

Wpływ drgań ultradźwiękowych na kształt i strukturę napoin ze stopu aluminium wykonanych metodą MIG

Effects of ultrasonic vibrations on MIG welded aluminium alloy padding welds shape and structure

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad wpływem ultradźwiękowych drgań mechanicznych o dużym natężeniu wprowadzanych poprzecznie do kierunku napawania MIG stopu aluminium 2017A na budowę napoin układanych w rowku.

Słowa kluczowe: drgania ultradźwiękowe, struktura napoin, napawanie MIG

Abstract

The study is concerned with the effect of high-intensity ultrasonic vibrations propagated crosswise to overlaying welding direction on the structure of V-groove padding welds produced by 2017A alloy by MIG process.

Keywords: ultrasonic vibration, structure of welds, padding welding, MIG

Wstęp

Zastosowanie drgań ultradźwiękowych w celu modyfikacji procesów spajania jest dziedziną stosunkowo nową, która ciągle się rozwija. W ostatnich kilku latach podejmowane były nieliczne próby modyfikacji klasycznych procesów spawania przez zastosowanie drgań ultradźwiękowych [1÷8].

Drgania mechaniczne podłużne lub poprzeczne, wprowadzane w strefę spajania, mogą być różnie zorientowane względem płaszczyzny połączenia, ewentualnego ruchu źródła ciepła bądź siły ciężkości [9]. Zewnętrzne układy drgające zwykle wytwarzają falę płaską, tzn. o płaskim czole. Wtedy łatwo jest wyznaczyć miejsca węzłów i strzałek drgań. Drgania wytwarzane w wyniku modulacji spawalniczego łuku elektrycznego bądź wiązki laserowej wywołują falę kulistą,

w której „węzły” i „strzałki” są rozłożone na powierzchniach sferycznych o różnych promieniach. Takie fale charakteryzują się czołem kulistym i z tego powodu trudno właściwie je wykorzystać w kontrolowany sposób do modyfikacji procesów spajania. Dlatego, gdy istotne jest zapewnienie pełnej kontroli wprowadzanych drgań, powinny one mieć płaską postać. Wprowadzanie fali płaskiej do konstrukcji spawanej może odbywać się w wielu konfiguracjach kierunków ich wprowadzania, zwrotów przemieszczeń, toru ruchu źródła ciepła, czy skierowania siły grawitacji. W zależności od tego, z którym układem mamy do czynienia, efekty oddziaływania na strukturę i właściwości otrzymywanych złączy lub powłok spawalniczych mogą być różne. Między innymi, istotne będzie wzajemne oddziaływanie kierunku wprowadzanych drgań w danym układzie geometryczno-masowym oraz pozycji i kierunku spawania.

Dr inż. Arkadiusz Krajewski; mgr inż. Michał Hudycz, dr inż. Jarosław Grześ – Politechnika Warszawska.

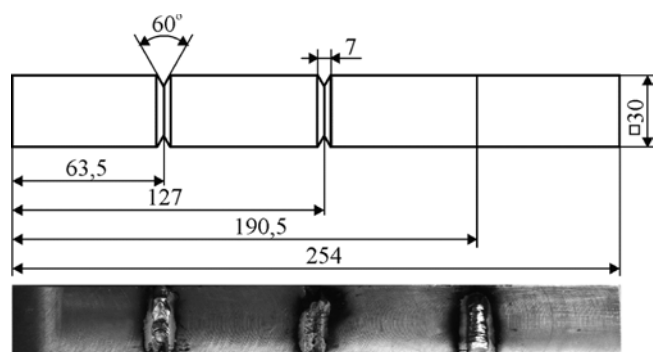
Autor korespondencyjny/Corresponding author: akrajews@wip.pw.edu.pl

Dotychczas w ramach prac badawczych Zakładu Inżynierii Spawania Politechniki Warszawskiej przeprowadzone zostały eksperymenty wtapiania i napawania na powierzchniach płaskich ośrodków drgających [9, 10] z wprowadzaniem drgań zarówno równoległe, jak i poprzecznie do kierunku ich propagacji. Doświadczenia prowadzono jedynie na płaskich powierzchniach drgających falowodów, a jak wiadomo, proces spawania odbywa się często w rowku o różnych kształtach i wymiarach. Aby przekonać się, jak zachowa się poddawana drganiom napoina układana w rowku, wykonano w ramach badań własnych próby napawania z drganiami prowadzonymi poprzecznie do osi rowka o kącie 60° .

Metodyka badań

W ramach pracy zostały przeprowadzone eksperymenty napawania metodą MIG przy udziale drgań ultradźwiękowych oraz bez nich. Napawanie wykonano poprzecznie do osi falowodu w kształcie prostopadłościanu o wymiarach $0,254 \times 0,03 \times 0,03$ m wykonanego ze stopu aluminium 2017A. W odległości $0,0635$ m oraz $0,127$ m od początku falowodu nacięte zostały rowki o szerokości 7 mm, głębokości 6 mm i kącie 60° (rys. 1). Długość falowodu ($0,254$ m) była równa długości ultradźwiękowych drgań w tym stopie, których częstotliwość wynosiła 20 kHz.

W celu przeprowadzenia eksperymentu skonfigurowano stanowisko badawcze (rys. 2) składające się z falowodu sprzężonego z przetwornikiem piezoelektrycznym o częstotliwości 20 kHz, połączonym z generatorem ultradźwiękowym o mocy $2,5$ kW za pomocą koncentratora o wzmacnieniu $1/1$, spawarki firmy Fronius ALU Edition do spawania metodą MIG, a także



Rys. 1. Wymiary falowodu zastosowanego w eksperymencie [mm] i widok wykonanych napoin (pierwsza od prawej wykonana bez drgań, a dwie kolejne z drganiami)

Fig. 1. The waveguide dimensions in mm and padding welds view (right sight reached without vibrations, the next two with vibrations)

z zestawu do zmechanizowanego spawania prostoliniowego. Zajarzanie łuku oraz moment rozpoczęcia ruchu głowicy były zsynchronizowane. Uchwyt spawalniczy w obu przypadkach był osadzony na ramieniu przymocowanym do zestawu mechanizacyjnego i ustawiony jak do spawania w pozycji podolnej (główna oś uchwytu spawalniczego była ustawiona w pionie).

Napoiny ułożono w miejscach charakterystycznych dla przebiegu drgań, a po napawaniu odcinki z napoinami wycięto i wykonano przekroje prostopadłe do ich osi. Otrzymane przekroje szlifowano, polerowano i trawiono odczynnikiem Kellera. W ramach badań makrostrukturalnych wykonano serię zdjęć przedstawiających widoki i profile poprzeczne uzyskanych napoin. Do badań metalograficznych wybrano przekroje wyznaczone współrzędną $z = 0,0635$ m oraz $z = 0,127$ m od mocowanego czoła falowodu (rys. 1). Odległości te wyznaczono odpowiednio dla $1/4$ i $1/2$ długości fali drgań, licząc od mocowanego czoła falowodu. Przeprowadzone badania strukturalne miały charakter porównawczy.

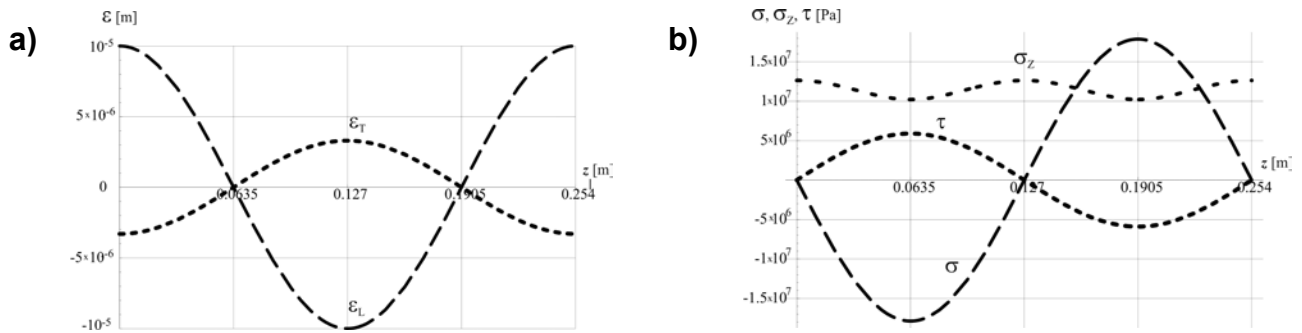
Do napawania metodą MIG został użyty drut ze stopu 5056 (AlMg5) o średnicy $1,2$ mm. Gazem osłaniającym jezioro spawalnicze był argon, którego przepływ wynosił 17 l/min. Natężenie prądu spawania wynosiło 170 A, napięcie łuku 20 V, prędkość spawania $0,21$ m/min, prędkość podawania drutu 10 m/min, a wolny wylot elektrody ok. $10 \div 11$ mm.

Próby napawania wykonano w identycznych warunkach i temperaturze otoczenia 20°C . Napoiny były układane w punktach charakterystycznych dla przebiegu fali, tj. węzłach i strzałce drgań. Była to odległość $0,0635$ m (w węźle) oraz $0,127$ m (w strzałce) (rys. 3a, b).

Analitycznie wyznaczony przebieg drgań dla tego przypadku zilustrowano na rysunkach 3a i 3b. Jak wykazano w [9], w rzeczywistości należy się spodziewać niewielkich przesunięć węzłów i strzałek o ok. $1/16$ długości fali drgań.



Rys. 2. Stanowisko do prób eksperymentalnych z układem drgającym
Fig. 2. Experimental set-up with the vibration unit

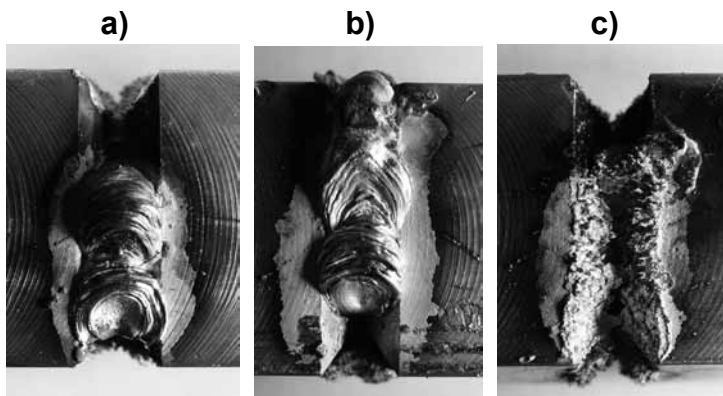


Rys. 3. Przebieg: a) przemieszczeń podłużnych ε_L i poprzecznych ε_T w falowodzie ze stopu 2017A, b) rozkład naprężeń osiowych σ poprzecznych τ i zredukowanych σ_z w falowodzie ze stopu 2017A

Fig. 3. Distribution of: a) longitudinal displacement ε_L and transversal displacement ε_T , b) axial stresses σ , transverse stresses τ , and reduced stresses σ_z in a 2017A waveguide

Wyniki badań struktury napoin

Po próbach napawania falowód został przecięty prostopadle do swojej osi w węzłach i strzałkach. W ramach badań strukturalnych wykonano serię zdjęć makrowidoków i profili uzyskanych napoin. Próby napawania (rys. 4) wykonano bez drgań, następną zaś z ich udziałem.



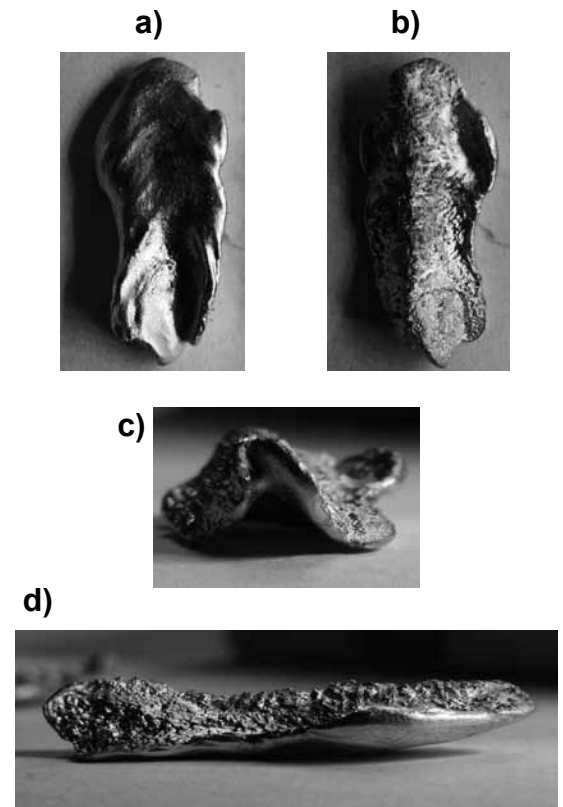
Rys. 4. Lica napoin uzyskanych w rowku: a) bez udziału drgań; b) z udziałem drgań $z = 0,0635$ m, c) z udziałem drgań $z = 0,127$ m

Fig. 4. The V-groove padding welds face view: a) without vibrations, b) with vibrations for $z = 0,0635$ m, c) with vibrations for $z = 0,127$ m

Na powierzchni materiału podstawowego po obu stronach napoin widoczna jest oczyszczona z tlenków i osmałów powierzchnia, przy czym jest ona największa w przypadku napoiny układanej w strzałce drgań ($z = 0,127$ m). Może to wskazywać, że w tym przypadku osłona argonu nie była tak skuteczna jak w pozostałych. Napoiny układane w odległości $z = 0,127$ m od mocowanego czoła falowodu (w strzałce drgań) wykazują charakterystyczną dekompozycję lica objawiającą się znacznym ubytkiem wypełnienia napoiny. Sytuacja ta mogła być spowodowana występującym lokalnie w strzałce maksymalnym przemieszczeniem cząstek. Ubytek, o którym mowa, oddzielił się od napoiny pod wpływem drgań ultradźwiękowych, a jego morfologię pokazano na rysunku 5. Powstała w ten sposób oddzielona część napoiny charakteryzuje się przekrojem poprzecznym o kształcie zbliżonym do trójkąta. Na rysunku 5 dostrzec można również różnice w fakturze powierzchni, gładkiej dla części zewnętrznej (rys. 5a i 5c) i chropowatej dla części wewnętrznej (rys. 5b i 5d). Powierzchnia górnej części lica charakteryzuje

się bardziej jednorodną strukturą o gładziej fakturze i wklęśnięciem. Zarówno faktura powierzchni, jak i jej ukształtowanie wskazują, że proces separacji części napoiny mógł następować w trakcie krzepnięcia oraz po procesie krystalizacji.

W węzłach drgań nie zaobserwowano zjawiska oddzielania się części napoiny, a jej budowa była ciągła.

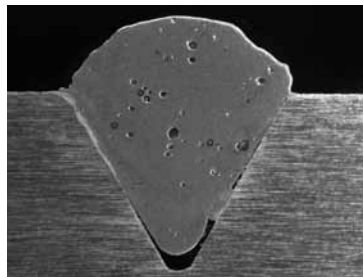


Rys. 5. Oddzielona część lica napoiny wykonana z udziałem drgań w odległości $z = 0,127$ m z zastosowaniem drgań ultradźwiękowych: a) powierzchnia zewnętrzna, b) powierzchnia wewnętrzna od strony grani napoiny, c) profil czołowy, d) profil boczny

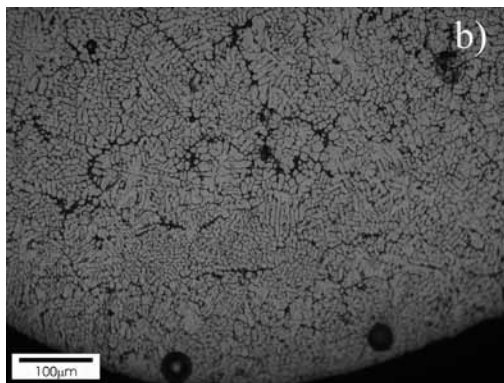
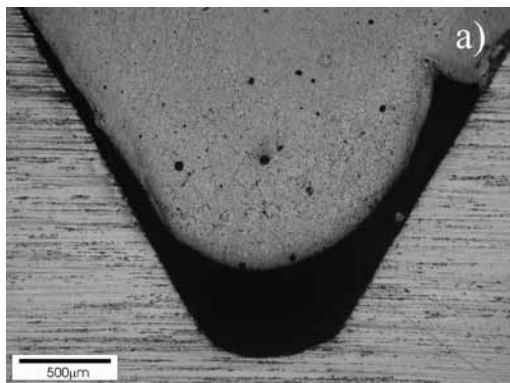
Fig. 5. The separated parts of the padding weld face reached with vibrations for $z = 0,127$ m: a) outside face surface, b) internal surface from root side, c) frontal profile, d) side profile

Badania mikrostruktury napoin

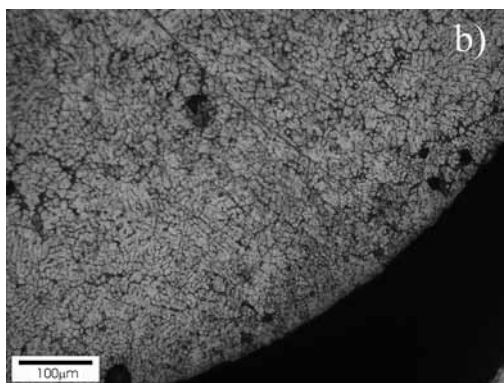
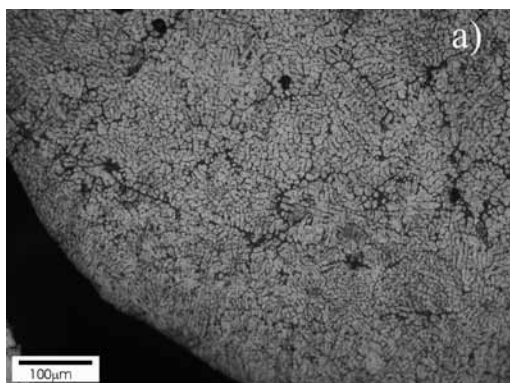
Przeprowadzone badania metalograficzne obejmują ogólną charakterystykę przekroju napoin przy zastosowaniu powiększeń od 16 do 500x. Na rysunkach 6÷10 pokazano cechy charakterystyczne mikrostruktury napoiny układanej w rowku bez zastosowania drgań ultradźwiękowych.



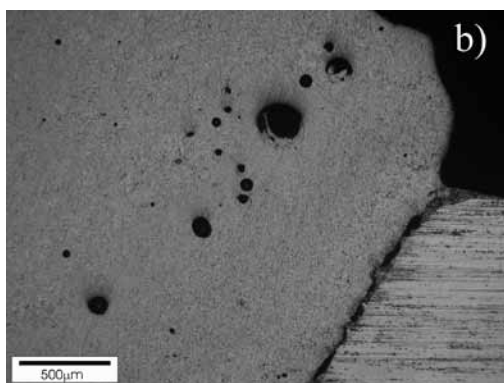
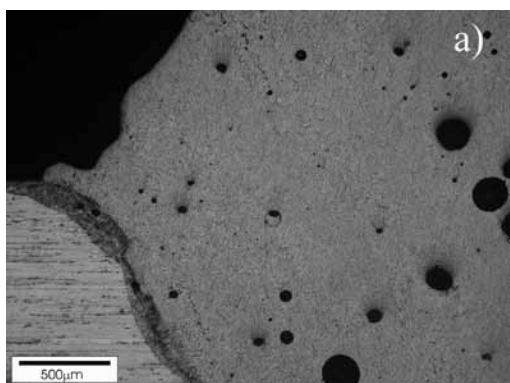
Rys. 6. Przekrój poprzeczny napoiny uzyskanej bez drgań w rowku, pow. 16x
Fig. 6. Cross section of the V-groove padding weld reached without vibrations, mag. 16x



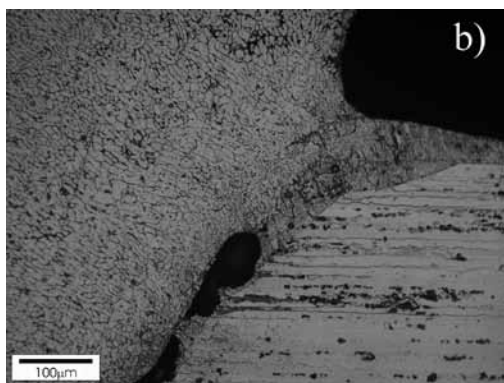
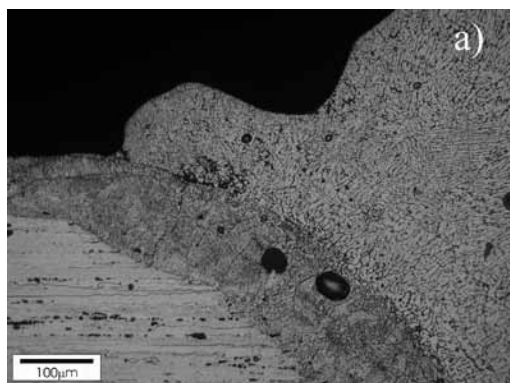
Rys. 7. Grań napoiny: a) pow. 50x; b) pow. 200x
Fig. 7. Root of the padding weld: a) magn. 50x, b) magn. 200x



Rys. 8. Grań napoiny, pow. 200x: a) strona lewa, b) strona prawa
Fig. 8. Root of the padding weld, magn. 200x: a) left side, b) right side



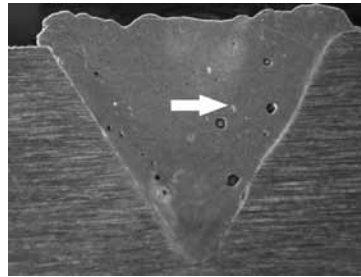
Rys. 9. Lico napoiny, pow. 50x: a) strona lewa, b) strona prawa
Fig. 9. Face of the padding weld, magn. 50x: a) left side, b) right side



Rys. 10. Lico napoiny, pow. 200x: a) strona lewa, b) strona prawa
Fig. 10. Face of the padding weld, magn. 200x: a) left side, b) right side

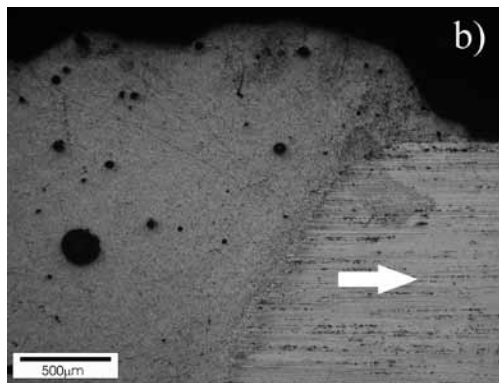
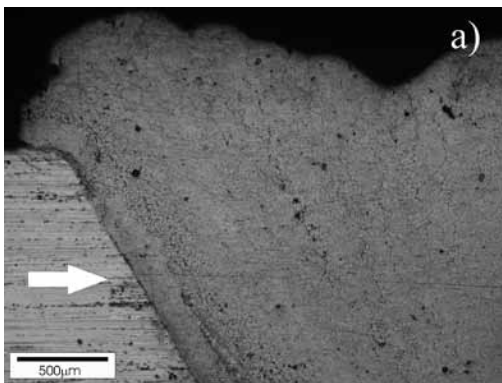
Napoina układana bez drgań charakteryzuje się dużą ilością pęcherzy gazowych oraz brakiem przetopu w grani. Kąty nachylenia linii wtopienia w obszarze grani mierzone w stosunku do osi z wynoszą odpowiednio 56° i 58° . Ziarna spoiny zarówno w obszarze grani (rys. 7, 8), jak i lica (rys. 9, 10) są widoczne już przy powiększeniu 200-krotnym i wyraźnie wyznaczają kierunek krystalizacji. Kierunek wzrostu ziaren mierzony względem osi z w obszarze grani wynosi 155° i 142° , a w przypadku obszaru lica 147° i 148° .

Zdjęcia na rysunkach 11÷14 przedstawiają strukturę napoiny wykonanej w rowku z zastosowaniem drgań ultradźwiękowych wraz z zaznaczeniem strony wejścia drgań i ich wyjścia z napoiny (strzałki na zdjęciach). Środek przekroju poprzecznego napoiny znajduje się w odległości $z = 0,0635$ m od mocowanego czoła falowodu.

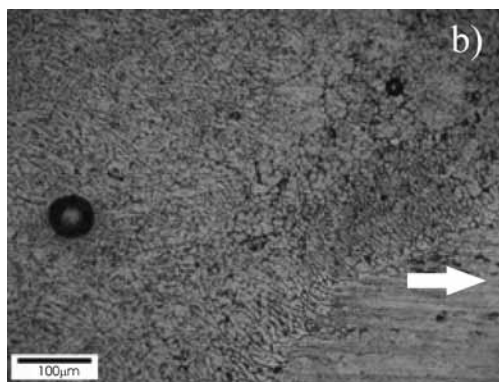
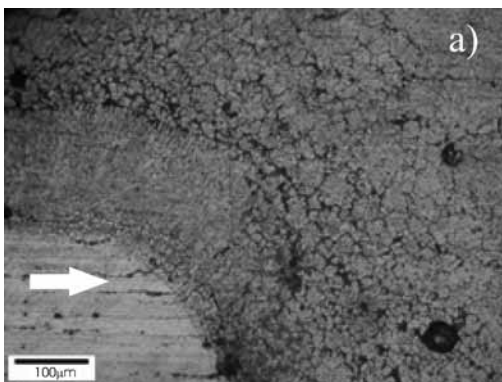


Rys. 11. Przekrój poprzeczny napoiny uzyskanej z udziałem drgań dla $z = 0,0635$ m, pow. 16x
Fig. 11. Cross section of the padding weld reached with vibrations $z = 0,0635$ m, mag. 16x

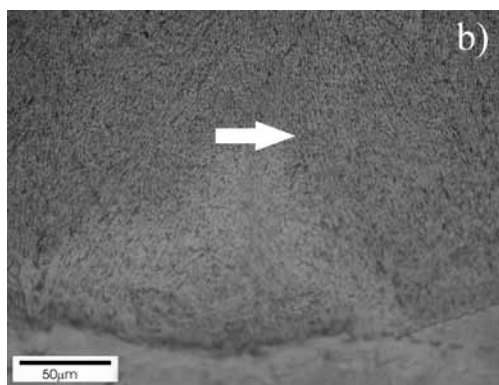
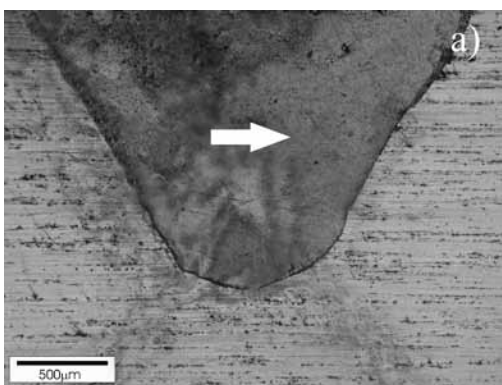
Napoiny wykonane w odległości $z = 0,127$ m od czoła falowodu (rys. 15÷23) wykazują występowanie znacznych ubytków zlokalizowanych wewnątrz napoiny. Prawdopodobną przyczyną ich powstawania jest zjawisko kawitacji wywołane naprężeniami rozciągającymi. Proces ten oddziałuje na jeziorko ciekłego metalu podczas procesu napawania, doprowadzając do ekspulsji ciekłego jeziorka metalu.



Rys. 12. Napoina: a) od strony wejścia drgań, b) od strony wyjścia drgań; pow. 50x
Fig. 12. Padding weld: a) from vibrations input side, b) from vibrations output side; magn. 50x



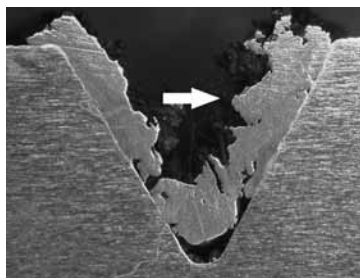
Rys. 13. Napoina: a) od strony wejścia drgań, b) od strony wyjścia drgań; pow. 200x
Fig. 13. Padding weld: a) from vibrations input side, b) from vibrations output side; magn. 200x



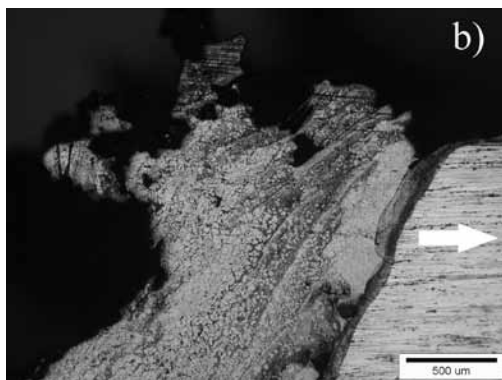
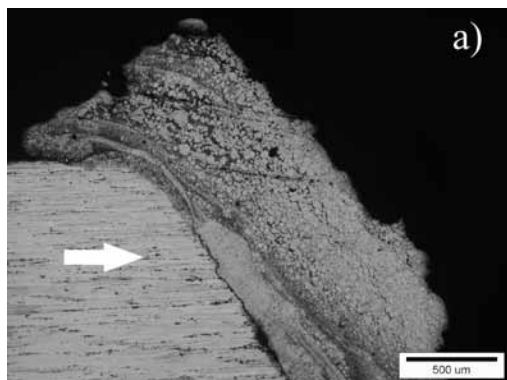
Rys. 14. Grań napoiny: a) pow. 50x, b) pow. 500x
Fig. 14. Root of the padding weld: a) mag. 50x, b) mag. 500x

Charakterystyczną cechą tych napoin jest dekompozycja lica (rys. 15, 16).

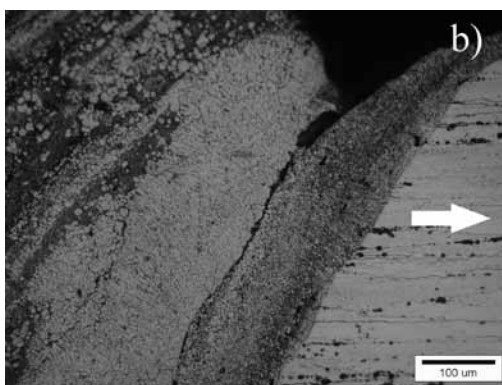
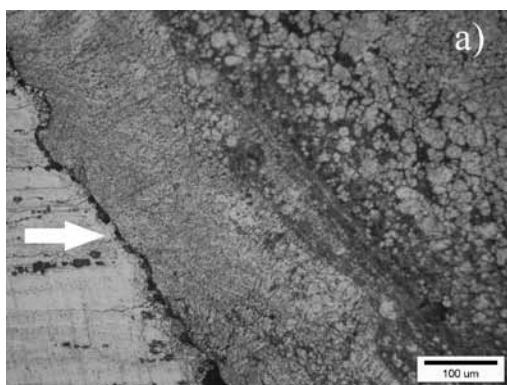
Pozwala to wysunąć wniosek, że zarys ubytku zależy od kierunku wprowadzania drgań ultradźwiękowych. Analizowana napoina charakteryzuje się ponadto pęknięciami gorącymi zarówno materiału rodzimego, jak i samej napoiny w okolicach grani. Napoina ma także charakterystyczny nawis po stronie wprowadzania drgań.



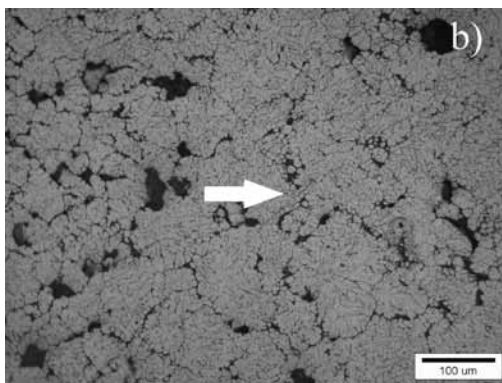
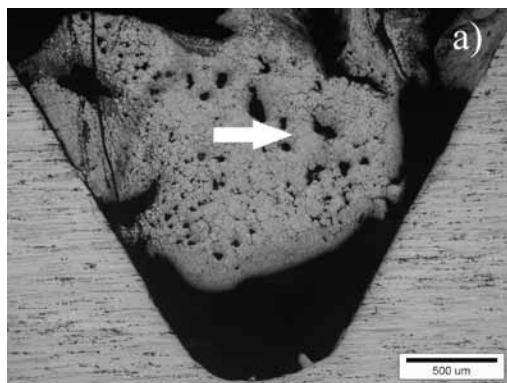
Rys. 15. Przekrój poprzeczny uzyskanej z udziałem drgań dla $z = 0,127$ m, pow. 16x
Fig. 15. Cross section of the padding weld reached with vibrations $z = 0,127$ m, mag. 16x



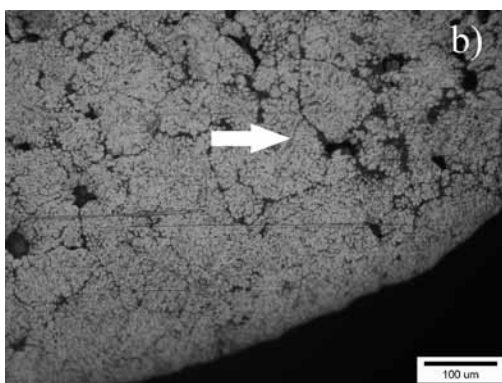
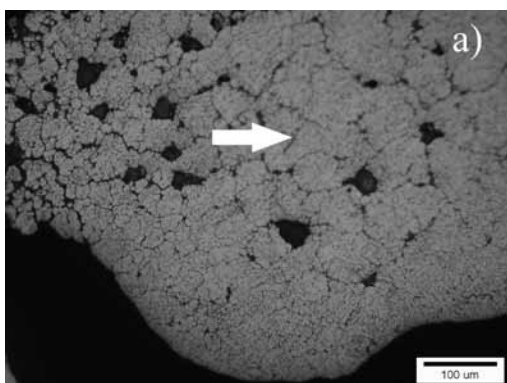
Rys. 16. Napoina: a) od strony wejścia drgań, b) od strony wyjścia drgań; pow. 50x
Fig. 16. Padding weld: a) from vibrations input side, b) from vibrations output side; magn. 50x



Rys. 17. Napoina: a) od strony wejścia drgań, b) od strony wyjścia drgań; pow. 200x
Fig. 17. Padding weld: a) from vibrations input side, b) from vibrations output side; magn. 200x



Rys. 18. Grań napoiny: a) pow. 50x, b) pow. 200x
Fig. 18. Root of the padding weld: a) mag. 50x, b) mag. 200x

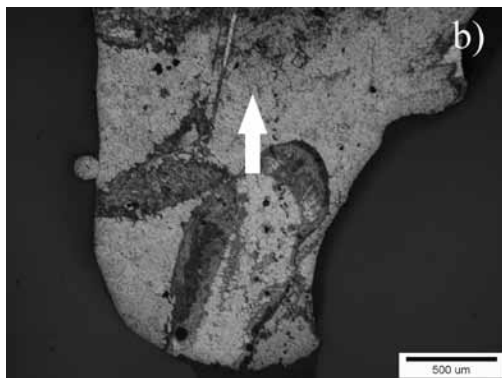
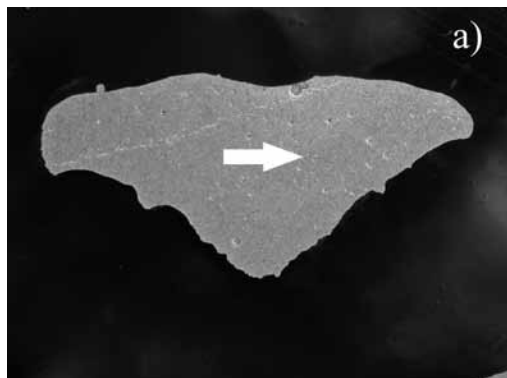


Rys. 19. Napoina: a) od strony wejścia drgań, b) od strony wyjścia drgań; pow. 200x
Fig. 19. Padding weld: a) from vibrations input, b) from vibrations output side; magn. 200x

Na rysunkach 20÷23 zamieszczono zdjęcia mikrostruktury oddzielonej części lica napoiny układanej w strzałce drgań.

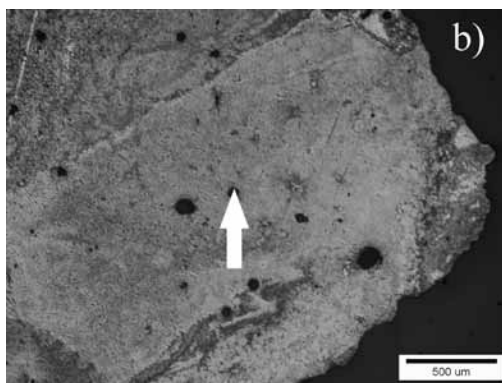
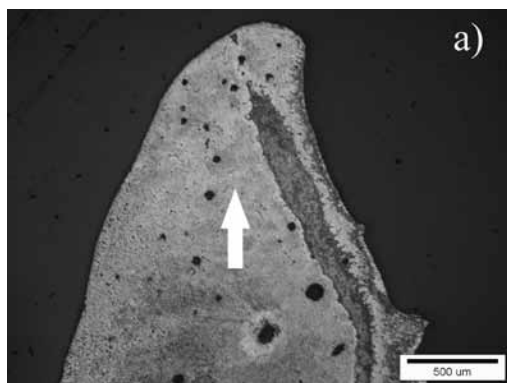
Napoiny układane z udziałem drgań ultradźwiękowych w rowku wykazują wyraźnie pasmową budowę, na którą składają się obszary układające się równoległe do

linii wtopienia zarówno od strony wprowadzania drgań, jak i po stronie przeciwnej, gdzie fala drgań opuszcza ciekłe jeziorko i wchodzi do nieprzetopionego materiału podstawowego. Wcześniej wykonane badania składu chemicznego [9] wykazały w tych pasmach koncentrację składników stopowych, takich jak miedź, krzem i magnez.



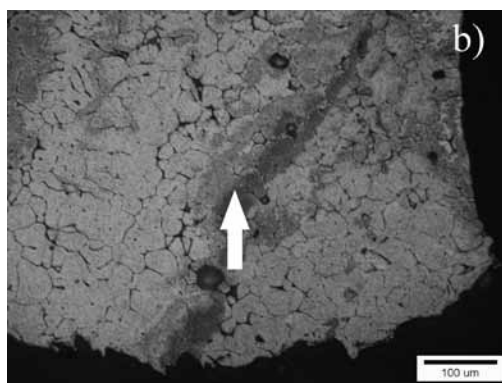
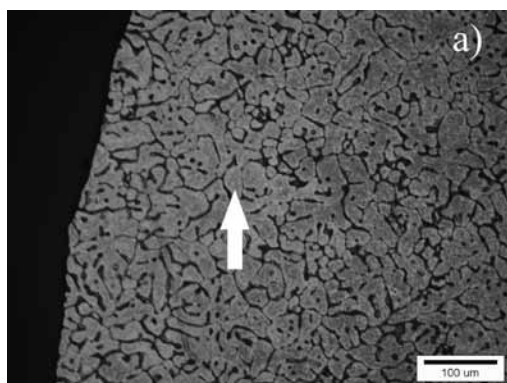
Rys. 20. Oddzielona część lica napoiny: a) pow. 16x, b) pow. 50x

Fig. 20. Separated part of padding weld face: a) mag. 16x, b) mag. 50x



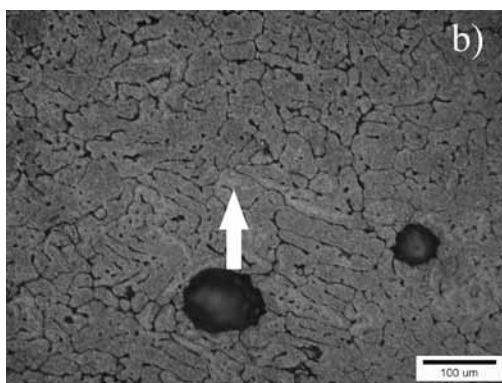
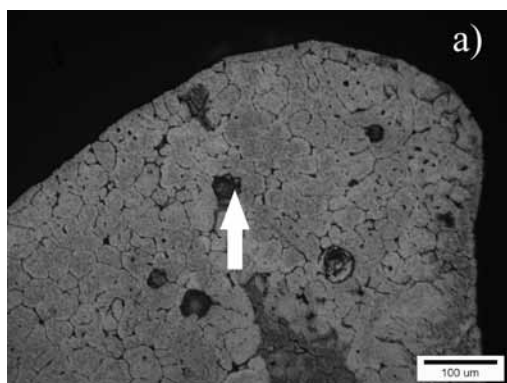
Rys. 21. Oddzielona część lica napoiny od strony wyjścia drgań: a) pow. 16x, b) pow. 50x

Fig. 21. Separated part of padding weld face from vibrations output side: a) mag. 16x, b) mag. 50x



Rys. 22. Oddzielona część lica napoiny od powierzchni, a) zewnętrznej, b) od strony wewnętrznej pow. 200x

Fig. 22. Separated part of padding weld face from a) outside surface, b) internal side mag. 200x



Rys. 23. Oddzielona część lica napoiny od strony wyjścia drgań: a) powierzchnia boczna, b) środek; pow. 200x

Fig. 23. Separated part of padding weld from output vibrations side: a) lateral surface, b) center; mag. 200x

Podobnie jak w przypadku napoin układanych w odległości $z = 0,0635$ m wielkość ziarna w grani napoiny dla $z = 0,127$ m jest mniejsza niż w jej górnej części.

Specyficzne dla napoin jest również występowanie zjawiska oddzielania się lica od napoiny, które przyjmuje charakterystyczny trójkątny przekrój (rys. 20a). Charakterystyczną cechą oddzielonych części lica jest również duża porowatość i występowanie pęcherzy gazowych (rys. 21 i 23).

Kąty nachylenia linii wtopienia dla napoin układanych w odległości $z = 0,127$ m od mocowanego czoła falowodu zmierzone na rysunku 17 wynoszą 58° od strony wejścia i 60° od strony wyjścia drgań. Podczas wykonywania napoin w odległości $z = 0,127$ m od czoła falowodu istotna część lica oddzieliła się od reszty napoiny. W przypadku napoin układanych w strzałce fali w okolicach grani widoczne są ponadto mikropęknięcia.

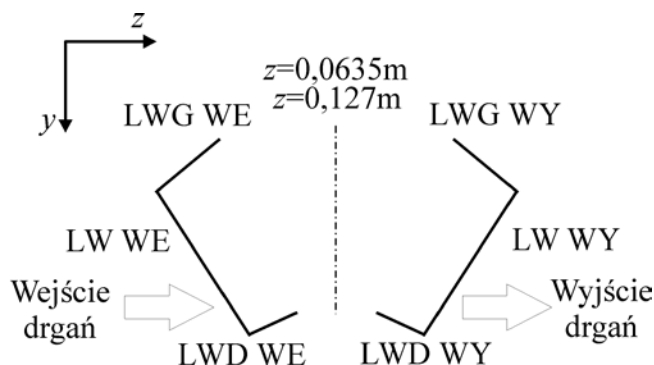
Porównując napoiny uzyskane bez drgań oraz z ich udziałem można stwierdzić, że drgania ultradźwiękowe w strzałce powodują powstawanie charakterystycznych pasm. Znalazło to także potwierdzenie w wynikach publikowanych w [9].

Napoiny układane z towarzyszeniem drgań w odległości $z = 0,635$ m od czoła falowodu charakteryzują się wklęsniętym licem, w przeciwieństwie do napoiny układanej bez drgań ultradźwiękowych mającej bardziej wypukły kształt lica.

Analiza kąta wzrostu ziaren i pochylenia linii wtopienia

Na rysunku 24 pokazano schematyczne oznaczenia przyjęte do pomiaru kąta nachylenia linii wtopienia (LW WE, LW WY) i kierunku wzrostu kryształów (ziaren) (LWD WE/WY, LWG WE/WY).

Wartości kątów pochylenia linii wtopienia i kierunku wzrostu ziaren zarówno na wejściu do jeziora ciekłego metalu, jak i wyjściu mierzone były od osi rowka napoiny. Umożliwiło to bezpośrednie porównanie wartości uzyskanych pomiarów kąta. W celu ułatwienia pomiarów



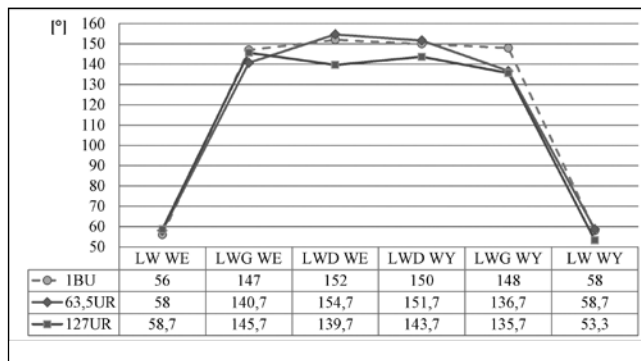
Rys. 24. Oznaczenia linii wzrostu ziaren i linii wtopienia w obszarze wejścia i wyjścia drgań

Fig. 24. Designation of the grain grow lines and fusion line at input and output of vibration area

linię wtopienia uproszczono cięciwą, a kierunki wzrostu ziaren zmierzono w stosunku do osi napoiny. Przyjęto następujące oznaczenia: LW WE – linia wtopienia od strony wejścia fali, LW WY – linia wtopienia od strony wyjścia fali, LWG WE – linia wyznaczająca kierunek wzrostu ziarna podczas krzepnięcia w obszarze lica napoiny od strony wejścia fali drgań, LWG WY – linia wyznaczająca kierunek wzrostu ziarna podczas krzepnięcia w obszarze lica napoiny od strony wyjścia fali drgań, LWD WE – linia wyznaczająca kierunek wzrostu ziarna podczas krzepnięcia w obszarze grani napoiny od strony wejścia fali drgań, LWD WY – linia wyznaczająca kierunek wzrostu ziarna podczas krzepnięcia w obszarze grani napoiny od strony wyjścia fali drgań.

W celu porównania efektów, jakie powoduje zastosowanie drgań, zmierzono wartości kątów linii wtopienia i kierunku wzrostu ziaren dla napoiny bez drgań oraz dla przypadków z udziałem drgań dla $z = 0,0635$ m oraz $z = 0,127$ m, a wyniki przedstawiono na (rys. 25).

Można zauważyć, że w napoinie wykonanej w rowku w odległości $z = 0,0635$ m nie występuje istotna różnica w nachyleniu linii wtopienia, zarówno od strony wejścia jak i wyjścia wprowadzanych drgań.



Rys. 25. Wykres porównawczy dla napoin układanych w rowku: 1BU – bez drgań, 63,5UR – z udziałem drgań dla $z=0,0635$ m, 127UR – z udziałem drgań dla $z = 0,127$ m

Fig. 25. Comparative chart for V-groove padding welds: 1BU – without vibrations, 63,5UR – with vibrations for $z = 0,0635$ m, 127UR – with vibrations for $z = 0,127$ m

Kąt pochylenia linii wtopienia (LW WE) nieznacznie rośnie po stronie wejścia drgań z 56° (dla napawania bez drgań) do 58° (dla napawania z udziałem drgań i $z = 0,0635$ m) oraz do wartości 59° (dla napawania z udziałem drgań i $z = 0,127$ m).

Analogiczna zależność występuje dla linii wtopienia po stronie wyjścia drgań (LW WY). Jej nachylenie nieznacznie zmniejsza się odpowiednio z 58° (dla napawania bez drgań) do 59° (dla napawania z udziałem drgań i $z = 0,0635$ m) oraz istotnie maleje (dla napawania z udziałem drgań i $z = 0,127$ m) do wartości 53° . Kąt nachylenia linii wyznaczającej kierunek wzrostu ziaren w obszarze grani (LWD WE) nieznacznie rośnie ze 152° (dla napawania bez drgań) do 155° (dla napoin układanych z udziałem drgań i $z = 0,0635$ m) i maleje do 140° (dla napoin układanych z udziałem drgań i $z = 0,127$ m). Kąt nachylenia linii wyznaczającej kierunek wzrostu ziaren w obszarze grani (LWD WY)

nieznacznie rośnie ze 150° (dla napawania bez drgań) do 152° (dla napoin układanych z udziałem drgań i $z = 0,0635$ m) i maleje do 144° (dla napoin układanych z udziałem drgań i $z = 0,127$ m). Kąt nachylenia linii wyznaczającej kierunek wzrostu ziaren w obszarze grani (LWG WE) maleje ze 147° (dla napawania bez drgań) do 141° (dla napoin układanych z udziałem drgań

i $z = 0,0635$ m) i nieznacznie maleje do 146° (dla napoin układanych z udziałem drgań i $z = 0,127$ m). Kąt nachylenia linii wyznaczającej kierunek wzrostu ziaren w obszarze grani (LWG WY) maleje ze 148° (dla napawania bez drgań) do 137° (dla napoin układanych z udziałem drgań i $z = 0,0635$ m) i do 136° (dla napoin układanych z udziałem drgań i $z = 0,127$ m).

Podsumowanie

Badania metalograficzne uzyskanych napoin dowodzą, że fale ultradźwiękowe, wprowadzane w strefę napawania, powodują rozdrobnienie ziaren i to niezależnie od tego, czy napawanie prowadzono w węźle, czy w strzałce. Napoiny wykonane w strzałce fali drgań (w odległości $z = 0,127$ m od czoła falowodu) charakteryzują się znaczną dekompozycją napoiny z oddzieloną częścią lica i wypełnienia.

Napoiny wykonane w węźle fali drgań ($z = 0,0635$ m) charakteryzowały się ciągłością, a lico wykazywało niewielkie wklęsnięcie. Obserwując zdjęcia metalograficzne napoin układanych w rowku z udziałem drgań ultradźwiękowych, można dostrzec charakterystyczną pasmową budowę napoin uzyskanych w strzałce drgań ($z = 0,127$ m). Prawdopodobną przyczyną jej powstania było rozbijanie frontów krystalizacji, które następuje w wyniku maksymalnych przemieszczeń cząstek ośrodka [9, 10].

Warto zaznaczyć, że największe zmiany pochyleń linii wtopienia na wejściu i wyjściu drgań zanotowano w strzałce $z = 0,127$ m. Po stronie wejścia drgań

linia wtopienia jest bardziej odchylona od osi napoiny, a przy wyjściu drgań zanotowano zmniejszenie tego kąta. Zmierzone wartości kątów pochylenia kierunku wzrostu ziaren dla napoin układanych w rowku, zarówno w węźle, jak i strzałce drgań charakteryzują się zbliżonymi wartościami w obszarach lica, w kierunku wejścia i wyjścia fali drgań. Dla napoin układanych w strzałce drgań wartości kąta wzrostu ziaren są nieznacznie mniejsze niż w obszarze węzła. Ze względu na ukosowanie rowka kąt linii wtopienia zbliżony jest do kąta napawanego rowka.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że napawanie w rowku z zastosowaniem drgań można prowadzić bez obawy istotnych zmian nachylenia linii wtopienia, jak i kierunku wzrostu ziaren, przy jednoczesnym rozdrobnieniu ziaren i zmniejszeniu się porowatości. Napawanie w rowku, w węźle drgań ($z = 0,0635$ m) pozwala na uzyskanie ciągłej napoiny z całkowitym przetopem, zaś w strzałce ($z = 0,127$ m) rozmiary i charakter powstałych ubytków dyskwalifikują uzyskane napoiny.

Literatura

- [1] Kim. S., Watanabe T., Yoshida Y.: Ultrasonic vibration aided laser welding of Al alloys: improvement of laser welding-quality, Department of precision & Production Engineering and Faculty of Engineering, Chiba University, Japan, Journal of Laser Applications, t. 7, nr 1, s. 38-46, 1995.
- [2] Qinghua L., Ligong C., Chunzhen N.: Effect of vibratory weld conditioning on welded valve properties, Mechanics of Materials 40, s. 565-574, 2008.
- [3] Borland J. C.: Generalized theory of super solidus cracking in welds and castings. British Welding Journal, 7(8)/1960, s. 508-512.
- [4] Balasubramanian K.: Studies on the effect of vibration on hot cracking and grain size in AA7075 aluminum alloy welding, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 3, nr 1, s. 681-685, 2011.
- [5] Takehiko Watanabe, Masataka Shiroki, Atsushi Yanagisawa, Tomohiro Sasaki: Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration, Journal of Materials Processing Technology, Niigata, Japan 27 May 2010.
- [6] Lei Yu-cheng, Wang Zhi-wei, Chen Xi-zhang: Effect of arc-ultrasound on microstructures and mechanical properties of plasma arc welded joints of SiCp/Al MMCs, Science Direct, Zhenjiang, Harbin, China, 6 July 2010.
- [7] Li Yuan-xing, Zhao Wei-wei, LengXue-song, Fu Qiu-jiao, Wang Lei, Yan Jiu-chun: Microstructure evolution and mechanical properties of ultrasonic-assisted soldering joints of 2024 aluminum alloys, Science Direct, Harbin, China, 5 January 2011.
- [8] Honggang Donga, LiqunYanga, Chuang Dongb, SindoKouca: Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, Dalian, China/ Madison, USA, 24 November 2011.
- [9] Krajewski A.: Wpływ drgań mechanicznych stosowanych w procesach spajania na właściwości połączeń, zeszyt 258, ISSN 978-83-7814-118-1, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013.
- [10] Krajewski A., Włosiński W., Chmielewski T., Kołodziejczak P.: Ultrasonic-vibration assisted arc-welding of aluminum alloys, Bulletin of the Polish Academy of Science, ISSN 0239-7528, Vol. 60, No. 4, s. 841-852, 2012.