



# Energetyka®

PROBLEMY ENERGETYKI I GOSPODARKI PALIWOWO-ENERGETYCZNEJ **11/2016**  
ISSN 0013-7294 CENA 20 ZŁ (w tym 5% VAT) (749)



**25** lat  
years

Z okazji świąt Bożego Narodzenia składamy życzenia spokoju ducha,  
a także wielu radosnych chwil w gronie najbliższych.  
Niech Nowy Rok 2017 przyniesie niemało satysfakcji zawodowej  
oraz pomyślność w życiu osobistym.

Ecol Sp. z o.o., Rybnik

[www.ecol.com.pl](http://www.ecol.com.pl)

3. Przedstawiony przykład projektowania zmęczeniowego wykazał, że kryterium Carpintierego zwiększa masę (koszty) konstrukcji nie gwarantując zwiększenia jej trwałości.

#### PIŚMIENNICTWO

- [1] Sakane M., Ohnami M., Sawada M.: *Fracture Modes and Low Cycle Biaxial Fatigue Life at Elevated Temperature*, "Journal of Engineering and Technology" 1987, Vol. 109, p. 236-243.
- [2] Carpinteri A., Spagnoli A.: *Multiaxial high-cycle fatigue criterion for hard metals*, "International Journal of Fatigue" 2001, 23, p. 135-145.
- [3] Kurek M.: *Trwałość zmęczeniowa wybranych materiałów konstrukcyjnych przy różnych kątach orientacji płaszczyzny krytycznej*, XXVI Sympozjum „Zmęczenie i mechanika pękania”, Bydgoszcz-Fojutowo, 2016, streszczenie referatów s. 59-60.
- [4] Karolczuk A., Macha E.: *Critical planes in multiaxial fatigue*, "Materials Science Forum" 2005, Vol. 482, p. 109-114.
- [5] Macha E.: *Generalization of fatigue fracture criteria for multiaxial sinusoidal loadings in the range of random loadings* [in:] Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF 3 1989 (Edited by M.W. Brown and K.J. Miller), Mechanical Engineering Publications, London, p. 425-436.
- [6] Walat K., Łagoda T.: *Lifetime of semi-ductile materials through the critical plane approach*, "International Journal of Fatigue" 2014, vol. 67, p.73-76.
- [7] Haney M. A.: *Topology Optimization of Engine Exhaust-Washed Structures*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Mechanical and Materials Engineering, Wright State University, Dayton, OH, 2005.
- [8] Mrzygłód M.: *Algorytm optymalizacji topologicznej konstrukcji ciągłych z ograniczeniami zmęczeniowymi*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Monografia 431. Mechanika, ISSN 0860-097X, 2013.
- [9] Mrzygłód M.: *Application of bio-inspired algorithm of structural optimization to automated design*. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Joint Conference on Computational Intelligence, 302-305, 2012. SciTePress. DOI:10.5220/0004157803020305.
- [10] ANSYS® Academic Research, Release 16.2, Help System, ANSYS Mechanical APDL, ANSYS, Inc. 2015.



Katarzyna Makowska

Institut Transportu Samochodowego, Warszawa

Zbigniew L. Kowalewski

Institut Transportu Samochodowego, Warszawa

Institut Podstawowych Problemów Techniki PAN

## Ocena stopnia degradacji materiałów ferromagnetycznych technikami magnetycznymi

### Evaluation of degradation level in ferromagnetic materials by means of magnetic techniques

Nieniszczące metody opierające się na wykorzystaniu efektu Barkhausena i emisji magnetoakustycznej stosowane są do badań materiałów ferromagnetycznych. Efekt Barkhausena polega na skokowym przebiegu zmiany namagnesowania ferromagnetyka pod wpływem zmieniających się warunków zewnętrznych [1]. W przypadku, gdy zmiana namagnesowania ferromagnetyka występuje pod wpływem natężenia pola magnetycznego, mówi się o magnetycznym efekcie Barkhausena. Polega on głównie na wymuszeniu skokowych ruchów granic domenowych przez zmianę natężenia pola magnetycznego [2]. W przypadku stali są to granice typu 180° oraz 90°. Kąty oznaczają względne kierunki namagnesowania sąsiednich domen [3]. Ściany domenowe są chwilowo hamowane przez bariery mikrostrukturalne, takie jak:

granice ziaren, wydzielenia, dyslokacje czy pustki, a następnie uwalniane pod wpływem zmian pola magnetycznego. Skokowe ruchy granic domenowych (tzw. skoki Barkhausena) generują fale elektromagnetyczne, które wywołują indukcyjną magnetyczną impulsu napięcia emisji Barkhausena do zbliżonego materiału cewki detekcyjnej [1].

Emisja magnetoakustyczna jest sygnałem akustycznym generowanym w stalach przez ruch ścian domenowych materiału typu 90° w wyniku zmiany objętości materiału o niezerowej magnetostrykcji. Ściany domenowe typu 180° nie powodują lokalnych zmian odkształcenia [4]. Uważa się również, że obecność maksimów emisji magnetoakustycznej jest związana z powstawaniem i anihilacją ścian domenowych [5].

Biorąc powyższe fakty pod uwagę można stwierdzić, że udział w tworzeniu sygnału Barkhausena mają dwie populacje granic domenowych ( $180^\circ$  i  $90^\circ$ ), natomiast w generowaniu sygnału emisji magnetoakustycznej tylko populacja granic domenowych ( $90^\circ$ ) [6]. W praktyce oznacza to, że wartości sygnału Barkhausena są wyższe niż sygnału emisji magnetoakustycznej. Obie metody badawcze są technikami powierzchniowymi, przy czym szum Barkhausena może być odczytywany z głębokości do ok. 1 mm, natomiast emisji magnetoakustycznej z głębokości do ok. 10 mm [6], a zatem w przypadku próbek o niewielkiej grubości z całej ich objętości. Wadą pomiarów emisji magnetoakustycznej jest konieczność przeprowadzenia badań w wyciszonych pomieszczeniach ze względu na konieczność redukcji zakłóceń sygnału falami akustycznymi.

## Program badań i uzyskane wyniki

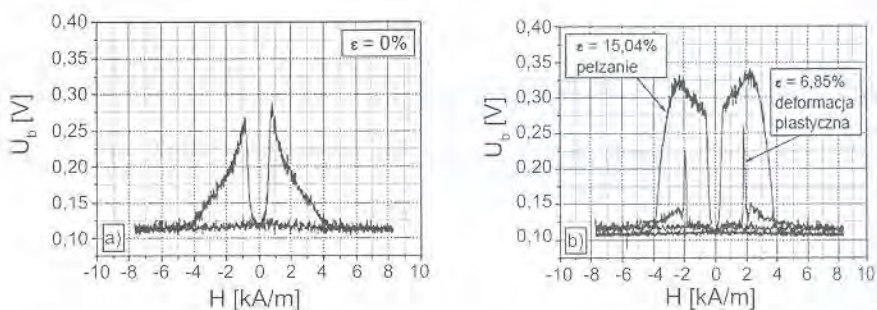
Materiał testowy stanowiła stal 40HNMA o następującym wagowym składzie chemicznym: 0,44% C, 0,31% S, 0,64% Mn, 0,015% P, 0,010% S, 0,74% Cr, 0,02% Mo, 1,40% Ni, 0,015% Al, 0,16% Cu, 0,50% Ti, 0,03% W, reszta Fe. Badania mikrostruktury materiału wykazały, że charakteryzuje się on strukturą sorbityczną z zachowanym iglastym układem pomartenzycytnym. W niektórych obszarach równomiernie rozłożonego sorbitu zauważono, że iglasty układ pomartenzycytny nie został w pełni zachowany. Sumaryczny udział tych obszarów wyniósł około 2%. Na podstawie wyników standardowej próby rozciągania określono następujące właściwości mechaniczne testowanej stali:  $R_{m1,2} = 1153$  MPa,  $R_m = 1246$  MPa,  $E = 207$  GPa,  $\Lambda = 15$  % [7, 8].

Próbki stalowe o długości pomiarowej 40 mm i wymiarach przekroju  $5 \times 7$  mm poddano obciążeniom mechanicznym. Dla jednej partii próbek przeprowadzono testy pełzania przyspieszonego przy stałym obciążeniu rozciągającym, zapewniającym naprężenie nominalne 250 MPa, w temperaturze  $500^\circ\text{C}$ , natomiast

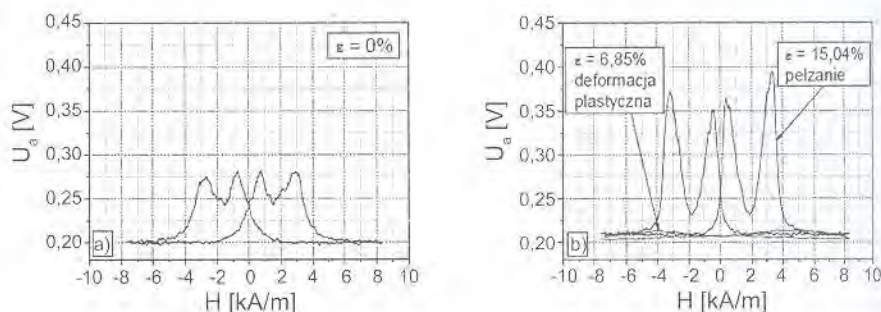
próbki z drugiej partii poddano deformacji plastycznej wskutek rozciągania przy monotonicznie narastającym obciążeniu w temperaturze pokojowej. Każdy test pełzania i plastycznego płynięcia zatrzymywano po określonym czasie obciążania w celu otrzymania materiału o zróżnicowanym stopniu odkształcenia, a tym samym o odmiennych właściwościach mechanicznych. W przypadku pełzania wartości odkształcenia, przy których zatrzymywano próby, wynosiły odpowiednio: 0,27%, 1,48%, 1,57%, 1,90%, 3,19%, 4,43%, 6,96%, 7,06%, 15,04%, 15,07%, natomiast w przypadku deformacji plastycznej: 0,22%, 0,79%, 1,39%, 1,78%, 3,04%, 4,23%, 6,85%, 6,88% [7, 8]. Oba zastosowane procesy deformacyjne przebiegały przy udziale odmiennych mechanizmów. Podczas prób pełzania był to poślizg oraz wspinanie dyslokacji, natomiast głównym mechanizmem odkształcenia podczas plastycznego płynięcia był tylko poślizg dyslokacji [9]. Po etapie wstępnej deformacji próbek wykonano badania poziomu szumu Barkhausena oraz emisji magnetoakustycznej, wykorzystując do tego celu urządzenie szerzej opisane na przykład w pracy [7], a następnie testy rozciągania do zniszczenia tych próbek.

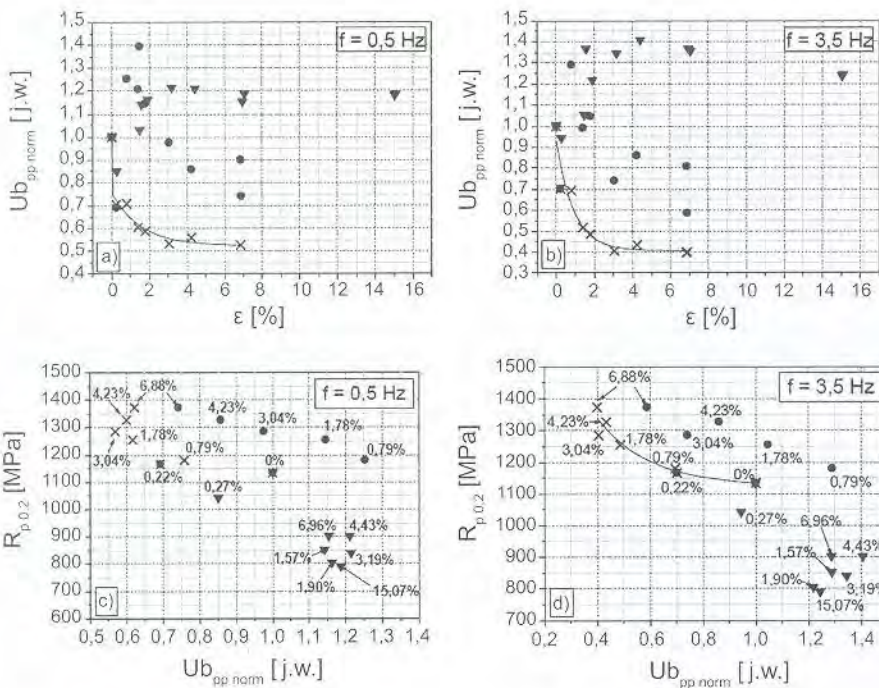
Na rysunku 1 zamieszczono przykładowe obwiednie napięcia skutecznego szumu Barkhausena w warunkach magnesowania dla  $f = 0,5$  Hz. Stwierdzono, że próbka bez wstępnej deformacji charakteryzuje się pojedynczym maksimum (rys. 1a). Wprowadzenie do badanego materiału odkształcenia wskutek pełzania zmienia kształt (amplitudę i szerokość) obwiedni, natomiast wprowadzenie odkształcenia wskutek rozciągania w temperaturze pokojowej powoduje dodatkowo pojawienie się drugiego maksimum (rys. 1b). Przyczynę tych zmian opisano w pracach [7,8]. W przypadku emisji magnetoakustycznej sygnał pochodzący od próbki nieodkształconej charakteryzuje się podwójnym maksimum, a proces rozciągania powoduje transformację sygnału z dwoma maksymalnymi pikami w sygnał z pojedynczym maksimum. Pełzanie zmienia jedynie profil obwiedni emisji magnetoakustycznej (rys. 2) [7].

Rys. 1. Obwiednie napięcia skutecznego szumu Barkhausena stali 40HNMA  
a) w stanie dostawy,  
b) po pełzaniu lub po deformacji plastycznej, dla częstotliwości prądu magnesującego  $f = 0,5$  Hz [7]

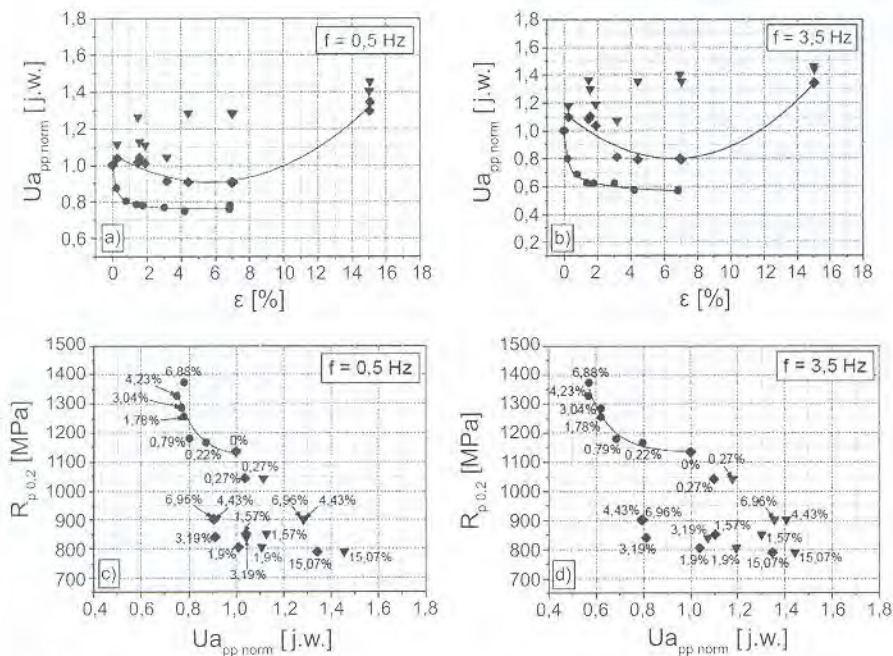


Rys. 2. Obwiednie napięcia skutecznego emisji magnetoakustycznej stali 40HNMA  
a) w stanie dostawy,  
b) po pełzaniu lub po deformacji plastycznej, dla częstotliwości prądu magnesującego  $f = 0,5$  Hz [7]





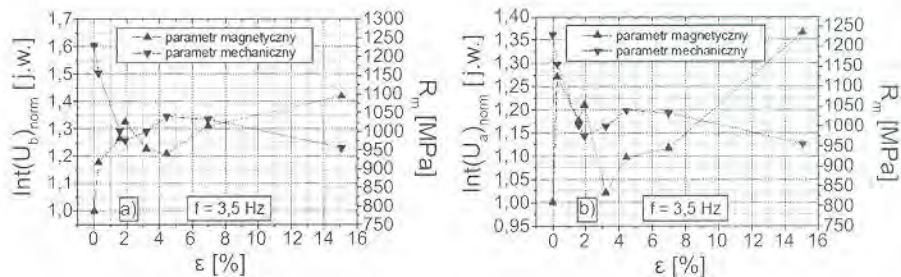
Rys. 3. Związek między amplitudą obwiedni rms szumu Barkhausena i odkształceniem: a)  $f = 0,5$  Hz, b)  $f = 3,5$  Hz oraz związek pomiędzy umowną granicą plastyczności a amplitudą z obwiedni rms szumu Barkhausena: c)  $f = 0,5$  Hz, d)  $f = 3,5$  Hz; oznaczenia: trójkąty – pełzanie; kółka – deformacja plastyczna, lewy pik; krzyżyki – deformacja plastyczna, prawy pik [7]



Rys. 4. Związek między amplitudą obwiedni rms emisji magnetoakustycznej i odkształceniem: a)  $f = 0,5$  Hz, b)  $f = 3,5$  Hz oraz związek pomiędzy umowną granicą plastyczności a amplitudą z obwiedni rms emisji magnetoakustycznej: c)  $f = 0,5$  Hz, d)  $f = 3,5$  Hz; oznaczenia: trójkąty – pełzanie, prawy pik; romby – pełzanie, lewy pik; kółka – deformacja plastyczna [7]

Z obwiedni rms sygnału szumu Barkhausena i emisji magnetoakustycznej wyznaczono ich amplitudy. Przebieg amplitudy wyznaczonej z obwiedni sygnału napięciowego emisji Barkhausena ( $U_{b_{pp}}$ ) dla różnych częstotliwości przedstawiono na rysunku 3a i 3b. Parametr ten dla próbek po pełzaniu początkowo szybko wzrasta w zakresie stosunkowo małych wartości odkształcenia

(do ok. 3%), a następnie nieznacznie maleje. Zmiany te są bardziej widoczne dla wyższej częstotliwości ( $f = 3,5$  Hz, rys. 3b) niż dla niższej ( $f = 0,5$  Hz, rys. 3a). W przypadku deformacji plastycznej amplituda lewego piku (niższe wartości natężenia pola magnetycznego H) wzrasta, podobnie jak w przypadku pełzania, natomiast po przekroczeniu odkształcenia  $\epsilon \approx 1,5\%$  gwałtownie



Rys. 5. Porównanie zmian całki z obwiedni napięcia skutecznego szumu Barkhausena ze zmianami  $R_m$  stali 40HNMA w funkcji  $\varepsilon$  - a), porównanie zmian całki z obwiedni napięcia skutecznego emisji magnetoakustycznej ze zmianami  $R_m$  stali 40HNMA w funkcji  $\varepsilon$  - b) [7]

maleje (rys. 3a i 3b). Tendencja ta jednak zanika dla wyższej częstotliwości badania  $f' = 3,5$  Hz. Amplituda prawego piku emisji magnetoakustycznej (wyższe natężenia pola magnetycznego H) dla obu częstotliwości zależy wykładniczo od odkształcenia. Wykresy przedstawione na rysunku 3c i 3d przedstawiają związek pomiędzy  $R_{p0,2}$  a parametrem  $U_{b,pp}$ . Na wykresach podano wartości wstępnej deformacji. Zauważono, że odpowiedni dobór częstotliwości prądu magnesującego umożliwia zidentyfikowanie związku wykładniczego  $R_{p0,2} - U_{b,pp}$  dla materiału po deformacji plastycznej.

Na rysunku 4 przedstawiono graficznie analogiczne związki pomiędzy amplitudą emisji magnetoakustycznej a odkształceniem (rys. 4a i 4b) i umowną granicą plastyczności (rys. 4c i 4d). W przypadku tego rodzaju sygnału można podjąć próbę określenia stopnia pełzania dla obu częstotliwości prądu magnesowania. Z kolei wyraźne zmiany tego parametru dla próbek po rozciąganiu występują dla wartości  $\varepsilon$  do ok. 1%. Mimo że związek pomiędzy sygnałem emisji magnetoakustycznej a umowną granicą plastyczności można określić funkcjami dla obu częstotliwości, szacowanie  $R_{p0,2}$  jest utrudnione ze względu na zbyt małe różnice  $U_{a,pp}$ .

Na rysunku 5 przedstawiono graficznie wartości całki wyznaczonej z obwiedni rms szumu Barkhausena oraz emisji magnetoakustycznej, a także wartości wytrzymałości doraźnej w funkcji odkształcenia. Zmiany całki wyznaczonej z obwiedni napięcia skutecznego szumu Barkhausena w funkcji wstępnej deformacji pełzania w zestawieniu ze zmianami granicy wytrzymałości doraźnej (rys. 5a) miały charakter lustrzany, tj. gdy  $\text{Int}(U_{b,form})$  zwiększała się, to  $R_m$  malała i odwrotnie. W podobny sposób, chociaż nie tak już symetryczny, zmieniały się całka z obwiedni napięcia skutecznego emisji magnetoakustycznej oraz  $R_m$  (rys. 5b).

## Wnioski

Sygnały napięciowe szumu Barkhausena oraz emisji magnetoakustycznej pozwalają zidentyfikować wczesny etap pełzania lub plastycznego płynięcia materiału, a także rozróżnić oba z wymienionych procesów deformacyjnych. Dobór odpowiedniej częstotliwości prądu magnesującego szumu Barkhausena umożliwia oszacowanie umownej granicy plastyczności materiału po rozciąganiu. Wyniki badań wskazują, że całka z obwiedni napięcia skutecznego szumu Barkhausena lepiej charakteryzuje właściwości mechaniczne niż całka wyznaczona z obwiedni napięcia skutecznego emisji magnetoakustycznej. Okazuje się, że w opisie charakterystyk mechanicznych bardziej istotny jest udział obu populacji ścian domenowych  $180^\circ$  i  $90^\circ$  niż głębokość, z jakiej

jest odbierany sygnał napięciowy [7]. W zależności od warunków pomiarowych dla metody szumu Barkhausena, która jest techniką powierzchniową, sygnał może być odbierany z głębokości mniejszej niż 1 mm, a za zmiany właściwości magnetycznych odpowiedzialne są obie populacje ścian domenowych  $180^\circ$  i  $90^\circ$ . Z kolei dla metody emisji magnetoakustycznej, której sygnał jest odbierany z głębokości do około 10 mm [6] (w danym przypadku jest to cała objętość próbki o wymiarach: 5 mm × 7 mm × 40 mm pod cewką magnesującą), o zmianach właściwości mechanicznych decyduje tylko jedna populacja granic domenowych typu  $90^\circ$ .

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Jiles D.: *Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect*, "Czechoslovak Journal of Physics" 2000, Vol. 50, No. 8, 893-968.
- [2] Blaow A., Evans J.T., Shaw B.A.: *The effect of microstructure and applied stress on magnetic Barkhausen emission in induction hardened steel*, "Journal of Materials Science" 2007, Vol. 42, No. 12, 4364-4371.
- [3] Piech T.: *Badania magnetyczne. Wykorzystanie efektu Barkhausena*, Biuro Gamma, Warszawa 1998.
- [4] Augustyniak B., Piotrowski L., Chmielewski M.: *Impact of frequency and sample geometry on magnetoacoustic emission voltage properties for two steel grades*, "Journal of Electrical Engineering" 2008, Vol. 59, No. 7, s. 33-36.
- [5] Augustyniak B.: *Zjawiska magnetoakustyczne i ich wykorzystanie w nieniszczących badaniach materiałów*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2003.
- [6] O'Sullivan D., Cotterell M., Cassidy S., Tanner D.A., Mészáros I.: *Magneto-acoustic emission for the characterisation of ferritic stainless steel microstructural state*, "Journal of Magnetism and Magnetic Materials" 2004, Vol. 271, No. 2-3, 381-389.
- [7] Makowska K.: *Metodyka oceny stanu uszkodzenia materiałów poddawanych laboratoryjnie symulowanym obciążeniom eksploatacyjnym*, Praca doktorska, IPPT PAN, 2014.
- [8] Makowska K., Kowalewski Z.L.: *Możliwości wykorzystania szumu Barkhausena do oceny mikrostruktury i właściwości mechanicznych materiałów*, „Energetyka” 2015, vol. 736, nr 10, 664-667.
- [9] Frost H.J., Ashby M.F.: *Deformation-mechanism maps, The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*, Oxford, New York, Sydney, Pergamon Press, 1982.