Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym
Modern material technologies in aerospace industry

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

KONFERENCJA
RADY PARTNERÓW CZT AERONET
i PANELE EKSPERTÓW
23-24 Czerwca 2014

ZB15

Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych
Unconventional technologies of joining of elements of aeronautical constructions

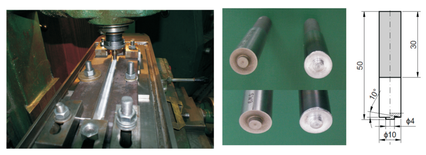
Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań
Results

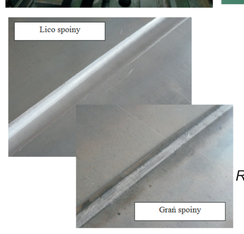
Zgrzewanie tarciowe z przemieszaniem blach ze stopu aluminium 2024 i stopu magnezu AZ31
Friction stir welding of aluminium 2024 and magnesium AZ31 alloy sheets

Badania eksperymentalne obejmowały próby zgrzewania tarciowego z przemieszaniem blach ze stopów aluminium 2024 i magnezu AZ31. Testy zgrzewania przeprowadzono na uniwersalnej frezarce pionowej. Parametrami zmiennymi była prędkość posuwu stołu frezarki oraz prędkość obrotowa narzędzia (wrzeciona frezarki). Stosowano narzędzia o wymiarach: średnica cylindrycznego trzpienia roboczego ϕ4 mm, średnica kołnierza ϕ10 mm, wysokość trzpienia 1,5 mm, powierzchnia podstawy trzpienia stożkowa, o kącie wklęsłości równym 10o.

Badania wytrzymałościowe obejmowały statyczną próbę rozciągania. Próbki do badań wytrzymałościowych wycinano z połączonych metodą FSW pasów blachy w kierunku prostopadłym do linii złącza. Szerokość próbek wynosiła 12,5 mm, baza pomiarowa wydłużenia (baza ekstensometru) 50 mm. Na powierzchni górnej zgrzeiny (lico) wykonano pomiary mikrotwardości oraz ocenę struktury powierzchni lica zgrzeiny za pomocą mikroskopu optycznego. Do oceny temperatury procesu zastosowano kamerę termowizyjną FLIR T400.



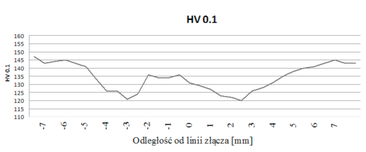
Rys 1.Stanowisko do wykonywania złączy FSW i narzędzia stosowane w badaniach
Fig.1 Friction stir welding set-up and tools used in the tests



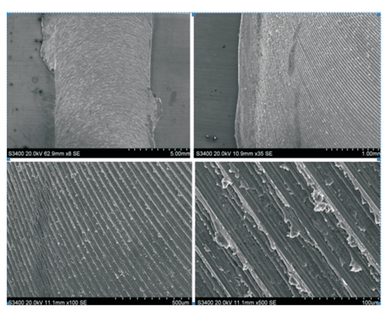
Rys. 2. Lico i grań spoiny FSW (stop 2024)
Rys. 2. Face and back of the FSW joint

Zgrzewanie FSW blach ze stopu aluminium 2024
The FSW process of aluminum 2024 alloy sheets

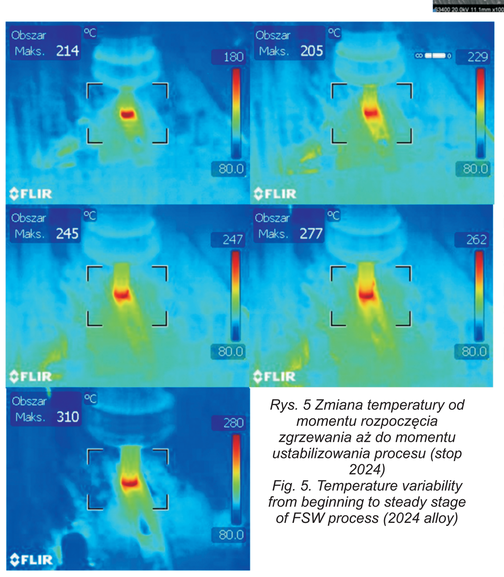
Zgrzewano blachy ze stopu aluminium 2024 o właściwościach mechanicznych: granica plastyczności R0,2 = 343 MPa, granica wytrzymałości na rozciąganie Rm = 486 MPa, wydłużenie A50 = 17%; grubość blach 1,6 mm. Po procesie zgrzewania próbki, przed badaniami wytrzymałościowymi, były starzone naturalnie (sezonowane) przez 7 dni.



Rys. 3. Rozkład mikrotwardości na powierzchni lica spoiny FSW (stop 2024)
Fig.3. Hardness distribution on a face of FSW joint (2024 alloy)

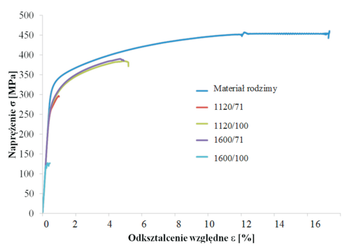


Rys. 4. Obrazy powierzchni lica spoiny FSW wykonane z różnym powiększeniem (stop 2024)
Fig. 4. FSW face joint images taken with different magnification (2024 alloy)

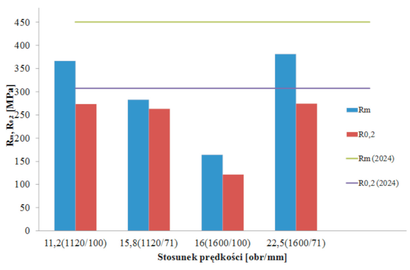


W momencie zagłębienia trzpienia mieszającego w łączone płyty temperatura na powierzchni spoiny wynosiła 180-200oC, włączenie posuwu stołu powodowało stopniowy wzrost temperatury, aż do ustabilizowania się jej na poziomie 280-310oC.

Rys. 5 Zmiana temperatury od momentu rozpoczęcia zgrzewania aż do momentu ustabilizowania procesu (stop 2024)
Fig. 5. Temperature variability from beginning to steady stage of FSW process (2024 alloy)

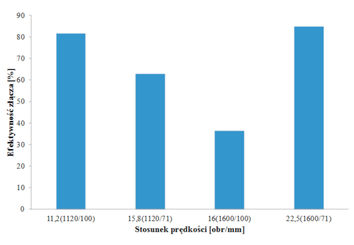


Rys. 7. Charakterystyki rozciągania złączy FSW i materiału litego 2024
Fig. 7.Tensile test graphs of the FSW joints and base 2024 alloy

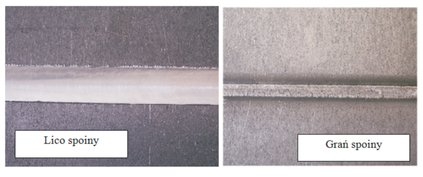


Rys. 6. Zależność właściwości wytrzymałościowych złącza FSW (stop 2024) od stosunku prędkości narzędzia
Fig. 6.The strength properties of the FSW joints versus the ratio of tool velocities obtained for 2024 alloy

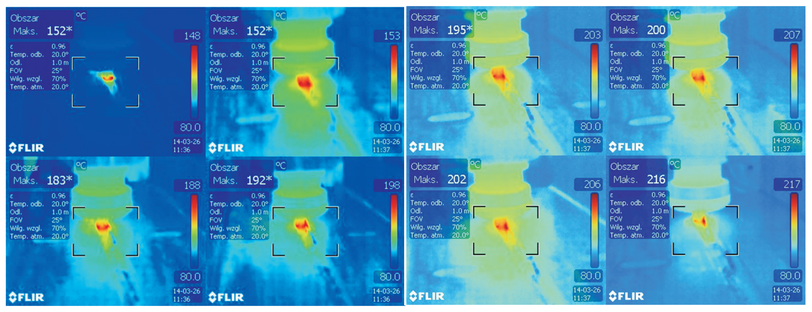
Zgrzewanie FSW blach ze stopu magnezu AZ31
The FSW process of AZ31 magnesium alloy sheets
Zgrzewaniu poddano blachy ze stopu magnezu AZ31 o właściwościach mechanicznych: wytrzymałość na rozciąganie Rm 240 MPa, granica plastyczności Rp0,2 163MPa, wydłużenie A 7,5 %, grubość blach 1,6 mm.



Rys. 8. Zależność efektywności złącza FSW od stosunku prędkości narzędzia (stop 2024)
Fig. 8The FSW joint efficiency versus the ratio of tool velocities obtained for 2024 alloy

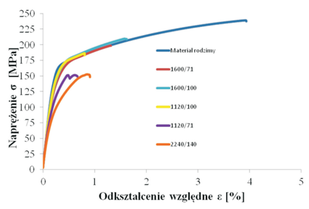


Rys. 9. Lico i grań spoiny FSW (stop Az31)
Fig. 9 Face and back of the FSW joint (AZ31 alloy)

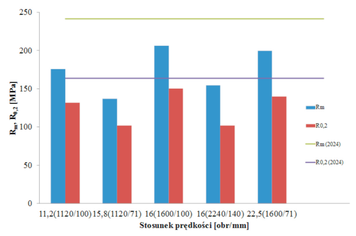


Rys. 10. Zmiana temperatury od momentu rozpoczęcia zgrzewania aż do momentu ustabilizowania procesu (stop AZ31)
Fig. 10. Temperature variability from beginning to steady stage of FSW process (AZ31 alloy)

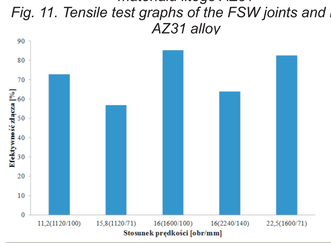
W przypadku prawidłowego formowania się zgrzeiny blach z AZ31 temperatura maksymalna na etapie zagłębiania się narzędzia w materiał wynosiła ok. 150°C. Włączenie posuwu stołu spowodowało stopniowy wzrost temperatury do 210 - 215°, po czym temperatura uległa stabilizacji na tym poziomie.



Rys. 11. Charakterystyki rozciągania złączy FSW i materiału litego AZ31
Fig. 11. Tensile test graphs of the FSW joints and base AZ31 alloy



Rys. 12. Zależność właściwości wytrzymałościowych złącza FSW (stop AZ31) od stosunku prędkości narzędzia
Fig.12 The strength properties of the FSW joints versus the ratio of tool velocities obtained for AZ31 alloy



Rys. 13. Zależność efektywności złącza FSW od stosunku prędkości narzędzia (stop AZ31)
Fig. 13. The FSW joint efficiency versus the ratio of tool velocities obtained for AZ31 alloy

Wnioski
Conclusions

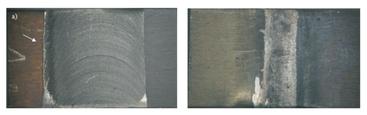
Przeprowadzone badania wykazały, że blachy cienkie ze stopu aluminium 2024 i AZ31 mogą być efektywnie łączone metodą FSW. Do wykonywania złączy dobrych jakościowo i o wysokich właściwościach wytrzymałościowych wymagane jest określenie optymalnych prędkości roboczych narzędzia. Zbyt duży posuw narzędzia jest niekorzystny ze względu na formowanie się pustki w obszarze złącza; zbyt duża prędkość obrotowa narzędzia jest niekorzystna ze względu na wzrost temperatury i przegrzewanie obszaru złącza. Struktura i właściwości zgrzeiny FSW nie są symetryczne względem linii złącza; występują różnice pomiędzy właściwościami obszaru ruchu wirowego narzędzia zgodnego i przeciwnego do ruchu posuwowego.

The experimental results show a good efficiency of friction stir welding of 2024 and AZ31 alloys thin sheets. The good quality and high strength joints can be obtained when optimal velocities of welding tool are determined. Too large velocity of the tool can cause formation of a void in the joint area, too large rotational speed can be the reason of temperature increase and overheating the joint zone. The structure and properties of FSW joint are not symmetrical according to welding line; there are differences between advancing and retreating sides of the joint.

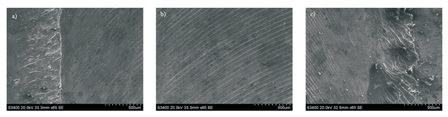
Wyniki badań
Results

Wykonanie badań mikrostruktury strefy połączenia blach w wyniku zgrzewania tarciowego z przemieszaniem

Materiał do badań: stop aluminium 2024 (4 Cu;1.3 Mg;0.2 Fe;0.1Si;0.05Cr;0.04Zn;0.14Ti;osnowa Al) – parametry procesu 1120/71 oraz stop magnezu AZ31 (4Al;1.2Zn;0.4Mn;0.05Cu;0.02Ni;0.01Fe;0.04Si;osnowa Mg) – parametry procesu 1600/100 i 2240/140, temperatura ~260 °C.
Makrostruktura: W przypadku obu stopów obszar połączenia zgrzewanego od strony „lica" jest jednorodny, ma wygląd regularnych, równomiernie rozmieszczonych, półkolistych linii tzw. onion rings (rys.1a,2)

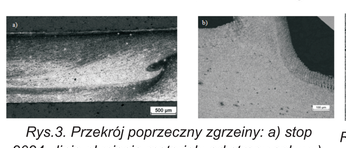


Rys.1. Wygląd zgrzeiny – stop 2024: a) od strony „lica" oraz b) od strony „grani" – strzałka wskazuje stronę spływu (większa wypływka), LM, pow. 4x

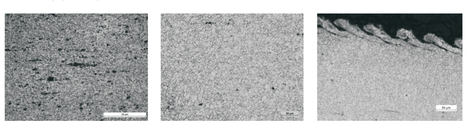


Rys.2. Powierzchnia zgrzeiny – stop AZ31: a) krawędź od strony natarcia, b) strefa środkowa (onion rings) i c) krawędź od strony spływu SEM, pow.65x

Mikrostruktura: Obszar granicy zgrzeina/stop charakteryzuje się obecnością linii płynięcia – efekt odkształcenia plastycznego (rys.3). Linie płynięcia od strony spływu są bardziej intensywne w porównaniu do innych obszarów, co wskazuje na niejednorodne odkształcenie plastyczne stopu w procesie zgrzewania. Morfologia składników mikrostruktury stopu 2024 w obszarze zgrzeiny nie uległa istotnym zmianom, jedynie w obszarze przypowierzchniowym widoczne są nieznaczne zmiany polegające na rozdrobnieniu cząsteczek fazy międzymetalicznej (Cu,Fe,Mn)Al6. W stopie AZ31 w obszarze zgrzeiny wykonanej przy zastosowaniu parametrów 1600/100 występują wady wewnętrzne o wyglądzie rozerwania (tearing), które powstały podczas procesu zgrzewania. Obecności tego typu wad nie zaobserwowano dla zgrzeiny wykonanej przy zastosowaniu parametrów 2240/140. Mikrostruktura stopu AZ31, zarówno w obszarze zgrzeiny, jak i w obszarze blach, jest jednorodna, nie stwierdzono jakichkolwiek zmian morfologii jej składników, które mogłyby zostać spowodowane procesem zgrzewania (rys.4).

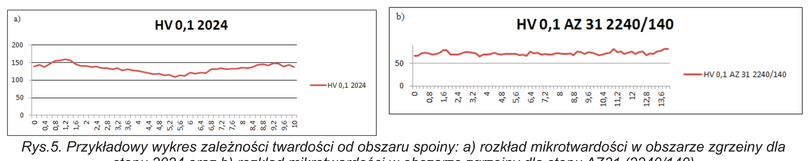


Rys.3. Przekrój poprzeczny zgrzeiny: a) stop 2024– linie płynięcia materiału od strony spływu), LM, pow. 25x.
b) stop AZ31 – obszar granicy zgrzeina–blacha od strony spływu, LM, pow. 200x



Rys.4. Mikrostruktura zgrzeiny: a) stop 2024, LM pow.1000, b) stop AZ31 – równoosiowe, drobne ziarna, LM, pow. 400x, c) stop AZ31 – krawędź zgrzeiny od strony „lica", LM, pow. 400x

Twardość: Wyniki pomiarów mikrotwardości obszaru zgrzewanego, w przypadku obu stopów i wszystkich zastosowanych parametrów procesu, wykazują brak gradientu twardości w obszarach zgrzeiny, strefy wpływu ciepła oraz materiału rodzimego, co świadczy o łagodnym i analogicznym po obu stronach zgrzeiny, charakterze przejścia obszaru zgrzeiny w materiał podstawowy (rys.5).



Rys.5. Przykładowy wykres zależności twardości od obszaru spoiny: a) rozkład mikrotwardości w obszarze zgrzeiny dla stopu 2024 oraz b) rozkład mikrotwardości w obszarze zgrzeiny dla stopu AZ31 (2240/140)

Wnioski
Conclusions

Właściwości wytrzymałościowe: Wszystkie próbki poddane badaniom właściwości wytrzymałościowych – próbie statycznej rozciągania – uległy zerwaniu w obszarze zgrzeiny. Uzyskano niższe właściwości wytrzymałościowe oraz plastyczne zgrzeiny w stosunku do materiału rodzimego.

Wyniki badań
Results

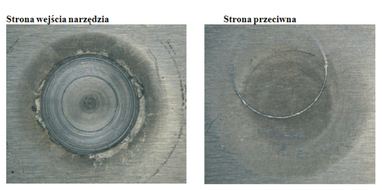
Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych. Wykonanie badań mikrostruktury strefy połączenia blach w wyniku zgrzewania punktowego

Materiał do badań: 9 próbek uzyskanych w wyniku zgrzewania punktowego blach o grubości 2 mm oraz 0,6 mm ze stopu aluminium 6061 (0.6Mg;1Mg;0.1Mn;0.25Cu;0.5Fe;0.25Zn;0.1Cr;0.15Ti; osnowa Al) w stanie T6 obróbki cieplnej. Proces zgrzewania prowadzono przy różnych parametrach (tab.1).

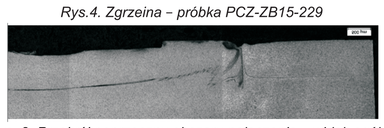
Tabela 1. Parametry prowadzenia procesu spajania metodą zgrzewania punktowego

Prędkość narzędzia, obr./min.	Czas wejścia/wyjścia narzędzia, s		
	0.5/0.3	0.7/0.5	1.0/0.8
1500	PCZ-ZB15-229	PCZ-ZB15-230	PCZ-ZB15-231
2000	PCZ-ZB15-232	PCZ-ZB15-233	PCZ-ZB15-234
2500	PCZ-ZB15-235	PCZ-ZB15-236	PCZ-ZB15-237

Makrostruktura: Nie zaobserwowano różnicy w wyglądzie połączenia w zależności od zastosowanych parametrów zgrzewania – wszystkie próbki mają podobny wygląd: obszar zgrzeiny posiada okrągły kształt wynikający z kształtu narzędzia, powierzchnia wokół „śladu narzędzia" jest ciemniejsza od pozostałego obszaru i tworzy ciemnoszary pierścień – strefę wpływu ciepła (rys.1). Nie stwierdzono również różnicy w budowie połączenia – w przypadku każdej z badanych próbek zgrzeina posiada charakterystyczny kształt „łódki" z widocznymi liniami płynięcia. Zarówno w obszarze zgrzeiny jak również w strefie wpływu ciepła nie zaobserwowano występowania jakichkolwiek wad typu pęcherze lub inne nieciągłości (rys.2).

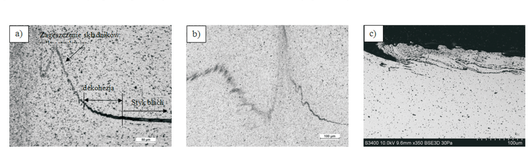


Rys.4. Zgrzeina – próbka PCZ-ZB15-229

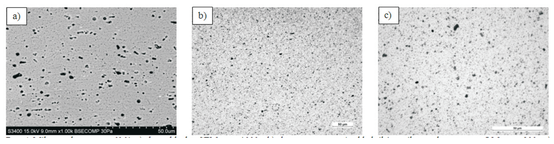


Rys. 2. Przekrój poprzeczny obszaru połączenia – widok ogólny charakterystyczny dla każdej badanej próbki

Mikrostruktura: w obszarze zgrzeiny występuje nieduży obszar dekohezji stopu (rys.3a) zlokalizowany od strony średnicy zewnętrznej (rys.2 – kółka). W obszarach sąsiadujących bezpośrednio z obszarami występowania dekohezji zaobserwowano nieznaczne skupienie/zagęszczenie wydzieleń faz międzymetalicznych – składników mikrostruktury. Spowodowało to wystąpienie nieciągłości mikrostruktury (rys.3b). Dokładne obserwacje mikroskopowe wykazały, że obszar dekohezji to obszar braku spójności zgrzeiny – niepełne zgrzanie, w którym „zamknięte" zostały tlenki pochodzące z powierzchni blach, natomiast obszar występowania niejednorodności mikrostruktury odpowiada wystąpieniu pasm płynięcia materiału. Pasma płynięcia stopu widoczne są również w obszarze brzegowym zgrzeiny w osi jądra – miejsce styku z narzędziem (rys.3c). Zarówno w obszarze zgrzeiny jak i w strefie wpływu ciepła brak jest jakichkolwiek zmian mikrostruktury stopu, które polegałyby na zmianie rodzaju wydzielających się w stopie faz. Wystąpiło natomiast zjawisko ujednorodnienia stopu w tych obszarach polegające na zaniku pasmowości mikrostruktury i równomiernym (poza pasmami płynięcia) rozłożeniu faz (rys.4).

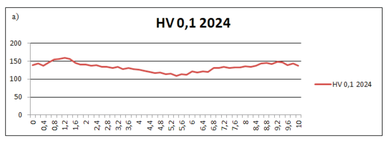


Rys. 3. Przekrój poprzeczny zgrzeiny: a) obszar dekohezji stopu, LM, pow.300x, b) obszar zagęszczenia składników mikrostruktury stopu tworzących nieciągłość mikrostrukturalną, LM,pow.150x, c) pasma płynięcia w obszarze brzegowym zgrzeiny, SEM, pow.350x



Rys. 4. Mikrostruktura stopu 6061: a) obszar blachy, SEM, pow.1000x, b) obszar zagęszczenia składników mikrostruktury stopu, LM, pow.300x c) strefa wpływu ciepła, LM, pow.800x,

Twardość: Wyniki pomiarów mikrotwardości obszaru wskazują na łagodny i analogiczny po obu stronach zgrzeiny charakter przejścia obszaru zgrzeiny w materiał podstawowy. Twardość stopu wynosi ok. 80 HV0.1, twardość w obszarze granicy zgrzeina/materiał



Rys.5. Przykładowy wykres zależności twardości od obszaru spoiny – rozkład mikrotwardości w obszarze zgrzeiny dla stopu

Wnioski
Conclusions

Bez względu na zastosowane parametry procesu zgrzewania uzyskano efekt trwałego połączenia blach. Proces zgrzewania nie spowodował zmian mikrostruktury stopu polegających na zmianie rodzaju wydzielających się faz, zarówno w obszarze zgrzeiny jak i w strefie wpływu ciepła. Spowodował jedynie zmianę morfologii składników mikrostruktury, nie ma to jednak istotnego wpływu na właściwości połączenia blach. Wewnątrz zgrzeiny w obszarze odpowiadającym jej średnicy zewnętrznej, w przypadku większości próbek, zaobserwowano zjawisko dekohezji stopu, spowodowane najprawdopodobniej pękaniem zgrzeiny. Obecność tych pęknięć będzie szczególnie niekorzystna dla elementów pracujących w warunkach naprężeń zmiennych, gdyż będą to obszary inicjowania pęknięć zmęczeniowych.

Wskaźniki realizacji celów projektu
Indicators of the project

Prace mgr, dr, hab..

Prace magiserskie

- Łukasz Micał: ***Analiza procesu zgrzewania tarciowego z przemieszaniem lotniczego stopu aluminium 2024*** Promotor : dr hab. inż. Tadeusz Balawender
- Bartłomiej Michna: ***Analiza procesu zgrzewania tarciowego z przemieszaniem lotniczego stopu magnezu AZ31,*** Promotor : dr hab. inż. Tadeusz Balawender

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO