

Spawanie laserowe stali stosowanych w środkach transportu

Norbert RADEK¹

Streszczenie

W artykule opisano badania wpływu dwóch parametrów spawania laserowego: prędkości posuwu i mocy wiązki na właściwości mechaniczne spoiny oraz stref do niej przyległych. Badania obejmowały statystyczną próbę rozciągania, pomiar twardości oraz obserwacje mikroskopowe.

Do spawania użyto lasera CO₂ TRUMPF, model Lasercell 1005 (długość fali $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$). Próbki wykonano ze stali DC04 o grubości 0,8 mm. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono na stanowisku do badania wytrzymałości na rozciąganie oraz ściskanie LabTest 5.20SP1. Do badania twardości użyto twardościomierza NEXUS 4304. Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono mikroskopem skaningowym Joel typ JSM-5400.

Badania wykazały, że spoiny otrzymane przy różnych parametrach spawania charakteryzują się zbliżonymi właściwościami mechanicznymi.

Słowa kluczowe: spawanie laserowe, spoina, właściwości mechaniczne, transport

1. Wprowadzenie

Proces spawania laserowego polega na przetopieniu metali w miejscu ich zetknięcia z ogniskowaną wiązką promieniowania o gęstości mocy $10^4 \div 10^6 \text{ W/mm}^2$ [10]. Pojawienie się laserów o dużej mocy wyjściowej dało nadzieję na zrealizowanie procesu łączenia grubych blach przez bezpośrednie przetopienie ich zetkniętych brzegów z pominięciem ukosowania i pracochłonnego wypełniania rowka z ukosowania ściągami spoiwa. Możliwość takiego przetapiania była już uzyskana w metodzie spawania elektronowego, ale zostało to okupione wieloma niedogodnościami związanymi z: koniecznością umieszczenia spawanych elementów w próżni, likwidacją przypadkowych pól magnetycznych i koniecznością ochrony przed promieniowaniem rentgenowskim, powstającym przy spawaniu elektronowym z wysokim napięciem [11]. Zalety spawania laserowego:

- wysoka czystość procesu (zależna od przygotowania powierzchni i czystości gazów),
- możliwość łączenia materiałów trudno spawalnych,
- łatwość automatyzacji,
- możliwość spawania z wysoką precyzją (np. łączenie elementów cienkich i grubych),
- duża prędkość procesu,
- możliwość wykorzystania jednego źródła promieniowania na kilku stanowiskach,

- spawanie przebiega pod ciśnieniem atmosferycznym (w przeciwieństwie do spawania wiązką elektronów, które wykonuje się w próżni),
- wysoka gęstość mocy (w przypadku spawania głębokiego), dzięki czemu uzyskuje się małe dys-torsje,
- wąska strefa wpływu ciepła.

W porównaniu z tradycyjnymi metodami, spawanie laserowe ma znacznie więcej zalet, co umożliwia rozszerzenie zakresu metali i stopów, które można spawać ze sobą tworząc wytrzymałe i dobre strukturalnie złącza. Większość metali i stopów cechuje się niskim współczynnikiem absorpcji promieniowania laserów CO₂. Przy spawaniu wiązką o gęstości mocy nieprzekraczającą $0,5 \text{ MW/cm}^2$ otrzymuje się płytką spoinę o szerokiej strefie wpływu ciepła, ponieważ dostarczona energia jest absorbowana jedynie na powierzchni. Otrzymany kształt spoiny jest efektem procesu przewodzenia ciepła w głąb materiału, natomiast dla gęstości mocy rzędu 1 MW/cm^2 zmienia się mechanizm absorpcji promieniowania przez metal i w osi wiązki materiał odparowuje, a utworzony kanał parowy umożliwia głębokie wnikanie wiązki. Wielokrotne jej odbicie od ścianek kapilary powoduje jonizację par metalu i tworzenie się plazmy, w której wiązka jest prawie w całości absorbowana. Plazma przekazuje energię wiązki laserowej do materiału i w efekcie powstaje spoina o dużej głębokości i wą-

¹ Prof. nzw. PŚk, dr hab. inż.: Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Centrum Laserowych Technologii Metali; e-mail: norrad@tu.kielce.pl.

skiej strefie wpływu ciepła [5]. Jakość i kształt spoin wykonanych za pomocą wiązki laserowej są uzależnione od stosowanych parametrów spawania. Do podstawowych parametrów spawania należą [8]:

- moc wiązki,
- średnica wiązki laserowej,
- prędkość spawania,
- sposób ogniskowania wiązki względem powierzchni spawanych elementów,
- rodzaj, ilość i kierunek nadmuchu gazu ochronnego,
- właściwości spawanego materiału.

W zależności od gęstości mocy wiązki, można wyróżnić kilka metod spawania laserowego [3]:

- mikrospawanie,
- spawanie przewodnościowe,
- spawanie głębokie,
- spawanie plazmowe.

Technika laserowego spawania umożliwia uzyskanie nowych, dotychczas niemożliwych do otrzymania połączeń różnych kombinacji metali. Należy jednak podkreślić, że nie wszystkie metale dają się dobrze spawać przy użyciu lasera, jest to zależne od ich właściwości termicznych i strukturalnych, np. cyna, aluminium, ołów, tantal lub wolfram na ogół są trudno spawalne (tabl. 1) [9].

Tablica 1

Zestawienie efektywności spawania laserem różnych metali: skala od 1 – zła do 10 – bardzo dobra [9]

	Ag	Al	Cr	Cu	Fe	Mo	Ni	Pd	Pt	Sn	Ta	Ti	W
Ag		5	1	4	2	1	1	9	4	1	1	4	1
Al	5		1	4	4	1	4	1	1	1	1	4	1
Cr	1	1		1	9	9	8	6	7	1	1	7	9
Cu	4	4	1		4	1	9	8	8	1	1	4	1
Fe	2	4	9	4		7	7	6	6	1	4	4	4
Mo	1	1	9	1	7		4	6	6	1	9	9	9
Ni	1	4	8	9	7	4		8	8	1	7	4	3
Pd	9	1	6	8	6	6	8		8	3	6	3	3
Pt	4	1	7	8	6	6	8	8		4	4	3	6
Sn	1	1	1	1	1	1	1	3	4		1	1	1
Ta	1	1	1	1	4	9	7	6	4	1		9	9
Ti	4	4	7	4	4	9	4	3	3	1	9		3
W	1	1	9	1	4	9	3	3	6	1	9	3	

Przy spawaniu różnych metali, których właściwości fizyczne (np. absorpcja, przewodność cieplna,

temperatura topnienia) znacznie się różnią, występują dodatkowe utrudnienia w przeprowadzeniu procesu spawania, a dobór parametrów procesu musi być wynikiem kompromisu między wymaganiami dla obu łączonych metali. Stosowanie pokrycia absorpcyjnego oraz odpowiednio ukształtowanej plazmy ułatwia przebieg procesu spawania; korzystne efekty uzyskuje się również przy użyciu dodatkowego materiału wypełniającego. Tym materiałem powinien być stop, którego jeden ze składników dobrze rozpuszcza się w obu łączonych metalach. W przypadku, gdy pokrycia absorpcyjne nie mogą być stosowane z uwagi na możliwości wprowadzenia zanieczyszczeń, pozytywny efekt poprawy absorpcji uzyskuje się przez wykorzystanie plazmy generowanej w gazie osłonowym o niskim progu jonizacji [5].

2. Materiały i urządzenia stosowane w badaniach

Próbki do badań wykonano z blachy stalowej o oznaczeniu DC04 i grubości 0,8 mm. Jest to gatunek stali odporny na starzenie i jest przeznaczony do wymagających zastosowań obejmujących głębokie tłoczenie i rozciąganie; jest stosowany głównie w środkach transportu. Stal DC04 charakteryzuje się dobrą spawalnością i zgrzewalnością, dlatego nie wymaga dodatkowych zabiegów podczas procesu łączenia. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali DC04 zawarto w tablicach 2 i 3.

Tablica 2

Skład chemiczny stali DC04 [6]

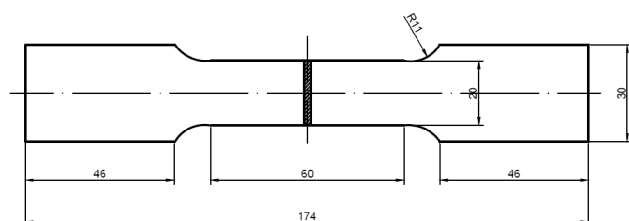
Gatunek stali	Maksymalna zawartość [%]				
	C	Mn	P	S	Ti
DC04	0,08	0,40	0,030	0,030	0

Tablica 3

Właściwości mechaniczne stali DC04 [6]

Granica plastyczności $R_{p0,2}$ maksymalnie [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Wydłużenie A_{80} [%] minimalnie	Parametry formowalności r_{90} minimalnie	Parametry formowalności n_{90} minimalnie
210	270–350	38	1,6	0,18

Próbki do badań wycięto laserem z arkusza blachy stalowej i przecięto w poprzek na dwie połowy, które zespawano laserem. Kształt i wymiary pojedynczej próbki przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbek stosowanych w badaniach

Cięcie i spawanie laserowe wykonano za pomocą lasera CO₂ model Lasercell 1005 o długości fali $l = 10,6$ mm (rys. 2).

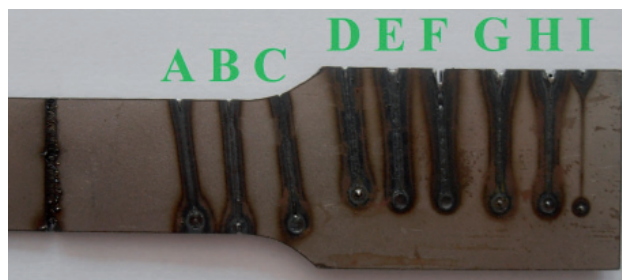


Rys. 2. Urządzenie od obróbki laserowej Lasercell 1005

Badania właściwości spoin wykonanych laserowo skupiły się na: obserwacji i analizie mikrostruktury, pomiarach twardości i statycznej próbie rozciągania. Obserwacje mikrostruktury prowadzono w elektronowym mikroskopie skaningowym Joel typ JSM-5400. Twardość mierzono twardościomierzem NEXUS 4304 przy obciążeniu 1 kG, przyłożonym na 10 s. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej Lab-Test 5.20SP1.

3. Dobór parametrów spawania laserowego

Parametry spawania były określone mocą lasera i prędkością posuwu. Według literatury [8–12] wymienione parametry mają największy wpływ na jakość wykonanych spoin. Na rysunku 3 przedstawiono widok przetopów imitujących spoinę, a w tabelicy 4 testowe parametry spawania laserowego. Na podstawie analizy makroskopowej przetopów oraz zjawisk towarzyszących procesowi spawania dobrano główne parametry spawania laserowego: moc lasera i prędkość posuwu.



Rys. 3. Widok przetopów imitujących spoinę (próba testowa)

Tabela 4

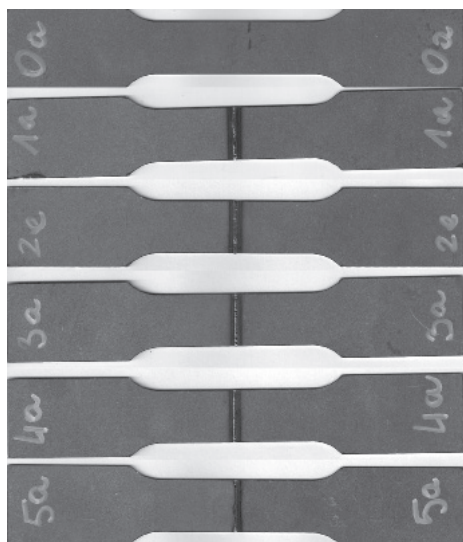
Testowe wartości głównych parametrów spawania laserowego

Oznaczenie	Moc lasera P [kW]	Prędkość posuwu v [m/min]
A	1,5	3
B	1,8	3
C	2	3
D	2,5	3
E	2	2
F	2	2,5
G	2	3,5
H	2	4
I	2	5

Przetopy A–D powstały przy prędkości posuwu równej 3 m/min i mocy lasera wynoszącej początkowo 1,5 kW i stopniowo zwiększanej do 2,5 kW. Podczas wykonywania przetopu mocą 1,5 kW nie pojawiła się plazma. Przy mocy 1,8 kW pojawił się niewielki obłoczek plazmy, który nie miał istotnego wpływu na przebieg procesu. Pozytywny efekt w postaci utworzenia obłoku plazmy uzyskano przy przetopie mocami 2 kW i 2,5 kW. Na podstawie makroskopowych obserwacji wykonanych przetopów przyjęto moc lasera równą 2 kW. Przy stałej mocy lasera ($P = 2$ kW) wykonano pięć następujących przetopów oznaczonych w tabelicy literami E–I, sterując prędkością posuwu w zakresie od 2 m/min do 5 m/min. Zaobserwowano, że przy prędkości posuwu 5 m/min nie pojawił się przetop na wskroś materiału (przetop I). Na podstawie wykonanych badań doświadczalnych przyjęto następujące parametry spawania laserowego:

- moc lasera $P = 2$ kW,
- zakres zmian prędkości posuwu $v = 2$ m/min, 2,5 m/min, 3 m/min, 3,5 m/min, 4 m/min,
- gaz osłonowy argon $Q = 10$ l/min,
- czas nagrzewania wstępnego $t = 5$ s,
- częstotliwość powtarzania $f = 30\ 000$ Hz,
- odległość dysza – przedmiot obrabiany $\Delta f = 0$ mm.

Wykonano pięć serii próbek spawanych laserowo oraz serię próbek z materiału rodzimego (stal DC04). Dla każdej serii wykonano po 3 próbki i oznaczono od 0 (materiał rodzimy) do 5 ($v = 4$ m/min). Na rysunku 4 przedstawiono widok przykładowych próbek z serii 0–5.



Rys. 4. Przykładowe próbki z serii 0-5

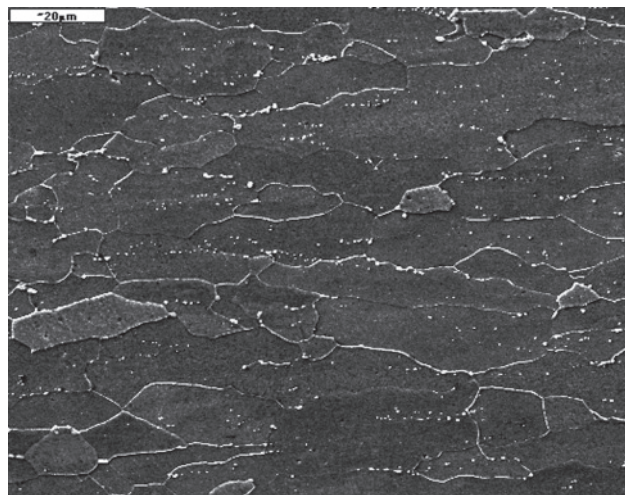
4. Omówienie wyników badań

4.1. Analiza mikrostruktury

Do badań mikrostruktury spawanych złączy wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel typ JSM-5400 wraz z mikroanalizatorem rentgenowskim IBIS-Oxford Instruments. Badania mikroskopowe uzyskanych spoin przeprowadzono na zglądach wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do powstałego złącza, co daje możliwość obserwacji spoiny oraz przyległych do niej stref. Powstałe struktury można analizować i wykonać pomiary zasięgu strefy wpływu ciepła (SWC). Celem wykonanych badań było porównanie powstałych mikrostruktur spawanych złączy oraz określenie wpływu zmiennej wartości prędkości posuwu na kształt powstałych spoin.

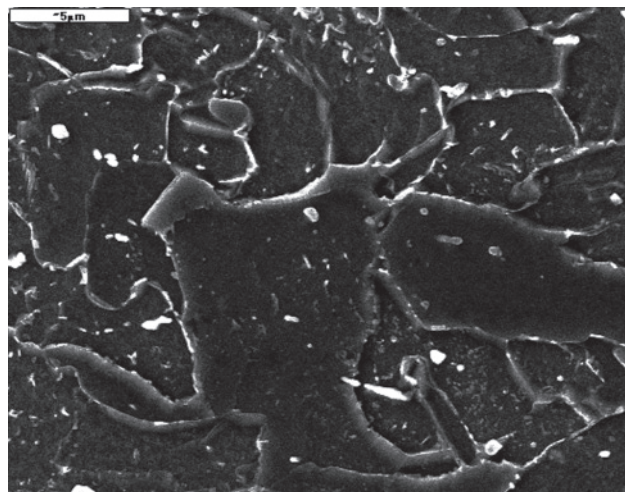
Podczas spawania laserowego występują bardzo duże szybkości nagrzewania i chłodzenia, co w efekcie powoduje zawężenie strefy przegrzania i samej spoiny. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury materiału rodzimego. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że materiał rodzimy składał się ze struktur ferrytyczno-perlitycznych o grubych ziarnach. Analizując mikrostrukturę, można zaobserwować pasmowe ułożenie ziaren, co

świadczy o tym, że arkusze blachy stali DC04 poddano walcowaniu.



Rys. 5. Mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna materiału rodzimego (powiększ. 1000×)

Mikrostruktura złącza spawanego (próbka serii 1) w SWC miała budowę ferrytyczno-perlityczną drobnoziarnistą z widocznymi wytrąceniami metalicznymi w ziarnach perlitu, co przedstawia rysunek 6.

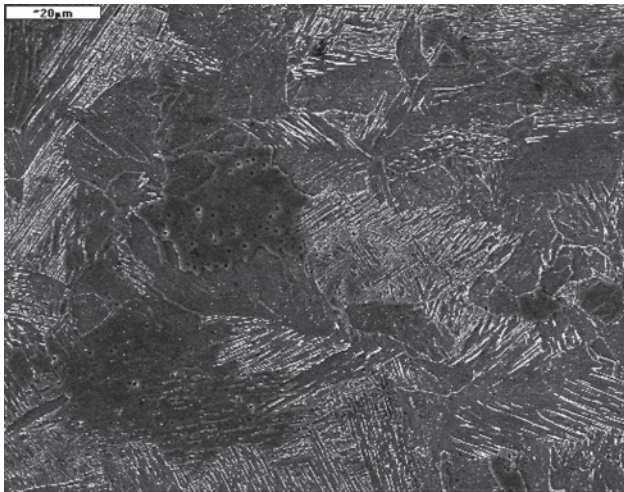


Rys. 6. Ziarna perlitu z wytrąceniami metalicznymi w SWC (powiększ. 1000×)

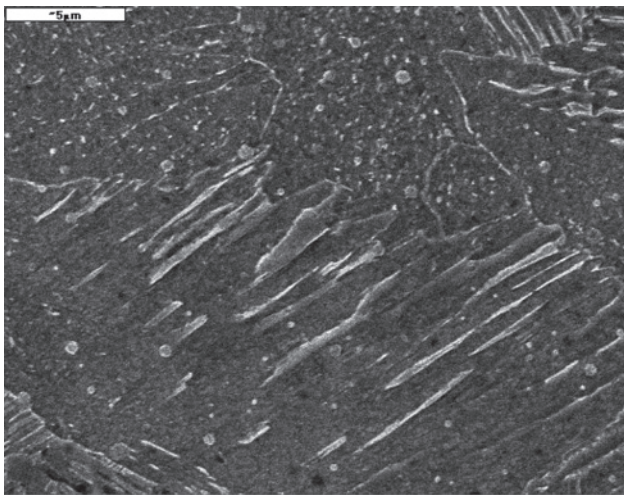
W obszarze spoiny (próbka serii 1) stwierdzono występowanie struktury Widmanstättena (rys. 7). Składa się ona z płytkowych wydzielen ferrytu ułożonych pod kątem 60° i 120° . Powstanie struktury Widmanstättena świadczy o przegrzaniu stali, co w efekcie znacząco obniża mechaniczne właściwości spoiny.

W strefie wpływu ciepła spawanego złącza (próbka serii 3) stwierdzono strukturę perlitu płytkowego, natomiast w strefie spoiny występowanie martenzytu listwowego (rys. 8). Kryształy martenzytu mają kształt listew równoległych tworzących tzw. pakiety. Struk-

tura martenzytyczna spoiny powoduje zwiększenie twardości w obszarze złącza.



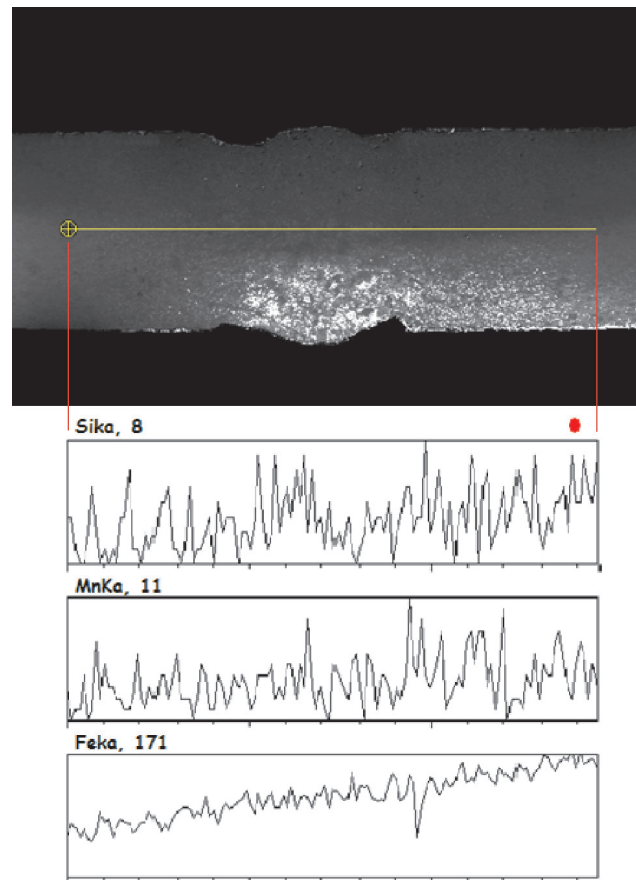
Rys. 7. Struktura Widmanstättena w strefie spoiny (powiększ. 1000×)



Rys. 8. Listwy martenzytu (powiększ. 5000×)

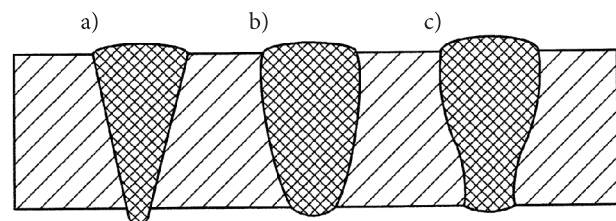
W przypadku złącza (próbka serii 4) mikrostruktura w strefie wpływu ciepła składała się z drobnych ziaren perlitu w osnowie ferrytu. Wewnątrz ziaren perlitu stwierdzono występowanie wytrąceń niemetalicznych. W strefie spoiny stwierdzono strukturę martenzytyczną, którą tworzyły kryształy listwowe martenzytu w osnowie austenitu.

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury oraz rozkład liniowy pierwiastków w spawanym złączu (próbka serii 1). Analiza liniowa wykazała nierównomierny rozkład pierwiastków w złączu. Można wyróżnić strefy, w których występują znaczne ilości Mn, Si oraz Fe. W badanym złączu wyraźnie widać lico spoiny oraz strefę wpływu ciepła.



Rys. 9. Mikrostruktura i rozkład liniowy pierwiastków w złączu spawanym

Obserwacje mikroskopowe pozwoliły określić wpływ zmiennej wartości prędkości posuwu na budowę mikrostruktur powstałych złączy spawanych oraz na kształt spoin. Stwierdzono, że prędkość spawania wpływa na kształt spoiny oraz na głębokość przetopienia. Wzrost prędkości spawania sprawił, że zmalała głębokość przetopienia, w efekcie czego doszło do zwężenia spoiny oraz zmiany zarysu linii wtopienia z kształtu grzybkowatego na trójkątny (rys. 10). Zbyt mała prędkość spawania spowodowała, że znacznie zwiększyła się szerokość spoiny oraz wzrosła szerokość strefy wpływu ciepła.



Rys. 10. Kształt spoin powstający w czasie spawania laserowego: a) trójkątny, b) i c) grzybkowaty

4.2. Pomiary twardości

Pomiary twardości przeprowadzono metodą Vicera dla próbek z serii 1-5. Odciski penetratorem wykonano na zglądach prostokątnych w trzech strefach: w licu spoiny, w strefie wpływu ciepła oraz w materiale rodzimym. Wyniki badań twardości przedstawiono w tablicach 5-9.

Tablica 5

Wyniki pomiarów twardości dla próbki z serii 1

Mierzone strefy	Twardość HV1			Wartość średnia HV1
	Numer pomiaru			
	1	2	3	
Lico spoiny	222	277	224	241
SWC	153	150	154	152
Materiał rodzimy	113	109	103	108

Tablica 6

Wyniki pomiarów twardości dla próbki z serii 2

Mierzone strefy	Twardość HV1			Wartość średnia HV1
	Numer pomiaru			
	1	2	3	
Lico spoiny	247	265	229	247
SWC	173	189	184	182
Materiał rodzimy	110	103	108	107

Tablica 7

Wyniki pomiarów twardości dla próbki z serii 3

Mierzone strefy	Twardość HV1			Wartość średnia HV1
	Numer pomiaru			
	1	2	3	
Lico spoiny	227	253	228	236
SWC	161	157	162	160
Materiał rodzimy	101	102	104	102

Tablica 8

Wyniki pomiarów twardości dla próbki z serii 4

Mierzone strefy	Twardość HV1			Wartość średnia HV1
	Numer pomiaru			
	1	2	3	
Lico spoiny	261	250	257	256
SWC	180	188	184	184
Materiał rodzimy	101	102	105	103

Tablica 9

Wyniki pomiarów twardości dla próbki z serii 5

Mierzone strefy	Twardość HV1			Wartość średnia HV1
	Numer pomiaru			
	1	2	3	
Lico spoiny	231	263	220	238
SWC	164	159	172	165
Materiał rodzimy	108	105	103	106

Wyniki pomiarów twardości w strefie materiału rodzimego każdej z serii próbek są porównywalne. Można przyjąć, że próbki miały podobną strukturę bez mikrodefektów wpływających na osłabienie materiału. Średnia twardość w strefie materiału podłoża dla wszystkich próbek z serii 1-5 wynosiła 105 HV1.

Analizując wyniki pomiarów twardości w strefie wpływu ciepła (tablice 5-9) można stwierdzić, że najwyższą twardość osiągnięto przy prędkości posuwu 3,5 m/min (próbka z serii 4). Najwyższa średnia twardość dla próbki z serii 4 w SWC wyniosła 184 HV1. Średnia twardość dla próbek z serii 1-5 w SWC w stosunku do średniej twardości materiału podłoża (każdej z serii próbek) wzrosła o 38 %. Wzrost twardości był spowodowany zmianami w mikrostrukturze materiału, opisanymi w rozdziale 4.1.

Największą twardość w licu spoiny otrzymano dla próbki z serii 4, a jej średnia wartość wyniosła 256 HV1. Najmniejszą twardość w spoinie miała próbka z serii 3 (prędkość posuwu $v = 3$ m/min), jej średnia twardość wyniosła 236 HV1. W wyniku przemian fazowych, które zachodzą w nagrzanym materiale podczas szybkiego chłodzenia, nastąpiło umocnienie obszaru spoiny oraz przyległych do niej stref. Efektem przemian fazowych są struktury martenzytycznopodobne i ferrytyczno-bainityczne, które powodują wzrost twardości. Średnia twardość w strefie spoiny wzrosła o 31% w stosunku do średniej twardości w strefie wpływu ciepła.

4.3. Statyczna próba rozciągania

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono dla próbek z serii 0-5. Celem statycznej próby rozciągania było porównanie wyników otrzymanych z rozciągania próbki ze stali DC04 (materiału wyjściowego) z pozostałymi próbkami spawanymi przy różnych parametrach procesu (prędkość posuwu).

Badania wytrzymałości na rozciąganie rozpoczęto od pomiaru szerokości i grubości próbek. Każdy pomiar wykonano trzykrotnie, aby zminimalizować ewentualne błędy pomiarów i obliczono średnie arytmetyczne grubości i szerokości osobno dla każdej próbki. Otrzymane wyniki wprowadzono do progra-

mu TestSystem. Wpisano m.in.: wymiary próbki (stała dla wszystkich próbek grubość – 0,78 mm, długość pomiarowa próbek – 60 mm oraz zmienne szerokości dla każdej z nich); jej masę (przyjęto 13 g); założoną prędkość próbną (początkowo było to $v_0 = 10$ mm/min, a po uzyskaniu siły F_0 równej 100 N następowała zmiana prędkości na $v_1 = 5$ mm/min; po wykonaniu czterech prób zmieniono prędkość v_1 na $v_2 = 10$ mm/min ze względu na długi czas przeprowadzania pojedynczego badania).

Na podstawie parametrów wprowadzonych do plików bazowych, program automatycznie utworzył pliki z wynikami. Kryterium końca badania określono początkowo uzyskaniem odkształcenia równego 30 mm oraz 95% spadkiem siły rozciągającej. Po wykonaniu dwóch prób zmieniono kryterium odkształcenia na 40 mm ze względu na dużą plastyczność materiału. Badania wykonano w temperaturze 20°C bez użycia ekstensometru. W pierwszym etapie wykonano badanie dla próbki testowej w celu odpowiedniego ustalenia zakresu parametrów oraz sprawdzenia prawidłowości wprowadzonych założeń. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono dla próbek w kolejności serii od 0 do 5. Przed każdym badaniem następowało zerowanie wartości przemieszczenia i siły.

Wyniki statycznej próby rozciągania dla próbek z serii 0 przedstawiono w tablicy 10 oraz na rysunku 11. Można zauważyć dużą powtarzalność wyników, co świadczy o jednorodności próbek z materiału rodzimego.

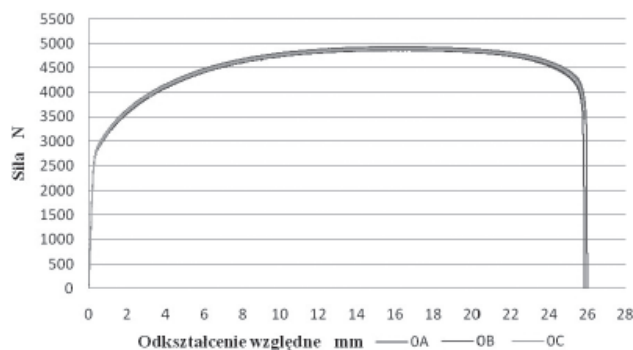
Tablica 10

Wyniki statycznej próby rozciągania dla próbek serii 0

Oznaczenie	Przemieszczenie dla R_m [mm]	Siła max. F_m [N]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Przemieszczenie w chwili zerwania L_0 [mm]	Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ [MPa]
0a	16,39	4875,66	311	25,85	162
0b	16,61	4928,68	308	26	164
0c	16,19	4899,34	315	25,97	159

Analiza wyników uzyskanych w statycznej próbie rozciągania wykazała, że próbki niepoddane procesowi spawania laserowego (seria 0) charakteryzują się niższą umowną granicą plastyczności ($R_{0,2}$) i wytrzymałością na rozciąganie (R_m) oraz lepszymi właściwościami plastycznymi, niż próbki spawane. Wartości wydłużenia do chwili osiągnięcia R_m oraz całkowitego osiągniętego wydłużenia są najwyższe dla próbek z materiału rodzimego. Świadczy to jednoznacznie, że obecność złącza spawanego wpływa na zwiększe-

nie wytrzymałości na rozciąganie próbek, natomiast zmniejszeniu ulegają właściwości plastyczne. Przykładowe wyniki statycznej próby rozciągania dla próbek spawanych (serii 4) przedstawiono w tablicy 11 oraz na rysunku 12. Rysunki 13 i 14 przedstawiają zbiorcze wyniki wytrzymałości na rozciąganie oraz umownej granicy plastyczności dla wszystkich próbek.

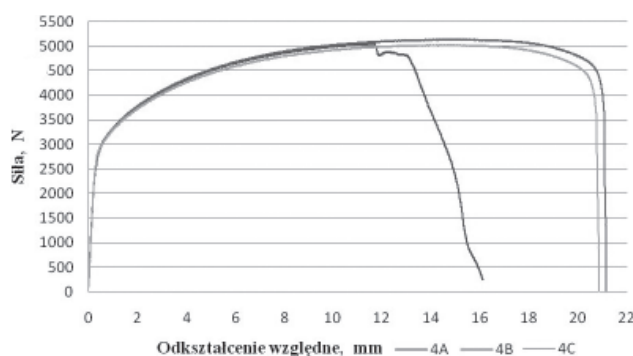


Rys. 11. Przebieg zmiany siły rozciągającej w funkcji odkształcenia (seria 0)

Tablica 11

Wyniki statycznej próby rozciągania dla próbek serii 4

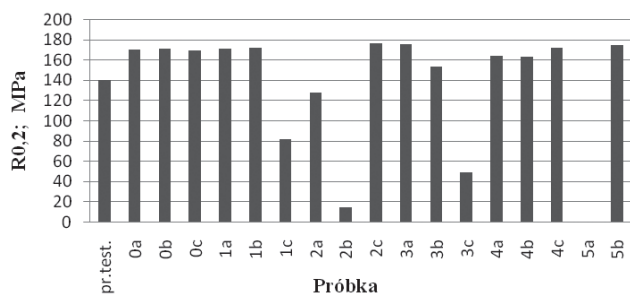
Oznaczenie	Przemieszczenie dla R_m [mm]	Siła max. F_m [N]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Przemieszczenie w chwili zerwania L_0 [mm]	Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ [MPa]
4a	11,61	5051,16	327	16,11	173
4b	14,49	5135,82	334	21,15	181
4c	14,36	5022,40	326	20,84	172



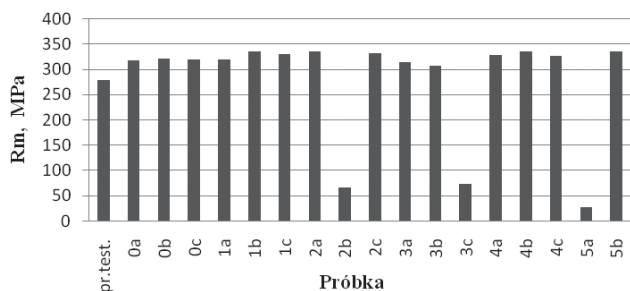
Rys. 12. Przebieg zmiany siły rozciągającej w funkcji odkształcenia (seria 4)

Porównując wyniki umownej granicy plastyczności oraz wyniki wytrzymałości na rozciąganie (rys. 13 i 14) próbek spawanych dla poszczególnych serii spawania można stwierdzić, że otrzymane wartości ce-

chują się dużą przypadkowością i w związku z tym trudno jest je określić mianem tendencji wzrostowej lub spadkowej. Dużą stabilność wyników można zaobserwować dla próbek spawanych serii 1 i 4.



Rys. 13. Zbiornicze wyniki umownej granicy plastyczności dla wszystkich próbek

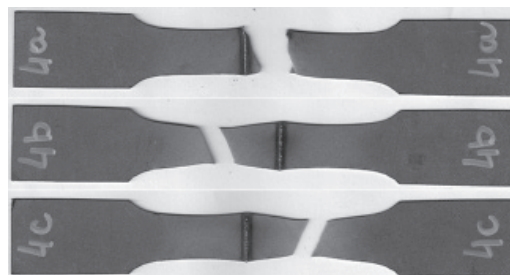


Rys. 14. Zbiornicze wyniki wytrzymałości na rozciąganie dla wszystkich próbek

Zróznicowanie wytrzymałości i plastyczności próbek może być konsekwencją niestabilności plazmy oraz związanymi z nią zmianami warunków absorpcji promieniowania laserowego i wymiany ciepła od plazmy do materiału. W celu uniknięcia tego zjawiska można zasugerować procedurę wprowadzania wiązki na powierzchnię materiału z uprzednio zapaloną

plazmą (w argonie lub na powierzchni pomocniczego nie spawanego odcinka blachy).

Po wykonaniu statycznej próby rozciągania, próbki poddano obserwacjom organoleptycznym. Ich celem było określenie umiejscowienia i przebiegu powstałych przełomów. Podczas prób zaobserwowano, że w większości przypadków badane próbki pękają, tworząc przełom ciągliwy ścięty (poślizgowy). Efektem jego powstania jest pokonanie sił spójności materiału w płaszczyźnie poślizgów nachylonej pod kątem około 45° do osi próbki, co tłumaczy się kierunkiem występowania największych naprężeń stycznych (tnących) w jednoosiowym stanie naprężeń. Przykładowy widok próbek spawanych po statycznej próbie rozciągania (seria 4) przedstawia rysunek 15, natomiast w tabelicy 12 opisano wygląd przełomów po wykonanej próbie.



Rys. 15. Wygląd próbek spawanych po zerwaniu (seria 4)

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań, stwierdzono, że:

1. Kształt i grubość powstałej spoiny, a także zakres strefy wpływu ciepła zależy od wartości prędkości posuwu.
2. Porównując właściwości mechaniczne próbek (seria 0) z próbkami spawanymi można stwierdzić,

Tablica 12

Opis wyglądu przełomów po zerwaniu próbek spawanych (seria 4)

Oznaczenie	Parametry spawania		Nadlew	Przełom		
	Moc [kW]	Prędkość posuwu [m/min]		Rodzaj	Wygląd	Umiejscowienie
4a	2	3,5	mały, wąski	ciągliwy, ścięty	jasnoszary kolor na krawędzi cięcia	niesymetryczne, początek w osi spoiny, koniec w odl. 6 mm od spoiny
4b	2	3,5	mały, wąski	ciągliwy, ścięty	jasnoszary kolor na krawędzi cięcia	niesymetryczne, w odl. 18-24 mm od spoiny
4c	2	3,5	mały, wąski	ciągliwy, ścięty	jasnoszary kolor na krawędzi cięcia	niesymetryczne, w odl. 18-24 mm od spoiny

że w wyniku spawania laserowego nastąpił znaczny wzrost właściwości wytrzymałościowych oraz wyraźny spadek właściwości plastycznych. Spadek właściwości plastycznych charakteryzuje się zmniejszeniem wydłużenia całkowitego próbek spawanych w stosunku do wydłużenia próbek z materiału rodzimego.

3. Badania twardości potwierdziły, że próbki spawane nie mają jednorodnej budowy, lecz mają strukturę o bardzo złożonej budowie.
4. W miarę wzrostu prędkości przesuwu wiązki, w strukturze spoiny i strefie wpływu ciepła zachodzą i są widoczne nieodwracalne zmiany strukturalne, które są wynikiem bardzo dużych szybkości nagrzewania i chłodzenia. Zmiany te charakteryzują się rozdrobnieniem struktury ziarnistej i wzrostem twardości.

Literatura

1. Chen S. et alii: *Influence of processing parameters on the characteristics of stainless steel/copper laser welding*, Journal of Materials Processing Technology, 222 (2015), pp. 43-51.
2. Costa A., Miranda R.M., Quintino L.: *Materials behavior in laser welding of hard metals to steel*, Mater. Manuf. Process., 21 (2006), pp. 457-463.
3. Czujko T., Hoffman J., Mucha Z. et alii: *Analiza efektów laserowego spawania blach ze stopu tytanu i stali*, Przegląd Mechaniczny, 20 (1993), str. 18-21.
4. Hayashi T., Matsubayashi K., Katayama S. et alii: *Reduction mechanism of porosity in tandem twin-spot laser welding of stainless steel*, Weld. Int., 17 (2003), pp. 12-19.
5. Hoffman J., Kalita W., Mucha Z., Czujko T.: *Laserowe spawanie blach z miedzi elektrolitycznej ze stali nierdzewną*, Przegląd Mechaniczny, 7-8 (1995), str. 30-34.
6. <http://www1.ruukki.pl/~media/Poland/Files/metals-coldrolled/karty-produkty/Ruukki-zimnowalcowane-Stale-przeznaczone-do-formowania.pdf> [dostępny 05.02.2016 r.].
7. Kuryntsev S.V., Gilmutdinov A.Kh.: *Welding of stainless steel using defocused laser beam*, Journal of Constructional Steel Research, 114 (2015), pp. 305-313.
8. Kusiński J.: *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, Kraków 2000.
9. Nowicki M.: *Lasery w technologii elektronicznej i obróbce materiałów*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1978.
10. Radek N.: *Laboratorium wiązkowych technologii obróbki materiałów*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Skrypt Nr 456, Kielce 2013.
11. Szczeciński Z.: *Spawanie wiązką promieniowania laserowego*, Przegląd Spawalnictwa, 9-10 (1985), str. 12-17.
12. Torkamany M.J., Ghaini F.M., Poursalehi R.: *An insight to the mechanism of weld penetration in dissimilar pulsed laser welding of niobium and Ti-6Al-4V*, Optics & Laser Technology, 79 (2016), pp. 100-107.

Laser Welding of Steel Used for Transport Means

Summary

In the paper the tests of the impact of the selected parameters of laser welding on the mechanical properties of the weld have been presented. The influence of two parameters have been analysed: moving speed and beam intensity. The research of the properties of the weld and neighbouring zones comprised the following measurements: tensile testing, hardness and microscopic observations. Welding was done with CO₂ TRUMPF, Lasercell 1005 model (wave length $l = 10,6$ mm). The samples were produced from DC04 steel of 0,8 mm thickness. Tensile testing was conducted on the tensile and compressive strength testing device LabTest 5.20SP1. Hardness was measured with NEXUS 4304 tester. Microscopic observations were carried out with the scanning microscope Joel type JSM-5400.

The performed tests indicate that welds produced at different welding parameters have similar mechanical properties.

Keywords: laser welding, weld, mechanical properties, transportation

Лазерная справка стали используемой в средствах транспорта

Резюме

В работе представлены результаты тестов влияния избранных параметров лазерной справки на механические свойства связки. В работе тестировано влияние двух параметров: скорость подачи и силу луча. Исследования свойств связки и прилегающих к ней зон состояли из следующих измерений: статической пробы растяжения, твердости и микроскопические наблюдения. Для справки использован лазер CO₂ TRUMPF модель LaserCell 1005 (длина волны $l = 10,6$ mm). Образцы изготовлено из стали DC04 толщиной 0,8 мм. Статическая проба растяжения проведена на стенде для исследования выносливости при растяжении и сжимания LabTest 5.20SP1. Для употребления твердости был использован твердомер NEXUS 4304. Микроскопические наблюдения проведено при использовании сканирующего микроскопа Joel типа JSM-5400. Проведенные тесты показывают, что связки получены при разных параметрах обладают похожими механическими свойствами.

Ключевые слова: лазерная справка, связка, механические свойства, транспорт