Fig. 11. Macrostructure in 41Cr4 steel welds: without argon (a), with argon (b), chemically etched by Nital

si 4,0 mm. Szerokość spoiny jest równa odpowiednio 1,5 i 1,4 mm, a szerokość SWC wynosi 1,2 i 1,1 mm. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że wymiary spoin są porównywalne i użycie gazu osłonowego nie wpływa w znaczący sposób na geometrię spoiny. Cechą szczególną, na którą warto zwrócić uwagę, jest to, że w przypadku złącza wykonanego w osłonie argonu występuje niewielki nadlew łoża spoiny, co świadczy o dokładniejszym dopasowaniu krawędzi łączonych elementów.

Na rysunku 12 przedstawiono rozkład twardości Vickersa złącza mierzonej w połowie wysokości spoiny. Z wykresu wynika, że w obszarze SWC oraz strefie



Rys. 12. Rozkład twardości Vickersa na linii pomiarowej w środku złącza (MR – materiał rodzimy, SP – spoina, SWC – strefa wpływu ciepła)

Fig. 12. Vickers' hardness distribution across the middle of the joint (MR – base material, SP – weld, SWC – heat affected zone)

wtopienia nastąpił znaczny wzrost twardości do wartości ok. 648 HV_{0,3} (twardość materiału rodzimego wynosi średnio 281 HV_{0,3}). Taka zmiana twardości wynika ze sposobu obróbki cieplnej materiału. Po spawaniu stal 41Cr4 w obszarze złącza uległa podhartowaniu. Następnie nastąpiło nagrzewanie za pomocą induktora, co spowodowało, że materiał nie został nagrzany w całości, a jedynie w warstwie powierzchniowej (efekt naskórkowości). Można przypuszczać, że zamiast struktury sorbitu/troostytu odpuszczania (twardość 350÷400 HV) otrzymano strukturę złożoną z martenzytu odpuszczania (twardość 650÷780 HV). Oznacza to, że odpuszczanie z wykorzystaniem nagrzewania indukcyjnego powinno trwać dłużej, aby uzyskać rezultaty podobne do odpuszczania w piecu.

Wnioski

Kluczowym elementem laserowego spawania hybrydowego stali 41Cr4 jest nagrzewanie indukcyjne, stąd też ważne jest właściwe zaprojektowanie wzbudnika. Rozkład pola temperaturowego wewnątrz materiału jest determinowany przez kształt solenoidu, wysokość cewki nad powierzchnią roboczą, prędkość przemieszczania się wzbudnika oraz moc induktora. Te parametry są ze sobą powiązane i wpływają na końcowe efekty spawania stali. Próby spawania stali 41Cr4 potwierdzają, że brak zastosowania odpowiedniej obróbki cieplnej przed i po procesie spawania powoduje pękanie złącza w spoinie w wyniku naprężeń krystalizacyjnych oraz

powstanie twardej i kruchej struktury martenzytycznej. Dzięki podgrzaniu stali do temperatury 300°C, a następnie zahartowaniu i odpuszczaniu po procesie spawania możliwe było uzyskanie spoiny bez pęknięć. Dodatkowe próby związane z użyciem gazu osłonowego pozwalają potwierdzić, że poprawia się jakość lica spoiny. W spoinie występuje ponad dwukrotny wzrost twardości w porównaniu z materiałem rodzimym, co może świadczyć o obecności martenzytu odpuszczania. Nie dochodzi jednak do pęknięć w spoinie z braku obecności wodoru dyfundującego i zbyt dużych naprężeń.

Literatura

- [1] Ferenc K.: Spawalnictwo, WNT, Warszawa 2007.
- [2] Kheronsky A., Lee H.: Induction heating for efficient laser applications, *Advanced Materials & Processes*, 2009, s. 39-42.
- [3] Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik: Laser Welding and Hybrid Welding Processes, Drezno 2004.
- [4] Vasilash G.: Laser processing meets induction heating, *Automotive Manufacturing & Production*, 1997, s. 54-55.
- [5] Neumeyer J., Mach M., Nacke B.: Numerical Simulation of Induction Assisted Hybrid Welding Processes, *International Scientific Colloquium, Ryga 2010*, s. 97-102.
- [6] Mach M., Schülbe H., Nacke B.: Modeling and optimization of induction assisted welding processes, *International Scientific Colloquium, Ryga 2008*, s. 215-220.
- [7] Pilarczyk J., Banasik M., Stano S., Dworak J.: Różnorodne techniki spajania laserowego – wyniki badań i możliwości zastosowań, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, nr 5/2008, s. 46-53.
- [8] Rudnev V., Loveless D., Cook R.: *Handbook of induction heating*, Marcel Dekker, Inc., 2003, s. 627-674.
- [9] Zinn S., Semiatin S.: *Elements of Induction Heating: Design, Control and Applications*, ASM International, 1988, s. 32-41.
- [10] Ruffini R., Nemkov V., Goldstein R.: *Enhancing Induction Heating Processes by Applying Magnetic Flux Controllers*, <http://fluxtrol.com/>, 1999.
- [11] Tavakoli M. H., Karbaschi H., Samavat F.: Influence of work-piece height on the induction heating process, *Mathematical and Computer Modeling*, 2011, s. 50-58.
- [12] Ruffini R., Nemkov V., Goldstein R.: Influence of Magnetic Flux Controllers on Induction Heating Systems, *Computer Simulation and Practice*, <http://fluxtrol.com/>, 2001.
- [13] Tasak E.: *Metalurgia spawania*, Wydawnictwo JAK Andrzej Choczewski, Kraków 2008.
- [14] <http://www.dostal.com.pl/stal-do-ulepszania-cieplnego.html>, dostęp 30.04.2013 r.



Linde Gas

Linde

Mamy przyjemność zaprosić Państwa do uczestnictwa w:

55. NAUKOWO-TECHNICZNEJ KONFERENCJI SPAWALNICZEJ pod hasłem: **SPAWALNICTWO W TRZECH ŻYWIÓŁACH: ZIEMIA – WODA – POWIETRZE**

organizowanej w dniach 14-16 października 2013 r. w Gdańsku-Sobieszewie przez:

Zakład Inżynierii Spajania Politechniki Gdańskiej, SIMP Oddział w Gdańsku, Linde Gaz Polska

Konferencja odbędzie się w Ośrodku Wypoczynkowym „Orle” na Wyspie Sobieszewskiej. W czasie konferencji przedstawione zostaną najnowsze osiągnięcia naukowe i techniczne z zakresu spawalnictwa. W programie konferencji przewidziane są również wycieczki techniczne oraz warsztaty.

Bliższych informacji udzielają:

dr hab. inż. Jerzy Łabanowski: tel.: 58 34 72 366; jlabanow@pg.gda.pl
dr inż. Dariusz Fydrych: tel.: 58 34 86 321; dfydrych@mech.pg.gda.pl

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Zakład Inżynierii Spajania,
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, <http://www.konferencjaspawalnicza.pl>