

Tomasz ŚWIĄTCZAK¹, Mariusz TOMCZYK², Bogusław WIĘCEK¹, Ryszard PAWLAK²

¹ POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź

² POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT SYSTEMÓW INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

Badania mikropołączeń spawanych laserem metodą termowizji aktywnej

Mgr inż. Tomasz ŚWIĄTCZAK

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej w 2005 r. Aktualnie jest doktorantem oraz pracownikiem w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Autor ponad 20 artykułów w czasopismach krajowych oraz międzynarodowych, materiałach konferencji krajowych oraz zagranicznych. Jego zainteresowania naukowe dotyczą termografii w podczerwieni, w szczególności technik termografii aktywnej, zagadnień wymiany ciepła oraz szeroko pojętej elektroniki.

e-mail: tomasz.swiatczak@p.lodz.pl



Dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK

Specjalizuje się w termografii w podczerwieni i w modelowaniu zjawisk złożonej wymiany ciepła w elektronice. Jest autorem i współautorem ponad 250 publikacji. Bogusław Więcek jest członkiem komitetów naukowych: Quantitative Infrared Thermography, Thermal Engineering and Thermometry oraz Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Jest organizatorem cyklicznej krajowej konferencji „Termografia i Termometria w Podczerwieni” – TTP.

e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl



Dr inż. Mariusz TOMCZYK

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej w 2000 r. Aktualnie jest adiunktem w Instytucie Systemów Inżynierii Elektrycznej. Jest autorem ponad 30 artykułów w czasopismach i materiałach konferencji krajowych i zagranicznych. Jego zainteresowania naukowe dotyczą modelowania i realizacji laserowych procesów technologicznych oraz wykorzystania zaawansowanych narzędzi informatycznych w technologiach materiałowych.

e-mail: martom@matel.p.lodz.pl



Dr hab. inż. Ryszard PAWLAK

Absolwent Politechniki Łódzkiej (1973 r.), aktualnie profesor nadzwyczajny, dyrektor Instytutu Systemów Inżynierii Elektrycznej PŁ. Autor ponad stu artykułów w czasopismach i materiałach konferencji zagranicznych i krajowych. Tematyka badawcza dotyczy inżynierii materiałowej na potrzeby elektrotechniki i elektroniki, ze szczególnym uwzględnieniem mikro-technologii laserowych. Członek Sekcji Elektrotechnologii Komitetu Elektrotechniki PAN, Laser Institute of America, PTETiS i Photonics Society of Poland.

e-mail: rypawlak@matel.p.lodz.pl



Streszczenie

W pracy opisano badania mikropołączeń elektrycznych spawanych metodą laserową z wykorzystaniem techniki termografii aktywnej. Zaproponowana nowa metoda badawcza jest nieniszcząca, pozwala zbadać jakość połączenia (w tym wykryć defekt wewnętrzny) bez ingerencji w próbkę. Przeprowadzono badania termowizyjne, proponując przyporządkowanie badanych połączeń do dwóch grup: połączenia prawidłowe oraz zawierające wewnętrzny defekt. Wybrane parametry określające jakość badanego połączenia to stała czasowa odpowiedzi termicznej w dziedzinie czasu oraz zespolona faza odpowiedzi termicznej (po zastosowaniu transformaty Fouriera). Rezultatem prac jest nieniszcząca metoda badań termowizyjnych, pozwalająca na określenie jakości mikropołączeń połączeń elektrycznych spawanych laserem.

Słowa kluczowe: mikropołączenia elektryczne spawane laserem, badania nieniszczące, termografia aktywna.

Investigations of laser welded joints using active thermography

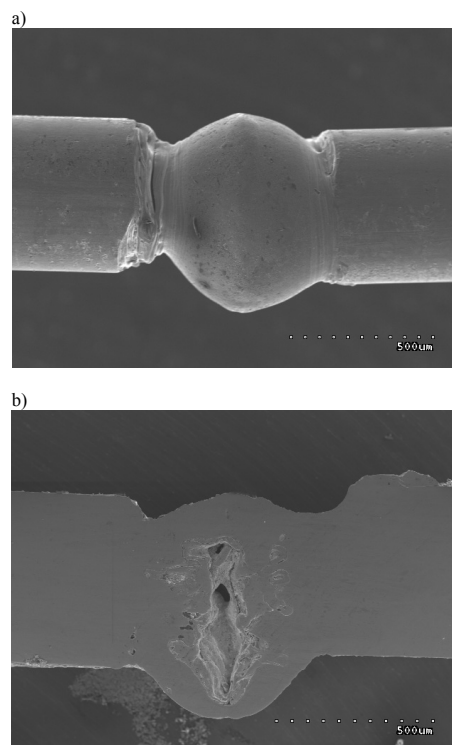
Abstract

Formation of gas voids inside wire joints during laser welding may cause internal defects (cracks and porosity) invisible from outside (Fig. 1). The authors propose application of active thermography to detection of such defects. The proposed new method is non-destructive and allows detection of internal defects in materials as well as evaluation of thermal properties. A thermal camera was used to acquire sequences of thermograms showing the joints during transient heating (Figs. 3 and 4). Electrical connections between two nickel wires of 0.5 mm diameter made by laser welding were used as a subject of the research. The samples with and without internal defects were chosen for investigations (Fig. 1). One of the parameters which can be used to describe quality of the investigated connection is time constant τ (Fig. 6). In the paper the authors divided the samples in two groups: defective and non-defective. Next, the fast Fourier transform (FFT) for all samples was calculated. There were obtained the thermal impedance values in the frequency domain [11]. The Fourier analysis enabled calculation of the phase value, which is different for defective and non-defective samples (Fig. 7.) and confirmed the applied "time constant method". By means of the active thermography technique, it was possible to estimate the quality of the investigated laser welded joints.

Keywords: laser welded joints, non-destructive examination, active thermography.

1. Połączenia spawane laserowo

Połączenie spawane laserowo wykonywane jest w wyniku bezpośredniego oddziaływania wiązki laserowej na łączone elementy. Przykładem połączeń są przedstawione na rys. 1a połączenia czołowe typu drut-drut.



Rys. 1. Spawane laserowo połączenie czołowe (drut Ni-Ni, $\phi=0,5$ mm), powiększenie 30 razy, a) widok ogólny, b) przekrój metalograficzny połączenia zawierającego nieciągłość struktury

Fig. 1. Laser welded wire joints (Ni-Ni wire $\phi=0,5$ mm), magnification 30x, a) view of joint, b) cross section of laser welded joint with big void inside

Połączenia spawane, w odróżnieniu np. od połączeń ultrakompresyjnych, charakteryzują się bardzo dobrą wytrzymałością mechaniczną i dobrymi właściwościami elektrycznymi. Połączenia spawane laserowo mogą być wykorzystane do punkowego łączenia z wyprowadzeniem elementu elektronicznego lub ścieżką obwodu drukowanego oraz wewnętrznymi wyprowadzeń przyrządów półprzewodnikowych.

Proces łączenia metalu w wyniku oddziaływania wiązki laserowej zapoczątkowany jest absorpcją promieniowania przez powierzchnię materiału, co prowadzi do stopienia metali i częściowego ich odparowania. Duże gradienty temperatury (10^7 K/m) oraz ciśnienie wiązki laserowej (dla gęstości mocy 10^6 W/cm²) około 33 Pa wywołują intensywne zjawiska hydrodynamiczne w obszarze stopionych metali. Procesy konwekcji termokapilarnej wymuszają transport roztopionej masy. Po ustąpieniu wiązki laserowej następuje ekstremalnie szybkie chłodzenie materiału (10^7 - 10^9 K/s), co determinuje przebieg procesu krystalizacji materiału. Tworzą się specyficzne struktury, typowe dla krystalizacji szybkiej (rozdrobione struktury dendrytyczne lub eutektyczne oraz fazy nierównowagowe). W strefie przetopu oraz w bliskim jej otoczeniu powstają naprężenia termiczne i deformacje powierzchni [1, 2].

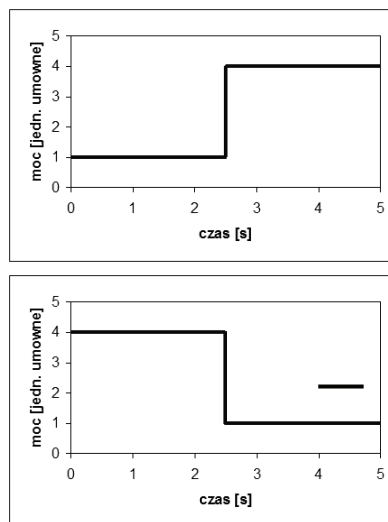
Niewłaściwie dobrane parametry wiązki laserowej, a także rodzaj łączonych materiałów i obecność gazów mogą przyczynić się do powstania dwu efektów pogarszających właściwości elektromechaniczne połączenia: 1) przewężenie technologiczne na granicy obszaru przetopu (rys. 1a) oraz 2) pęcherze powietrzne w obszarze spoiny (rys. 1b). W obu przypadkach zwiększa się rezystancja połączenia, co może prowadzić do jego nadmiernego nagrzewania. Pierwszy z defektów może być łatwo wykryty i zniwelowany dzięki optymalnemu określeniu parametrów procesu spawania. Drugi natomiast, wymaga wykonania badań metalograficznych przekroju połączenia, co jest równoznaczne z jego zniszczeniem [3].

Autorzy w pracy proponują zastosowanie badań nieniszczących metodami termowizji aktywnej do oceny jakości połączeń spawanych laserowo w szczególności do wykrywania defektów w postaci pęcherzyków powietrza wewnątrz tych mikrołączeń. Metoda detekcji termograficznej umożliwi diagnozowanie jakości połączeń spawanych wiązką laserową bez konieczności mechanicznego niszczenia połączenia.

2. Metoda analizy termicznego stanu przejściowego

Badania nieniszczące technikami termowizji aktywnej umożliwiają wykrywanie defektów w strukturach bez ingerencji mechanicznej w badaną próbkę. Pozwalają na określenie ich rodzaju, rozmiaru oraz głębokości, na której występują. Można także określić parametry fizyczne danego obiektu na podstawie jego odpowiedzi na wymuszenie termiczne. W metodach tych badany obiekt pobudza się energią, która zamienia się na ciepło. Kamera termowizyjna rejestruje zmienny w czasie rozkład temperatury. Analiza cieplna struktur pozwala wykazać, że zarówno amplituda jak i faza odpowiedzi termicznej zależy od parametrów badanych materiałów. Przykładem takich badań może być badanie struktur przewodnikowych i półprzewodnikowych, gdzie źródłem energii jest przepływający przez strukturę prąd [4, 5].

W pracy wybrano technikę badań termowizyjnych z wymuszeniem cieplnym w postaci skoku jednostkowego tzw. termografię przejściową (*ang. transient thermography*). Jest to jedna z technik termografii aktywnej wykorzystujących dynamiczne pobudzenie energetyczne oraz przekształcenia częstotliwościowe. Badania termowizyjne tą metodą polegają na obserwacji odpowiedzi termicznej badanego obiektu na pobudzenie energetyczne w postaci skoku jednostkowego z temperatury otoczenia do temperatury wyższej, lub odwrotnie - wyłączenie źródła energii i obserwacja spadku temperatury. Przykładowe przebiegi czasowe obrazujące kształt sygnału pobudzającego obiekt pokazano na rys. 2.

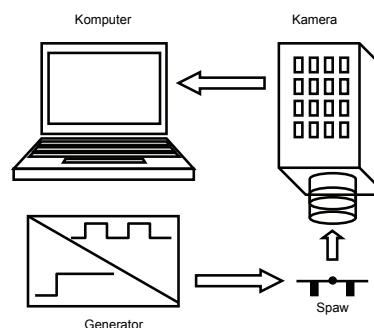


Rys. 2. Przykładowe przebiegi sygnału pobudzającego w metodzie przejściowej
Fig. 2. Exemplary excitation signal in the transient thermography method

Następnie otrzymaną odpowiedź termiczną badanego obiektu w dziedzinie czasu poddaje się przekształceniu Fouriera FFT (*ang. Fast Fourier Transform*). Otrzymaną w ten sposób amplitudę i fazę zespolonej odpowiedzi termicznej w dziedzinie częstotliwości poddaje się dalszej analizie w celu wykrycia defektów wewnątrz badanych struktur oraz określenia własności fizycznych materiału [4, 5, 6, 7].

3. Badania termowizyjne

Pomiary termowizyjne przeprowadzono przy użyciu stanowiska składającego się z kamery termowizyjnej Cedip Titanium®, komputerowego systemu do akwizycji danych termograficznych wraz z oprogramowaniem Altair®, generatora przebiegów arbitralnych sprzężonego z wydajnym prądowo wzmacniaczem oraz badanej próbki w postaci mikrołączenia spawanego laserowo pomiędzy dwoma odcinkami drutu niklowego (Ni) (rys. 3). Dodatkowo ze względu na mikroskopijne rozmiary badanego obiektu (średnica drutu 0,5 mm, obszar badanego połączenia około 0,5 mm×0,5 mm) konieczne było zainstalowanie w kamerze pierścieni dystansowych umożliwiających optyczne powiększenie obrazu.



Rys. 3. Idea budowy stanowiska pomiarowego
Fig. 3. Idea of the measurement set-up

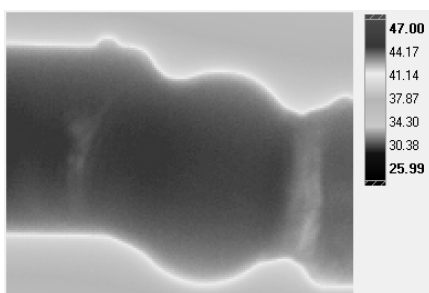
Do badanego mikrołączenia spawanego laserem dostarczona energia z generatora przebiegów arbitralnych w postaci prądu przepływającego przez badane połączenie (źródło prądowe). W przeprowadzonych badaniach użyto sygnału w postaci skoku jednostkowego, a wartość prądu w trakcie nagrzewania wynosiła 3 A. Pod wpływem dużego natężenia prądu połączenie spawane laserem pomiędzy dwoma odcinkami drutu niklowego rozgrzewało się z temperatury otoczenia do temperatury wyższej i odwrotnie, po odjęciu energii obserwowano spadek temperatury. Odpowiedź termiczna badanego układu obserwowana była za pomocą

kamery termowizyjnej. Nagrano szereg sekwencji termogramów dla kilkunastu próbek połączeń spawanych laserem zarówno dla nagrzewania jak i schładzania próbki. Rzeczywiste stanowisko pomiarowe pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe do badań nieniszczących
Fig. 4. Non destructive testing set-up

Na rys. 5 poniżej, zamieszczono przykładowy termogram prezentujący badane mikropołączenie spawane laserem, jest to jedna ramka (obraz) z całej zarejestrowanej sekwencji termogramów podczas nagrzewania próbki.



Rys. 5. Przykładowy termogram badanego połączenia
Fig. 5. Exemplary thermogram of the investigated joint

Zarejestrowane odpowiedzi termiczne badanych próbek połączeń spawanych laserem na wymuszenie energetyczne w postaci skoku jednostkowego (nagrzewanie przez 100 sekund) poddano analizie w dziedzinie czasu. Dla wszystkich badanych połączeń wyznaczono stałe czasowe z następującego wzoru (1):

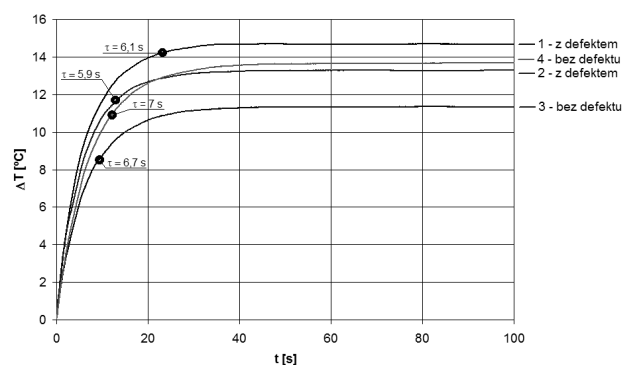
$$y = A \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1)$$

gdzie: A - wartość maksymalna temperatury, t - czas, τ - stała czasowa.

Analiza wartości stałych czasowych otrzymanych z badań pozwoliła na podzielenie badanych połączeń na dwie grupy: połączenia zawierające defekt oraz prawidłowe połączenia bez defektu. W przypadku połączeń zawierających wewnętrzne defekty w postaci pęcherzyków powietrza, stałe czasowe wynosiły około 6 sekund, natomiast w przypadku poprawnych połączeń bez defektu - około 7 sekund. Sposób wyznaczania stałych czasowych przy użyciu wzoru (1) uznano za skuteczny, ponieważ współczynnik korelacji dla regresji nieliniowej, dla wszystkich próbek wynosił powyżej 0,99. Przykładowe, reprezentatywne wyniki analizy stałych czasowych wraz z przebiegami odpowiedzi termicznej badanych obiektów przedstawiono na rys. 6.

Jak wyraźnie widać z powyższego rysunku, metoda stałych czasowych może doskonale służyć do określania jakości mikropołączeń spawanych laserem. Co więcej amplituda odpowiedzi termicznej może być niejednoznaczna ze względu na różny kształt każdego z wykonanych połączeń, a co za tym idzie różną powierzchnię. W większości przypadków amplituda odpowiedzi termicznej połączenia z defektem jest wyższa od amplitudy odpo-

wiedzi prawidłowo wykonanego "spawu" (dla tej samej wartości mocy wymuszenia energetycznego), jednakże w niektórych przypadkach może zdarzyć się odwrotnie (rys. 6).



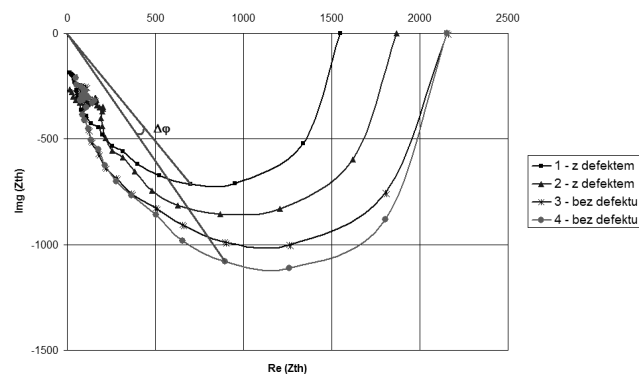
Rys. 6. Przykładowe odpowiedzi termiczne w dziedzinie czasu
Fig. 6. Exemplary thermal response in the time domain

Uwzględniając wszystkie zarejestrowane sekwencje termogramów, zastosowano transformatę Fouriera (FFT). Po przekształceniu odpowiedzi termicznej z dziedzinie czasu do dziedzinie częstotliwości otrzymano fazę i amplitudę odpowiedzi termicznej badanego układu. W celu zweryfikowania metody stałych czasowych, obliczono dla wszystkich badanych próbek fazy odpowiedzi termicznych, a następnie podzielono je na dwie grupy: mikropołączeń z defektem wewnętrznym oraz bez. Obliczone wartości fazy odpowiedzi termicznej badanych połączeń z defektem oraz bez defektu zestawiono w tab. 1. Dodatkowo w celu zobrazowania metody przyporządkowywania badanych próbek w dziedzinie częstotliwości do dwóch opisanych grup, obliczono impedancję termiczną dla każdego z badanych mikropołączeń zgodnie z poniższym wzorem (2):

$$Z(t) = \frac{\Delta T(t)}{P}, \quad Z(j\omega) = \frac{\Delta T(j\omega)}{P(j\omega)} \quad (2)$$

gdzie: $Z(j\omega)$ - zespolona impedancja termiczna, T - temperatura, P - moc.

Przebiegi charakterystyk zespolonej impedancji termicznej dla czterech przykładowych próbek z defektem oraz bez defektu przedstawiono w postaci graficznej na rys. 6. Różnicę wartości fazy pomiędzy poprawną próbką, a połączeniem z defektem oznaczono jako $\Delta\phi$.



Rys. 7. Przykładowa impedancja termiczna badanych połączeń spawanych laserem
Fig. 7. Exemplary thermal impedance of the investigated laser welded joints

Powyższe przykładowe przebiegi zespolonej odpowiedzi termicznej badanych obiektów (z defektem oraz bez defektu) wyraźnie ilustrują różnicę we właściwościach termicznych (a co za tym idzie i elektrycznych) badanych połączeń spawanych laserem pomiędzy próbką z występującym defektem wewnętrznym,

a prawidłowo wykonanym połączeniem bez defektu. Obliczone wartości fazy odpowiedzi termicznej pomiędzy tymi próbkami zestawiono w poniższej tab. 1. Wartości fazy obliczone zostały dla czwartego komponentu, czyli dla częstotliwości $f=40$ mHz.

Tab. 1. Podsumowanie wyników badań
Tab. 1. Summary of the investigation results

Nr próbki	rodzaj próbki	τ [s]	r	ϕ [°] (40 mHz)
1	z defektem	6,1	0,999	-45
2		5,9	0,998	-44
3	bez defektu	6,7	0,999	-48
4		7	0,999	-51

4. Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne mikropołączeń elektrycznych spawanych laserem potwierdzają skuteczność termograficznych metod badań nieniszczących w zastosowaniu zarówno do wykrywania defektów wewnętrznych struktur jak i do określania właściwości fizycznych materiałów. Wyznaczone w tej pracy parametry tj. stałe czasowe oraz impedancja termiczna mogą być wykorzystane do scharakteryzowania wyżej wymienionych parametrów materiałowych. Należy jednak zauważyć, iż powyższe wartości liczbowe stałych czasowych są ściśle powiązane wymiarami geometrycznymi drutu, oraz materiałem z jakiego go wykonano. Dla innych materiałów oraz wymiarów, wartości liczbowe mogą być inne, zachowana jednak zostanie przedstawiona powyżej zależność, na podstawie której możliwe jest klasyfikowanie połączeń na prawidłowe oraz z zawierające defekt wewnątrz struktury.

Co więcej podczas serii przeprowadzonych badań zauważono, a następnie potwierdzono zmianę wartości dyfuzyjności materiału

(Ni) w miejscu przetopu. Podczas łączenia drutów Ni metodą laserową występuje bardzo dynamiczne nagrzewanie a następnie chłodzenie materiału, powstają duże gradienty temperatur oraz raptowna rekrytalizacja niklu. W wyniku powyższych zjawisk, w przypadku nieoptymalnych warunków spawania, oprócz występowania w badanych połączeniach wewnętrznych defektów w postaci pęcherzyków powietrza, występuje także wzrost rezy-stancji termicznej badanych połączeń.

5. Literatura

- [1] Pawlak R.: Laserowa modyfikacja właściwości materiałów przewodzących, Zeszyty naukowe PŁ, Nr 898, Łódź 2002.
- [2] Tomczyk M.: Właściwości termokinetyczne spawanych laserowo wyprowadzeń wewnętrznych w półprzewodnikowych przyrządach mocy, Pr. Nauk. Inst. Podst. Elektrotech. Elektrotechnol. Politech. Wroc. 2006 nr 44 Konf. nr 18 str. 208-212.
- [3] Pawlak R., Tomczyk M.: Metoda laserowego spawania ultra-cienkich przewodów wielodrutowych, 9. Sympozjum Techniki Laserowej - conference materials, pp. 179-180, Szczecin, 2009.
- [4] Maldague X., Galmiche F., Ziadi A.: Advances in pulsed phase thermography, Infrared Physics and Technology, 43, 2002.
- [5] Meola C., Carlomagno G., Squillace A., Giorleo G.: Non destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography, Measurement Science and Technology, 13, 2002.
- [6] Więcek B., Zwolenik S., Danych R., Wajman T., Lis M.: Zastosowanie termowizji w badaniach nieniszczących i w mikroelektronice, Pomiary Automatyka Kontrola, 11, 2002.
- [7] De Mey G., Vermeersch B., Banaszczuk J., Świątczak T., Więcek B., Janicki M., Napieralski A.: Thermal impedances of thin plates, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 2007.

otrzymano / received: 06.08.2011

przyjęto do druku / accepted: 05.09.2011

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Szanowni Autorzy artykułów publikowanych w PAK,

W trosce o jak najwyższy poziom punktacji miesięcznika PAK zwracam się z prośbą o cytowanie artykułów opublikowanych w PAK w innych artykułach, zwłaszcza tych publikowanych w czasopismach z listy filadelfijskiej. Ma to bezpośredni wpływ na współczynnik IF (Impact Factor) miesięcznika PAK.

W algorytmach oceny czasopism współczynnik IF ma największą wagę. Na zwiększenie wartości współczynnika IF redakcja czasopisma nie ma żadnego wpływu, ale wszystko zależy od Autorów cytujących. W przypadku miesięcznika PAK aktualnie każde cytowanie zwiększa IF o około 0,002. Oczywiście cytowanie artykułu tylko wtedy jest uzasadnione, jeżeli jest on tematycznie związany z artykułem cytującym, a autor korzystał z niego przy przygotowaniu pracy.

Aby ułatwić Autorom korzystanie z artykułów opublikowanych w PAK (a także możliwość cytowania) została opracowana przez redakcję PAK „Wyszukiwarka”, umożliwiająca wyszukiwanie artykułów według nazwiska autora, słowa tytułu artykułu, albo frazy kluczowej.

Aby skorzystać z „Wyszukiwarki” należy:

- wejść na stronę: www.pak.info.pl
- w menu „Wyszukiwarka” (po lewej stronie ekranu) wybrać „Artykuły”.

Strona zawiera również szereg innych łatwo dostępnych funkcjonalności, m.in. wykazy artykułów opublikowanych w PAK, a cytowanych w artykułach opublikowanych w czasopismach z listy filadelfijskiej.

Zdaję sobie sprawę, że redakcje niektórych czasopism usuwają cytowania artykułów publikowanych w czasopismach spoza listy filadelfijskiej, np. argumentując, że są one mało dostępne. Taka argumentacja będzie mniej uzasadniona, jeżeli tytuł naszego miesięcznika oraz tytuły artykułów będą podane w cytowaniach w języku angielskim. Proszę zauważyć, że oficjalny tytuł anglojęzyczny miesięcznika PAK (występujący na okładce) ma formę: Measurement, Automation and Monitoring (MA&M), a wszystkie artykuły naukowe publikowane w PAK są napisane albo w języku angielskim, albo mają rozszerzone abstrakty w tym języku.