

Warstwy intermetaliczne typu Fe-AL wytwarzane metodą TIG AC

Fe-Al intermetallic layers produced by TIG AC method

Streszczenie

W pracy przedstawiono nową metodę bezpośrednio wytwarzania warstw na osnowie uporządkowanych faz międzymetalicznych ze związków Fe-Al. Zastosowano przetapianie prądem przemiennym techniką TIG natryskiwanej wcześniej powłoki aluminiowej na podłożu stalowym, uzyskując twardość w powłoce przekraczającą 1000 μHV . Artykuł ma przybliżyć zagadnienia wytwarzania warstw intermetalicznych typu Fe-Al charakteryzujących się bardzo dobrymi właściwościami, jak np. wysoką odpornością na utlenianie czy wysoką odpornością na korozję w podwyższonej temperaturze oraz w środowisku korozyjnym.

Abstract

This paper presents the new method of *in-situ* production of ordered Fe-Al intermetallic based layers. The experiment has two stages. Once the thermally sprayed pure aluminum coating was applied on the steel substrate, the TIG AC method for remelting was used. The meanweld microhardness was higher than 1000 μHV . The proposed method makes possible production of intermetallic Fe-Al layers, which are characterized by very good properties, such as: high resistance to oxidation and corrosion at higher temperature in corrosive environment.

Wstęp

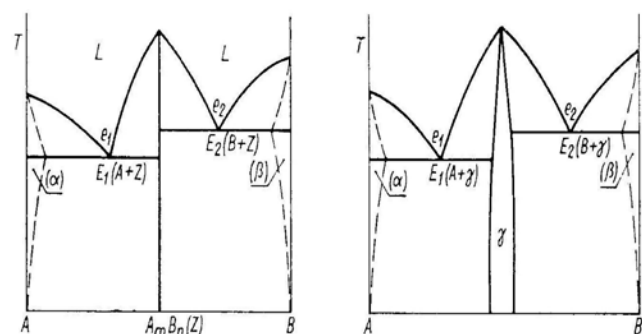
Fazy międzymetaliczne nazwane często *intermetalami* należą do unikatowej klasy materiałów metalicznych o właściwościach pośrednich między metalami a ceramiką. Od wielu lat są postrzegane jako materiały funkcjonalne o specyficznych właściwościach chemicznych i fizycznych [1]. Powstają w wyniku połączenia metali lub metali z niemetalami i wykazują właściwości metaliczne ze względu na częściowy lub całkowity udział wiązania metalicznego. Atomy składników wykazują uporządkowane rozmieszczenie w sieci krystalicznej, stabilne niekiedy aż do temperatury topnienia.

Obecność faz międzymetalicznych w spoinie znacznie obniża parametry złącza, dlatego też nie są dobrze postrzegane w gronie spawalników. Jednak, gdy wykorzystamy *intermetale* do modyfikacji powierzchni metali, możemy uzyskać *doskonałe* efekty. Powłoki takie wykazują dużą twardość, odporność na ścieranie oraz na korozję w środowisku utleniającym i redukującym, a także mogą pracować w wysokiej temperaturze [2].

Fazy międzymetaliczne mogą powstawać przez wykryształizowanie wprost z roztworu ciekłego i w tym przypadku mają charakter związku międzymetaliczne-

go o wzorze A_mB_n lub wtórnego roztworu stałego, występującego w pewnym zakresie stężeń (rys. 1).

Materiały te są konkurencyjne dla coraz droższych stopów na bazie niklu. Wykazują małą gęstość, mają wysoki moduł Younga, a umowna granica plastyczności jest często porównywalna do tych dobrych, wciąż pożądanych – stopów niklu. Granica plastyczności większości intermetali jest stabilna do 600-800°C. Ich właściwości są zbliżone do superstopów (np. Inconelu), które znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym oraz motoryzacyjnym na



Rys. 1. Dwuskładnikowe układy równowagi z fazami międzymetalicznymi o charakterze: a) związku A_mB_n , b) wtórnego roztworu stałego γ [3]

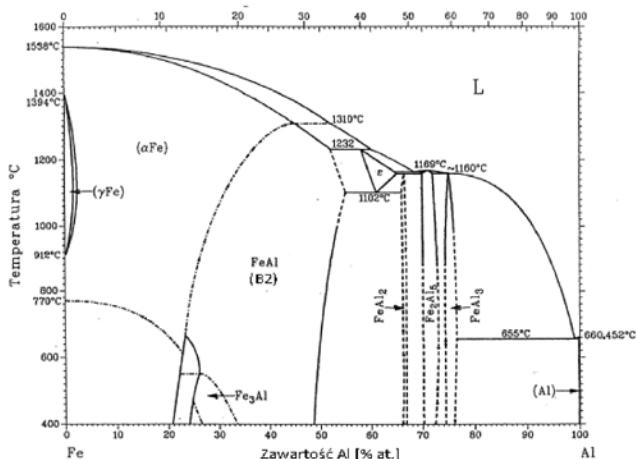
Fig. 1. Bivariant phase system with intermetallic phase as: a) A_mB_n compound, b) secondary solid solution γ [3]

elementy lub powłoki elementów pracujących w wysokiej temperaturze [4].

Obecnie duże zainteresowanie towarzyszy materiałom na bazie związków międzymetalicznych z układu Fe-Al. Wynika to z m.in. względnie niskiej ceny w stosunku do innych grup materiałów bazujących na fazach międzymetalicznych. Istotne składniki kosztów to koszt materiałów podstawowych oraz koszt technologicznego procesu wytwarzania. Dotychczas stopy na bazie faz międzymetalicznych wytwarzane były klasycznymi metodami (głównie przez topienie i odlewanie), jak również z wykorzystaniem nowoczesnych technik wytwarzania opartych na metalurgii proszków [5].

Materiały na bazie uporządkowanych faz międzymetalicznych z układu Fe-Al są roztworami wtórnymi na osnowie sieci B2 i występują w temperaturze otoczenia w zakresie stężeń 36,5÷50% Al (rys. 2). Charakteryzują się wysoką wytrzymałością (wytrzymałość na rozciąganie – 1150 MPa) i odpornością na utlenianie, a także małą gęstością – 5,5 g/cm³ (z uwagi na wysoką zawartość aluminium), odpornością na erozję i zużycie ściernie [6]. Mogą pracować w temperaturze nawet do 900°C, przy temperaturze topnienia wynoszącej ok. 1350°C. Utrudnienia w ich stosowaniu wynikają z dużej kruchości w temperaturze otoczenia. Występują również trudności przy wytwarzaniu z nich elementów o użytkowych gabarytach charakteryzujących się litą budową o drobnoziarnistej mikrostrukturze pozbawionej mikropęknięć i innych nieciągłości.

Stopy Fe-Al znalazły szerokie zastosowanie m.in. w przemyśle lotniczym (powłoki łopatek w silnikach odrzutowych), przemyśle okrętowym i motoryzacyjnym (palety i stojaki w piecach do obróbki cieplno-chemicznej, rolki do transportu taśm stalowych walcowanych na gorąco, pierścienie, katalizatory), jak również w przemyśle energetycznym i petrochemicznym (komponenty wymienników ciepła, obudowy ogniwo paliwowych, elementy konstrukcyjne pracujące w podwyższonej temperaturze) [7, 8]. Ze względu na niskie koszty materiałowe i specyficzne właściwości, stopy na bazie faz międzymetalicznych z układu Fe-Al mogą



Rys. 2. Wykres równowagi układu Fe-Al [6]
Fig. 2. Fe-Al phase system [6]

zastępować niektóre drogie stopy zawierające chrom, nikiel czy molibden, używane na powłoki ochronne oraz do regeneracji części. Stosowanie powłok regeneracyjnych jest korzystne ze względów ekonomicznych, ale również umożliwia ulepszenie naprawianych powierzchni zarówno pod względem odporności na utlenianie w wysokiej temperaturze, jak i twardości [9, 10].

W pracy zaproponowano nową metodę wytwarzania warstw intermetalicznych z układu Fe-Al. Dwuetapowy proces technologiczny nawiązuje w części do tradycyjnych metod spajania, jednak jest całkowicie nowym rozwiązaniem. Powłoka oparta na fazie międzymetalicznej z układu Fe-Al jest wytwarzana *in situ*.

Materiały i metoda wytwarzania

Proces wytwarzania Fe-Al warstw został przeprowadzony w dwóch etapach. W pierwszym etapie, na podłożu stali niestopowej (wag. 98,5% Fe) w kształcie płytki o wymiarach 90 x 20 mm i grubości 2 mm, nałożona została metodą łukową warstwa aluminium o grubości ok. 0,2 mm. Parametry natryskiwania zawarto w tablicy I.

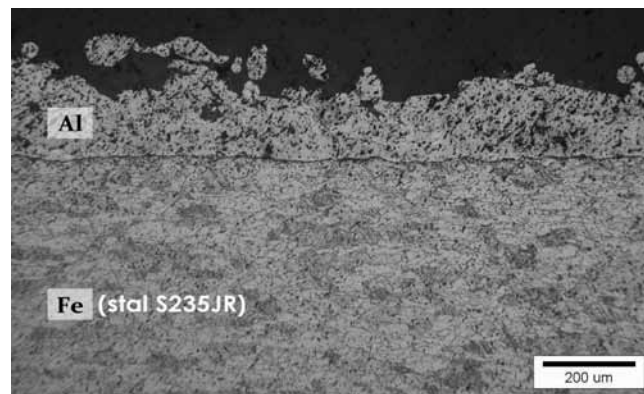
Na rysunku 3 przedstawiono mikrostrukturę warstwy aluminium po natryskiwaniu. Powierzchnia po natryskiwaniu ma wysoką chropowatość, powłoka jest szczelna i jednolita, a jej mikrostruktura potwierdza szczelność powłoki aluminiowej na podłożu stalowym. Powłoka jest ciągła, ma dużą porowatość, połączenie cząsteczek powłoki z podłożem ma charakter zakleszczenia mechanicznego.

W kolejnym etapie natryskana powłoka z aluminium była przetwarzana wraz z warstwą stalowego podłoża wiązką energii cieplnej. Do procesu zastosowano

Tablica I. Parametry natryskiwania łukowego powłoki Al na podłożu stalowe S235JR

Table I. Parameters of thermal spraying of Al coating on S235JR substrate

Natężenie prądu, A	150
Napięcie łuku, V	30
Ciśnienie powietrza, MPa	0,5
Odległość dyszy pistoletu od przedmiotu, mm	300

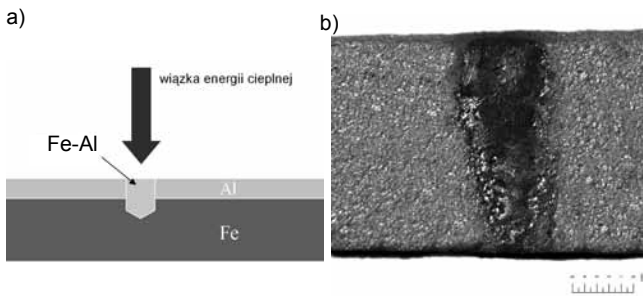


Rys. 3. Mikrostruktura natrykiwanej termicznie powłoki aluminium na podłożu ze stali S235JR, pow. 100x

Fig. 3. Microstructure of thermal sprayed Al. coating on S235JR substrate, magn. 100x

Tablica II. Parametry przetapiania TIG AC
Table II. Parameters of TIG AC remelting

Natężenie prądu, A	65
Ośłona gazowa	argon
Natężeniem przepływu gazu, l/min	11
Odległość dyszy od przetapianej warstwy, mm	4
Prędkość przesuwu palnika, mm/min	120



Rys. 4. Schemat procesu przetapiania TIG AC komponentów (a) i zewnętrzna powierzchnia próbki po przetopieniu (b)
Fig. 4. Scheme of TIG AC remelting (a) and the surface of the specimen after process (b)

urządzenie LORCH T220. Przetapiano przy zastosowaniu prądu przemiennego na całkowitej głębokości do ok. 0,5 mm. Proces ten przedstawiono schematycznie na rysunku 4a.

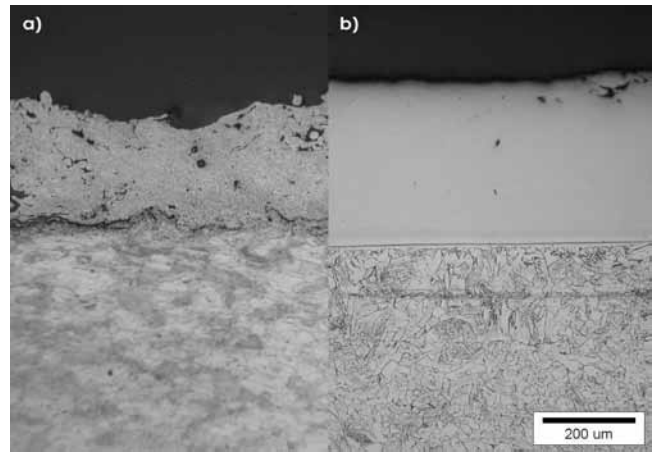
Przetapianie należało przeprowadzić, stosując odpowiednie parametry (tabl. II), tak by kąpiel metaliczna (obszar ciekłego metalu) składała się w równym stopniu z materiału powłoki aluminiowej oraz częściowo przetopionego podłoża stalowego. Na rysunku 4b przedstawiono widok zewnętrznej powierzchni próbki po przetopieniu.

Wyniki badań

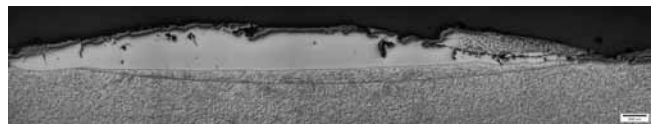
Wykonano podstawowe badania metalograficzne w celu scharakteryzowania mikrostruktury oraz średniej twardości warstw. Na rysunku 5 pokazano budowę mikrostrukturalną przetopionego obszaru na granicy z powłoki nałożonego aluminium.

Analizowana warstwa jest wolna od pęknięć i porowatości charakteryzujących warstwę natrykiwane. Zapewnia to wysoki poziom szczelności i brak karbów o charakterze geometrycznym, koncentrujących naprężenia. W wytworzonej warstwie nie występują mikropęknięcia, warstwa jest ciągła, ewentualna porowatość może występować jedynie w jej wierzchniej części (rys. 6). Największą zaletą przeprowadzonego procesu w stosunku do powłok natrykiwanych jest metalurgiczne związanie z podłożem zapewniające przyczepność warstwy na poziomie o rząd wielkości wyższym niż dla powłok natrykiwanych.

Wykonano badania mikrotwardości w stalowym podłożu oraz wytworzonej warstwie (rys. 7). Twardość próbki po stronie podłoża badano do głębokości ok. 2,3 mm celem ujawnienia ewentualnego

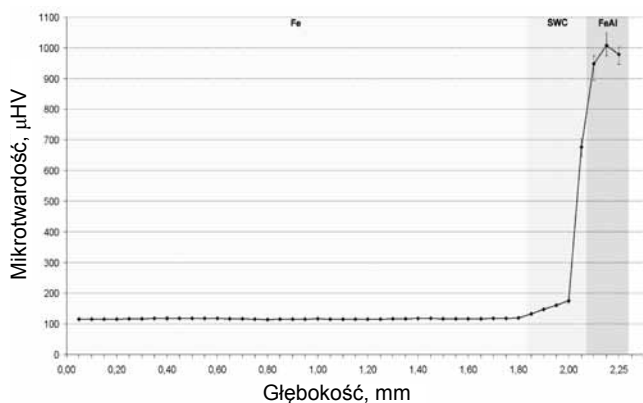


Rys. 5. Mikrostruktura warstwy powierzchniowej: a) przed przetopieniem, b) po przetopieniu, pow. 200x
Fig. 5. Microstructure of superficial layer: a) before remelting, b) after remelting, magn. 200x



Rys. 6. Mikrostruktura warstwy powierzchniowej – przekrój poprzeczny, kontrast Nomarskiego, pow. 100x
Fig. 6. Microstructure of superficial layer – bead cross-section, Nomarski's contrast, magn. 100x

oddziaływania cyklu cieplnego również na podłoże. W podłożu odnotowano wzrost twardości do poziomu ok. 450 $\mu\text{HV}_{0,1}$ jedynie w obszarze strefy wpływu ciepła (SWC), która swoim zasięgiem obejmowała pasmo o szerokości około 0,25 mm, bezpośrednio przyległe do granicy wtopienia. W warstwie właściwej zarejestrowano twardość w zakresie 890÷1050 $\mu\text{HV}_{0,1}$. Jest to poziom właściwy dla wtórnego roztworu stałego FeAl. Otrzymane wyniki odzwierciedlają jednorodność chemiczną, strukturalną i fazową wytworzonej warstwy. Bardzo wysoka mikrotwardość rzędu 1000 $\mu\text{HV}_{0,1}$ może świadczyć o wytworzeniu czystej fazy FeAl wtórnego roztworu stałego bez udziału innych faz ubocznych, co będzie można potwierdzić po wykonaniu dodatkowych badań (m.in. rentgenowskiej analizy fazowej).



Rys. 7. Rozkład mikrotwardości w stalowym podłożu i warstwie
Fig. 7. Microhardness distribution in steel substrate and layer

Podsumowanie

Zaproponowana metoda jest alternatywą dla obecnie stosowanych metod modyfikacji powierzchni stalowych, opartych na pokrywaniu ich drogimi gotowymi fazami międzymetalicznymi (najczęściej w formie proszku), jak i dla innych spawalniczych metod wytwarzania powłok intermetalicznych (przetapianie laserowe [11] i mikroplazmowe [12]). Największą zaletą opracowanej metody jest niski koszt stosowanych materiałów Al i Fe oraz urządzenia do wytwarzania z nich nowego stopu na powierzchni modyfikowanego elementu podczas przetapiania powłoki i podłoża. Zastosowane źródło ciepła przy przetapianiu (TIG AC) umożliwi selektywne prowadzenie procesu przetapiania na wyizolowanym obszarze części maszyn.

Zastosowanie łuku spawalniczego zasilanego prądem przemiennym do przetapiania umożliwiło uzyskanie powłoki intermetalicznej o podobnej mikrostrukturze oraz wyższej mikrotwardości od warstw wytwarzanych w procesie przetapiania mikroplazmowego i laserowego. Przedstawiona metoda daje możliwość wytwarzania *in-situ* warstw ochronnych opartych na roztworze wtórnym FeAl, które z uwagi na swoją budowę właściwości mechaniczne i użytkowe, mogą mieć zastosowanie na elementy maszyn, poddane wysokim obciążeniom mechanicznym oraz cieplnym i podlegające silnemu zużyciu ściernemu.

Literatura

- [1] Szkliniarz W.: Doświadczenia w zakresie wytwarzania i przetwarzania stopów na osnowie fazy międzymetalicznej TiAl, Inżynieria Materiałowa, vol. 28, nr 2, s. 47-53, 2007.
- [2] Chmielewski T., Zhu S.: Natryskiwanie powłok na bazie wybranych faz międzymetalicznych metodą High Efficiency Hypersonic Plasma Spraying. Prace naukowe. Mechanika, z. 215, 49-58, wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.
- [3] Przybyłowicz K.: Metaloznawstwo, wyd. 6, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [4] Chmielewski T., Jakubowski J.: Żaroodporne powłoki Inconel 625 natryskiwane termicznie na podłoża ze stali stopowych. Prace naukowe. Mechanika, z. 229, 143-153, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009.
- [5] Durejko T., Bojar Z.: Materiały na bazie faz międzymetalicznych z układu Fe-Al otrzymywane zmodyfikowaną metodą prasowania w podwyższonej temperaturze. Composites No. 2, s. 323-327, 2005.
- [6] Kobayashi S., Yakou T.: Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment, Materials Science and Engineering: A, Vol. 338, Issues 1-2, 44-53, 2002.
- [7] Chmielewski T., Golański D.: Znaczenie spawalnictwa w procesie remanufacturingu. Przegląd Spawalnictwa, 6/2011 s. 29-32, 2011.
- [8] Niewielki G., Jabłońska M.: Charakterystyka i zastosowanie intermetali z układu Fe-Al, Inżynieria Materiałowa, vol. 28, nr 2, s. 43-47, 2007.
- [9] Augustyn-Pieniążek J., Skrzypek S.J., Goły M.: Skład fazowy i mikrostruktura warstwy wierzchniej na podłożu stali austenitycznej 18-8 po laserowej modyfikacji. Mechanika, z. 6, 2-M/2009, s. 91-98, 2009.
- [10] Włosiński W., Chmielewski T.: Plasma-hardfaced chromium protective coatings – effect of ceramic reinforcement on their wettability by glass, Advances in Science and Technology 32, s. 253-260, 2003.
- [11] Chmielewski T., Golański D.: The new method of in-situ fabrication of protective coatings based on FeAl intermetallic compounds, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, 2011, Vol. 225 (4).
- [12] Gontarz G., Chmielewski T., Golański D.: Modyfikacja natryskiwanych powłok aluminiowych na stali skoncentrowanym źródłem ciepła, Przegląd Spawalnictwa 12/2011, 52-55, 2011.

W następnym numerze

Michał Kawiak

Spawanie tłoczyska siłowników hydraulicznych

Jacek Górka, Rafał Skiba

Wpływ procesów cięcia termicznego i strumieniem wody na własności i jakość powierzchni ciętych stali niskostopowych o wysokiej granicy plastyczności

Sebastian Pawlak, Maciej Różański, Grzegorz Muzia

Zastosowanie termografii aktywnej do badań nieniszczących połączeń lutowanych

Maciej Różański

Wpływ dodatku tytanu w spoiwach cynkowych na zwilżalność powierzchni i właściwości mechaniczne aluminiowych połączeń lutowanych

Edward Wajs

Analiza stanu naprężenie-odkształcenie w niklowych powłokach elektrolitycznych zawierających nano- i mikrocząstki twardej fazy