

# Zastosowanie magnetyków amorficznych do budowy magnetosprężystych sensorów sił rozciągających

Jacek Salach\*, Adam Bieńkowski\*, Roman Szewczyk\*\*,  
Dorota Jackiewicz\*, Piotr Fydrych\*, Aleksandra Kolano-Burian\*\*\*

\* Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej,

\*\* Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

\*\*\*Instytut Metali Nieżelaznych

**Streszczenie:** W referacie omówiono możliwości wykorzystania stopów amorficznych o składzie  $Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$  do budowy sensorów sił rozciągających. W opracowanych sensorach uzyskano równomierny rozkład naprężeń rozciągających działających w kierunku osi magnesowanego rdzenia pierścieniowego. Przedstawione wyniki wykazały wysoką czułość magnetosprężystą stopu o składzie  $Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$ , poddanego działaniu naprężeń rozciągających. Ponadto stwierdzono, że czułość magnetosprężysta rośnie w wyniku przeprowadzenia relaksacji termicznej - wyżarzania stopu amorficznego.

**Słowa kluczowe:** efekt magnetosprężysty, stopy amorficzne, naprężenia rozciągające

## 1. Wprowadzenie

Zjawisko magnetosprężyste, które związane ze zmianami wartości indukcji magnetycznej  $B$  w rdzeniu magnetycznym poddanym działaniu naprężeń  $\sigma$  od sił zewnętrznych, znajduje szerokie zastosowanie w konstrukcji czujników do pomiaru siły w zastosowaniach przemysłowych [1, 2, 3, 4]. Jednak stosowane do tej pory rozwiązania koncentrują się głównie na pomiarze sił ściskających [5] lub pomiarze niewielkich sił rozciągających działających w kierunku taśmy z magnetyka amorficznego [6].

Należy podkreślić, że czujniki magnetosprężyste nie wymagają stosowania pośredniego, mechanicznego elementu sprężystego, co jest konieczne np. w tensometrycznych przetwornikach sił. Magnetyczny rdzeń czujnika, czuły na naprężenia, może być równocześnie elementem konstrukcyjnym, co jest szczególnie korzystne w zastosowaniach przemysłowych, ponieważ upraszcza budowę oraz stwarza możliwość doboru zakresu mierzonych sił poprzez zmianę wymiarów geometrycznych rdzenia ferromagnetycznego [4].

Pomimo oczywistych zalet magnetosprężyste czujniki naprężeń rozciągających nie znalazły do tej pory szerszego zastosowania w warunkach praktycznych. Wynika to przede wszystkim z braku opisu łatwej do stosowania metodyki badania wpływu naprężeń rozciągających na charakterystyki magnesowania stopów amorficznych oraz z braku danych na temat tych charakterystyk, szczególnie w powiązaniu z procesem relaksacji termicznej stopów amorficznych.

Niniejszy referat jest próbą wypełnienia tej luki. Przedstawiono w nim zarówno dogodną w praktyce metodę zadawa-

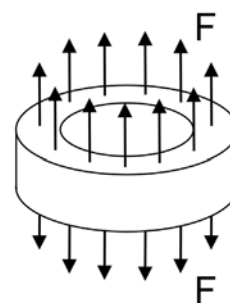
nia naprężeń rozciągających do rdzeni ze stopów amorficznych oraz wyniki badania wpływu naprężeń rozciągających na charakterystyki magnetyczne stopu amorficznego o składzie  $Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$  w różnych stadiach relaksacji termicznej.

## 2. Metodyka i przedmiot badań

Istotę opracowanej metodyki zadawania jednorodnych naprężeń do rdzeni ze stopów amorficznych przedstawiono schematycznie na rys. 1. Naprężenia rozciągające zadawane są do pierścieniowego rdzenia ze stopu amorficznego w kierunku jego tworzącej [7, 8]. W rezultacie wartość naprężeń efektywnych  $\sigma_{eff}$  oddziałujących na kształt charakterystyki magnesowania rdzenia może być wyznaczona z zależności [9]:

$$\sigma_{eff} = \sigma(\cos \varphi - \nu \sin \varphi) = -\nu \cdot \sigma \quad (1)$$

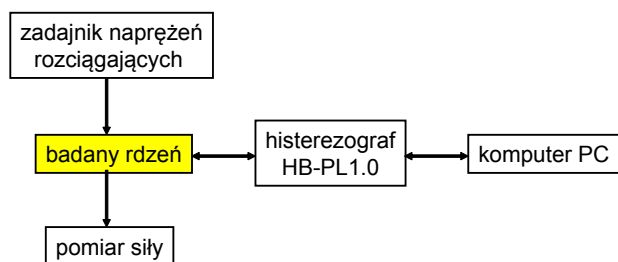
gdzie  $\nu$  - stała Poissona materiału,  $\varphi$  - kąt między kierunkiem naprężeń  $\sigma$  i kierunkiem pola magnesującego  $H$  (w rozpatrywanym przypadku  $\varphi = 90^\circ$ ),  $\sigma$  wartość naprężeń w kierunku tworzącej rdzenia pierścieniowego.



**Rys. 1.** Schemat metody zadawania jednorodnych naprężeń rozciągających

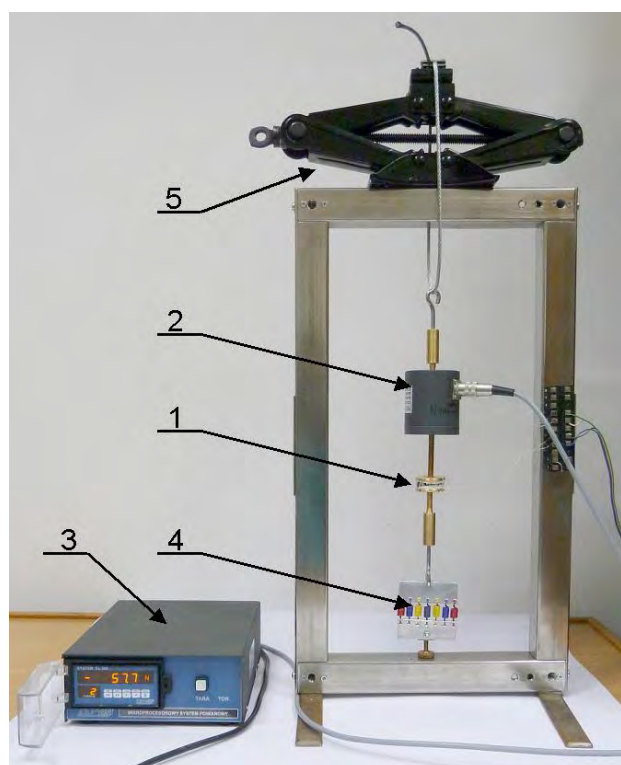
**Fig. 1.** Schematic diagram of the method for applying the uniform tensile stresses

Schemat opracowanego stanowiska do badania wpływu naprężeń rozciągających na charakterystyki magnetyczne pierścieniowych rdzeni amorficznych podano na rys. 2. Rdzeń amorficzny, uzwojony zgodnie z opisem w [7], jest obciążany za pomocą śrubowego zadajnika sił rozciągających. Wartość siły rozciągającej jest mierzona za pomocą kontrolnego, tensometrycznego czujnika siły. Natomiast charakterystyki magnetyczne pod wpływem naprężeń rozciągających są wy-



**Rys. 2.** Schemat blokowy stanowiska do badania wpływu naprężeń rozciągających na charakterystyki magnetyczne pierścieniowych rdzeni magnetycznych

**Fig. 2.** Schematic block diagram of the measuring setup for determination of the influence of tensile stresses on magnetic characteristics of ring-shaped cores

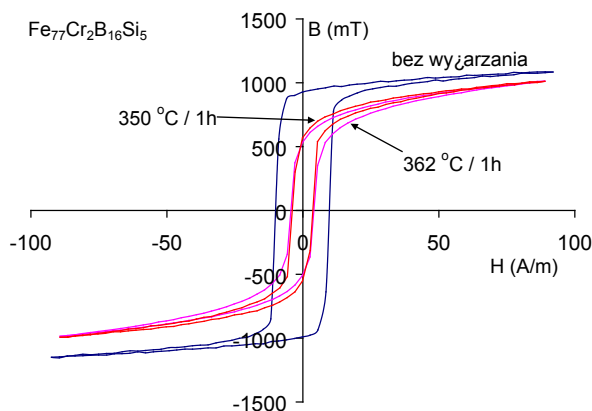


**Rys. 3.** Układ mechaniczny opracowanego stanowiska do badania wpływu naprężeń rozciągających na charakterystyki magnesowania rdzeni pierścieniowych: 1 - badany rdzeń, 2 - wzorcowy, tensometryczny czujnik siły, 3 - elektronicznym układ przetwarzania, 4 - zestaw sprężyn, 5 - zadajnik sił rozciągających

**Fig. 3.** Mechanical part of measuring setup: 1 - core under tests, 2 - tensometric force transducer, 3 - electronic transducer, 4 - set of springs, 5 - force generator

znaczane z wykorzystaniem sterowanego cyfrowo histerezografu magnetycznego HB-PL1.0. W opracowanym stanowisku wyznaczano charakterystyki quasi-statyczne, dla częstotliwości zmian natężenia pola magnesującego  $H$  wynoszącej 1 Hz.

Na rys. 3 przedstawiono widok części mechanicznej opracowanego stanowiska. Śrubowy zadajnik naprężeń rozciągających (5) oddziałuje na wzorcowy czujnik siły (2) połączony z elektronicznym układem przetwarzania (3) oraz badany



**Rys. 4.** Wpływ relaksacji termicznej na kształt pętli histerezy magnetycznej  $B(H)$  rdzenia ze stopu  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$

**Fig. 4.** The influence of thermal relaxation on the shape of  $B(H)$  hysteresis loop of  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$  amorphous alloy

rdzeń (1). W układzie umieszczono także zestaw sprężyn 4, które zmniejszają sztywność układu.

W ramach pracy zbadano właściwości magnetosprężyste trzech rdzeni pierścieniowych ze stopu amorficznego o składzie  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$ , średnica zewnętrzna badanych rdzeni wynosiła 32 mm, średnica wewnętrzna wynosiła 25 mm, zaś ich wysokość była równa 8 mm. Dwa rdzenie wyżarzono odpowiednio w temperaturach 350 °C i 362 °C przez 1 godzinę, natomiast trzeci z rdzeni badano w stanie wyjściowym (bez wyżarzania).

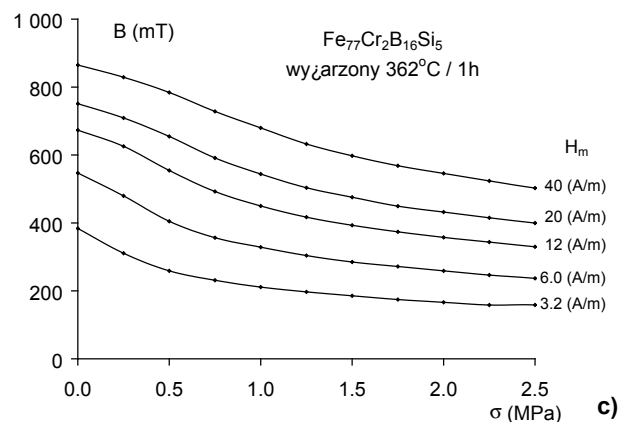
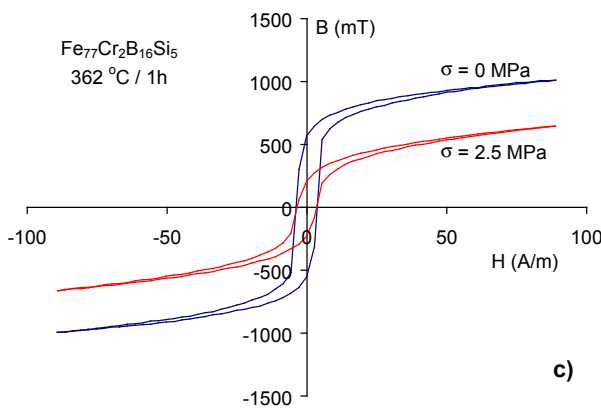
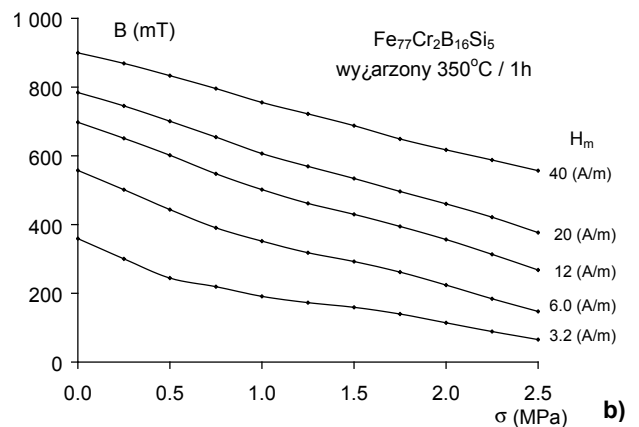
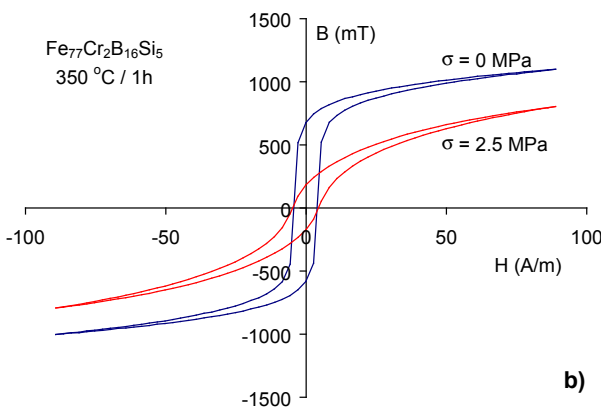
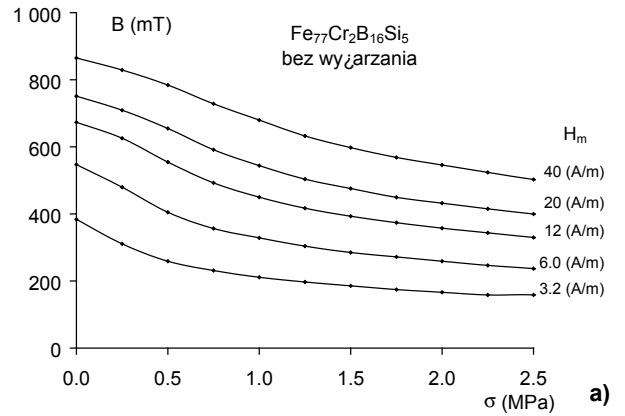
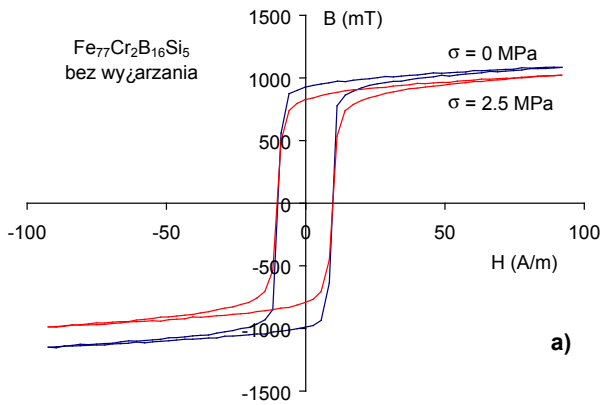
### 3. Wyniki badań

Na rys 4 przedstawiono wyniki badania wpływu relaksacji termicznej na kształt pętli histerezy magnetycznej  $B(H)$  rdzeni ze stopu o składzie  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$  w różnych stadiach relaksacji termicznej na skutek wyżarzania.

W wyniku procesu relaksacji termicznej maleje wartość naprężeń własnych stopu amorficznego [10]. W rezultacie kształt pętli histerezy magnetycznej ulega znacznym zmianom, w szczególności maleje wartość natężenia pola koercji  $H_c$  oraz rośnie wartość maksymalnej przenikalności amplitudowej  $\mu_a$  rdzenia.

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ naprężeń rozciągających  $\sigma$  na kształt pętli histerezy magnetycznej  $B(H)$  badanych rdzeni ze stopu amorficznego o składzie  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$ . Naprężenia zadawano w zakresie do 2,5 MPa, co było podyktowane wytrzymałością układu pomiarowego. Należy podkreślić, że ze względu na nieznacznie zróżnicowany przekrój poprzeczny badanych próbek, naprężenia w rdzeniu o wartości 2,5 MPa odpowiadały różnym wartościom siły rozciągającej.

Na rys. 6 podano charakterystyki magnetosprężyste  $B(\sigma)$  badanych rdzeni ze stopu amorficznego o składzie  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$ . W charakterystykach tych, dla danej wartości amplitudy natężenia pola magnesującego  $H_m$  wyznaczano zależność indukcji magnetycznej  $B$  uzyskiwanej w rdzeniu od naprężeń  $\sigma$ . Pomiedzy pomiarami rdzeń rozmagnesowywano elektrycznie gasnącym wykładniczo przebiegiem o częstotliwości 100 Hz.



**Rys. 5.** Wpływ naprężeń rozciągających  $\sigma$  na kształt pętli histerezy magnetycznej  $B(H)$  badanych rdzeni ze stopu amorficznego o składzie  $Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$ : a) rdzeni bez wyżarzania, b) rdzeni wyżarzany w temperaturze  $350\text{ }^\circ\text{C}$  przez 1 godzinę, c) rdzeni wyżarzany w temperaturze  $362\text{ }^\circ\text{C}$  przez 1 godzinę

**Fig. 5.** Influence of tensile stresses  $s$  on the shape of hysteresis loop  $B(H)$  of tested cores: a) in as quenched state, b) after annealing in  $350\text{ }^\circ\text{C}$  for 1 hour, c) after annealing in  $362\text{ }^\circ\text{C}$  for 1 hour

**Rys. 6.** Charakterystyki magnetoelastyczne  $B(\sigma)_{H_m}$  badanych rdzeni ze stopu amorficznego o składzie  $Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$ : a) rdzeni bez wyżarzania, b) rdzeni wyżarzany w temperaturze  $350\text{ }^\circ\text{C}$  przez 1 godzinę, c) rdzeni wyżarzany w temperaturze  $362\text{ }^\circ\text{C}$  przez 1 godzinę

**Fig. 6.** Magnetoelastic  $B(s)_{H_m}$  characteristics of tested cores made of  $Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$  amorphous alloys: a) in as quenched state, b) after annealing in  $350\text{ }^\circ\text{C}$  for 1 hour, c) after annealing in  $362\text{ }^\circ\text{C}$  for 1 hour

W tab. 1 zebrano wybrane wartości liczbowe wyników badań magneto-mechanicznych właściwości rdzeni ze stopu amorficznego o składzie  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$ .

**Tab. 1.** Magnetomechaniczne właściwości rdzeni ze stopu amorficznego o składzie  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$  ( $H_m=40$  A/m)  
Tab. 1. Magnetomechanical properties of  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$  amorphous alloy ( $H_m=40$  A/m)

Rdzeń	$H_c$ (A/m)	B (10 $H_c$ ) (mT)	$\frac{B(H_m) _{\sigma=0} - B(H_m) _{\sigma}}{B(H_m) _{\sigma=0}}$
Bez wyżarzania	9,4	1 215	0,09
350 °C/1h	4,15	1 051	0,24
362 °C/1h	3,79	1 002	0,33

Należy zauważyć, że wartość natężenia pola koercji materiału  $H_c$  znacząco maleje wraz z postępowaniem procesu relaksacji termicznej (ze wzrostem temperatury wyżarzania). Równocześnie maleje wartość indukcji magnetycznej  $B$  w rdzeniu, uzyskiwanej dla natężenia pola magnesującego równego  $10 H_c$ . Na szczególną uwagę zasługuje znaczny wzrost czułości magnetosprężystej rdzeni na skutek procesu relaksacji termicznej. Względne zmiany maksymalnej wartości indukcji  $B$  uzyskiwanej w rdzeniu dla amplitudy natężenia pola magnesującego  $H_m = 40$  A/m rosną z 0,09 dla rdzenia bez wyżarzania, do 0,33 dla rdzenia poddanego wyżarzaniu w temperaturze 362 °C przez jedną godzinę. Wzrost ten wynika ze zmniejszenia naprężeń własnych materiału rdzenia na skutek wyżarzania. W rezultacie maleje udział energii naprężeń własnych materiału w całkowitym bilansie energii swobodnej. Powoduje to wzrost udziału w tym bilansie energii naprężeń od sił zewnętrznych, a w rezultacie wzrost czułości magnetosprężystej rdzenia.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawiona w referacie metoda badania wpływu naprężeń zewnętrznych na charakterystyki magnesowania rdzeni pierścieniowych ze stopu o składzie  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$  umożliwia wypełnienie luki w wiedzy na temat magneto-mechanicznych właściwości magnetyków wysokoprzenikalnościowych. W rezultacie stwarza możliwości opracowania nowego typu czujników do pomiaru sił rozciągających, w których element magnetosprężysty może być równocześnie elementem konstrukcyjnym.

Przedstawione wyniki badań wskazały spadek pola koercji stopu o składzie  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$  w wyniku relaksacji termicznej, oraz wzrost jego czułości magnetosprężystej. Dla stopu poddanego relaksacji w temperaturze 362 °C przez jedną godzinę uzyskano bardzo wysoką czułość magnetosprężystą. Względne zmiany maksymalnej wartości indukcji  $B$  uzyskiwanej w rdzeniu dla amplitudy natężenia pola magnesującego  $H_m = 40$  A/m przekraczają w przypadku tego stopu 33 %. Jest to szczególnie korzystne z punktu widzenia konstrukcji

magnetosprężystych sensorów do zastosowań przemysłowych, ponieważ będą się one cechowały znaczną czułością.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy.

#### Bibliografia

1. Barandiaran J. M., Gutierrez J., *Magnetoelastic sensors based on soft amorphous magnetic alloys*. Sensors and Actuators A59 (1997) 38.
2. Bydzovsky J., Kraus L., Svec P., Pasquale M., *Magnetoelastic strain sensors for the outdoors application*. J. Magn. Mater. 272–276 (2004) e1743.
3. Cai Q. Y., Grimes C. A., *A remote query magnetoelastic pH sensor*, Sensors and Actuators B 71 (2000) 112.
4. Bieńkowski A., Szewczyk R., *The possibility of utilizing the high permeability magnetic materials in construction of magnetoelastic stress and force sensors*. Sensors and Actuators A113 (2004) 270.
5. Bieńkowski A., Szewczyk R., Salach J., *Industrial application of magnetoelastic force and torque sensors*. Acta Physica Polonica A, 118 (2010) 1008.
6. Bydzovsky J., Kollar M., Jancarik V., Svec P., Kraus L., *Strain sensor for civil engineering application based on CoFeCrSiB amorphous ribbons*. Czechoslovak Journal of Physics, 52A (2002) A117.
7. Bieńkowski A., Salach J., Szewczyk R., *Urządzenie do zadawania naprężeń rozciągających do rdzenia pierścieniowego przetwornika magnetosprężystego*. Zgłoszenie patentowe P-382475, 2007.
8. Salach J., Szewczyk R., Bieńkowski A., Frydrych P., *Methodology of testing the magnetoelastic characteristics of ring-shaped cores under uniform compressive and tensile stresses*. Journal of Electrical Engineering, 61 (2010) 93.
9. Sablik M. J., Augustyniak B., Chmielewski M., *Modeling biaxial stress effects on magnetic hysteresis in steel with the field and stress axes noncoaxial*. J. Appl. Phys. 85 (1999) 4391.
10. O'Handley R., *Modern magnetic materials – principles and applications*. John Wiley & sons, 2000. ■

#### Utilizing of magnetic amorphous alloys in magnetoelastic tensile stress sensors

**Abstract:** Paper presents possibilities of utilizing  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$  amorphous alloy in development of magnetoelastic tensile stress sensors. In presented sensors the uniform distribution of tensile stresses was achieved. These stress were perpendicular to the direction of magnetizing field in the ring-shaped core. Presented results indicated high magnetoelastic sensitivity of  $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$  amorphous alloy under tensile stresses. Moreover it was indicated, that magnetoelastic sensitivity increases due to thermal relaxation – annealing of amorphous core.

**Keywords:** magnetoelastic effect, amorphous alloys, tensile stresses

**dr inż. Jacek Salach**

Od 2005 roku pracownik Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Zaangażowany w prace związane z badaniem zjawisk magneto-mechanicznych oraz opracowaniem sensorów i aktuatorów mechatronicznych, miernictwem elektrycznym.

*e-mail: j.salach@mchtr.pw.edu.pl*



**prof. nzw. dr. hab. inż. Adam Bieńkowski**

Absolwent Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Od 2001 roku prof. nzw. Na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Prowadzi prace nt. metrologii wielkości elektrycznych i magnetycznych, mechatronicznych właściwości magnetyków, procesów magnesowania magnetyków w obecności naprężeń od sił zewnętrznych, magnetosprężystych sensorów naprężeń i sił.

*e-mail: a.bienkowski@mchtr.pw.edu.pl*



**prof. nzw. dr. hab. inż. Roman Szewczyk**

Od 2000 roku pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów oraz Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Zaangażowany w prace związane z modelowaniem zjawisk magneto-mechanicznych, opracowaniem sensorów mechatronicznych, miernictwem elektrycznym oraz prognozowaniem rozwoju technologii (technological foresight).

*e-mail: rszewczyk@piap.pl*

*e-mail: rszewczyk@piap.pl*



**mgr inż. Dorota Jackiewicz**

Od października 2011 roku doktorantka w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. W pracy naukowej zajmuje się modelowaniem zjawisk magneto-mechanicznych.

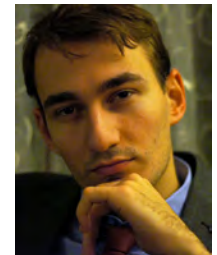
*e-mail: d.jackiewicz@mchtr.pw.edu.pl*



**mgr inż. Piotr Frydrych**

Od 2010 roku doktorant w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. W pracy naukowej zajmuje się modelowaniem procesów magnesowania i opracowywaniem nowego typu sensorów do pomiaru pola magnetycznego.

*e-mail: p.frydrych@mchtr.pw.edu.pl*



**dr Aleksandra Kolano-Burian**

Absolwentka Wydziału Fizyki Uniwersytetu Śląskiego. Pracę doktorską obroniła w roku 2005 na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Kierownik Laboratorium Materiałów Szybkoschładzanych w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach.

*e-mail: olak@imn.gliwice.pl*

