



ZESZYTY STUDENCKICH KÓŁ NAUKOWYCH

Charakterystyka zmian mikrostruktury i własności napoin wykonywanych wiązką elektronów i materiałem dodatkowym w postaci drutu LNM307

M. Ordon^a, M. Bonek^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email: m_ordon@interia.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email: mirosław.bonek@polsl.pl

Streszczenie: Celem pracy było przeprowadzenie badań eksperymentalnych dotyczących napawania wiązką elektronów z materiałem dodatkowym w postaci drutu (gatunek LNM 307). Próby napawania przeprowadzono na płytach próbnych o wymiarach 10×80×200 mm wykonanych ze stali niestopowej w gatunku S235JR. Na płytach próbnych napawanie jednowarstwowe wykonano na powierzchni o wymiarach 40×40mm.

Abstract: The aim of the work was to conduct experimental investigations concerning electron beam welding with additional material in the form of wire (LNM 307 grade). The welding tests were carried out on sample boards with dimensions of 10×80×200 mm made of non-alloy steel in the S235JR grade. On test plates, single-layer welding was done on a surface measuring 40×40mm.

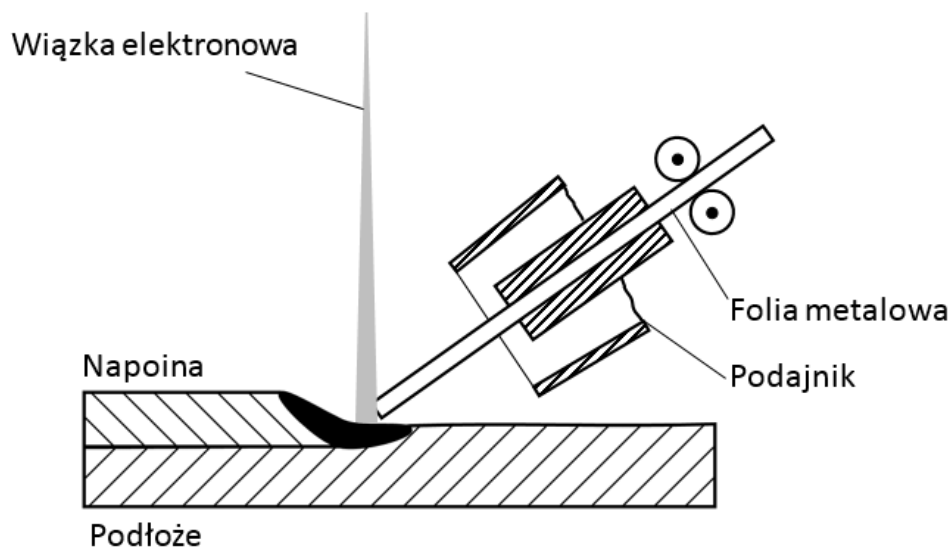
Słowa kluczowe: obróbka powierzchniowa, wiązka elektronów, napawanie, inżynieria powierzchni.

1. WSTĘP

Napawanie elektronowe

W napawaniu elektronowym źródłem ciepła jest skoncentrowana wiązka elektronów. Wiązka emitowana jest pod wpływem napięcia przyspieszającego z katody działa elektronowego. Elektrony poruszają się z bardzo dużą prędkością, a ich energia kinetyczna zamieniana jest na ciepło w miejscu oddziaływania wiązki z powierzchnią materiału. Materiał dodatkowy może być podawany w formie drutu lub taśmy. Podczas procesu materiał dodatkowy jest w ciągłym kontakcie z powierzchnią, dzięki czemu roztapia się on bezpośrednio na powierzchni obrabianego elementu [1-3].

Proces napawania elektronowego może odbywać się w próżni wysokiej (ok. 10^{-3} – 10^{-5} Pa) lub w próżni częściowej ($2,6 \cdot 10^{-1}$ Pa – $1,3 \cdot 10^{-3}$ Pa). Dzięki temu nie jest konieczne stosowanie gazów osłonowych. W wysokiej próżni znajduje się taka sama ilość cząsteczek tlenu co w argonie o czystości 99,9999. Taka czystość argonu nie jest możliwa do osiągnięcia w skali przemysłowej, natomiast wysoka próżnia nie stanowi tak dużego problemu [1-3].



Rys.1. Schemat napawania elektronowego [4].

Fig. 1. Scheme of electron welding [4]

Podstawową zaletą napawania elektronowego jest bardzo wysoka czystość wykonanych napoin. Ponadto napoiny charakteryzują się minimalnym wymieszaniem z materiałem rodzimym oraz wąską strefą wpływu ciepła. Wadami są konieczność napawania w próżni oraz bardzo wysoki koszt oprzyrządowania [2,3].

Wiązka elektronów

Elektrony które poruszają się z bardzo dużymi prędkościami mogą tworzyć wiązki elektronowe. Tego typu wiązki pełnią ważne funkcje w procesach cieplnych ze względu na dużą energię kinetyczną elektronów wchodzących w skład wiązek [1].

Energię kinetyczną elektronu można określić następującym wzorem [1]:

$$W = \frac{m_0 v^2}{2} = eU \quad (1)$$

gdzie: W – energia, v – prędkość elektronu, U – napięcie przyspieszające, e – ładunek elektronu, m_0 – masa spoczynkowa elektronu.

Ze wzoru (1) można wyznaczyć wzór na prędkość elektronu w zależności od napięcia przyspieszającego [1]:

$$v = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U} \quad (2)$$

Należy pamiętać, że wzory na energię kinetyczną (1) oraz prędkość elektronu (2) są słuszne zakładając, że prędkość elektronu jest mała w porównaniu do prędkości światła. W przypadku wysokiego napięcia przyspieszającego (30-200 kV) konieczne jest uwzględnienie relatywistycznego przyrostu masy elektronu. W tym celu należy wprowadzić współczynnik β [1].

$$\beta = v/C \quad (3)$$

gdzie: c – prędkość światła.

Jeśli współczynnik $\beta^2 \leq 1$ to można pominąć efekt relatywistyczny. W przeciwnym wypadku prędkość elektronu, zgodnie z teorią względności, wyznacza się ze wzoru (4) [1]:

$$v = 3 \cdot 10^8 \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + 1,96 \cdot 10^{-6} U)^2}} \quad (4)$$

Elektrony to ujemnie naładowane cząstki elementarne obecne we wszystkich atomach. Aby możliwe było uzyskanie wolnych elektronów, które budują wiązkę niezbędne jest nagrzanie elektrody emitującej (katody). Ze względu na ich ładunek możliwe jest oddziaływanie na elektrony wykorzystując pole elektryczne. Siła Kulomba działająca na elektrony w polu elektrycznym powoduje ich przyspieszanie w kierunku anody. Ilość energii kinetycznej jaką uzyskują elektrony w wyniku tego oddziaływania jest zależna od różnicy potencjału między katodą a anodą. Na elektrony można także oddziaływać polem magnetycznym. Siła Lorentza wpływa na kierunek ruchu elektronów, co pozwala na skupianie elektronów w wiązkę oraz jej formowanie [4].

Działo elektronowe

W działle elektronowym elektrony emitowane są z termokatody. Emisja elektronów zależna jest od natężenia pola elektrycznego, temperatury pracy katody, rodzaju materiału katody oraz od rodzaju powierzchni emitującej elektrony. Podstawowe zadanie termokatody to możliwie najbardziej ekonomiczne dostarczanie elektronów. Ponadto materiał termokatody powinien [1]:

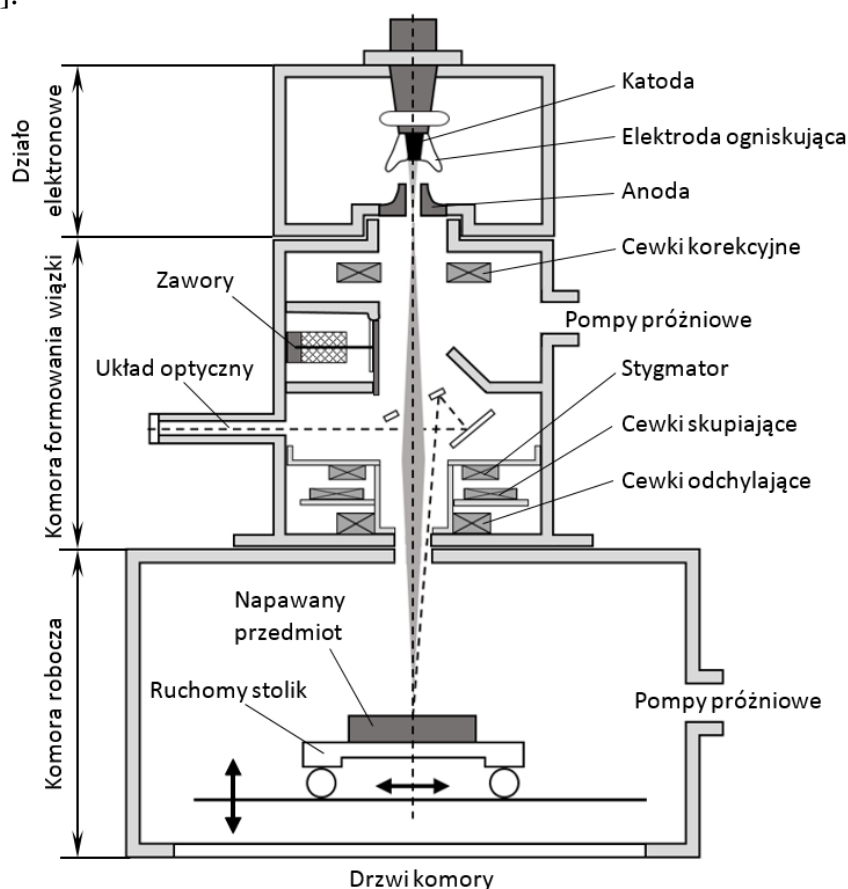
- być łatwo formowalny,
- zachowywać własności mechaniczne oraz kształt w podwyższonych temperaturach,
- charakteryzować się wysoką temperaturą topnienia,
- być odporny na czynniki zatruwające, wpływające negatywnie na zdolność emisyjną katody,
- charakteryzować się możliwie małą emisyjnością cieplną powierzchni zewnętrznej.

Jako materiał katodowy najczęściej stosowany jest wolfram. Charakteryzuje się on wysoką temperaturą topnienia, przy stosunkowo dużym potencjale wyjścia ($\varphi_0 = 4,55 \text{ V}$). Innym metalem często stosowanym jako materiał na termokatody jest tantal (potencjał wyjścia $\varphi_0 = 4,12 \text{ V}$) [1].

Na rysunku 2 przedstawiono schemat urządzenia do napawania elektronowego. Składa się on z działla elektronowego, komory formowania wiązki zwaną też kolumną przelotową oraz z komory roboczej. Kolumna przelotowa wraz z komorą działla elektronowego tworzą kompletny układ działla elektronowego. Głównym zadaniem tego układu jest wytworzenie wiązki oraz jej ogniskowanie na obrabianym przedmiocie. Układ ten składa się z działla elektronowego oraz kolumny przelotowej. Ponadto całe urządzenie musi być wyposażone w system pomp mechanicznych oraz dyfuzyjnych w celu wytworzenia próżni. Elektrony powinny być emitowane w próżni wysokiej ($10^{-3} - 10^{-5} \text{ Pa}$), umożliwia to swobodny przepływ wiązki elektronów, bez utraty energii. Komora działla wyposażona jest w termokatodę, elektrodę ogniskującą oraz anodę. Kolejnym elementem są cewki korekcyjne znajdujące się w kolumnie przelotowej. Innym istotnym elementem jest także zawór odcinający kolumnę przelotową oraz komorę działla od komory roboczej. Jest to konieczne ponieważ podczas załadunku komora robocza jest zapowietrzona. Kolumna przelotowa jest wyposażona w układ optyczny pozwalający na obserwację linii spawania. Ostatnim elementem kolumny przelotowej jest układ odchylający [1,5,6].

Zarówno w spawaniu jak i napawaniu elektronowym źródłem ciepła jest strumień elektronów. Do katody doprowadzony jest prąd o wysokim napięciu, różnica potencjałów między katodą a anodą oraz nagrzanie katody w wyniku oddziaływania prądu przez nią płynącego prowadzi do emisji elektronów z katody w stronę anody [7].

Aby możliwe było wykorzystanie wiązki elektronów jako źródło ciepła konieczne jest skierowanie jej na powierzchnię obrabianego elementu. W tym celu wykorzystuje się pole magnetyczne. Cewki wytwarzają pole magnetyczne, które pozwala na formowanie wiązki elektronowej w sposób zbliżony do formowania wiązki światła przez soczewki. Ogniskowa takiej cewki zależy od napięcia przepływającego przez cewkę oraz energii elektronów formujących wiązkę. Zmiana napięcia w cewkach pozwala na zmianę ogniskowej, dzięki czemu możliwe jest elektroniczne sterowanie wiązką elektronową. Wykorzystując odpowiednie układy soczewek magnetycznych możliwe jest sterowanie wiązką oraz zmiana jej kształtu [4].



Rys. 2. Schemat urządzenia do napawania elektronowego [6].

Fig. 2. Diagram of the electron beam welding device [6].

Oddziaływanie wiązki elektronowej na obrabiany element

W przypadku spawania i napawania wiązka musi charakteryzować się odpowiednimi własnościami. Podstawową z nich jest dostarczanie energii pozwalającej na stopienie i odparowanie metalu. Równocześnie ważne jest aby strefa wokół miejsca napawanego/spawanego była jak najmniej nagrzana. Taki efekt możliwy jest do uzyskania poprzez dostarczenie bardzo dużej energii na jak najmniejszy obszar (wysoka gęstość energii)

dlatego wiązka elektronowa musi mieć możliwie małą średnicę. Mała średnica wiązki pozwala też na głębsze wtopienie [4].

Wiązka elektronowa składa się z ogromnej liczby elektronów przyspieszonych do bardzo dużych prędkości. Proces cieplny w metodach wykorzystujących wiązkę elektronową jest oparty o zamianę energii kinetycznej przyspieszanych elektronów na energię cieplną. Oddziaływanie wiązki elektronowej na obrabiany element składa się z trzech faz [1,4]:

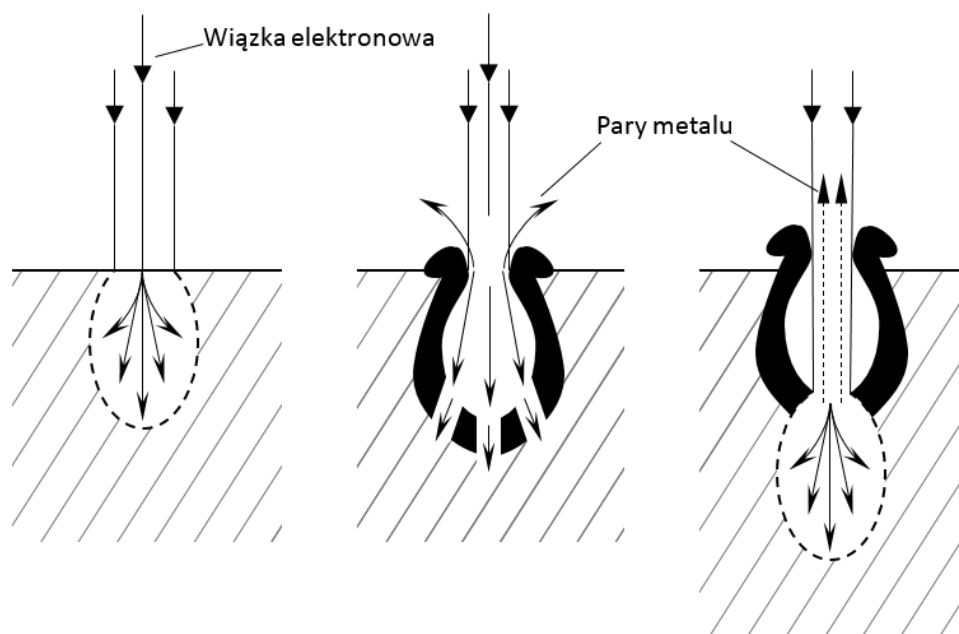
- rozproszenie elektronów w materiale przed zmianą stanu fizycznego,
- topienie, parowanie oraz wrzenie materiału,
- powstawanie kanału.

Podczas bombardowania elektrony wnikają do wnętrza materiału na głębokość maksymalnie kilkudziesięciu mikrometrów (głębokość zależy od typu materiału i napięcia przyspieszającego). Większość energii elektronów ulega zamianie na ciepło pod powierzchnią materiału czego efektem jest lokalny wzrost temperatury. W miarę wzrostu temperatury następuje przejście do drugiej fazy – topienia. W tej fazie główna część energii jest wykorzystana do stopienia i odparowania materiału. Niewielką część energii traci się w wyniku promieniowania oraz przewodnictwa cieplnego materiału obrabianego. Część stopionego metalu ulega odparowaniu, reakcja par powoduje wzrost ciśnienia, które wypycha stopiony metal dzięki czemu wiązka elektronowa może dostać się w głąb materiału. Proces przechodzi w trzecią fazę – powstawanie kanału [1].

Tabela 1. Głębokość wnikania elektronów dla kilku przykładowych materiałów [4].

Table 1. Depth of electron penetration for several sample materials [4.]

Napięcie przyspieszające	Mg [μm]	Al [μm]	Ti [μm]	Cu [μm]	Fe [μm]	W [μm]
60 kV	35	23	14	7	8	3
120 kV	112	72	43	22	25	10



Rys. 3. Etapy powstawania wgłębienia [1].

Fig. 3. Stages of hole formation [1.]

Proces tworzenia kanału w spawaniu elektronowym nosi nazwę głębokiej penetracji. Istnieje kilka poglądów dotyczących mechanizmu tego procesu. Jeden z bardziej popularnych poglądów, będący równocześnie potwierdzony doświadczalnie, mówi o tym, że parowanie materiału stopionego przebiega w postaci następujących po sobie erupcji (Rys..). Wiązka elektronowa wnika w głąb materiału powodując narastanie temperatury pod powierzchnią. W miarę wzrostu temperatury i ciśnienia następuje erupcyjne odparowanie metalu. Ciekły metal jest wypychany na ścianki wgłębienia przez nacisk cząsteczek parującego materiału. Bombardowanie elektronami prowadzi do zjonizowania par metalu, czego efektem jest zogniskowanie wiązki na dno wgłębienia gdzie proces się powtarza [1].

Wady i zalety napawania elektronowego

Napawanie z wykorzystaniem wiązki elektronowej to metoda intensywnie rozwijana, która obecnie zyskuje na popularności. Posiada szereg cech wyróżniających tą metodę od innych obecnie stosowanych. Zaletami napawania elektronowego są [8]:

- bardzo wysoka gęstość mocy dochodząca do 10^7 W/cm^2 ,
- możliwość napawania z dużymi szybkościami,
- możliwość uzyskania wąskiego, głębokiego wtopienia,
- ograniczenie strefy wpływu ciepła,
- możliwość ogniskowania wiązki na różne odległości, co pozwala na napawanie elementów o skomplikowanych kształtach,
- napawanie prowadzone jest w próżni, co owocuje wysoką czystością wykonanej napoiny oraz oszczędnością na gazach osłonowych,
- komputerowe sterowanie parametrami gwarantuje wysoką powtarzalność procesu,
- możliwość sterowania mocą wiązki pozwala na napawanie blach o grubości w zakresie 1-300 mm.
- Pomimo wielu zalet, jak każda metoda wytwarzania, napawanie elektronowe posiada też swoje wady. Należą do nich [8]:
- konieczność napawania w próżni powoduje ograniczenie co do wielkości napawanych elementów, ze względu na fakt, że cały element musi znajdować się w komorze próżniowej,
- napawanie elementów magnetycznych jest problematyczne ze względu na oddziaływania pola magnetycznego z wiązką,
- napawanie w próżni wymaga bardzo dokładnego oczyszczenia powierzchni,
- bardzo wysoki koszt aparatury.

2. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ WŁASNYCH

Celem pracy było przeprowadzenie badań eksperymentalnych dotyczących napawania wiązką elektronów z materiałem dodatkowym w postaci drutu (gatunek LNM 307). Próby napawania przeprowadzono na płytach próbnych o wymiarach $10 \times 80 \times 200 \text{ mm}$ wykonanych ze stali niestopowej w gatunku S235JR. Na płytach próbnych napawanie jednowarstwowe wykonano na powierzchni o wymiarach 40×40 . W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny materiału podstawowego, tabela 3 zawiera skład chemiczny materiału dodatkowego natomiast tabela 4 przedstawia warunki technologiczne procesu napawania.

Tabela 2. Skład chemiczny materiału stali S235JR zgodnie z normą EN 10025-2: 2004.

Table 2. Chemical composition of S235JR steel according to EN 10025-2: 2004.

Pierwiastek	C	Mn	P	S	N	Cu
Zawartość [%]	0,17-0,20	do 1,4	do 0,04	do 0,04	do 0,012	0,55

Tabela 3. Skład chemiczny drutu LNM 307.

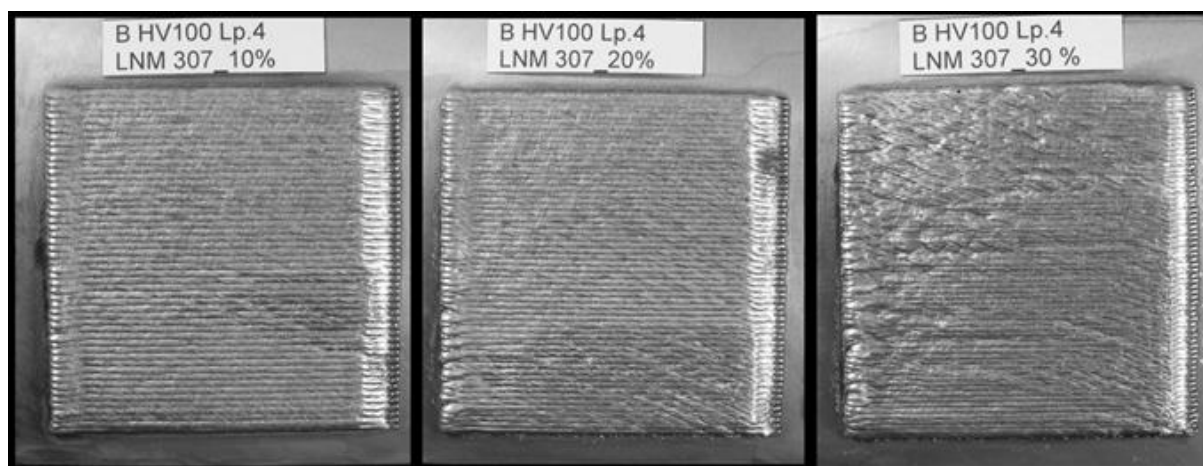
Table 3. The chemical composition of the LNM 307 wire.

Pierwiastek	C	Mn	Si	Cr	Ni
Zawartość [%]	0,07	7,1	0,8	18,6	8,0

Tabela 4. Warunki technologiczne napawania.

Table 4. Technological conditions of surfacing.

Parametr	Wartość		
Próba	1	2	3
Napięcie przyspieszające [kV]	100	100	100
Natężenie prądu wiązki [mA]	8	8	8
Prędkość podawania drutu [mm/min]	1000	1000	1000
Prędkość przesuwu stołu	800	800	800
Focus [mA]	580	580	580
Zakładka [%]	10	20	30



Rys. 4. Widok napoin na płytach próbnych, z kładką od lewej 10%, 20%, 30%.

Fig. 4. View of weld material on test plates, with footbridge from the left 10%, 20%, 30%.

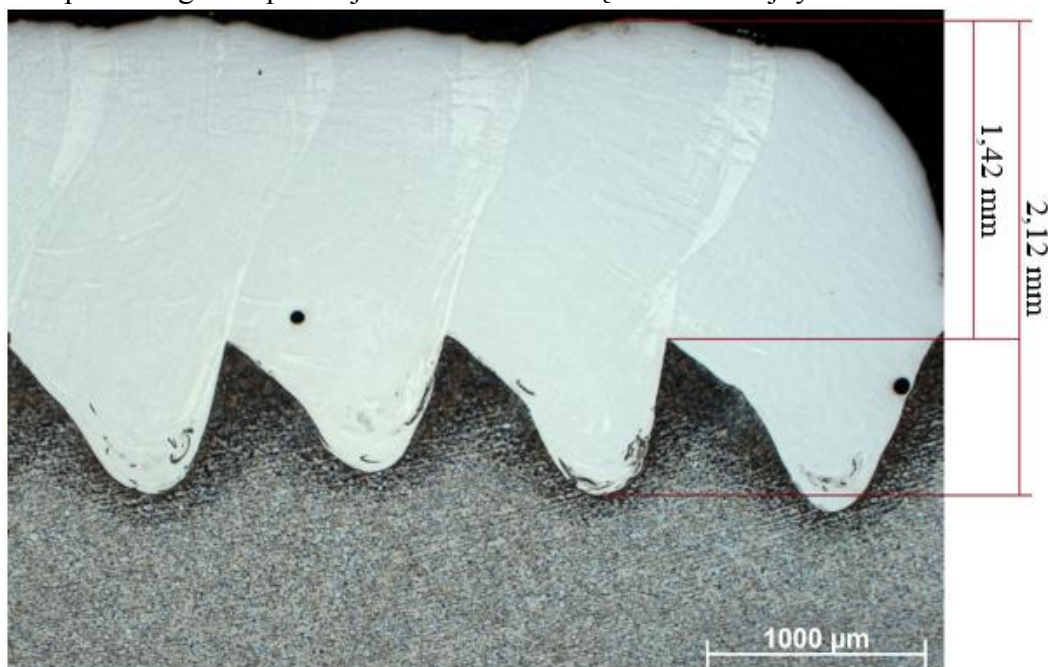
Zakładka wyrażana w procentach oznacza stopień zachodzenia na siebie kolejnych ściegów napoiny. Za jej pomocą można sterować głębokością wtopienia oraz jednorodnością struktury napoiny. Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcia próbek po napawaniu. Płyty zostały pocięte w kierunku prostopadłym do kierunku napawania. Z wyciętych pasów wykonano zgłady metalograficzne, które zostały wytrawione z wykorzystaniem nitalu. Zgłady wykorzystano do obserwacji mikrostruktury na mikroskopie świetlnym.

Pomiary grubości powłok oraz szerokości strefy wpływu ciepła

Pierwszym etapem badań było wykonanie pomiarów cech charakterystycznych napoin. Zmierzono szerokość strefy wpływu ciepła, maksymalną grubość powłoki oraz efektywną grubość powłoki dla każdej z próbek. Pomiary grubości powłoki wykonano na mikroskopie

światłnym Zeiss Axio Vert przy powiększeniu 25x, natomiast strefa wpływu ciepła była mierzona przy powiększeniu 50x.

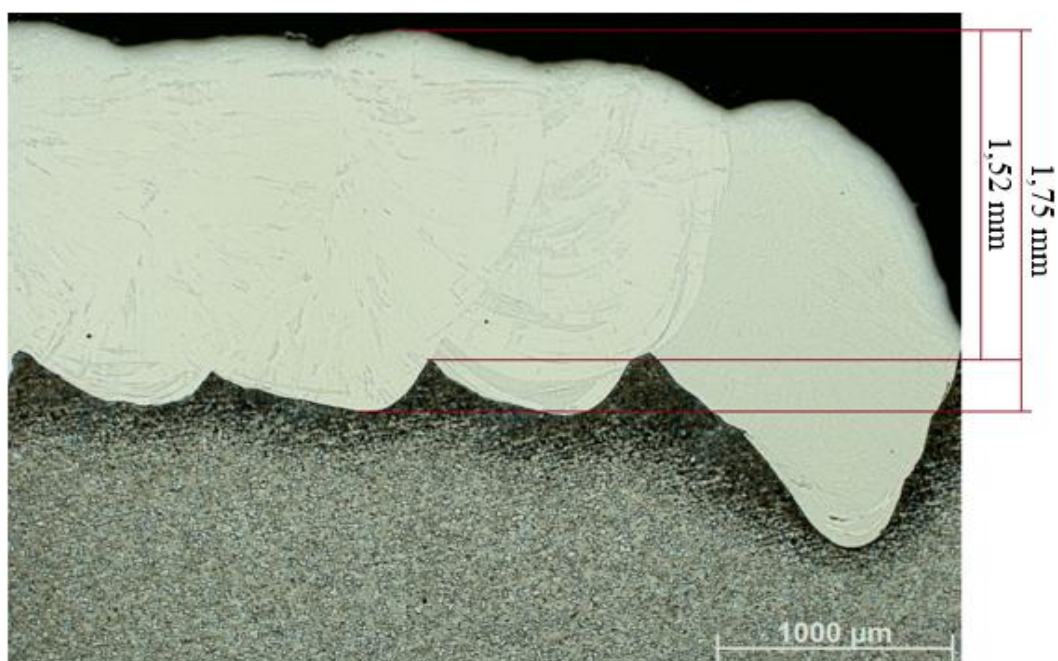
Na Rys. widać pomiar maksymalnej i efektywnej grubości powłoki dla próbki 1. Różnica głębokości pomiędzy kolejnymi wtopieniami jest niewielka, mieści się w przedziale 0,1 mm. Głębokość pierwszego wtopienia jest nieznacznie większa od kolejnych.



Rys. 5. Maksymalna oraz efektywna grubość powłoki próbki 1.

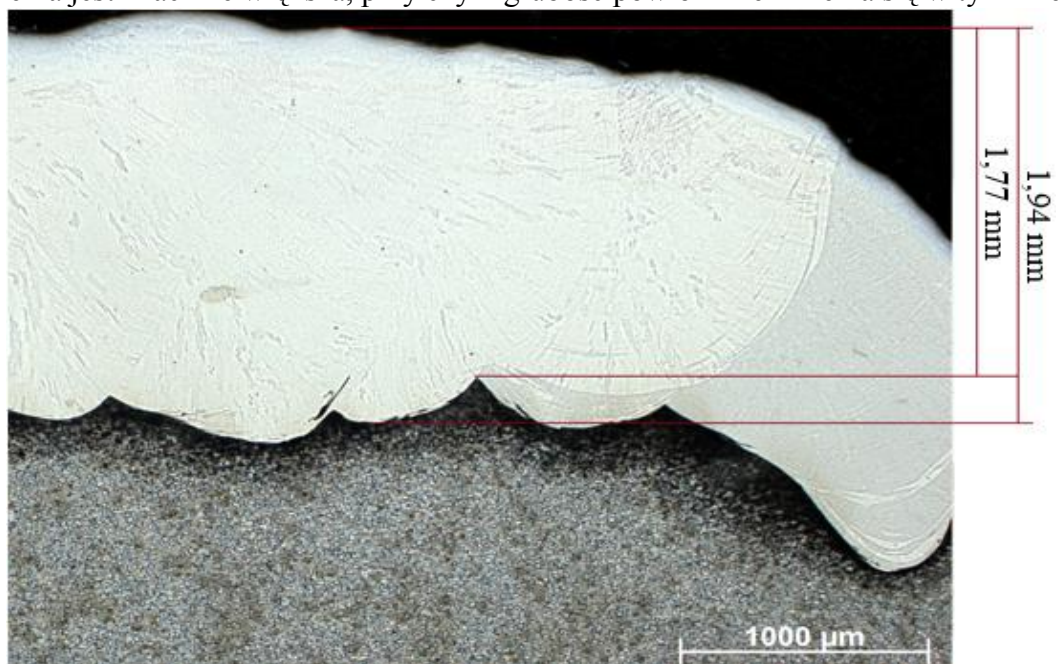
Fig. 5. Maximum and effective thickness of sample coating 1.

Rysunek 6 przedstawia pomiary grubości powłoki dla próbki 2. Maksymalna grubość powłoki jest znacznie niższa niż w próbce 1, natomiast efektywna grubość powłoki jest nieco większa. Dostrzegalna jest znaczna różnica pomiędzy głębokością pierwszego wtopienia a kolejnymi, maksymalna grubość powłoki przy pierwszym wtopieniu wynosi 2,01 mm co jest wartością zbliżoną do maksymalnej grubości powłoki dla próbki 1. Różnice w głębokości pomiędzy kolejnymi wtopieniami tak samo jak w przypadku próbki 1 mieszczą się w zakresie 0,1 mm.



Rys. 6. Maksymalna oraz efektywna grubość powłoki próbki 2.
Fig. 6. Maximum and effective thickness of sample coating 2.

Rysunek 7 przedstawia pomiary dla próbki 3. Maksymalna grubość powłoki jest nieco mniejsza niż w przypadku próbki 1, natomiast efektywna grubość powłoki jest najwyższa spośród wszystkich próbek. Różnice pomiędzy głębokościami wtopienia tak samo jak w przypadku pozostałych próbek mieszczą się w zakresie 0,1 mm. Głębokość pierwszego wtopienia jest znacznie większa, przy czym grubość powłoki nie zmienia się w tym miejscu.



Rys. 7. Maksymalna oraz efektywna grubość powłoki próbki 3.
Fig. 7. Maximum and effective thickness of sample coating 3.

W tabeli 5 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów dla wszystkich próbek. Próbka 1 charakteryzuje się największą grubością maksymalną oraz równocześnie najmniejszą grubością efektywną. Największą grubość efektywną powłoki oraz najmniejszą różnicę pomiędzy grubością maksymalną a efektywną wykazuje próbka 3. Obrazuje to wpływ zastosowanej zakładki na budowę powłoki. Im bardziej pokrywają się kolejne przetopienia tym bardziej równomierna jest grubość powstałej powłoki.

Tabela 5. Zestawienie wyników pomiarów grubości powłok dla wszystkich próbek.

Table 5. Summary of thickness measurement results for all samples.

Próbka	1	2	3
Grubość maksymalna [mm]	2,12	1,75	1,94
Grubość efektywna [mm]	1,42	1,52	1,77
Różnica [mm]	0,7	0,23	0,17

Wskazane jest aby różnica pomiędzy maksymalną grubością a grubością efektywną była jak najmniejsza. Dzięki temu uzyskana powłoka jest bardziej jednorodna. Wzrost stopnia zakładki powoduje spadek tej różnicy, jednak należy zauważyć, że spadek ten nie ma charakteru liniowego. Pomiarom poddano także strefę wpływu ciepła. Strefa wpływu ciepła to strefa w okolicach granicy wtopienia, w której w wyniku działania wysokiej temperatury doszło do zmian strukturalnych. Zmiany te powstają samoistnie i nie są pożądane, jednak z powodu charakterystyki procesu napawania nie możliwym ich uniknięcie. Możliwa jest jednak minimalizacja tego obszaru, do czego dąży się podczas projektowania napoin oraz złączy spawanych.

Na rysunkach 8-10 przedstawiono pomiary szerokości strefy wpływu ciepła dla kolejnych próbek. Szerokość mierzono od wierzchołków kolejnych wtopień. Najmniejszą szerokość strefy wpływu ciepła zmierzono dla próbki 1, najszerza strefa występuje w próbce 2. Na zdjęciach można zaobserwować, że wtopienia w próbce 1 są najostrej zakończzone dzięki czemu powierzchnia oddziaływania ciepła była mniejsza. Efektem tego jest uzyskanie najwęższej SWC, jednakże należy zauważyć, że strefy pomiędzy kolejnymi wtopieniami (które w całości należą do SWC) są największe w próbce 1. Z tego względu, w praktyce strefa wpływu ciepła w próbce 1. zajmuje największy obszar. W próbkach 2 i 3 strefy te zajmują względnie taki sam obszar, szerokość SWC jest nieco mniejsza w próbce 3. Tabela 6 zawiera zestawienie średniej szerokości SWC dla wszystkich próbek.

Tabela 6. Średnia szerokość strefy wpływu ciepła dla poszczególnych próbek.

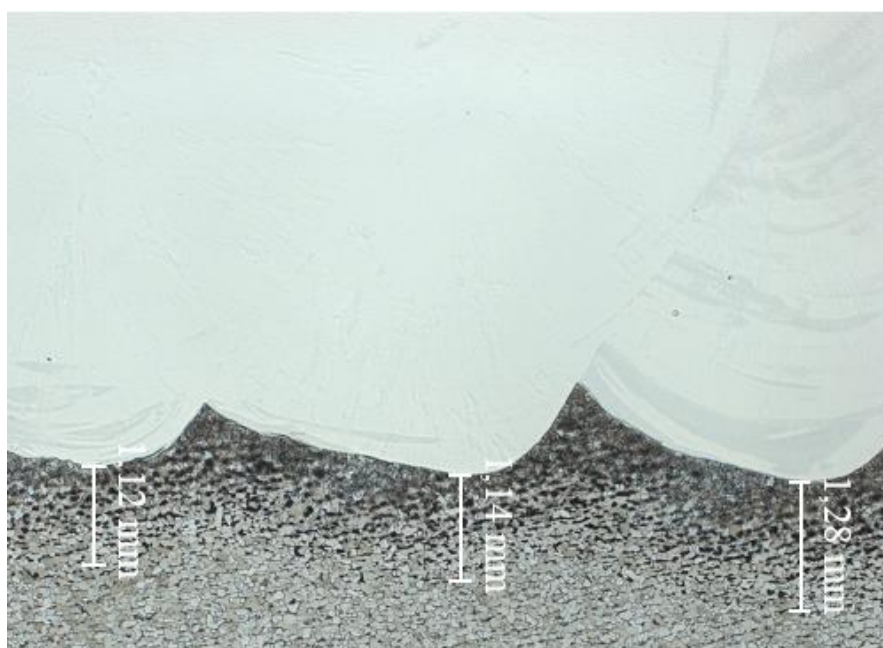
Table 6. The average width of the heat affected zone for individual samples.

Próbka	1	2	3
Szerokość SWC [mm]	0,65	1,18	0,87



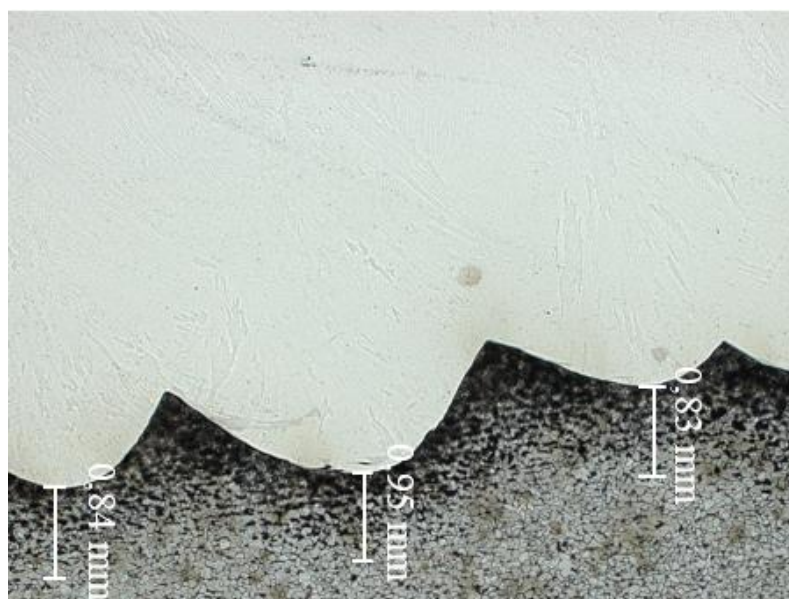
Rys. 8. Pomiary szerokości strefy wpływu ciepła dla próbki 1.

Fig. 8. Measurements of the width of the heat affected zone for the sample 1.



Rys. 9. Pomiary szerokości strefy wpływu ciepła dla próbki 2.

Fig. 9. Measurements of the width of the heat affected zone for the sample 2.



Rys. 10. Pomiary szerokości strefy wpływu ciepła dla próbki 3.

Fig. 10. Measurements of the width of the heat affected zone for the sample 3.

Powyższe pomiary jednoznacznie wskazują na wpływ zakładki na kształt napoiny oraz na szerokość strefy wpływu ciepła. Najkorzystniejsze parametry posiada próbka 3, najmniej korzystne próbka 1. Pomiar strefy wpływu ciepła jest utrudniony ze względu na kształt przekroju napoiny. Największa poprawa wielkości charakteryzujących napoiny występuje przy przejściu z zakładki 10% na 20%, różnice pomiędzy próbkami 2 i 3 nie są tak duże, jednak zmiana jest zauważalna.

Analiza mikrostruktury

Analizy mikrostruktury dokonano wykorzystując mikroskop świetlny Zeiss Acio Vert przy powiększeniach od 25x do 1000x. Zdjęcia wykonywano w polu jasnym oraz w kontraście Nomarskiego co ułatwiło interpretację otrzymanych obrazów. Analizie poddano strukturę napoiny, strefy wpływu ciepła oraz materiał podstawowy.

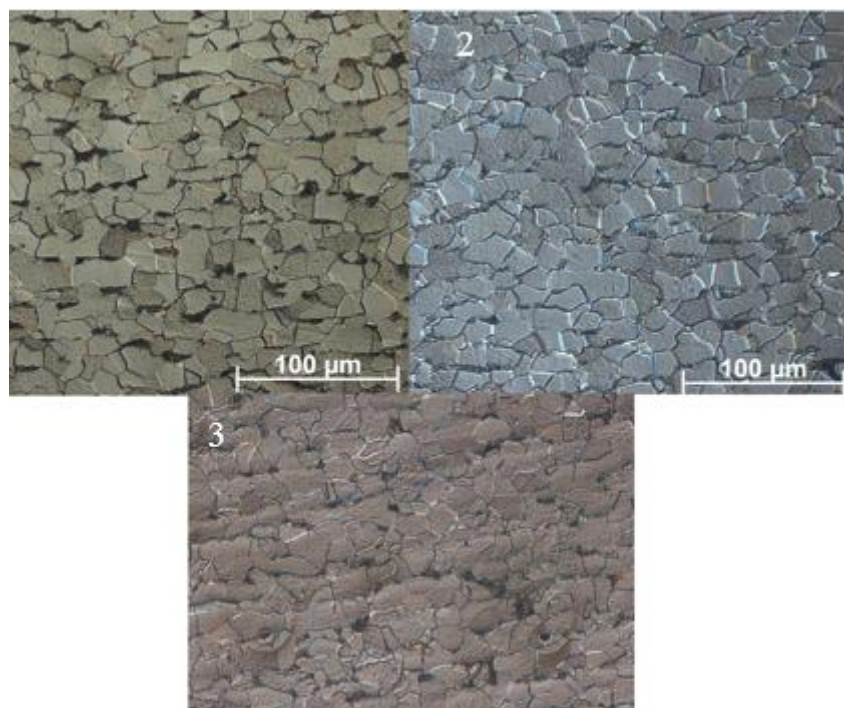
Materiał podstawowy stanowiły płyty ze stali S235JR. Jest to stal niestopowa, o zawartości węgla nieprzekraczającej 0,2%. Skład chemiczny stali wskazuje na strukturę ferrytyczno-perlityczną. Potwierdzają to badania przeprowadzone na mikroskopie świetlnym.

Struktura materiału podstawowego dla wszystkich próbek jest taka sama – ferrytyczno-perlityczna ze znaczną przewagą ferrytu (rys. 11). Jasne ziarna na zdjęciach stanowią ziarna ferrytu, natomiast czarne punkty to ziarna perlitu. Nie odnotowano obecności żadnych wydzieleni ani zanieczyszczeń. Średnia wielkość ziarna wynosi 27 μm . rysunek 12 przedstawia zdjęcia struktury w kontraście Nomarskiego.



Rys. 11. Struktura materiału podstawowego dla próbek 1, 2 i 3, pow. 100x.

Fig. 11. Structure of the base material for samples 1, 2 and 3, 100x.

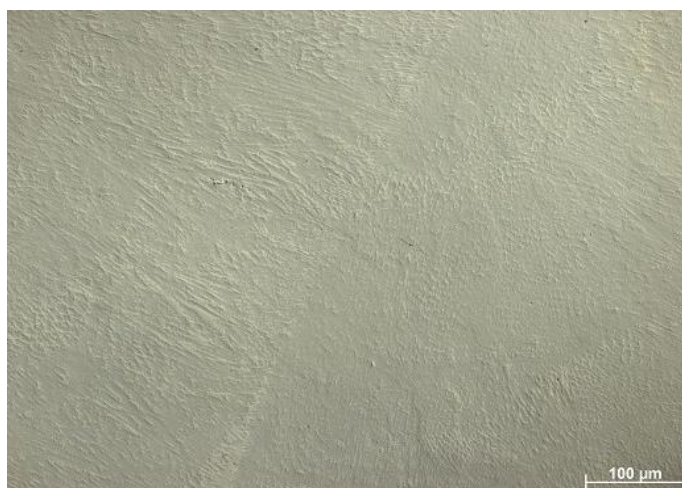


Rys. 12. Zdjęcia struktury materiału podstawowego dla próbek 1,2 i 3, kontrast Nomarskiego, pow. 200x.

Fig. 12. Pictures of the basic material structure for samples 1,2 and 3, Nomarski contrast, 100x.

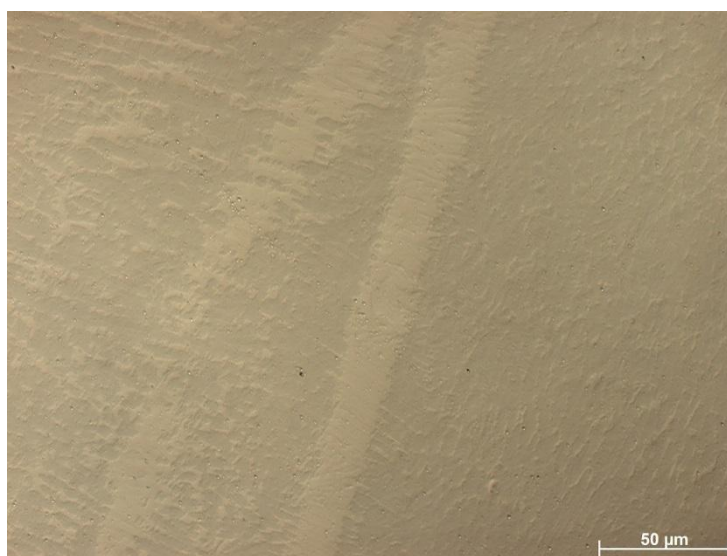
Materiał zastosowany do napawania posiada skład chemiczny zbliżony do składu chemicznego stali austenitycznej. Wysoka zawartość niklu pozwala na uzyskanie struktury austenitycznej w temperaturze pokojowej. Dodatek manganu dodatkowo stabilizuje austenit dzięki czemu możliwe jest uzyskanie struktury czysto austenitycznej, natomiast wysoka zawartość chromu zwiększa odporność stali na korozję.

Rysunek 13 przedstawia strukturę napoiny próbki 1 w polu jasnym oraz w kontraście Nomarskiego. Na obrazach wyraźnie widać granicę pomiędzy kolejnymi wotpieniami, przy czym wyraźniej tę granicę uwidacznia obraz w kontraście Nomarskiego. Napoina charakteryzuje się drobnoziarnistą strukturą austenitu, wewnątrz napoiny dostrzec można wiele drobnych ziaren austenitu. W obszarze przy granicy wtopień zauważalny jest rozrost ziaren austenitu oraz obecność ukierunkowanych (prostokątnych do granicy), podłużnych ziaren austenitu. Ponadto przy większych powiększeniach (ciemne punkty, rysunek 14.) zaobserwować można obecność wydzieleni, najprawdopodobniej węglików chromu.



Rys. 13. Struktura napoiny próbki 1, kontrast Nomarskiego, pow. 200x.

Rys. 13. Struktura napoiny próbki 1, kontrast Nomarskiego, pow. 200x.



Rys. 14. Struktura napoiny próbki 1, kontrast Nomarskiego, pow. 500x.

Rys. 14. Struktura napoiny próbki 1, kontrast Nomarskiego, pow. 500x.

Struktura napoin próbek 2 i 3 wykazuje duże podobieństwo do próbki 1, jednak występują pewne różnice. W przypadku próbki 2, wciąż zauważalna jest granica pomiędzy wtopieniami, przy czym jest znacznie mniej wyraźna niż w próbce 1. W napoinie próbki 3 przejścia pomiędzy wtopieniami są płynne, struktura napoiny jest pod tym względem jednorodna. Tak samo jak w próbce 1, napoiny pozostałych próbek posiadają drobnoziarnistą strukturę austenitu, występują strefy drobnych okrągłych ziaren oraz strefy ukierunkowanych, podłużnych ziaren austenitu (rys. 15).



Rys. 15. Struktura napoin próbek 2 i 3, pole jasne, pow. 100x, kontrast Nomarskiego pow. 200x.

Rys. 15. Struktura napoin próbek 2 i 3, pole jasne, pow. 100x, kontrast Nomarskiego pow. 200x.

Obrazy struktur w kontraście Nomarskiego lepiej uwydatniają granice między wtopieniami. W próbce 3 dostrzegalna jest strefa występująca na całej szerokości spoiny, w której występują drobne, podłużne ziarna austenitu. Jest to strefa płynnego przejścia pomiędzy wtopieniami. Największe zmiany strukturalne wykazuje strefa wpływu ciepła. Ciepło dostarczone podczas napawania wywołało zmiany strukturalne, które wpłynęły na własności mechaniczne. Różnice w składzie chemicznym pomiędzy materiałem płyt a materiałem dodatkowym stosowanym w napawaniu mogły wywołać także lokalne zmiany składu chemicznego w strefie wpływu ciepła.

W strefie wpływu ciepła można wyróżnić 3 strefy – strefa przemian strukturalnych (najbliżej granicy wtopienia), strefa rozdrobnienia ziarna oraz strefa częściowo zmieniona. W przypadku badanych próbek stosunek szerokości tych stref różni się w zależności od analizowanego obszaru. Pomiedzy kolejnymi wtopieniami strefa zmian strukturalnych zyskuje na szerokości na rzecz pozostałych stref, natomiast na wierzchołkach wtopień praktycznie nie występuje.

Badania twardości

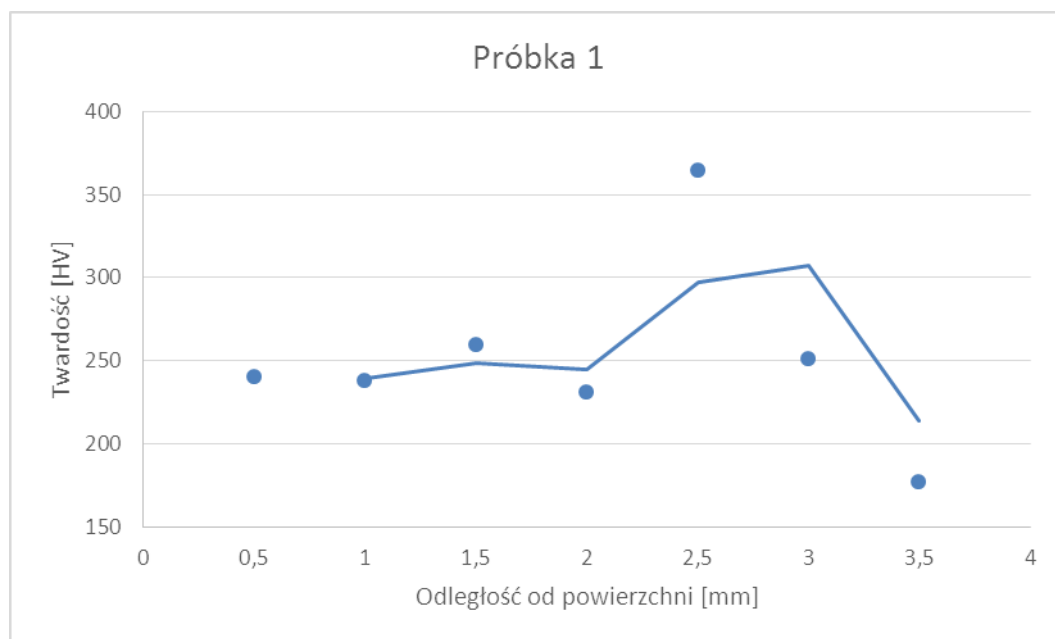
Próbki poddano badaniu mikrotwardości z wykorzystaniem Twardościomierz Vickersa z automatycznym torem pomiarowym FUTURE-TECH FM-ARS 9000 przy obciążeniu równym 0,1N. Na każdej z próbek wykonano 7 wgłębień, odległości pomiędzy wgłębieniami wynosiły 0,5 mm dla próbek 1 i 3 oraz 0,35 mm dla próbki 2. 5 wgłębień przypadało na powłokę, 6. wgłębienie wykonane zostało w strefie wpływu ciepła, natomiast ostatnie w materiale rodzimym. Tabela 7 zawiera wyniki pomiarów twardości dla wszystkich próbek.

Tabela 7. Zestawienie wyników pomiarów twardości.

Table 7. Zestawienie wyników pomiarów twardości

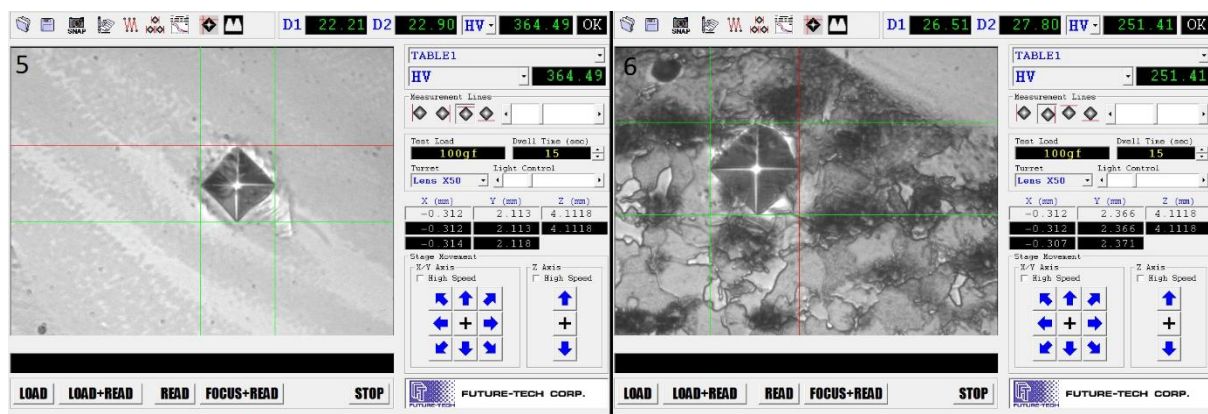
Pomiar	Twardość [HV]						
	1	2	3	4	5	6	7
Próbka 1	240	238	259	231	364	251	177
Próbka 2	219	235	210	231	231	270	193
Próbka 3	219	209	226	235	231	243	187

Na rysunku 16 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów twardości dla próbki 1 w funkcji odległości od powierzchni. Pomiary obejmujące napoinę oscylują w przedziale 230-260 HV, następnie w strefie przejściowej następuje gwałtowny wzrost twardości a następnie spadek do wartości 177 HV. Na rysunku 17 widoczne są pomiary 5. i 6., dla których odnotowano najwyższą twardość. Na zdjęciach widać, że przypadają one na strefę wpływu ciepła oraz granicę napoiny.



Rys. 16. Twardość w funkcji odległości dla próbki 1.

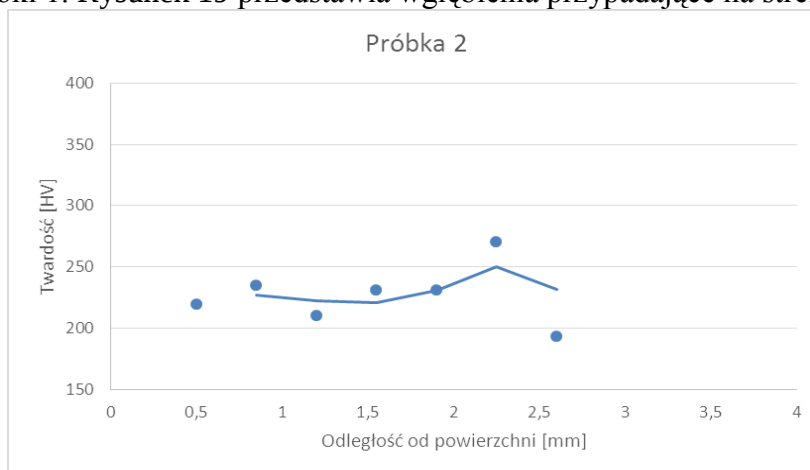
Rys. 16. Twardość w funkcji odległości dla próbki 1.



Rys. 17. Pomiary twardości w strefie przejściowej dla próbki 1.

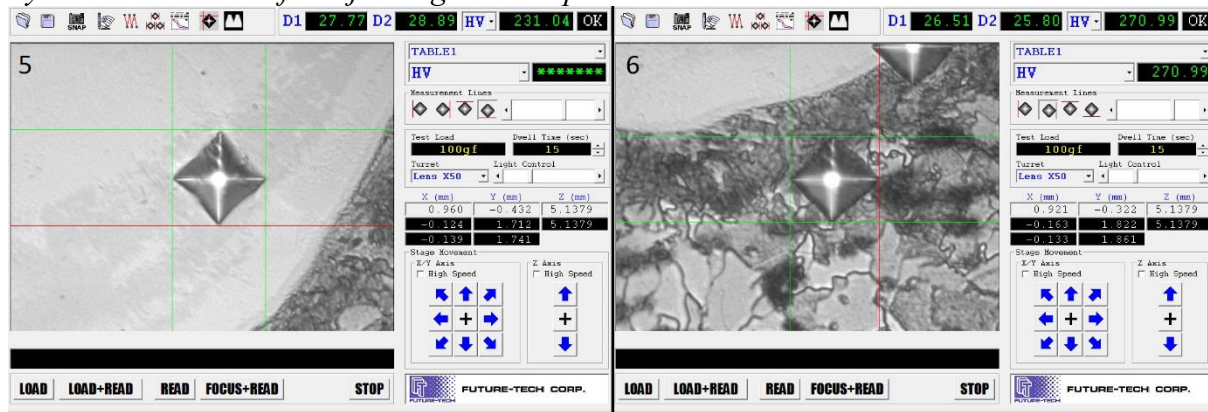
Rys. 17. Pomiary twardości w strefie przejściowej dla próbki 1.

Rysunek 18 przedstawia wyniki pomiarów twardości w funkcji odległości dla próbki 2. Twardość napoiiny jest nieco niższa niż w przypadku próbki 1. Pomiary oscylują w przedziale 210-230 HV. Następnie, tak samo jak w przypadku próbki 1, następuje wzrost twardości przypadający na strefę graniczną. Różnice w odczytach są jednak zauważalnie niższe niż w przypadku próbki 1. Rysunek 19 przedstawia wgłębienia przypadające na strefę przejściową.



Rys. 18. Twardość w funkcji odległości dla próbki 2.

Rys. 18. Twardość w funkcji odległości dla próbki 2.

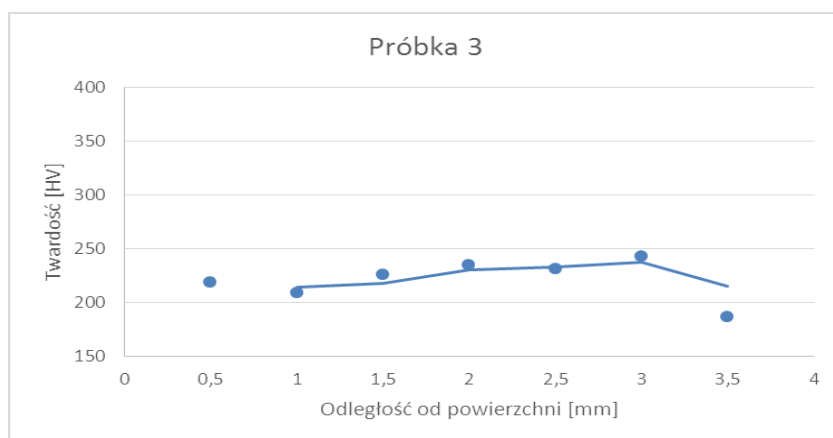


Rys. 19. Pomiary twardości w strefie przejściowej dla próbki 2.

Rys. 19. Pomiary twardości w strefie przejściowej dla próbki 2.

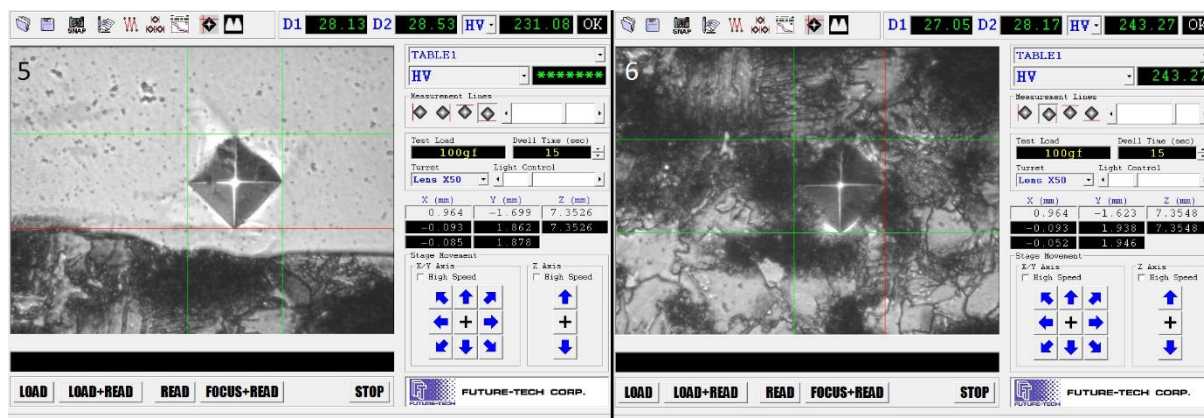
Wyniki pomiarów twardości w funkcji odległości od powierzchni zaprezentowano na rysunku 20. Twardość napoiny oscyluje w przedziale 210-230 HV, tak samo jak w przypadku próbki 2. Dla 3 próbki nie odnotowano wzrostu twardości w strefie przejściowej. Rysunek 21 przedstawia wgłębienia przypadające na strefę przejściową dla próbki 3.

Twardość materiału podstawowego dla wszystkich próbek jest zbliżona i wynosi 180-190 HV. Wskazuje to na brak wpływu napawania na strukturę materiału podstawowego co w przypadku tego procesu jest pożądane. Zewnętrzne części napoiny także charakteryzują się niskim odchyleniem wartości pomiarów twardości. Dla próbek 2 i 3 twardość powłoki oscyluje w przedziale 210-230 HV, napoina na próbce 1 charakteryzuje się nieco większą twardością w przedziale 230-250 HV. Pomiary dla materiału rodzimego odpowiadają katalogowym wartościom pomiarów dla stali S235JR, podobnie w przypadku wnętrza napoiny, twardość jest zbliżona do twardości stali AISI 304, której skład chemiczny jest podobny do składu chemicznego drutu LNM 307.



Rys. 20. Twardość w funkcji odległości dla próbki 3.

Rys. 20. Twardość w funkcji odległości dla próbki 3.



Rys. 21. Pomiary twardości w strefie przejściowej dla próbki 3.

Rys. 21. Pomiary twardości w strefie przejściowej dla próbki 3.

Twardość w strefie wpływu ciepła zawiera się w zakresie 243-270 HV odpowiednio dla próbek 1, 2, 3. Twardość materiału podstawowego mieściła się w przedziale 170-190 HV, taki wzrost twardości w strefie wpływu ciepła jednoznacznie wskazuje na zmianę struktury w tej

strefie w wyniku napawania. W przypadku obszaru napoiny znajdującego się przy granicy pomiędzy napoiną a strefą wpływu ciepła wzrost twardości odnotowano tylko dla próbki 1. Zmiana struktury w strefie granicznej wynika z charakterystyki procesu napawania. Przetopienie materiału podstawowego oraz dodatkowego wymaga dostarczenia dużej ilości energii cieplnej, która w wyniku przewodnictwa cieplnego oddziałuje również na strefy sąsiadujące ze strefą przetopienia. Skutkiem tego oddziaływania jest niezamierzona obróbka cieplna zachodząca w strefie wpływu ciepła. W przypadku różnicy w składzie chemicznym pomiędzy materiałem dodatkowym a materiałem napawanym w wyniku dyfuzji może także dojść do pewnego rodzaju obróbki cieplno-chemicznej.

Podsumowanie

Część praktyczna pracy obejmowała wytworzenie napoin na płytach stalowych wykorzystując jako źródło ciepła wiązkę elektronów. Następnie wytworzone próbki zostały pocięte celem wytworzenia zglądów metalograficznych. Zgłady zostały poddane badaniom na mikroskopie świetlnym oraz badaniom mikrotwardości. Badania mikroskopowe obejmowały pomiary wielkości charakteryzujących napoinę oraz analizę mikrostruktury.

Wytworzono 3 próbki, materiał podstawowy oraz materiał dodatkowy dla każdej z próbek był taki sam – płyta ze stali S235JR oraz spoiwo LNM307. Parametry napawania także były jednakowe dla każdej z próbek, jedyną zmienną stanowiła zastosowana zakładka (stopień nachodzenia na siebie kolejnych ściegów), która wynosiła odpowiednio 10, 20 i 30% dla próbek 1, 2 i 3.

Pierwszym etapem badań było wykonanie pomiarów wielkości charakteryzujących napoiny – grubości oraz szerokości strefy wpływu ciepła. Wykonano pomiar grubości maksymalnej oraz grubości efektywnej. Powinno dążyć się do jak najmniejszych różnic pomiędzy tymi wielkościami, ponieważ wpływa to na jednorodność napoiny. W przypadku badanych próbek najlepszą jednorodnością w tym względzie charakteryzowała się próbka 3, natomiast najmniejszą próbka 1. Jednoznacznie wskazuje to na wpływ zastosowanej zakładki na kształt napoiny, mniejszy stopień zakładki zaowocował głębszym wtopieniem, jednak rzeczywista grubość powłoki była najniższa. Wtopienia były ostrzej zakończone, przerwy pomiędzy kolejnymi wtopieniami zajmowały większy obszar co może mieć niekorzystny wpływ na strukturę napoiny.

Kolejną zmierzoną wielkością była szerokość strefy wpływu ciepła. W tym wypadku także odnotowano wpływ zakładki na mierzoną wielkość, przy czym pomiar szerokości strefy wpływu ciepła był nieco utrudniony. Szerokość mierzono od wierzchołków wtopień. Pomiary wskazują, że najwęższą strefą charakteryzuje się próbka 1, wynika to z kształtu wtopień. Większa zakładka spowodowała zaokrąglenie kolejnych wtopień, przez co powierzchnia oddziaływania ciepła była większa, w wyniku czego szerokość strefy o zmienionej strukturze uległa wzrostowi. Należy jednak zauważyć, że strefa znajdująca się pomiędzy wtopieniami także uległa zmianom w wyniku oddziaływania ciepła, ocena wizualna zdjęć mikroskopowych pozwala na stwierdzenie, że największą powierzchnią tego obszaru charakteryzuje się próbka 1. Pomimo pozornie najwęższej strefy wpływu ciepła w ostatecznym rozrachunku, największą powierzchnię tego obszaru wykazuje próbka 1. Wzrost stopnia zakładki pozytywnie wpływa na szerokość strefy wpływu ciepła, co potwierdza wcześniej postawioną tezę, że stopień zakładki ma wpływ na jednorodność napoin. Potwierdza to także późniejsza analiza mikrostruktury.

Pomiary wielkości charakterystycznych napoiny wykazały wpływ zakładki na kształt oraz jednorodność napoin. Wraz ze wzrostem stopnia zakładki malała różnica pomiędzy grubością

maksymalną a efektywną napoiny, oraz szerokość strefy wpływu ciepła. Wynika to z faktu, że im bardziej kolejne ściegi na siebie nachodziły tym mniejsza była strefa pomiędzy wtopieniami, taka sama ilość ciepła dostarczona na mniejszą powierzchnię pozwoliła na przetopienie większej ilości materiału co zaowocowało większą grubością powłoki. Kolejne wtopienia miały bardziej zaokrąglony kształt dzięki czemu ciepło rozkładało się na większej powierzchni, co wpłynęło na zmniejszenie szerokości strefy wpływu ciepła.

Badania mikroskopowe obejmowały także analizę mikrostruktury napoin. Analizie poddano 3 obszary – materiał podstawowy, wewnątrz napoiny oraz obszar strefy wpływu ciepła. Struktura płyt nie uległa zmianie w wyniku napawania. Materiał płyt wykazuje strukturę ferrytyczno-perlityczną dla każdej z próbek, wielkość ziaren nie uległa zmianie. Nie odnotowano także obecności wydzieleni.

Skład chemiczny materiału dodatkowego jest zbliżony do składu chemicznego stali austenitycznych, taką strukturę potwierdziły także badania mikroskopowe. Zaobserwowano występowanie granicy pomiędzy kolejnymi wtopieniami, najwyraźniejsza granica występowała w próbce 1. Wraz ze wzrostem stopnia zakładki granica pomiędzy ściegami stawała się coraz mniej wyraźna, co pozytywnie wpływa na jednorodność struktury.

Największe zmiany struktury występowały w strefie wpływu ciepła. W strefie wpływu ciepła można wyróżnić 3 obszary o różnym stopniu zmiany struktury, szerokość tych obszarów była różna dla poszczególnych próbek. W obszarze najbliższej granicy wtopienia zaszły największe zmiany struktury, analiza wykazała obecność martenzytu, ferrytu allotriomorficznego, ferrytu Widmanstattena oraz perlitu. Wraz ze wzrostem odległości od granicy wtopienia malał udział martenzytu a wzrastał udział perlitu. Kolejny obszar SWC to obszar rozdrobnienia ziarna gdzie zauważono rozdrobnienie ziaren austenitu, w ostatnim obszarze odnotowano tylko zwiększenie udziału perlitu w strukturze.

Próbki różnią się tylko szerokością poszczególnych stref, co wynika z różnic w kształcie napoin (różnice w powierzchni oddziaływania ciepła). W próbce 3 zauważoną większy udział martenzytu w strukturze niż w próbce 2. Może to być wynikiem zwiększonej dyfuzji chromu do strefy wpływu ciepła w próbce 3.

Ostatnim etapem badań były badania mikrotwardości. Wykonane wgłębenia obejmowały materiał napoiny, strefę wpływu ciepła oraz materiał podstawowy. W materiale podstawowym nie odnotowano istotnych zmian twardości, dla każdej próbki twardość była zbliżona oraz odpowiadała twardości katalogowej stali S235JR. W strefie wpływu ciepła odnotowano wysoki wzrost twardości, co potwierdza zmiany strukturalne zaobserwowane podczas badań mikroskopowych. W przypadku próbek 2 i 3 twardość napoiny nie ulegała zmianie na całym jej przekroju. W przypadku próbki 1 zauważono duży wzrost twardości w pobliżu granicy wtopienia. Może to wynikać z dyfuzji niklu do materiału podstawowego, zmniejszone stężenie niklu zmniejszyło stabilność austenitu, w wyniku czego mogło dojść do przemiany martenzytycznej w tej strefie, co zaowocowało wzrostem twardości. Potwierdzenie tej tezy wymagałoby jednak przeprowadzenia dodatkowych badań. Twardość strefy wpływu ciepła jest także nieco inna dla każdej z próbek. Wynika to z charakterystyki struktury SWC, zmiany struktury występują obszarowo, wgłębnik mógł trafić w różne obszary dla każdej z próbek stąd różnice w twardości.

3. WNIOSKI

Na podstawie analizy literaturowej i wykonanych eksperymentów praktycznych sformułowano następujące wnioski:

1. Strefa wpływu ciepła jest wadą zarówno w napoinach jak i w złączach spawanych, jednakże charakterystyka procesów spawalniczych nie pozwala na jej uniknięcie, możliwe jest tylko jej ograniczenie.
2. Napawanie elektronowe pozwala na uzyskanie jednorodnych napoin przy niewielkim wymieszaniu materiału dodatkowego z podstawowym co ma szczególnie dużo znaczenie w przypadku napoin poprawiających odporność na korozję.
3. Zakładka zastosowana podczas napawania ma wpływ na kształt napoin oraz na ich jednorodność, a przez to na jakość otrzymanej powłoki.
4. Zastosowanie wiązki elektronów jako źródła ciepła pozwala na ograniczenie obszaru strefy wpływu ciepła.

LITERATURA

1. W. Barwicz, *Wiązka elektronowa w przemyśle*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1989A. Klimpel *Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999
2. K. Ferenc, *Spawalnictwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007
3. *Poradnik inżyniera: spawalnictwo*, t. 2, pod red. J. Pilarczyka, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005
4. V. Adam, U. Claus, D. von Dobenack, T. Krüssel, T. Löwer, *Electron beam welding. The fundamentals of a fascinating technology*, pro-beam AG & Co. KGaA, Monachium 2011
5. A. Klimpel *Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999
6. K. Weman, *Welding processes handbook*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2003
7. J. Pilarczyk, J. Pilarczyk, *Spawanie i napawanie elektryczne metali*, Śląsk, Katowice 1996
8. M. Węglowski, S. Błacha, A. Phillips, *Electron beam welding – Techniques and trends – Review*, Vacuum, nr 130, s. 72-92, 2016