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 ROCZNA
Projektu Kluczowego
12-13 Grudnia 2011

ZB 9

Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych w tym materiały typu Glare
Composite metallic materials in aviation applications (including Glare-type materials)

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska, Instytut Lotnictwa w Warszawie
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań
Results

Wykorzystanie kompozytów metalowych oraz ceramiczno metalowych na elementy lotnicze

Ze względu na uzyskanie odpowiednich dla przewidywanego zastosowania własności użytkowych odlewów szkieletowych podjęto próbę opracowania technologii wytwarzania odlewów szkieletowych na bazie kompozytu z osnową AlSi oraz fazami międzymetalicznymi, pełniącymi rolę umocnienia. Fazy takie dają dodatkowo możliwość stosowania obróbki cieplnej (utwardzanie wydzieleniowe), poprawiającej wybrane własności mechaniczne kompozytu.

Using of metal matrix composites reinforced with ceramic *particles* for aircraft elements

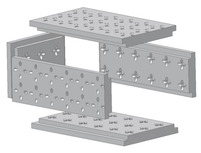
To obtaining appropriate operating properties of skeleton castings for the intended use an attempt was made to develop technology for the production of castings based on the AlSi matrix composite with intermetallic phases, used as the reinforcement. Such phases give an additional possibility of using heat treatment (precipitation hardening), improving the mechanical properties of selected composite.

W ramach badań zaplanowano następujące czynności:

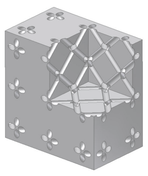
1. Przygotowanie stanowiska do wytwarzania kompozytowych odlewów szkieletowych
2. Zaprojektowanie kompozytu w zakresie udziału faz umacniających w oparciu o analizę numeryczną z uwzględnieniem obróbki cieplnej
3. Wytworzenie odlewów kompozytowych oraz analizę procesu krystalizacji i krzepnięcia w oparciu o analizę termiczną i derywacyjną
4. Przeprowadzenie zabiegów obróbki cieplnej
5. Przeprowadzenia badań udarności dla stopu w stanie surowym oraz po obróbce cieplnej.

1. Opracowane stanowisko do wytwarzania kompozytowych odlewów szkieletowych obejmuje następujące elementy:

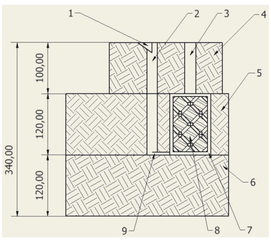
Etapy realizacji cyklu technologicznego wytwarzania odlewów szkieletowych przedstawia rys.1.



1. Rdzennica wykonana z płyt stalowych. Służy to wytworzenia rdzenia odlewu szkieletowego, którego komórka elementarna ma kształt osmiościanu foremnego.
1. Steel plate core box, used for preparation of core with octahedron shape single cell.

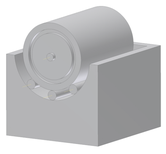


2. Półprzekrój gotowego ceramicznego rdzenia odlewu szkieletowego o komórce elementarnej w kształcie osmiościanu formenego.
2. Model of the ceramic core.

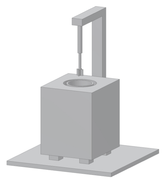


3. Wykonanie formy piaskowej zgodnie z rysunkiem
3. Sand mould preparation.

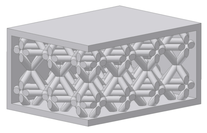
4. Piec do obróbki cieplnej. Wygrzewanie formy przed zalaniem.
4. Electric furnace for sand mould pre-heating.



5. Młynek kulowy. Przygotowanie materiałów wsadowych, w tym przygotowanie cząstek wzmacniających w młynku kulowym.
5. Ball mill for reinforcing phase preparation



6. Piec indukcyjny z mieszadłem mechanicznym. Przygotowanie kąpieli metalowej, uzupełnionej cząstkami wzmacniającymi. Użycie mieszadła mechanicznego w celu zniwelowania zjawisk segregacji cząstek wzmacniających. Zalanie wcześniej przygotowanej formy
6. Inductive furnace with mechanical stirring for liquid dispersion preparation. Mechanical stirring is used for uniform sdistribution of reinforcing particles. After preparation of the liquid dispersion the sand mould is poured.



7. Kompozytowy odlew szkieletowy o komórce elementarnej w kształcie ośmiościanu foremnego.
7. Composite skeleton casting with octahedron single cell.

8. Piec do obróbki cieplnej odlewów szkieletowych.
8. Electrical furnace for heat treatment operation of composite skeleton castings

Rys. 1. Etapy realizacji cyklu technologicznego wytwarzania odlewów szkieletowych
Fig. 1. Stages of the technological cycle of the composite skeleton castings

2. Zaprojektowanie kompozytu w zakresie udziału faz umacniających w oparciu o analizę numeryczną z uwzględnieniem obróbki cieplnej

W analizach numerycznych posłużono się oprogramowaniem Thermocalc umożliwiającym obliczenia termodynamiczne stopów wieloskładnikowych – wielofazowych. W trakcie analiz wykonano obliczenia dla trzech stopów aluminium z dodatkiem, odpowiednio 5, 7.5 i 10% masy stopu wstępnego na bazie kobaltu CoCr27Mo6C4Ni. Obliczenia numeryczne opracowane były dla warunków równowagowych i miały na celu określenie składników fazowych w funkcji temperatury, jak również określenie składu chemicznego poszczególnych składników strukturalnych. Opis procesu krystalizacji przedstawiono w tabelach 1 – 3.

Tabela 1. Opis procesu krystalizacji i struktury stopu Al + 5% CoCrMoCNi
Table 1. Crystallization process description for Al + 5% CoCrMoCNi

L.p.	T °C	skład fazowy lub przemiana	faza ciekła %	ilość poszczególnych faz, %				
				MoC	$Al_{13}Cr_2$	α	Al_3Ni	$Al_{11}Cr_2$
1	1030, T_L	L + MoC	100	0	0	0	0	0
2	735	L + MoC + $Al_{13}Cr_2$	99.8	0.2	0	0	0	0
3	670	L + MoC + $Al_{13}Cr_2$ + α	95.8	0.2	4	0	0	0
4	660, T_S	stan stały	0	0	1	99	0	0
5	560	MoC + $Al_{13}Cr_2$ + α	0	0	3	97	0	0
	460	MoC+ $Al_{13}Cr_2$ + α +Al_3Ni	0	0.2	4.2	95.6	0	0
6	70	$Al_{13}Cr_2$ → $Al_{11}Cr_2$	0	0.2	5.5	94.2	0.1	0
7	20	struktura w temp. ot.	0	0.2	0	95	0.1	4.7

T_L – temperatura likwidus, T_S – temperatura solidus

Tabela 2. Opis procesu krystalizacji i struktury stopu Al + 7.5% CoCrMoCNi
Table 2. Crystallization process description for Al + 7.5% CoCrMoCNi

L.p.	T °C	skład fazowy lub przemiana	faza ciekła %	ilość poszczególnych faz, %				
				MoC	$Al_{13}Cr_2$	α	Al_3Ni	$Al_{11}Cr_2$
1	1085, T_L	L + MoC	100	0	0	0	0	0
2	755	L + MoC + $Al_{11}Cr_2$	99.7	0.3	0	0	0	0
3	735	L + MoC + $Al_{13}Cr_2$	97.7	0.3	0	0	0	2
4	670	L + MoC + $Al_{13}Cr_2$ + α	93.2	0.3	6.5	0	0	0
5	660, T_S	stan stały	0	0.2	3.7	96.1	0	0
	470	MoC+ $Al_{13}Cr_2$ + α +Al_3Ni	0	0.3	7	92.7	0	0
6	90	$Al_{13}Cr_2$ → $Al_{11}Cr_2$	0	0.3	8.2	91.3	0.2	0
7	20	struktura w temp. ot.	0	0.3	0	92.4	0.2	7.1

T_L – temperatura likwidus, T_S – temperatura solidus

Tabela 3. Opis procesu krystalizacji i struktury stopu Al + 10% CoCrMoCNi
Table 3. Crystallization process description for Al + 10% CoCrMoCNi

L.p.	T °C	skład fazowy lub przemiana	faza ciekła %	ilość poszczególnych faz, %				
				MoC	$Al_{13}Cr_2$	α	Al_3Ni	$Al_{11}Cr_2$
1	1130, T_L	L + MoC	100	0	0	0	0	0
2	780	L + MoC + $Al_{11}Cr_2$	99.6	0.4	0	0	0	0
3	735	L + MoC + $Al_{13}Cr_2$	94.1	0.4	0	0	0	5.5
4	670	L + MoC + $Al_{13}Cr_2$ + α	90.6	0.4	9	0	0	0
5	660, T_S	stan stały	0	0.3	6.5	93.2	0	0
	480	MoC+ $Al_{13}Cr_2$ + α +Al_3Ni	0	0.4	9.5	90.1	0	0
6	120	$Al_{13}Cr_2$ → $Al_{11}Cr_2$	0	0.4	11	88.3	0.3	0
7	20	struktura w temp. ot.	0	0.4	0	89.8	0.3	9.5

T_L – temperatura likwidus, T_S – temperatura solidus

Tabela 4. Udział masowy pierwiastków w poszczególnych składnikach strukturalnych stopu Al + 10% CoCrMoCNi
Table 4. Chemical composition of phases precipitating for Al + 10% CoCrMoCNi

faza	udział masowy pierwiastka, % mas.					
	Al	Co	Cr	Mo	C	Ni
MoC	0	0	0	89	11	0
$Al_{13}Cr_2$	77	0	23	0	0	0
α (sieć A1)	82 – 92	6.7 – 13	0 – 4.7	0 – 0.2	0.3	0 – 0.1
Al_3Ni	58	0	0	0	0	42
$Al_{11}Cr_2$	74	0	26	0	0	0

Skład chemiczny faz dla stopu Al + 10% CoCrMoCNi przedstawiono w tabeli 4.

Przedstawione wyniki umożliwiły opis przemian fazowych zachodzących w trakcie krystalizacji wieloskładnikowych stopów aluminium z dodatkiem kobaltu, chromu, molibdenu, węgla i niklu. Uzyskane wyniki pozwoliły wstępnie określić niektóre parametry zabiegów obróbki cieplnej mających na celu poprawę własności stopu, wykorzystanego docelowo jako osnowa kompozytu odlewanego z fazami międzymetalicznymi (węglikowymi).

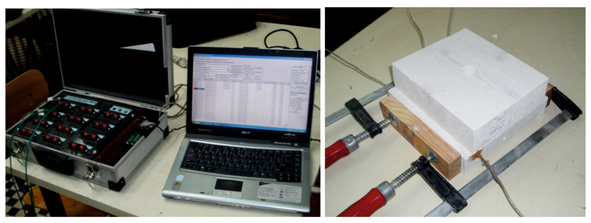
2. Wytworzenie odlewów kompozytowych oraz analizę procesu krystalizacji i krzepnięcia w oparciu o analizę termiczną i derywacyjną

W trakcie badań doświadczalnych przeprowadzono wytopy dla stopu AlSi11 z dodatkiem faz umacniających w ilości 0%, 5% oraz 10% masy. Stop odlewany był do form ceramicznych wykonanych z materiały termoizolacyjnego stosowanego na rdzeń odlewów szkieletowych. W planie eksperymentu, którego schemat zawiera tabela 5, przewidziano również zabiegi obróbki cieplnej.

Tabela 5. Plan badań eksperymentalnych
Table 5. Plan of the experimental studies

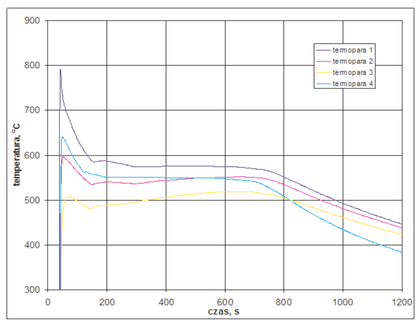
ilość dodatku umacniającego, %	stan surowy	przesycanie	przesycanie+starzenie
0	x	x	x
5	x	x	x
10	x	x	x

Do oceny procesu krystalizacji wytwarzanego kompozytu użyto analizy termicznej i derywacyjnej ATD. Temperatura rejestrowana była w kilku punktach pomiarowych. Schemat stanowiska przedstawia rys. 2

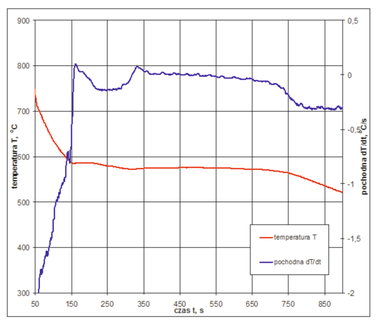


Rys. 2. Elementy stanowiska do badań ATD, po lewej przetwornik analogowo-cyfrowy, wielokanałowy oraz komputer klasy PC, po prawej złożony próbnik ceramiczny z umieszczonymi wewnątrz termoparami
Fig. 2. The experimental stand for thermal and derivative analysis (TDA), on the left: the A/C converter and PC computer, on the right the ceramic probe with four thermocouples inside

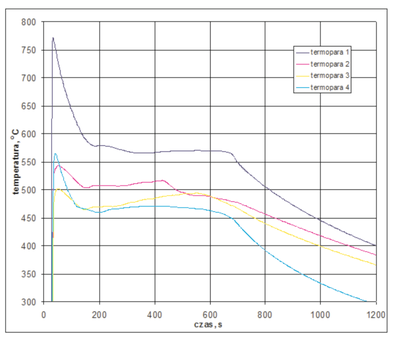
W trakcie analizy procesu rejestrowano przebieg krzywych stygnięcia i krystalizacji w funkcji czasu, których przebiegi dla stopu AlSi11 oraz kompozytu AlSi11+5% cząstek CoCrMoCNi przedstawiono na rysunkach 3 – 6. Zebranie tych danych umożliwiło porównanie parametrów krzywych ATD w zależności od zawartości fazy umacniającej. Punkty pomiarowe były rozmieszczone w odlewie w centrum cieplnym odlewu (termopara 1) oraz w punktach rozmieszczonych w kierunku krawędzi odlewu, co umożliwia wyznaczenie gradientu temperatury, występującego w trakcie krzepnięcia odlewu.



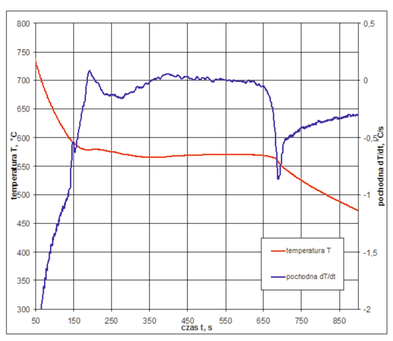
Rys. 3. Przebieg krzywych stygnięcia (ATD) w funkcji czasu dla odlewu AlSi11 bez dodatku umacniającego
Fig. 3. Cooling curves (TDA) in fuction of time for AlSi11 casting without reinforcing phase addition



Rys. 4. Przebieg krzywych stygnięcia i krystalizacji (ATD) w funkcji czasu dla odlewu AlSi11 bez dodatku umacniającego
Fig. 4. Cooling and crystallization curves (TDA) in function of time for AlSi11 casting without reinforcing phase addition



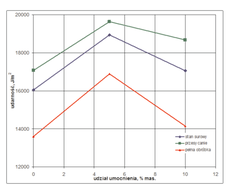
Rys.5. Przebieg krzywych stygnięcia (ATD) w funkcji czasu dla odlewu AlSi11 + 5% dodatku umacniającego
Fig. 5. Cooling curves (TDA) in function of time for AlSi11 casting with 5% of reinforcing phase addition



Rys. 6. Przebieg krzywych stygnięcia i krystalizacji (ATD) w funkcji czasu dla odlewu AlSi11 + 5% dodatku umacniającego
Fig.6. Cooling and crystallization curves (TDA) in function of time for AlSi11 casting with 5% of reinforcing phase addition

2. Przeprowadzenie zabiegów obróbki cieplnej

Uzyskany odlew podzielono na części i poddano różnym zabiegom obróbki cieplnej (przesycanie, przesycanie + starzenie). Następnie przeprowadzono badania udarności dla próbek po wymienionych zabiegach oraz dla stanu surowego. Wyniki z serii pomiarów uśredniono i zestawiono na wykresie w funkcji udziału fazy umacniającej (rys. 6). Najlepsze rezultaty uzyskano dla stopu z 5% dodatkiem fazy umacniającej w stanie po przesycaniu.



Rys. 7. Zależność między udziałem fazy umacniającej (%mas.) a udarnością (J/m²) dla przebadanych próbek po różnych zabiegach obróbki cieplnej
Fig. 7. Impact strength (J/m²) in function of reinforcing phase content (%mas.) for examined samples after different heat treatment operations and in as-cast state

Wnioski
Conclusions

Przeprowadzone badania potwierdziły słuszność przyjętych założeń. Uzyskany kompozyt wykazał zwiększone własności użykowe oraz możliwość dalszej ich poprawy poprzez odpowiednie zabiegi obróbki cieplnej. Przeprowadzone w trakcie analiz badania procesu krystalizacji pozwoliły zebrać obszerny zbiór danych w zakresie oddziaływania faz międzymetalicznych wprowadzanych ex situ do stopu na proces krystalizacji osnowy. Dane te będą wykorzystane w dalszej części badań.

Conducted studies confirmed the validity of the assumptions. The resulting composite showed increased operating properties and the ability to further improve them by suitable heat treatment procedures. Crystallization process analysis carried out during the solidification of casting allowed collection of comprehensive data set on the effect of intermetallic phases, introduced ex situ, on crystallization process of alloy matrix. These data will be used in the further studies

Wyniki badań
Results

Badania pochłaniania dźwięku przez ceramiczne materiały porowate
Acoustic absorption measurements of porous ceramic materials

Próbki ceramiki wykonanej z tlenku glinu Al2O3 przebadano pod względem współczynnika pochłaniania dźwięku, stosując tzw. dwu-mikrofonową metodę funkcji przejścia. Bezpośrednim celem badania było sprawdzenie jaka porowatość ceramiki korundowej zapewnia dobrą dźwiękochłonność oraz czy uzyskiwane wyniki pomiarów mogą stanowić podstawę do dalszych badań fundamentalnych dotyczących projektowania materiałów tłumiących hałas, w tym do walidacji modelowania typu mikro-struktura–makro-własności, co wymaga wytwarzania próbek o w miarę regularnej i podobnej mikro-morfologii.

Acoustic absorption coefficient of Al2O3 ceramic samples was measured using the so-called two-microphone transfer function method. The main purpose was to assess which porosity of corundum ceramic ensures good acoustic absorption and whether the morphology, regularity and general quality of samples ensures repeatability of measurements so that the results could be used for validation of micro-to-macro modelling (the so-called „bottoms-up" approach) necessary for further fundamental research concerning design of excellent noise insulating materials for aircraft industry.

Próbki ceramicznych materiałów porowatych
Porous ceramic samples

Wykonano 8 próbek ceramiki korundowej (rys.1) o porowatościach 90%, 89,5%, 88% i 72% (Politechnika Rzeszowska). Próbki przystosowano do badań w tubie impedancyjnej (IPPT PAN). Średnica próbek wynosi 29 mm; inne, istotne cechy próbek prezentuje Tabela 1

Rys.1: Próbki korundowej ceramiki porowatej
Fig.1: Porous corundum ceramic samples

Tabela 1: Cechy próbek ceramiki porowatej
Table 1: Properties of porous ceramic samples

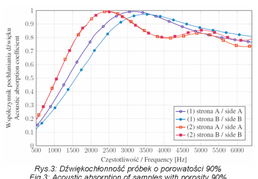
Nr No.	Oznaczenie Symbol	Porowatość Porosity	Wysokość Height
1	p90h18	90%	18 mm
2	p90h24	90%	24 mm
3	p88h14	88%	14 mm
4	p88h17	88%	16,5 mm
5	p72h16	72%	16 mm
6	p72h22	72%	22 mm
7	p89h18	89,5%	18 mm
8	p89h20	89,5%	22 mm

System pomiarowy do badania dźwiękochłonności materiałów
System for measurements of acoustic absorption of materials

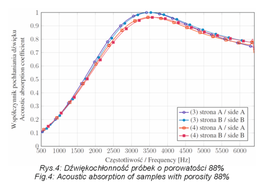
Rysunek 2 prezentuje system pomiarowy wykorzystany do badania dźwiękochłonności próbek ceramicznych, składający się z:
(a) zestawu tuby impedancyjnej (wraz z głośnikiem) firmy Brüel&Kjaer,
(b) dwóch wysokiej klasy mikrofonów 1/4-cala firmy Brüel&Kjaer,
(c) siedmio-kanałowego analizatora sygnałów PULSE firmy Brüel&Kjaer,
(d) generatora sygnału,
(e) dwóch wzmacniacze oraz oscyloskopu.

Rys.2: System pomiarowy dwu-mikrofonowa metoda funkcji przejścia
Fig.2: Measurement system for the two-microphone transfer function method

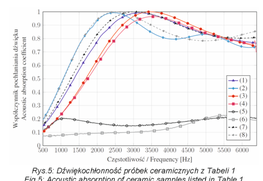
Rysunki 3-5 prezentują krzywe absorpcji otrzymane dla próbek ceramiki korundowej, przy czym rys.3 i 4 pokazują (względną) niezależność absorpcji od tego, z której strony pada fala na próbki o porowatościach 90% i 88%, natomiast rys.5 porównuje dźwiękochłonność wszystkich próbek ceramicznych wykazanych w Tabeli 1. Można stwierdzić, że próbki o porowatości 88-90% charakteryzuje otwarta struktura porów i bardzo dobra absorpcja akustyczna, w częstotliwościach zwłaszcza powyżej 1500 Hz. Ceramika o mniejszej porowatości (72%) jest w dużej mierze materiałem o porach zamkniętych i posiada bardzo słabą zdolność do pochłaniania dźwięku.



Rys.3: Dźwiękochłonność próbek o porowatości 90%
Fig.3: Acoustic absorption of samples with porosity 90%



Rys.4: Dźwiękochłonność próbek o porowatości 88%
Fig.4: Acoustic absorption of samples with porosity 88%



Rys.5: Dźwiękochłonność próbek ceramicznych z Tabeli 1
Fig.5: Acoustic absorption of ceramic samples listed in Table 1

Wnioski
Conclusions

Ceramika Al2O3 o porowatościach bliskich 90% ma otwartą strukturę porów i znakomite własności dźwiękochłonne; mniejsza porowatość (ok.70%) to w dużej mierze zamknięte pory i mierna absorpcja akustyczna. Stosowany proces wytwarzania ceramiki korundowej pozwala na uzyskiwanie próbek ceramicznych o powtarzalnej morfologii, czyli próbek nie tylko o podobnej porowatości, lecz najpewniej również o podobnej przepuszczalności i parametrach mikro-strukturalnych, takich jak charakterystyczne rozmiary porów i ich uśredniona krętość. Makroskopowo, próbki posiadają wystarczająco jednorodną strukturę, co wraz z powtarzalną mikro-morfologią pozwala na przeprowadzanie weryfikowalnych badań eksperymentalnych o bardzo dobrej zgodności. Prezentowane krzywe współczynnika pochłaniania dźwięku, jak również możliwe do uzyskania inne wyniki eksperymentalne (np. krzywe impedancji akustycznej) mogą posłużyć rozwijaniu i walidacji zaawansowanego, mikro-strukturalnego modelowania propagacji i dysypacji fal akustycznych w materiałach porowatych o sztywnym szkielecie.

Al2O3 ceramics with porosity app. 90% means open-cell microstructure and excellent acoustic absorption; less porous ceramics (app. 70%) are characterised by closed pores and poor absorption. Ceramic samples of similar porosity are possibly also similar with respect to their micro-morphology, that is, should have similar permeability and some microstructural parameters like certain characteristic sizes of pores and their average tortuosity. From the macroscopic point of view, the ceramic samples are sufficiently homogeneous which (together with their reproducible micro-morphology) permits to carry out experiments giving consistent results (of acoustic impedance, absorption, etc.) suitable for validation of advanced, micro-to-macro modelling of acoustic wave propagation and dissipation in porous materials with rigid frame.

Wskaźniki realizacji celów projektu
Indicators of the project

Publikacje

1. Zielinski T.G.: "Numerical investigation of active porous composites with enhanced acoustic absorption". *Journal of Sound and Vibration*, Vol.330, No.22, pp.5292-5308, 2011.

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ UNIĘ EUROPEJSKĄ ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU REGIONALNEGO