

UŻYTKOWE WARSTWY MIĘDZYMETALICZNE WYTWARZANE METODAMI SPAWALNICZYMI

Autorzy:
mgr inż. Grzegorz Gontarz, dr hab. inż. Dariusz Golański prof. PW,
dr hab. inż. Tomasz Chmielewski prof. PW

Wstęp

Materiały na bazie uporządkowanych faz międzymetalicznych z układów Fe-Al oraz Ti-Al charakteryzują się wysoką wytrzymałością i odpornością na utlenianie, a także małą gęstością. Mogą pracować w temperaturze powyżej 900°C utrzymując przy tym stabilność struktury i wiązań chemicznych. Między innymi dlatego znajdują obecnie szerokie zastosowanie w przemyśle energetycznym, motoryzacyjnym, lotniczym, a także spożywczym [1, 2].

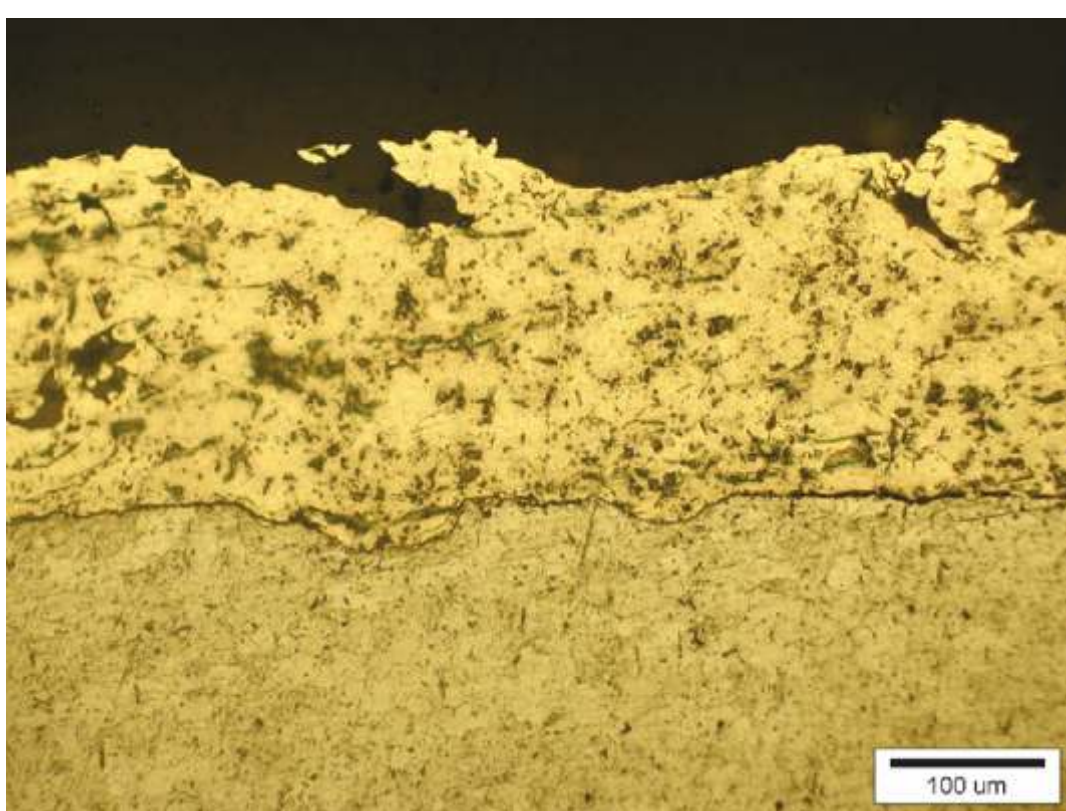
W niniejszej pracy zaproponowano nowe metody wytwarzania warstw intermetalicznych na podłożu stalowym. Procesy technologiczne zostały przeprowadzone za pomocą tradycyjnych metod z zakresu spajania. Połączenie procesów natryskiwania oraz przetapiania pozwala na uzyskanie warstwy na bazie faz międzymetalicznych oraz właściwości charakteryzujących warstwę przetapianą [3]. Proces przetapiania pozwala na uzyskanie drobnoziarnistej struktury materiału podstawowego. Dzięki takiej obróbce zlikwidowane zostają defekty struktury po obróbce plastycznej, a materiał podstawowy uzyskuje wysoką jednorodność i odporność na zmęczenie [4].

Z kolei w procesach napawania w kąpieli metalicznej bierze udział żelazo (ze stalowego podłoża) oraz materiały dodatkowe – aluminium oraz tytan. Dodatek Ti w procesie napawania ma na celu zmianę struktury wytwarzanej warstwy, która pozwoli uzyskać ciągliwą warstwę intermetaliczną o wysokiej adhezji do podłoża. Powstająca faza Ti-Al rozproszona w warstwie Fe-Al może korzystnie wpływać na jej właściwości. Wprowadzenie nowej fazy może mieć także korzystny wpływ na powstające w układzie warstwa-podłoże naprężenia własne [6-7].

Wytwarzanie warstw na bazie faz międzymetalicznych

Wytwarzanie warstw Fe-Al „z warstwą pośrednią”

Warstwę wytworzono w dwuetapowym procesie natryskiwania i przetapiania – metodami: TIG AC oraz łukiem plazmowym. W pierwszym etapie, na podłożu stali niestopowej (wag. 98,5% Fe) w kształcie płytki o wymiarach 30 x 20 mm i grubości 2 mm, natryskana została metodą łukową powłoka Al o grubości około 0,2 mm (rys. 1).



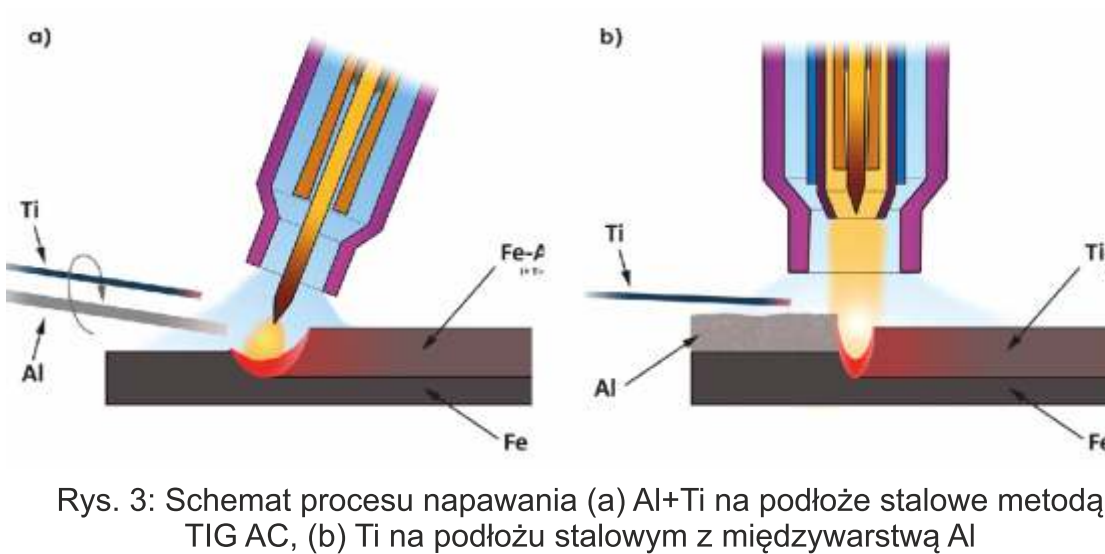
Rys. 1: Mikrostruktura natryskanej powłoki aluminiowej na stali S235JR

W drugim etapie natryskana powłoka Al została przetopiona wraz z częścią stalowego podłoża (na całkowitej głębokości do około 0,5 mm) metodą TIG AC oraz łukiem mikroplazmowym. Warunkiem otrzymania warstwy typu Fe-Al było zapewnienie takich warunków procesu przetapiania, aby powstała kąpiel metaliczna (obszar ciekłego metalu) składała się w równym stopniu z materiału powłoki Al oraz częściowo przetopionego podłoża stalowego. Dla metody TIG AC (rys. 2a) przetapianie prowadzono przy zastosowaniu prądu przemiennego o parametrach: I=65 A, osłona gazowa – argon (11 l/min), odległość dyszy od przetapianej warstwy – 4 mm, prędkość przesuwu palnika – 120 mm/min. Z kolei dla łuku plazmowego (rys. 2b) parametry przetapiania kształtowały się następująco: łuk pulsacyjny, I_{max}=25 A, U=11,7 V, osłona gazowa – argon (12 l/min), gaz plazmowy – argon (0,6 l/min), odległość dyszy od przetapianej warstwy – 3 mm, prędkość przesuwu palnika – 15 mm/min. Podczas przetapiania temperatura podłoża nie przekraczała 250°C.

Wytwarzanie warstw Fe-Al z fazami Ti-Al

Warstwę wytworzono również z zastosowaniem dwóch metod: w jednoetapowym procesie napawania TIG AC oraz w dwuetapowym procesie: natryskiwania łukowego i napawania plazmowego. Warstwy wytworzono na stalowym podłożu (wag. 98,5% Fe) w kształcie płytki o wymiarach 30 x 20 mm i grubości 2 mm.

W pierwszym przypadku napawano metodą TIG z użyciem prądu przemiennego Al oraz Ti w proporcjach 3:1 (rys. 3a). Do ciekłego jeziora spawalniczego wprowadzano na



Rys. 3: Schemat procesu napawania (a) Al+Ti na podłożu stalowym metodą TIG AC, (b) Ti na podłożu stalowym z międzywarstwą Al

(0,6 l/min), odległość dyszy od przetapianej warstwy – 3 mm, prędkość przesuwu palnika – 30 mm/min.

Na rys. 4 przedstawiono zestawienie makrostruktury powierzchni po przetapianiu oraz napawaniu wszystkimi metodami. Szerokość ściegu wynosiła od 3 mm dla przetapiania mikroplazmowego do około 5 mm dla TIG AC. Aby uzyskać większą powierzchnię tak wytworzonego stopu należy wykonać kilka ściegów zachodzących wzajemnie na siebie na szerokość około 20% szerokości ściegu.

Badania mikrostruktury

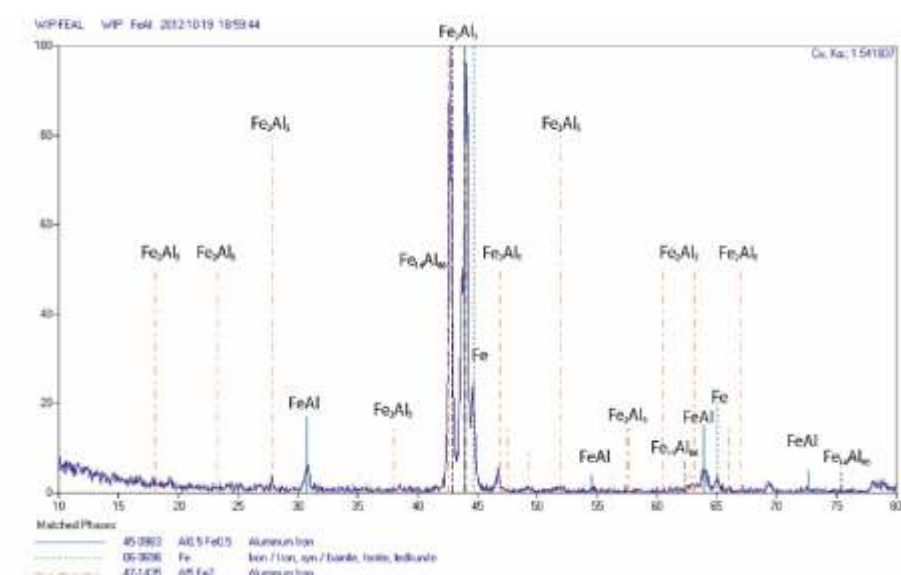
Warstwa wytworzona poprzez przetapianie powłoki Al na stali (rys. 5a) jest wolna od pęknięć i porowatości charakteryzujących warstwy natryskiwane. Zapewnia to wysoki poziom szczelności i brak karbów o charakterze geometrycznym, koncentrujących naprężenia. Ewentualna porowatość może występować jedynie w wierzchniej części warstwy. Największą zaletą przeprowadzonego procesu w stosunku do powłok intermetalicznych natryskanych bezpośrednio jest metalurgiczne związanie warstwy z podłożem. Warstwa jest jednorodna i ciągliwa.

Po przetapianiu mikroplazmowym (rys. 5b) w obszarze nowopowstałego stopu obserwujemy charakterystyczną dla faz międzymetalicznych komórkową budowę mikrostrukturalną o średnim rozmiarze ziaren na poziomie 20 µm oraz dyspersyjne wydzielenia innych związków o wymiarach nieprzekraczających 2 µm. Analizowana warstwa jest wolna od pęknięć i porowatości charakteryzujących warstwy natryskiwane.

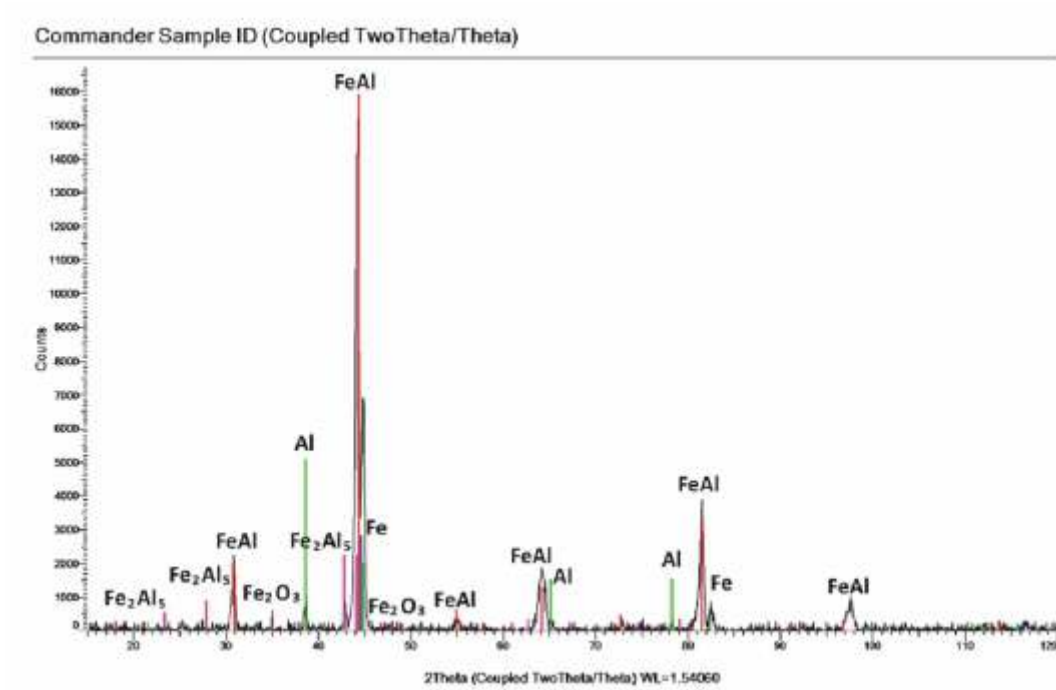
Warstwa wytworzona poprzez napawanie Al oraz Ti na podłożu stalowym (rys. 5c) również nie posiada pęknięć oraz porowatości. W obszarze nowopowstałego stopu można zauważyć wydzielenia innych faz (prawdopodobnie z układu Ti-Al). Obecność równomiernie rozproszonych w objętości obszaru napawy cząstek innych faz może mieć pozytywny wpływ m.in. na właściwości mechaniczne wytworzonej warstwy. W strefie wpływu ciepła obserwuje się znaczny rozrost ziaren.

Ostatnia prezentowana warstwa, powstała w wyniku oddziaływania łuku plazmowego na powłokę Al charakteryzuje się dobrze widoczną komórkową budową o średnim rozmiarze ziaren na poziomie 30 µm. Zauważalne są również wydzielenia innych faz równomiernie rozmieszczone w strukturze wytworzonego materiału. Podczas procesu napawania została przetopiona powłoka Al wraz z częścią stalowego podłoża.

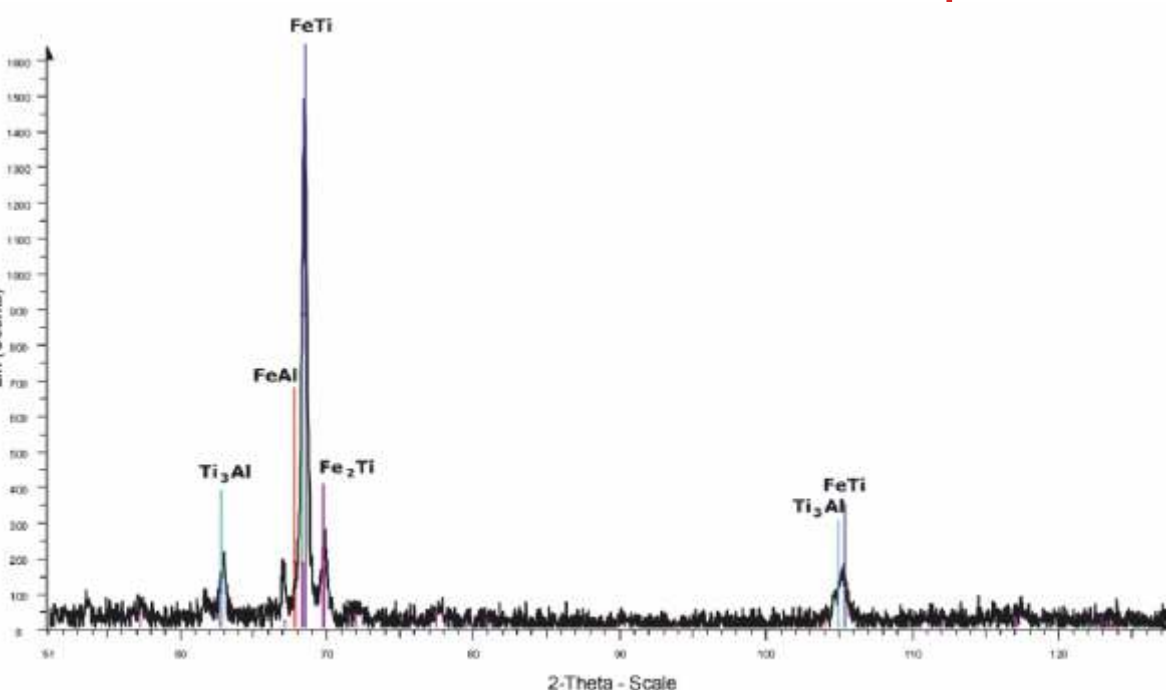
Na rys. 6 pokazano dyfraktogram powstałej warstwy po procesie przetapiania aluminium na podłożu stalowym metodą TIG AC. Wyniki rentgenowskiej analizy fazowej potwierdzają obecność fazy FeAl wrotnego rozrostu stałego, a jednocześnie potwierdzają udział innej fazy – Fe₂Al₅ – jako głównego składnika strukturalnego.



Rys. 6: Dyfraktogram przetopionej powłoki Al metodą TIG AC



Rys. 7: Dyfraktogram przetopionej powłoki Al łukiem mikroplazmowym



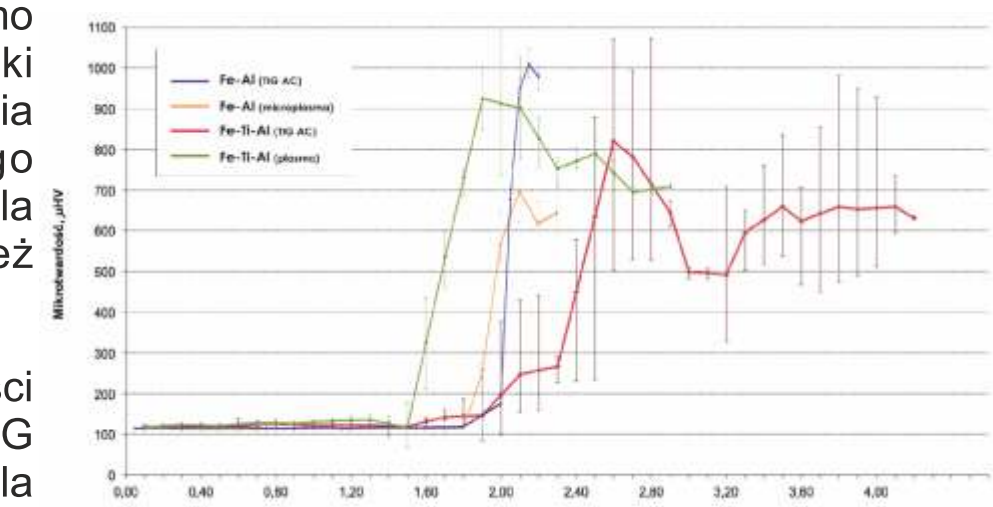
Rys. 8: Dyfraktogram warstwy wytworzonej przez napawanie Al z dodatkiem Ti

Wyniki rentgenowskiej analizy fazowej warstwy wytworzonej poprzez przetapianie mikroplazmowe powłoki Al (rys. 7) potwierdzają obecność fazy FeAl jako głównego składnika strukturalnego, dodatkowo wykazują nieznaczny udział innych faz ubocznych, takich jak Fe₂O₃ oraz Fe₂Al₅. Faza Fe₂O₃ powstała podczas przetapiania warstwy natryskanej z podłożem na skutek reakcji żelaza z tlenem atmosferycznym.

Rys. 8 przedstawia wynik dyfrakcji rentgenowskiej próbki z warstwą Al + Ti napawaną na podłożu stalowe. Pomimo głębokiego wtopienia w podłoże i wymieszania składników, uzyskano fazę Fe₂Ti jako głównego składnika strukturalnego. Dodatkowo uzyskano wydzielenia fazy FeAl oraz fazy TiAl.

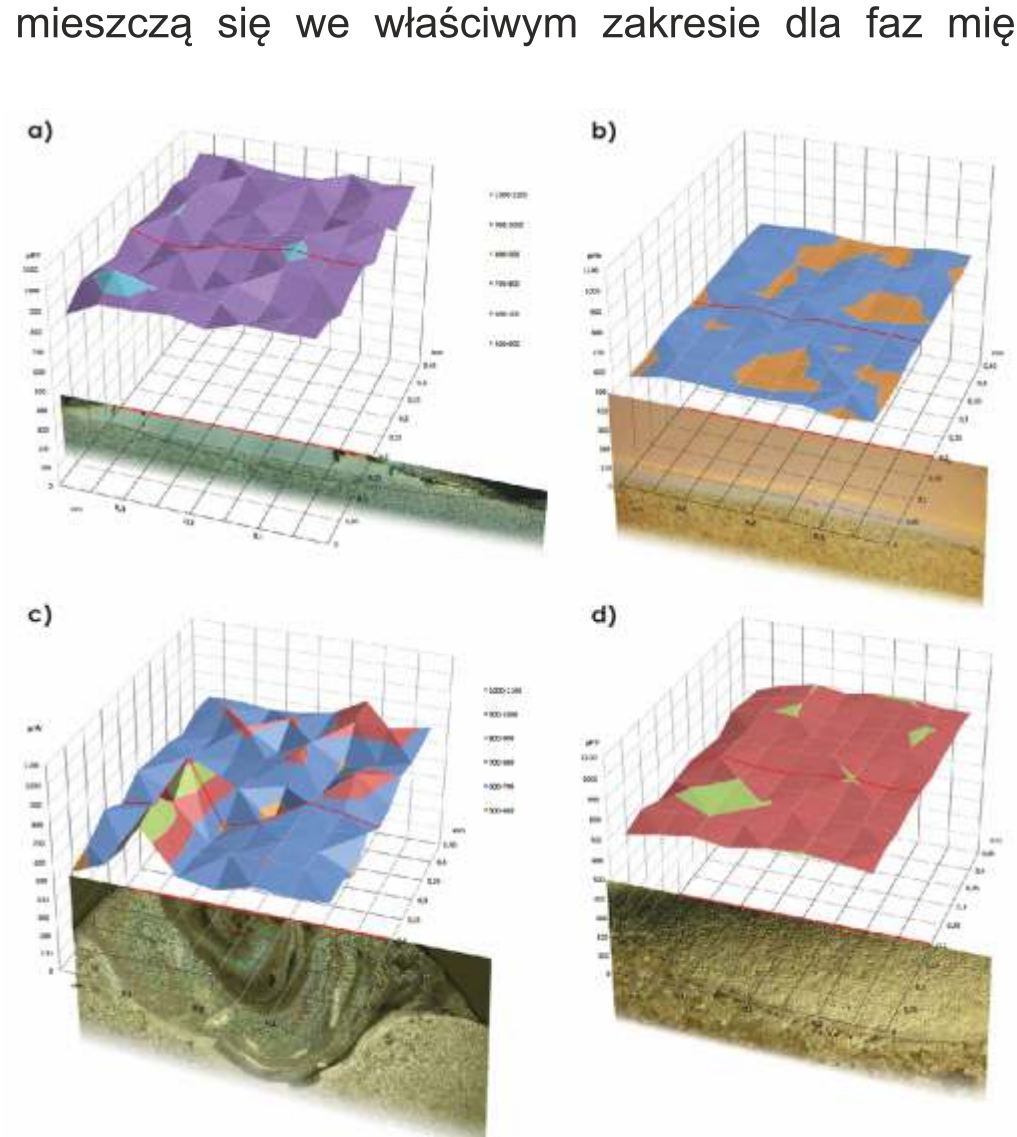
Badania mikrotworczy

Wyniki badań mikrotworczy w stalowym podłożu dla wytworzonej warstwy dla wszystkich zastosowanych metod pokazano na rys. 9. W podłożu odnotowano wzrost twardości do poziomu około 350 µHV_{0,1} jedynie w obszarze strefy wpływu ciepła (SWC), która swoim zasięgiem obejmowała pasmo o szerokości około 0,25 mm dla metody przetapiania powłoki aluminiowej metodą TIG AC oraz 0,4 - 0,6 mm dla metody napawania aluminium oraz tytanu. Dla przetapiania mikroplazmowego odnotowano nieznaczny wzrost twardości w SWC, natomiast dla napawania plazmowego odnotowano wzrost twardości również w stalowym podłożu.



Rys. 9: Zestawienie rozkładów twardości na przekroju próbki: w stalowym podłożu i wytworzonej warstwie

W warstwie właściwej zarejestrowano twardość w zakresie wartości 890-1020 µHV_{0,1} dla przetapiania prądem przemiennym metodą TIG oraz 450-570 µHV_{0,1} dla napawania Al i Ti na stali, 520-810 µHV_{0,1} dla przetapiania mikroplazmowego oraz 650-1100 µHV_{0,1} dla warstwy wytworzonej poprzez napawanie plazmowe. Dla wszystkich zastosowanych metod, zmierzone wyniki mikrotworczy warstwy mieszczą się we właściwym zakresie dla faz międzymetalicznych z układów Fe-Al oraz Ti-Al, a ich wartości są prawdopodobnie zależne od ilości wydzielonych innych faz.



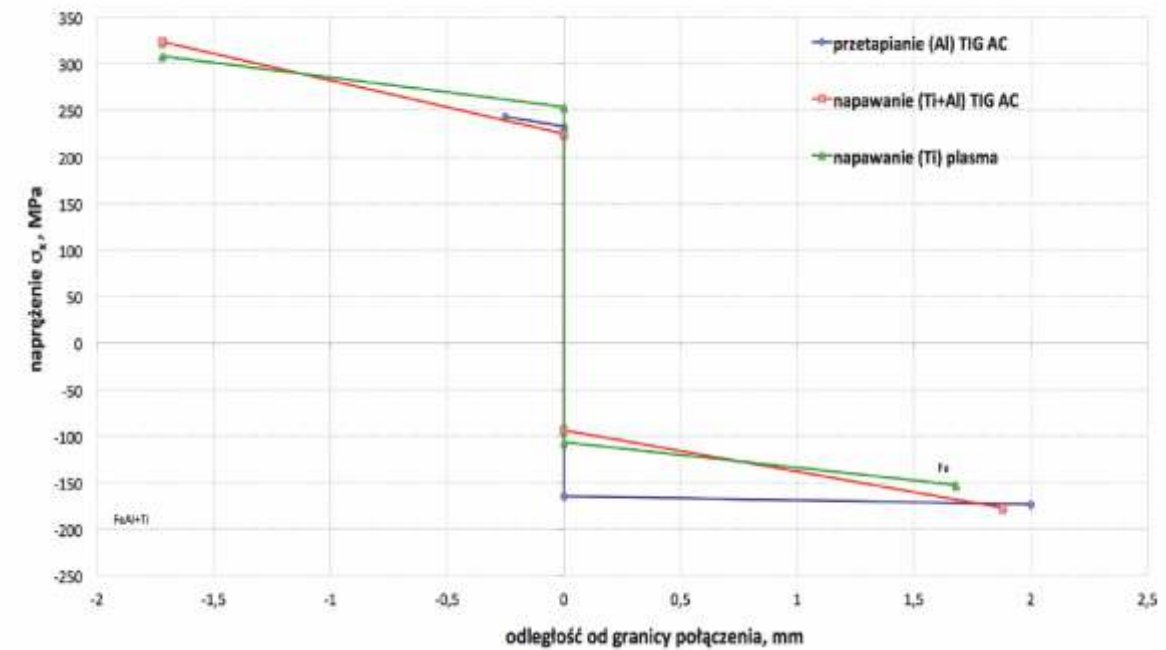
Rys. 10: Wykres mikrotworczy powierzchni warstwy po przetopieniu powłoki Al (a) metodą TIG AC oraz (b) łukiem mikroplazmowym, (c) po napawaniu Al z dodatkiem Ti oraz (d) po napawaniu Ti na podłożu stalowe z międzywarstwą Al

Badania mikrotworczy przeprowadzono również na „powierzchni użytkowej” wytworzonej warstwy. Płaszczyznę otrzymano poprzez zeszlifowanie na głębokość 10% wytworzonej warstwy. Jednolitą powierzchnią została zbadana w obszarze 0,4 x 0,45 mm. Wyniki pomiarów zostały przedstawione na wykresach na rys. 10. Powierzchnia po przetapianiu warstwy Al metodą TIG AC charakteryzuje się równomierną twardością w całym obszarze pomiarowym i mieści się w zakresie 900-1000 µHV_{0,1}. Rozkład twardości dla powierzchni po przetapianiu łukiem mikroplazmowym (rys. 10b) obejmuje wąski przedział wartości w zakresie 570-610 µHV_{0,1}. Powierzchnia po napawaniu aluminium oraz tytanu (rys. 10c) wykazuje duże skoki twardości (500-1000 µHV_{0,1}). Ostatnia warstwa - wytworzona poprzez napawanie Ti na stal z międzywarstwą aluminiową - ma stabilną twardość na poziomie 770-880 µHV_{0,1}.

Badania naprężeń własnych

Badania naprężeń własnych wykonano na specjalnie zbudowanym stanowisku pomiarowym. Zmierzono wartości ugięcia próbek po wytworzeniu warstwy i na podstawie zmodyfikowanego równania Stoneya'ya wyznaczono naprężenia w układzie warstwa-podłoże.

Zależności te opisał w sposób analityczny Clyne otrzymując rozwiązanie umożliwiające wyznaczenie naprężeń na kierunku x w warstwie i podłożu [5]. Na ich podstawie dla warstw Fe-Al na Fe otrzymujemy następujący wykres zmiany naprężenia σ_x (rys. 11) na przekroju warstwa-podłoże.



Rys. 11: Wykres zmiany naprężenia σ_x na przekroju warstwy Fe-Al i podłoża Fe obliczony według zmodyfikowanego równania Stoneya'ya

Jak widać z wykresu, w warstwie występują rozciągające naprężenia własne o wartościach przekraczających 300 MPa. Największe naprężenia występują w warstwie wytworzonej poprzez napawanie plazmowe tytanu na podłożu stalowe z międzywarstwą Al. Charakterystyczne w takich układach jest występowanie gwałtownego skoku naprężenia na granicy warstwy i podłoża.

Podsumowanie

Zaproponowane sposoby wytwarzania warstw międzymetalicznych z układu Fe-Al oraz warstw FeAl modyfikowanych fazami z układu Ti-Al mogą stanowić alternatywę dla obecnie stosowanych metod modyfikacji powierzchni stalowych, opartych na pokrywaniu ich droginami komercyjnymi fazami międzymetalicznymi (najczęściej w formie proszku).

Wytworzone warstwy bazujące na związku typu Fe-Al, Fe-Ti oraz Ti-Al mogą w przyszłości znaleźć zastosowanie jako warstwy pośrednie do połączeń konstrukcji stalowych z elementami aluminiowymi.

Badania wskazują, że wzrost grubości warstwy prowadzi do wzrostu naprężeń własnych osiągając maksymalne wartości na poziomie 230-320 MPa. Im większe jest oddziaływanie wysokiej temperatury na podłoże tym wyższe naprężenia powstają po wytworzeniu warstwy.

Przedstawione w pracy podejście oraz zastosowane metody dają możliwość wytwarzania *in-situ* warstw ochronnych bazujących na roztworze wtórnym Fe-Al.

Bibliografia

- [1] Williams J.C.: Intermetallics for structural applications: potential, reality and road ahead, Structural Intermetallics, ed. M.V. Nathal et al., TMS 1997, pp. 3-8.
- [2] Bystrzycki J., Varin R.A., Bojar Z.: Postępy w badaniach stopów na bazie uporządkowanych faz międzymetalicznych z udziałem aluminium, Inżynieria Materiałowa 1996, 5, s. 137-149.
- [3] Gontarz G., Chmielewski T., Golański D.: Modyfikacja natryskiwanych powłok aluminiowych na stali skoncentrowanym źródłem ciepła, Przegląd Spawalnictwa, Nr 12/2011, s. 52-54.
- [4] Gontarz G.: Przetapianie warstw powierzchniowych nanoszonych metodami spawalniczymi, Zeszyt Naukowy Mechanika, nr 230: Spajanie we współczesnej technice, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010, s. 115-129.
- [5] Clyne T.W., Gill S.C.: Residual Stresses in Surface Coatings and Their Effects on Interfacial Debonding: A Review of Recent Work, J. Thermal Spray Technology, (1996), Vol. 5(4), pp. 401-418.
- [6] Gontarz G., Golański D., Chmielewski T.: Properties of Fe-Al type intermetallic layers produced by AC TIG method, Advances in Materials Science, Vol.13, No.3 (37) 2013, pp. 5-16.
- [7] Golański D., Chmielewski T., Gontarz G., Zimmerman J., Włosiński W.: Badania naprężeń własnych w powłokach natryskiwanych metodą HVOF, Przegląd Spawalnictwa, 10 (2013), s. 30-36.

Kontakt:

Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Wytwarzania
Zakład Inżynierii Spajania
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa
tel.: 22 234 84 02, fax: 22 849 96 21
www.zis.wip.pw.edu.pl
e-mail: zis@wip.pw.edu.pl