



POLISH ACADEMY OF SCIENCES - COMMITTEE OF MATERIALS SCIENCE  
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY OF GLIWICE  
INSTITUTE OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS  
ASSOCIATION OF ALUMNI OF SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Conference  
Proceedings

12th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE  
ACHIEVEMENTS IN MECHANICAL & MATERIALS ENGINEERING

Modelowanie własności mechanicznych stopu magnezu EN – MCMgAl9Zn1<sup>\*)</sup>

L.A. Dobrzański<sup>a</sup>, T. Tański<sup>a</sup>, W. Sitek<sup>a</sup>, L. Čížek<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Zakład Technologii Procesów Materiałowych i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie,  
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska  
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, Poland

<sup>b</sup>Faculty of Metallurgy and Material Engineering,  
VŠB-Technical University Ostrava  
17 listopadu, Ostrava-Poruba, CZ 708 33, Czech Republic

W pracy przedstawiono metodykę modelowania zależności między składem chemicznym a twardością i wytrzymałością na rozciąganie odlewniczego stopu magnezu EN – MCMgAl9Zn1. Bazując na wynikach doświadczalnych badań własności mechanicznych, opracowano i porównano modele sieci neuronowej i modele statystyczne umożliwiające obliczanie własności mechanicznych na podstawie składu chemicznego badanego stopu. Ponadto dokonano analizy zgodności wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi.

## 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach obserwuje się coraz większy wzrost zapotrzebowania na materiały o małej wadze i stosunkowo dużej wytrzymałości. Dążenie do obniżenia masy produktów staje się dużym wyzwaniem dla konstruktorów i technologów. Problem „martwej masy” w znacznym stopniu weryfikuje możliwości poszczególnych grup materiałów. Wybór materiału poprzedzony jest analizą wielu czynników obejmujących wymagania: mechaniczne, projektowe, środowiskowe, dotyczące recyklingu, kosztu, dostępności i masy.

Stopy magnezu, które z powodzeniem od dawna stosowane są w różnych gałęziach przemysłu wykazują połączenie niskiej gęstości i dużej wytrzymałości w stosunku do niewielkiej masy. Powyższe cechy, jak zarówno niska bezwładność w przeważającej mierze przyczyniły się do zastosowania stopów magnezu na szybko poruszające się elementy i w miejscach gdzie pojawiają się gwałtowne zmiany prędkości, czego bardzo dobrym przykładem mogą być koła samochodowe, tłoki silników spalinowych lub elementy wyposażenia samolotów[5]. Szeroka gama produkowanych obecnie stopów magnezu dostępnych na rynku odznacza się w dużej mierze wysoką wytrzymałością i ciągliwością.

---

<sup>\*)</sup> Autorzy uczestniczą w realizacji projektu CEEPUS No PL-013/03-04 kierowanego przez Prof. L.A. Dobrzańskiego.

Celem podjętych badań jest opracowanie modelu przydatnego do obliczania twardości oraz wytrzymałości na rozciąganie odlewniczego stopu magnezu EN – MCMgAl9Zn1 na podstawie składu chemicznego oraz dalszego jego wykorzystanie do analizy wpływu pierwiastków chemicznych, oraz ich kombinacji na wymienione własności.

## 2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Badania własności mechanicznych wykonano dla 279 wytopów odlewniczego stopu magnezu EN – MCMgAl9Zn1 wytworzonego przez ČKD Motory a.s. Hradec Králové w Czechach. Zakresy składów chemicznych stopów podano w tabelicy 1.

Tabelica 1.

Zakres stężeń masowych pierwiastków stopowych występujących w analizowanych stopach

Stężenie masowe pierwiastka, %													
	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Be	Ti	Zr	Sn	Ni	Pb	Ce
maks	7,070	0,569	0,158	0,018	0,001	0,0044	0,0	0,0	0,0001	0,000	0,0020	0,0	0,0
min	9,190	0,794	0,355	0,166	0,046	0,0257	0,0015	0,0079	0,0154	0,010	0,0697	0,072	0,003

Badania twardości 68 wytopów przeprowadzono na twardościomierzu typu Zwick ZHR 4150 TK, a badania wytrzymałości na rozciąganie 279 wytopów przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INOVA TSM 50. Wyniki tych badań wraz z odpowiednimi składami chemicznymi posłużyły do opracowania modeli umożliwiających obliczanie twardości i wytrzymałości na rozciąganie stopów EN – MCMgAl9Zn1 jedynie na podstawie składu chemicznego. Wykorzystano tutaj dwa podejścia. W pierwszym zastosowano klasyczną metodę regresji linowej do wyznaczenia modelu matematycznego. Zaznaczyć należy, że rozpatrzono kilkadziesiąt różnych postaci fenomenologicznych modelu, a dwa z nich o największej zgodności z danymi doświadczalnymi opisują odpowiednio równanie (1) dla twardości oraz równanie (2) dla wytrzymałości na rozciąganie. Wszystkie obliczenia wykonano w programie MS Excel. W drugim przypadku do modelowania własności zastosowano jednokierunkowe sieci neuronowe typu perceptron wielowarstwowy. Przeanalizowano szereg sieci neuronowych o strukturach 13-x-1 oraz 13-x-y-1, gdzie 13 neuronów wejściowych odpowiada kolejnym składnikom stopowym występującym w badanych stopach[1]. Należy zwrócić uwagę, że podstawowy składnik stopu Mg został pominięty, gdyż stanowi on dopełnienie do 100% stężenia masowego, a podanie jego stężenia nie stanowi w tym przypadku nowej informacji. X i y oznaczają odpowiednio liczbę neuronów w pierwszej warstwie ukrytej oraz liczbę neuronów w drugiej warstwie ukrytej (o ile występuje). Jeden neuron wyjściowy odpowiada wyznaczonej wartości twardości lub wytrzymałości na rozciąganie. Procedury uczenia, walidacji oraz testowania sieci neuronowych wykonano w programie Statistica Neural Network. Spośród opracowanych sieci najlepsze wyniki obliczeń uzyskano dla sieci o jednej warstwie ukrytej i strukturze dla twardości 3-20-1 i wytrzymałości na rozciąganie 13-7-1 i one zostały wykorzystane w dalszych obliczeniach.

$$H = a_0 + a_1 \cdot Al + a_2 \cdot Zn + a_3 \cdot Mn + a_4 \cdot Cu + a_5 \cdot Ni + a_6 \cdot Pb + a_7 \cdot Ce + a_8 \cdot Zr + a_9 \cdot Si + a_{10} \cdot \sqrt{(Al \cdot Zn \cdot Mn)} + a_{11} \cdot Zn \cdot Mn \cdot Ni + a_{12} \cdot Al \cdot Zn \cdot Mn + a_{13} \cdot \sqrt{Ni} + a_{14} \cdot \sqrt{Mn} + a_{15} \cdot \sqrt{Al} + a_{16} \cdot \sqrt{Zn} \quad (1)$$

$$R = a_0 + a_1 \cdot Al + a_2 \cdot Zn + a_3 \cdot Mn + a_4 \cdot Si + a_5 \cdot Cu + a_6 \cdot Fe + a_7 \cdot Be + a_8 \cdot Zr + a_9 \cdot Ni + a_{10} \cdot Al \cdot Zn \cdot Mn + a_{11} \cdot Al \cdot Zn \cdot Ni + a_{12} \cdot Al \cdot Mn \cdot Ni + a_{13} \cdot Zn \cdot Ni + a_{14} \cdot Al \cdot Zn + a_{15} \cdot Al \cdot Mn + a_{16} \cdot Zn \cdot Mn \quad (2)$$

gdzie: H – Twardość stopu EN – MCMgAl9Zn1,  
 R – Wytrzymałość na rozciąganie stopu EN – MCMgAl9Zn1,  
 %X – stężenie masowe odpowiedniego pierwiastka,  
 $a_i$  – stałe współczynniki wyznaczone metodą regresji podane w tablicach 2 i 3.

Tablica 2

Stale współczynniki wyznaczone metodą regresji dla twardości

Stale współczynniki								
$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
2908,16	16,7648	1434,887	2358,586	128,3778	-1760,01	1042,585	186,8859	-167,23
Stale współczynniki								
$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$a_{16}$	
-13,3692	1716,847	300,9453	-395,791	891,622	-4186,38	-421,929	-3446,66	

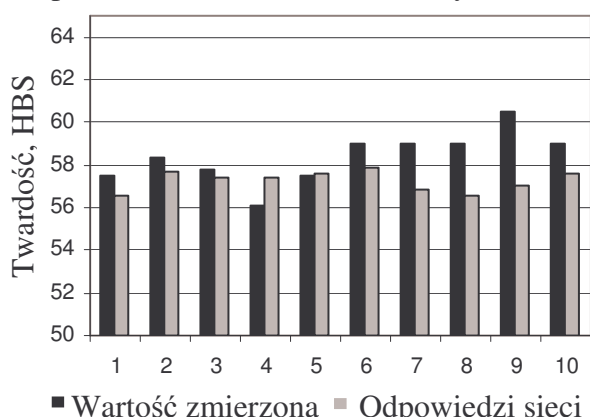
Tablica 3

Stale współczynniki wyznaczone metodą regresji dla wytrzymałości na rozciąganie

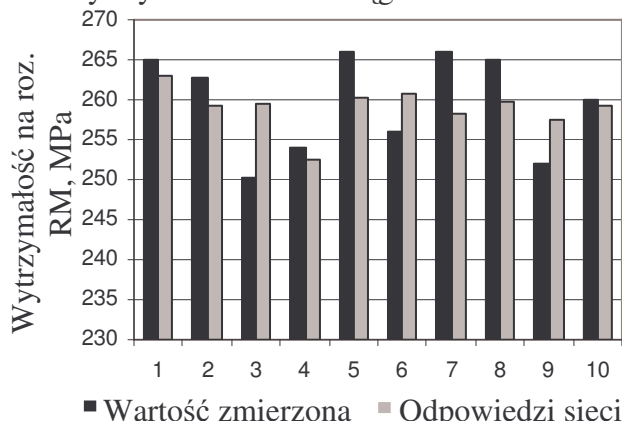
Stale współczynniki								
$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
1683,577	-142,925	-2026,1	-5339,8	-98,598	93,10807	183,2968	-2990,65	300,2996
Stale współczynniki								
$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$a_{16}$	
347,3877	-3138,07	7189,718	-422,278	209,1044	598,5075	6660,541	-770,189	

Opracowane modele matematyczne (1) i (2) oraz modele sieci neuronowych poddano weryfikacji, polegającej na porównaniu zgodności wyników obliczeń twardości oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zastosowaniu wymienionych modeli z wynikami badań eksperymentalnych. W przypadku modeli matematycznych średni błąd bezwzględny obliczeń wynosi 1,31 HBS w przypadku twardości (Rys.3) oraz 6,27 MPa dla wytrzymałości na rozciąganie (Rys.4). Średni błąd względny wynosi odpowiednio 2,28 % dla twardości i 2,42 % dla wytrzymałości. Natomiast dla modeli sieci neuronowych średni błąd bezwzględny obliczeń wynosi 1,39 HBS w przypadku twardości (Rys.1) oraz 6,56 MPa dla wytrzymałości na rozciąganie (Rys.2). Średni błąd względny wynosi odpowiednio 2,44 % dla twardości i 2,52 % dla wytrzymałości na rozciąganie [4].

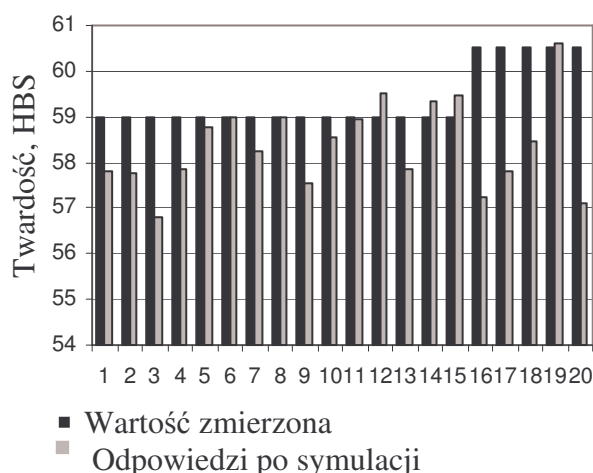
Uzyskane wyniki należy uznać za zadawalające, gdyż dokładność obliczeń jest zbliżona do powtarzalności metod badawczych twardości i wytrzymałości na rozciąganie.



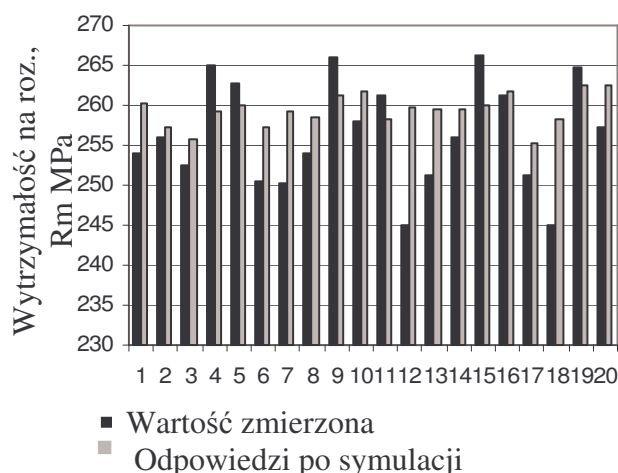
Rys. 1. Porównanie rzeczywistych i obliczonych wartości HBS (sieci neuronowe)



Rys. 2. Porównanie rzeczywistych i obliczonych wartości Rm (sieci neuronowe)



Rys. 3. Porównanie rzeczywistych i obliczonych wartości HBS (model matematyczny)



Rys. 4. Porównanie rzeczywistych i obliczonych wartości Rm (model matematyczny)

### 3. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono modele matematyczne oraz modele sieci neuronowych przydatne do przewidywania twardości i wytrzymałości na rozciąganie twardości i wytrzymałości na rozciąganie odlewniczego stopu magnezu EN – MCMgAl9Zn1. Uzyskane wyniki wskazują na dużą zgodność obliczeń, przy zastosowaniu opracowanych modeli wymienionych własności mechanicznych, z danymi doświadczalnymi. Pozwalają również stwierdzić przydatność sieci neuronowych i opracowanych modeli matematycznych do oceny wpływu pierwiastków stopowych na twardość i wytrzymałość stopu EN – MCMgAl9Zn1. Należy sądzić, że powiązanie obydwu metod doświadczalnych tj. analizy komputerowej i badań mechanicznych pozwoli na osiągnięcie szybszej optymalizacji składu chemicznego stopów, a co za tym idzie i ich własności.

### 4. LITERATURA

1. L.A. Dobrzański, J. Trzaska, R. Maniara, Proc. 10th Int. Sc. Conf. AMME'2001, Gliwice – Cracow – Zakopane, 2001, 175.
2. L.A. Dobrzański, J. Trzaska, K. Pozimska, Proc. 10th Int. Sc. Conf. AMME'2001, Gliwice – Cracow – Zakopane, 2001, 179.
3. L.A. Dobrzański, W. Sitek, A. Piętka, Proc. 11th Int. Sc. Conf. AMME'2002, Gliwice – Zakopane, 2002, 499.
4. W. Sitek, Proc. 11th Int. Sc. Conf. AMME'2002, Gliwice – Zakopane, 2002, 507.
5. L. Čížek, L. Pawlica, M. Greger, J. Pavelcová, T. Tański, Proc. 11th Int. Sc. Conf. AMME'2002, Gliwice – Zakopane, 2002, 47.