

# Laserowe spawanie stali niskowęglowej

NORBERT RADEK\*

W pracy przedstawiono badania wpływu wybranych parametrów spawania laserowego na własności mechaniczne spoiny. Badano wpływ dwóch parametrów: prędkości posuwu oraz mocy wiązki. Na badania własności spoiny oraz stref do nich przyległych składały się następujące pomiary: statycznej próby rozciągania i twardości oraz obserwacje mikroskopowe. Przeprowadzone badania wykazały, że spoiny otrzymane przy różnych parametrach spawania charakteryzują się zbliżonymi własnościami mechanicznymi.

## WPROWADZENIE

Proces spawania laserowego polega na przetopieniu metali w miejscu ich zetknięcia zogniskowaną wiązką promieniowania o gęstości mocy  $10^4 \div 10^6$  W/mm<sup>2</sup> [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 zukosowanego rowka ściegami spoiwa. Możliwość takiego przetapiania została już wcześniej uzyskana w metodzie spawania elektronowego, ale zostało to okupione wieloma niedogodnościami związanymi z: koniecznością umieszczania spawanych elementów w próżni, likwidacją przypadkowych pól magnetycznych i z koniecznością ochrony przed promieniowaniem rentgenowskim, powstającym przy spawaniu elektronowym z wysokim napięciem [11].

Proces spawania laserowego cechują następujące zalety:

– duża czystość procesu (zależna od przygotowania powierzchni i czystości gazów),

– możliwość łączenia materiałów trudno spawalnych,

– łatwość automatyzacji,

– możliwość spawania z dużą precyzją (np. łączenie elementów cienkich i grubych),

– duża szybkość procesu,

– możliwość wykorzystania jednego źródła promieniowania na kilku stanowiskach,

– spawanie przebiega przy ciśnieniu atmosferycznym (w przeciwieństwie do spawania wiązką elektronów, które wykonywane jest w próżni),

– duża wartość gęstości mocy (w przypadku spawania głębokiego) dzięki czemu uzyskuje się małe dystorsje,

– 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 małym współczynnikiem absorpcji promieniowania laserów CO<sub>2</sub>. Przy spawaniu wiązką o gęstości mocy nie przekraczającej 0,5 MW/cm<sup>2</sup>, otrzymuje się płytką spoinę o szerokiej strefie wpływu ciepła, ponieważ dostarczona energia absorbowana jest jedynie na powierzchni. Otrzymany kształt spoiny jest efektem procesu przewodzenia ciepła w głąb materiału. Natomiast dla gęstości mocy rzędu 1,0 MW/cm<sup>2</sup> zmienia się mechanizm absorpcji promieniowania przez metal. 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. Plazma przekazuje energię wiązki laserowej do materiału i w efekcie powstaje spoina o dużej głębokości i wąskiej strefie wpływu ciepła [5].

\* Dr hab. inż. Norbert RADEK, prof. uczelni, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Centrum Laserowych Technologii Metali, Al. Solidarności 23, 25-314 Kielce, norrad@tu.kielce.pl.

Jakość i kształt spoin wykonanych za pomocą wiązki laserowej uzależnione są od stosowanych parametrów spawania. Do podstawowych czynników należą [8]:

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

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

- mikrosparowanie,
- spawanie przewodnościowe,
- spawanie głębokie,
- spawanie plazmowe.

Technika laserowego spawania umożliwia uzyskanie nowych, dotychczas niemożliwych do otrzymania połączeń różnych kombinacji metali. Należy podkreślić jednak, 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 – Tabela 1.

Przy spawaniu ze sobą 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 proces spawania, korzystne efekty uzyskuje się również przy użyciu dodatkowego materiału wypełniającego. Materiałem tym 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

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

**Tabela 2. Skład chemiczny stali DC04 [6]**

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

**Tabela 3. Właściwości mechaniczne stali DC04 [6]**

Granica plastyczności R <sub>p02</sub> maksymalnie [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R <sub>m</sub> [MPa]	Wydłużenie A <sub>80</sub> % minimalnie	Parametry formowalności r <sub>90</sub> minimalnie	Parametry formowalności n <sub>90</sub> minimalnie
210	270 – 350	38	1,6	0,18

wykorzystanie plazmy generowanej w gazie osłonowym o niskim progu jonizacji [5].

### MATERIAŁY I URZĄDZENIA STOSOWANE W BADANIACH

Próbki do badań zostały wykonane z blachy stalowej o oznaczeniu handlowym DC04 i grubości 0,8 mm. Jest to gatunek odporny na starzenie, przeznaczony do wymagających zastosowań, obejmujących głębokie tłoczenie i rozciąganie, 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 zostały zawarte w Tabelach 2 i 3.

Przygotowanie próbek do badań polegało na wycięciu ich laserem z arkusza blachy stalowej. Próbki następnie zo-

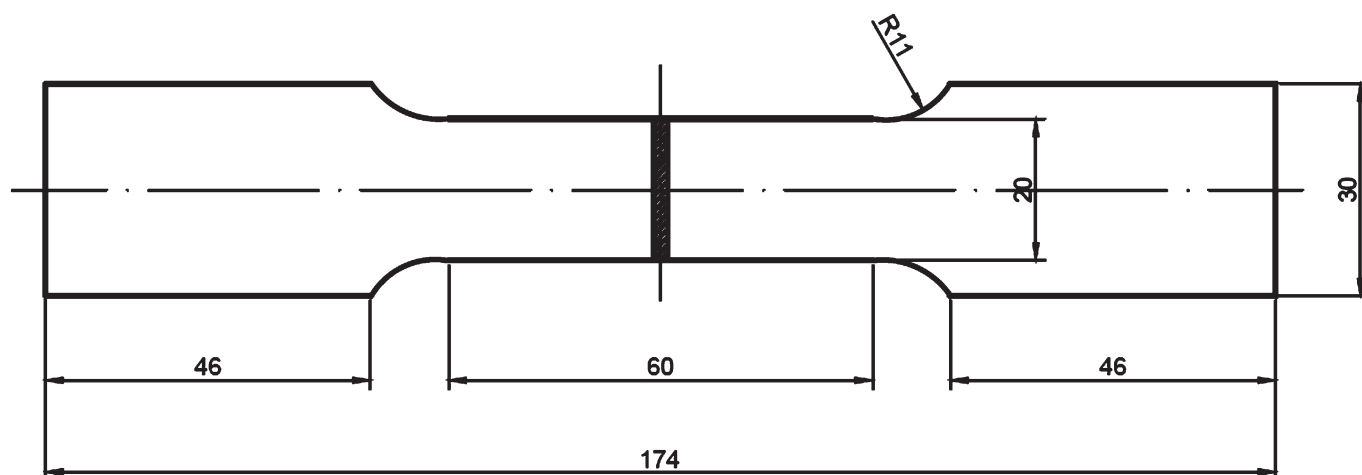
stały przecięte w poprzek na dwie równe części, które zesparowano laserem. Wymiary oraz kształt próbki przedstawiono na rysunku 1.

Cięcie i spawanie laserowe wykonano za pomocą lasera CO<sub>2</sub> model LaserCell 1005 (długość fali λ = 10,6 m) przedstawionego na rysunku 2.

Badania własności spoin wykonanych laserowo skupiły się na: obserwacji i analizie mikrostruktury oraz na pomiarach twardości i statycznej próbie rozciągania.

Obserwacje mikrostruktury prowadzono używając elektronowego mikroskopu skaningowego Joel typ JSM-5400. Twardość mierzono na twardościomierzu NEXUS 4304 przy obciążeniu 10 N, przyłożonym przez 10 s. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej LabTest 5.20SP1.





Rys. 1. Kształt i wymiary próbek stosowanych w badaniach



Rys. 2. Urządzenie od obróbki laserowej Lasercell 1005

### DOBÓR PARAMETRÓW SPAWANIA LASEROWEGO

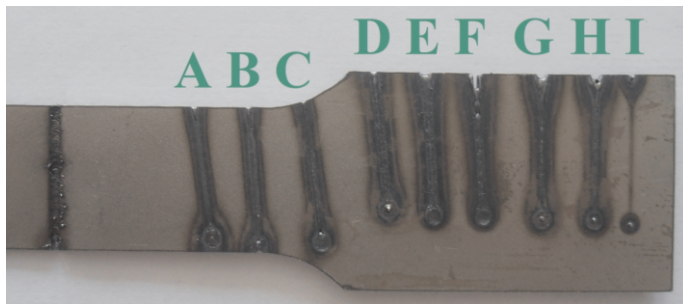
Dobór parametrów spawania odbywał się poprzez sterowanie dwoma parametrami, tj. mocą lasera i prędkością posuwu. Według literatury [1, 2, 4, 7, 12] w/w parametry mają największy wpływ na jakość wykonanych spoin.

Na rysunku 3 przedstawiono przetopy imitujące spoinę, natomiast w Tabeli 4 – parametry spawania laserowego (testowe). Na podstawie analizy makroskopowej przetopów oraz zjawisk towarzyszących procesowi spawania dobrano głównie parametry spawania laserowego, a więc: moc lasera i prędkość posuwu.

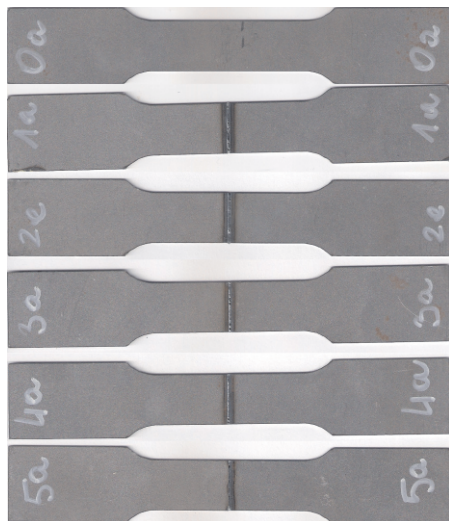
Przetopy A-D powstały przy prędkości posuwu równej 3,0 m/min. Moc lasera początkowo wynosiła 1,5 kW i była stopniowo zwiększana do 2,5 kW. Podczas wykonywania przetopu z mocą 1,5 kW nie wystąpiła plazma. Przy mocy 1,8 kW pojawił się niewielki obłoczek plazmy, który nie miał istotnego wpływu na przebieg procesu. Pozytywny efekt w formie obłoku plazmy uzyskano przy przetopie z mocą 2,0 kW i 2,5 kW. Na podstawie obserwacji makroskopowych wykonanych przetopów przyjęto moc lasera równą 2,0 kW. Przy takiej mocy lasera wykonano następujących pięć przetopów E-I sterując prędkością posuwu w zakresie od 2,0 do 5,0 m/min. Zaobserwowano, że przy prędkości posuwu 5,0 m/min nie wystąpił przetop na wskroś materiału

Tabela 4. Testowe wartości głównych parametrów spawania laserowego

Oznaczenie	Moc lasera P [kW]	Prędkość posuwu v [m/min]
A	1,5	3,0
B	1,8	3,0
C	2,0	3,0
D	2,5	3,0
E	2,0	2,0
F	2,0	2,5
G	2,0	3,5
H	2,0	4,0
I	2,0	5,0



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



Rys. 4. Przykładowe próbki z serii 0-5

- gaz osłonowy argon  $Q = 10 \text{ dm}^3/\text{min}$ .
- czas nagrzewania wstępnego  $t = 5 \text{ s}$ ;
- częstotliwość powtarzania  $f = 30000 \text{ Hz}$ ;
- odległość dysza-przedmiot obrabiany  $h = 0 \text{ mm}$ .

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 ( $v = 4,0 \text{ m/min}$ ). Fotografie próbek z serii 0-5 przedstawiono na rysunku 4.

## WYNIKI BADAŃ I ICH INTERPRETACJA

### Analiza mikrostruktury

Do badań mikrostruktury złączy spawanych wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel typ JSM-5400 wraz z mikroanalizatorem rentgenowskim IBIS-Oxford Instruments.

Badania mikroskopowe uzyskanych spoin zostały przeprowadzone na

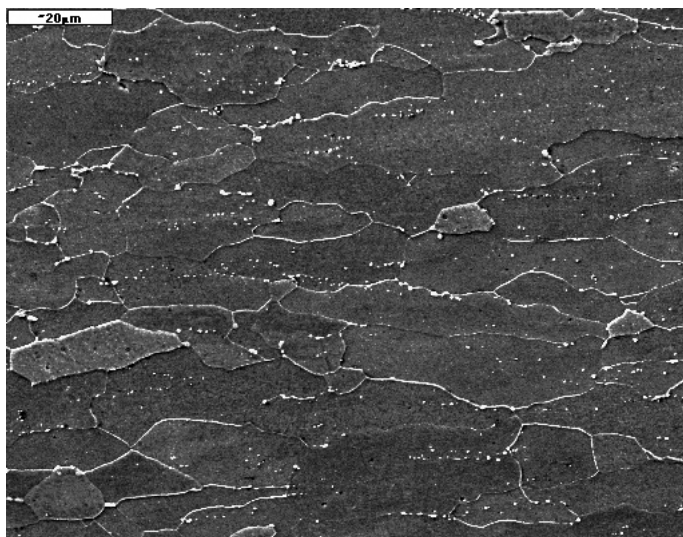
zglądach wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do powstałego złącza, co stwarzało możliwość obserwacji spoiny oraz przyległych do niej stref. Ponadto, można było analizować powstałe struktury oraz wykonać pomiary zasięgu strefy wpływu ciepła (SWC).

Celem wykonanych badań było porównanie powstałych mikrostruktur złączy spawanych oraz określenie wpływu zmiennej wartości prędkości posuwu na kształt powstałych spoin.

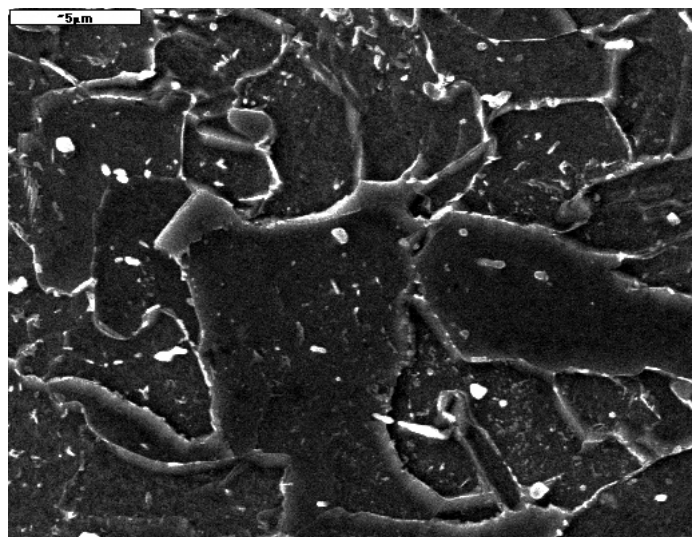
Proces spawania laserowego zachodzi z bardzo dużymi szybkościami nagrzewania i chłodzenia, co w efekcie powoduje zawężenie strefy przegrzania i samej spoiny.

Na fotografii (rys. 5) przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury materiału rodzimego. W oparciu o uzyskane wyniki stwierdzono, że materiał rodzimy składał się ze struktur ferrytyczno-perlitycznych o grubych ziarnach. Ponadto analizując mikrostrukturę można zaobserwować pasmowe ułożenie ziaren, co świadczy o tym, że arkusze blachy stali DC04 w procesie produkcyjnym zostały poddane procesowi walcowania.

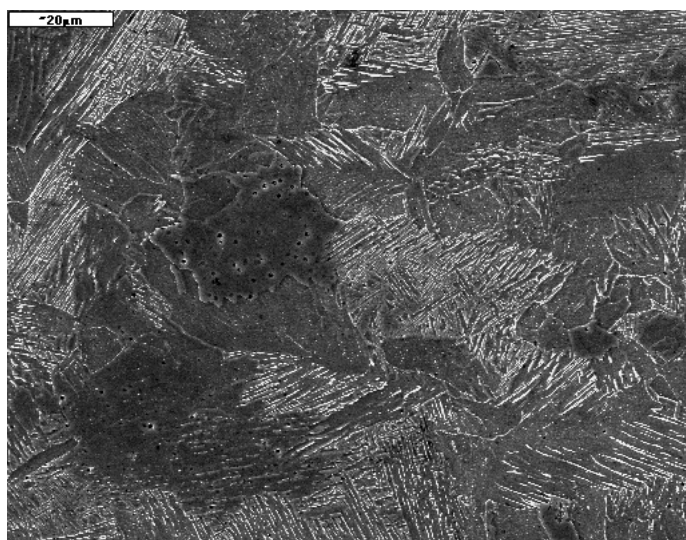
Mikrostruktura złącza spawanego (próbka serii 1) w SWC posiadała budowę ferrytyczno-perlityczną drobnoziarnistą z widocznymi wytrąceniami metalicznymi w ziarnach perlitu. Przykładową fotografię mikrostruktury złącza spawanego w SWC (próbka serii 1) przedstawiono na rysunku 6.



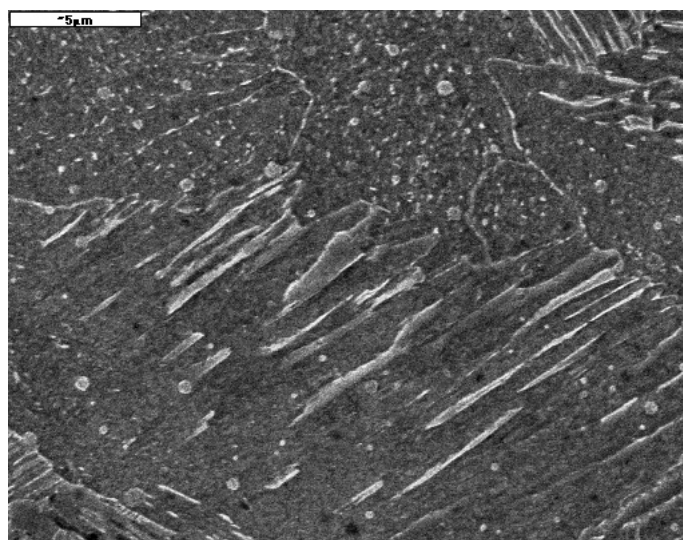
Rys. 5. Mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna materiału rodzimego



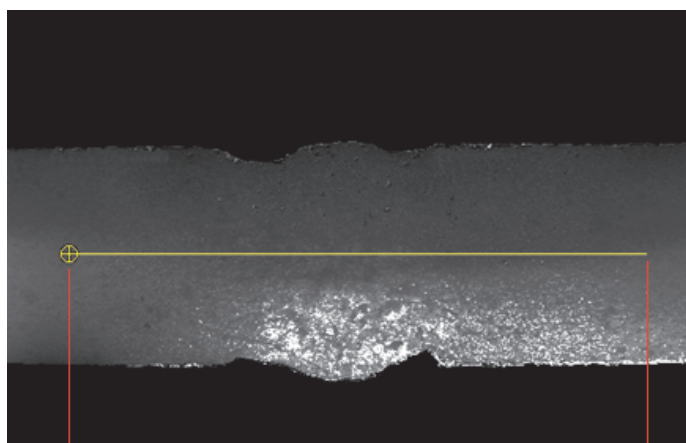
Rys. 6. Ziarna perlitu z wytrąceniami metalicznymi w SWC



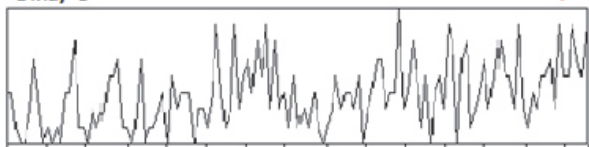
Rys. 7. Struktura Widmanstättena w strefie spoiny



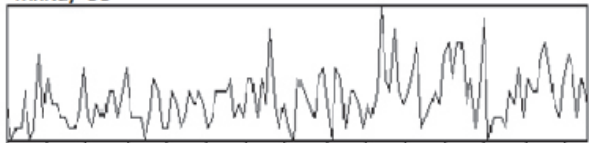
Rys. 8. Listwy martenzytu



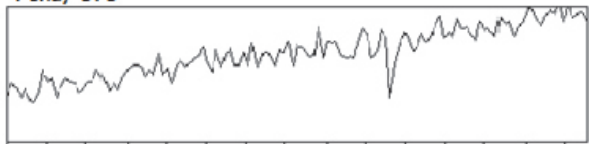
Sika, 8



MnKa, 11



FeKa, 171



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

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

W strefie wpływu ciepła złącza spawanego (próbka serii 3) stwierdzono strukturę perlitu płytkowego, natomiast w strefie spoiny – występowanie martenzytu listwowego (rys. 8). Kryształ martenzytu mają kształt listw równoległych tworzących tzw. pakiety. Struktura martenzytyczna spoiny powoduje zwiększenie twardości w obszarze złącza.

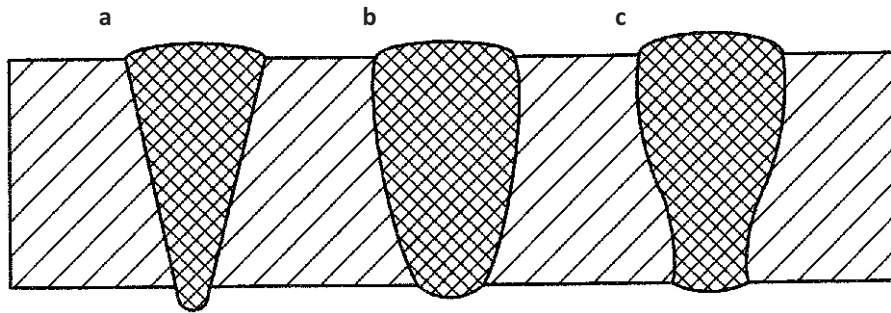
W przypadku złącza próbek serii 4 mikrostruktura w strefie wpływu ciepła składała się z drobnych ziaren perlitu w osnowie ferrytu. Wewnątrz ziaren perlitu stwierdzono występowanie wytrąceń niemetalicznych. W strefie spoiny stwierdzono strukturę martenzytyczną, którą tworzyły kryształy listwowe martenzytu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

Na fotografii – rys. 9, przedstawiono przykładowy widok mikrostruktury oraz rozkład liniowy pierwiastków w złączy spawanym (próbka serii 1). Analiza liniowa wykazała nierównomierny rozkład pierwiastków w złączy spawanym. Można wyróżnić strefy, w których występują znaczne ilości Mn, Si oraz Fe. W badanym złączy wyraźnie są widoczne: lico spoiny oraz strefa wpływu ciepła.

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 zwiększyła się szerokość strefy wpływu ciepła.

### Pomiary twardości

Pomiary twardości przeprowadzono metodą Vickersa dla próbek z serii 1-5. Odciski penetratorem wykonano na zgładach prostopadłych w trzech strefach: w licu spoiny, w strefie wpływu ciepła, jak również w materiale rodzimym. Wyniki badań twardości przedstawiono w Tabelach 5 ÷ 9.



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

Tabela 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

Tabela 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

Tabela 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

Tabela 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

Tabela 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 posiadały podobną strukturę bez mikrodefektów wpływających na osłabienie materiału. Średnia twardość w strefie materiału podłoża dla wszystkich próbek z serii 1-5 wyniosła 105 HV1.

Analizując wyniki pomiarów twardości w strefie wpływu ciepła (Tabele 5÷9) można stwierdzić, że największą twardość osiągnięto przy prędkości posuwu 3,5 m/min (próbka z serii 4). Największa 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 ok. 38%. Wzrost twardości spowodowany był zmianami w mikrostrukturze materiału, które zostały opisane w części *Analiza mikrostruktury*.

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

### Statyczna próba rozciągania

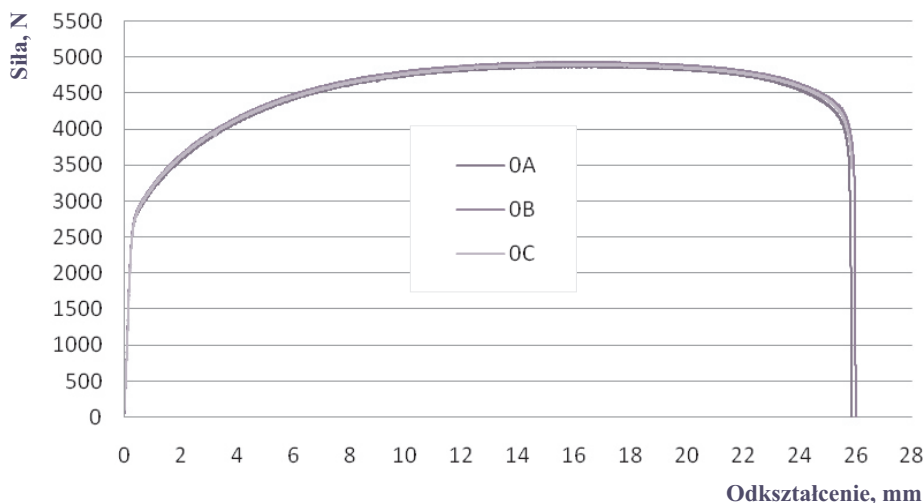
Statyczna próba rozciągania została przeprowadzona dla próbek z serii 0-5. Celem statycznej próby rozciągania było porównanie wyników otrzymanych z rozciągania próbki ze stali DC04 (materiału rodzimego) z pozostałymi próbkami spawanymi przy różnych parametrach procesu (prędkość posuwu).

Badania wytrzymałości na rozciąganie rozpoczęły się od pomiaru szerokości i grubości próbek. Każdy pomiar wykonano trzykrotnie, by zminimalizować wpływ ewentualnych odchyłek pomiarów. Następnie wyliczono średnie arytmetyczne grubości i szerokości osobno dla każdej próbki. Otrzymane wyniki

Tabela 10. Wyniki statycznej próby rozciągania dla próbek serii 0

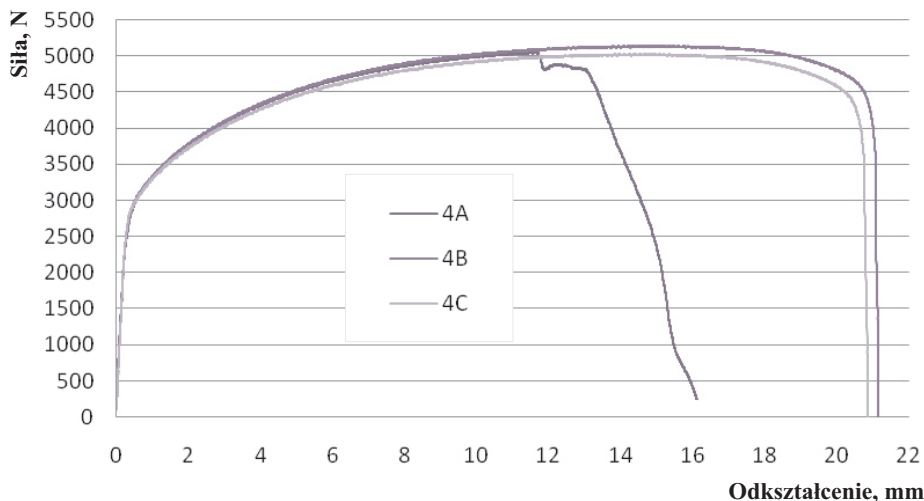
Oznaczenie	Przemieszczenie dla $R_m$	Siła max. $F_m$	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$	Przemieszczenie w chwili zerwania $L_o$	Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$
	[mm]	[N]	[MPa]	[mm]	[MPa]
0A	16,39	4875,66	311	25,85	162
0B	16,61	4928,68	308	26,00	164
0C	16,19	4899,34	315	25,97	159

## Rozciąganie próbek z serii 0



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

## Rozciąganie próbek z serii 4



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

wprowadzono do programu TestSystem. Wpisywane były m.in. wymiary próbki (stała dla wszystkich próbek grubość: 0,78 mm, długość pomiarowa próbek: 60 mm oraz zmienne dla każdej z nich szerokość), jej masa (przyjęto 13 g), założona prędkość próbna (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 wprowa-

dzonych parametrów utworzono plik bazowy. Automatycznie program utworzył dla każdej z prób pliki z wynikami, które były tworzone na podstawie pliku bazowego. Kryterium końca badania określono początkowo uzyskaniem odkształcenia równego 30 mm oraz 95% spadku siły rozciągającej. Po wykonaniu dwóch prób zmieniono kryterium odkształcenia na 40 mm ze względu na dużą plastyczność materiału. Badania wykonano w temperaturze 20°C oraz bez użycia ekstensometru. W pierwszym etapie wykonano badanie dla próbki testowej w celu odpowiedniego ustawienia zakresu parametrów oraz sprawdzenia prawidłowości wprowadzonych założeń. Następnie statyczną próbę rozciągania przeprowadzono dla próbek w kolejności serii od 0 do 5. Przed każdym badaniem następowało zerowanie wartości przemieszczenia i siły.

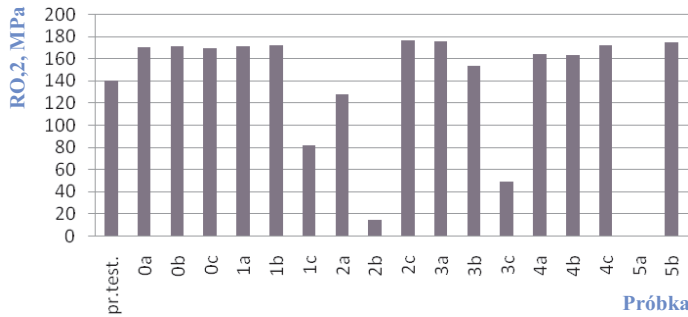
Wyniki statycznej próby rozciągania dla próbek z serii 0 przedstawiono w Tabeli 10 oraz na wykresie (rys. 11). Analizując wyniki w Tabeli 10 oraz ich zapis na rysunku 11 można zauważyć dużą powtarzalność wyników, co świadczy o jednorodności próbek z materiału rodzimego.

Analiza wyników uzyskanych w statycznej próbie rozciągania wykazała, że próbki niepoddane procesowi spawania laserowego (seria 0) charakteryzują się mniejszą umowną granicą plastyczności ( $R_{0,2}$ ) i wytrzymałością na rozciąganie ( $R_m$ ) oraz większymi własnościami plastycznymi, niż próbki spawane. Zarówno wartości wydłużenia do chwili osiągnięcia  $R_m$ , oraz całkowitego osiągniętego wydłużenia są największe dla próbek z materiału rodzimego. Świadczy to jednoznacznie, że obecność złącza spawanego wpływa na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie próbek, natomiast zmniejszeniu ulegają własności plastyczne.

Przykładowe wyniki statycznej próby rozciągania dla próbek (serii 4) przedstawiono w Tabeli 11 oraz na wykresie (rys. 12). Natomiast na wykresach (rysunki 13 i 14) przedstawiono zbiorcze wyniki wytrzymałości na rozciąganie oraz umownej granicy plastyczności dla wszystkich próbek.

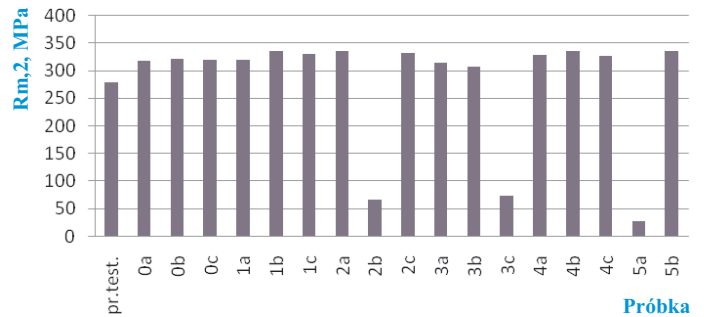
Porównując wyniki umownej granicy plastyczności oraz wytrzymałości na roz-

Zmiana umownej granicy plastyczności



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

Zmiana wytrzymałości na rozciąganie

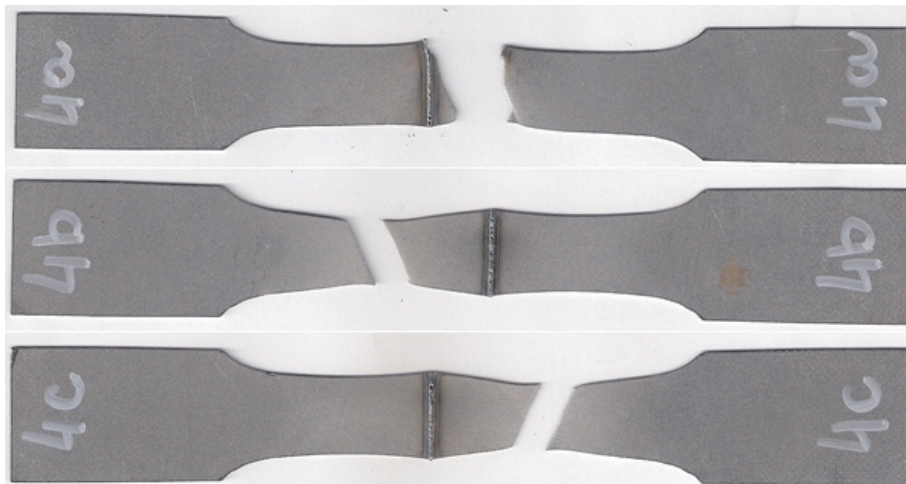


Rys. 14. Zbiornicze wyniki wytrzymałości na rozciąganie dla wszystkich próbek

Tabela 11. Wyniki statycznej próby rozciągania dla próbek serii 4

Oznaczenie	Przemieszczenie dla $R_m$	Siła max. $F_m$	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$	Przemieszczenie w chwili zerwania $L_o$	Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$
	[mm]	[N]	[MPa]	[mm]	[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

ciąganie (rys. 13 i 14) próbek spawanych dla poszczególnych serii spawania można stwierdzić, że otrzymane wyniki cechują się dużą przypadkowością i w związku z tym trudno jest je określić mianem tendencji (wzrostowej lub spadkowej). Dużą stabilność wyników można natomiast zaobserwować dla próbek spawanych serii 1 i 4.



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).

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

Tabela 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	ciągły, ścięty	jasno szary kolor na krawędzi cięcia	niesymetryczne, początek w osi spoiny, koniec w odl. 6 mm od spoiny
4b	2	3,5	mały, wąski	ciągły, ścięty	jasno szary kolor na krawędzi cięcia	niesymetryczne, w odl. 18-24 mm od spoiny
4c	2	3,5	mały, wąski	ciągły, ścięty	jasno szary kolor na krawędzi cięcia	niesymetryczne, w odl. 18-24 mm od spoiny

Po wykonaniu statycznej próby rozciągania, próbki zostały poddane badaniom organoleptycznym. Ich celem było określenie umiejscowienia i przebiegu powstałych przełomów. Podczas prób zaobserwowano, że w większości przypadków badane próbki pękając tworzą 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) przedstawiono na rysunku 15, natomiast w Tabeli 12 opisano wygląd przełomów po w/w próbie.



## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań, stwierdzono, że:

1. Kształt i grubość powstałej spoiny, a także zakres strefy wpływu ciepła zależą od wartości prędkości posuwu.
2. Porównując własności mechaniczne próbek (seria 0) z próbkami spawanymi można stwierdzić, że w wyniku spawania laserowego nastąpił nieznaczny wzrost własności wytrzymałościowych oraz wyraźny spadek własności plastycznych. Spadek własności plastycznych charakteryzuje się zmniejszeniem wydłużenia całkowitego próbek spawanych w stosunku do wydłużenia próbek z materiału rodzimego.
3. Badania twardości potwierdzają, że próbki spawane nie mają jednorodnej budowy, lecz posiadają 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., Huang J., Xia J., Zhao X., Lin S.: *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., Przetakiewicz W., Kalita W.: *Analiza efektów laserowego spawania blach ze stopu tytanu i stali*. Przegląd Mechaniczny, 20 (1993), str. 18-21.
4. Hayashi T., Matsubayashi K., Katayama S., Abe N., Matsunawa A., Ohmori A.: *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 stalą 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](http://www1.ruukki.pl/~media/Poland/Files/metals-coldrolled/karty-produkty/Ruukki-zimnowalcowane-Stale-przeznaczone-do-formowania.pdf) (z dn. 05.02. 2023 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.