

Zygmunt BIERNACKI*, Krzysztof WERNER**

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

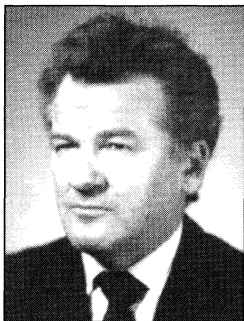
*WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY INSTYTUT ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA

**WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I INFORMATYKI

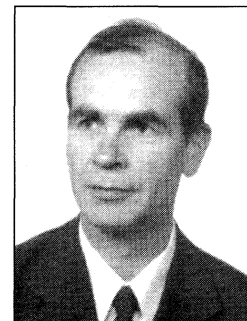
INSTYTUT MECHANIKI I PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN

Badania pęknięć zmęczeniowych w stalach konstrukcyjnych**Prof. dr hab. inż. Zygmunt BIERNACKI**

Ukończył w 1958 r. wydz. Elektryczny Politechniki Wrocławskiej. W Politechnice Częstochowskiej pracuje od 1962 r. W 1969 r. uzyskał stopień dr n. t. z metrologii elektrycznej, a w 1990 r. dr hab. n. t. w Państwowym Uniwersytecie Elektrotechnicznym w Sankt Petersburgu w zakresie Systemów pomiarowo-informacyjnych. Od 1980 r. i aktualnie członek Komisji Kształcenia K. M. i A. N. PAN w Warszawie. Od 1986 r. członek Komisji Metrologii Oddz. Katowickiego PAN. Staże naukowe odbył w: Głównym Urzędzie Miar oraz na uniwersytetach technicznych w Karlsruhe, Stuttgartie i Monachium. W 1998 r. uzyskał tytuł naukowy profesora n. t. Jest autorem lub współautorem około 150 publikacji i kilkunastu patentów. Jego obszar działalności n-b to Metrologia Elektryczna i Elektroniczna.

**Dr hab. inż. Krzysztof WERNER**

Jest profesorem nadzwyczajnym na Politechnice Częstochowskiej. Zajmuje się problematyką wytrzymałości zmęczeniowej materiałów, a w szczególności pomiaru pęknięć powierzchniowych półeliptycznych oraz strefy odkształceń plastycznych na czole pęknięcia. Z tego zakresu wiedzy jest autorem lub współautorem wielu prac naukowo-badawczych zrealizowanych w ramach centralnych programów badawczych. Ponadto jest autorem lub współautorem ponad 50 publikacji w naukowych czasopismach krajowych, zagranicznych oraz w materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych. Jest członkiem następujących zespołów naukowych: Zespołu Inżynierii Powierzchni KBM PAN, Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji PAN, oraz Komisji Metrologii PAN.

**Streszczenie**

Artykuł przedstawia wyniki badań pęknięć w płaskich próbkach ze stali konstrukcyjnych przy zmęczeniowym rozciąganiu. Na podstawie aktualnego stanu wiedzy zaprezentowano oryginalne rozwiązanie przetwornika magnetycznego dwurdzeniowego pracującego w układzie komparacyjnym służącego do pomiaru pęknięć zmęczeniowych. W artykule zawarto także odpowiednie zależności analityczne łączące charakterystyczne wielkości elektryczne z parametrami geometrycznymi próbek. Ponadto zamieszczono charakterystyki wzorcowania układu porównanie wyników pomiaru długości pęknięć metodą optyczną i magnetyczną.

Abstract

In the paper the laboratories examinations of cracks in flat samples made of constructional steels at fatigue tensile are presented. The original design of the magnetic converter with two-core comparator for measurement of fatigue cracks is presented against the background of current condition of science. The paper contains also the adequate analytical dependencies, binded the characteristic electrical magnitudes with geometrical parameters of samples. Moreover the calibration results of of the converter by comparison the measurement results of crack length at using the optical and magnetic method is instanced.

Wstęp

Optymalny dobór materiału na elementy konstrukcyjne maszyn wymaga informacji o rozwoju pęknięć w warunkach obciążeń zmęczeniowych. Badania zmęczeniowego pęknięcia prowadzone są metodami klasycznymi [1], jak i przy użyciu zaadaptowanych do tego celu metod pomiaru parametrów magnetycznych materiałów ferromagnetycznych [2], [3].

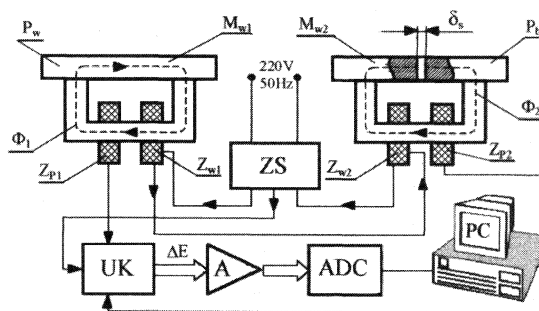
W pracy zaproponowano do pomiaru wzrostu pęknięć zmęczeniowych przetwornik magnetyczny dwurdzeniowy, pracujący w układzie komparacyjnym.

Metodyka badań i układ pomiarowy

Badania przeprowadzono na próbkach płaskich (350×70×10 mm) wyciętych z blachy stalowej o podwyższonej wytrzymałości (SPW)

18G2AV-specjal o granicy plastyczności $R_c=696$ MPa oraz wytrzymałości na rozciąganie $R_m=760$ MPa i złączach spawanych ze stali SPW 15G2ANb ($R_c=395$ MPa, $R_m=510$ MPa). Zastosowano obciążenie zmęczeniowe rozciągające o stałej amplitudzie.

Zaproponowano tu komparacyjny przetwornik magnetyczny [4], [5]. Jego istotą jest dwurdzeniowy przetwornik indukcyjny (rys. 1), złożony z magnetowodów M_{w1} i M_{w2} , w których strumień magnetyczny przepływa przez próbkę i zworę w kształcie litery „C”. W magnetowodzie M_{w1} zwora ściśle przylega do próbki wzorcowej P_w , a w magnetowodzie M_{w2} do próbki badanej P_b . Uzwojenia wzbudzące z_{w1} i z_{w2} magnetowodów są połączone szeregowo i zasilane z zasilacza sieciowego ZS (220/24/12 V, 50 Hz, 15 VA). Siły elektromotoryczne wytworzone przez te uzwojenia wzbudzają strumienie magnetyczne Φ_1 i Φ_2 odpowiednio w magnetowodach M_{w1} i M_{w2} . Ich wartości zależą od reluktancji dróg magnetycznych magnetowodów M_{w1} i M_{w2} .



Rys. 1. Układ komparacyjny do badania pęknięć

Pojawienie się pęknięcia o szerokości δ_s i długości l w próbce prowadzi do zmniejszenia strumienia magnetycznego Φ_2 względem Φ_1 . Strumienie magnetyczne indukują w odpowiednich uzwojeniach pomiarowych z_{p1} i z_{p2} siły elektromotoryczne:

$$e_1 = -z_{p1} \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad \text{oraz} \quad e_2 = -z_{p2} \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} \quad (1)$$

Wartości tych sił są porównywane w układzie komparacyjnym UK, na wyjściu którego sygnał napięciowy ΔE jest bliski zeru gdy w próbce badanej nie ma szczeliny:

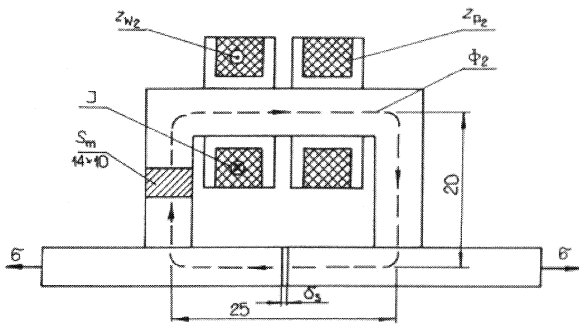
$$\Delta E = E_1 - E_2 = 0 \quad (2)$$

Ogólnie strumień magnetyczny Φ [2] można określić zależnością:

$$\Phi = \frac{\Theta_m}{R_\mu} = \frac{I \cdot z}{R_\mu} \quad (3)$$

We wzorze (3) $\Theta_m = I \cdot z$ jest siłą magnetomotoryczną (w Az), a R_μ jest reluktancją całej drogi – obwodu strumienia magnetycznego (w H^{-1}). Reluktancja R_μ składa się z sumy reluktancji poszczególnych jej odcinków: zwory – $R_{\mu(m)}$, nabiegowników – $R_{\mu(o)}$, próbki – $R_{\mu(p)}$ i szczeliny – $R_{\mu(s)}$

$$R_\mu = R_{\mu(m)} + 2 \cdot R_{\mu(o)} + R_{\mu(p)} + R_{\mu(s)} \quad (4)$$



Rys. 2. Magnetowód z próbką badaną

W obwodzie zwory i badanej próbki, o polach przekroju odpowiednio S_m i S_p (rys. 2), reluktancja wynosi:

$$R_\mu = \frac{l_m}{S_m \cdot \mu_{Fe}} + \frac{2 \cdot \delta_o}{S_o \cdot \mu_o} + \frac{l_p}{S_p \cdot \mu_{Fe}} + \frac{\delta_s}{S_s \cdot \mu_s} \quad (5)$$

Po przepolerowaniu nabiegowników i próbki reluktancję nabiegowników $R_{\mu(o)}$ można pominąć. W próbce wzorcowej należy pominąć też reluktancję $R_{\mu(s)}$ w związku z brakiem w niej pęknięcia. Wtedy strumienie magnetyczne określane są przez rzeczywistą reluktancję $R_{\mu(real)}$:

$$\Phi = \frac{\Theta_m}{R_{\mu(real)}} \quad (6)$$

gdzie w magnetowodzie M_{w1} $R_{\mu(real)} = R_{\mu(1)}$, a w magnetowodzie M_{w2} $R_{\mu(real)} = R_{\mu(2)}$:

$$R_{\mu(1)} = \frac{l_m}{S_m \cdot \mu_{Fe}} + \frac{l_p}{S_p \cdot \mu_{Fe}} \quad (7)$$

$$R_{\mu(2)} = \frac{l_m}{S_m \cdot \mu_{Fe}} + \frac{l_p}{S_p \cdot \mu_{Fe}} + \frac{\delta_s}{S_s \cdot \mu_s} \quad (8)$$

Strumienie magnetyczne Φ_1 i Φ_2 odpowiadają stanowi obu obwodów magnetycznych. Indukowana w uzwojeniu z_{p2} przetwornika pomiarowego siła elektromotoryczna zależęć będzie od wielkości szczeliny w badanej próbce. Różnica sygnału napięciowego ΔE na wyjściu czujników wynosi:

$$\Delta E = \omega \cdot I \cdot \left(\frac{z_{w1} \cdot z_{p1}}{R_{\mu_1}} - \frac{z_{w2} \cdot z_{p2}}{R_{\mu_2}} \right) \quad (9)$$

gdzie $\omega = 2\pi f$ – pulsacja a I – natężenie prądu elektrycznego.

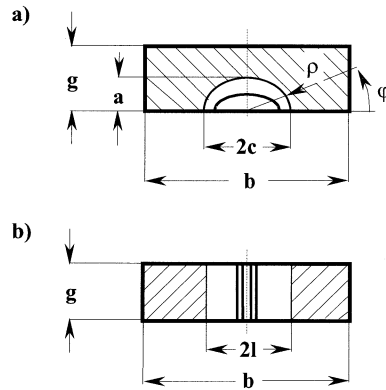
Ze względu na symetrię parametrów konstrukcyjnych obu magnetowodów można przyjąć:

$$z_{w1} = z_{w2} = z_w \quad \text{oraz} \quad z_{p1} = z_{p2} = z_p \quad (10)$$

W rezultacie sygnał napięciowy na wyjściu układu komparacyjnego określa wzór:

$$\Delta E = \omega \cdot I \cdot z_w \cdot z_p \cdot \frac{S_s \cdot \mu_s}{\delta_s} \quad (11)$$

Wartość sygnału napięciowego ΔE może być mierzona bezpośrednio za pomocą miliwoltomierza lub po wzmocnieniu przez wzmacniacz A przesyłana do komputera w sposób ciągły za pomocą karty pomiarowej i rejestrowana na dysku albo poddawana obróbce metrologicznej.



Rys. 3. Pęknięcia: półeliptyczne (a) i skośne (b)

Wyniki pomiaru sygnału ΔE określają parametry pęknięcia poprzez zmianę szerokości szczeliny δ_s i zmianę jej pola S_s . Pole szczeliny powietrznej S_s zależy od wymiarów charakteryzujących pęknięcie (rys. 3). W próbce z pęknięciem półeliptycznym (rys. 3a) pole szczeliny S_s określone jest przez półosię elipsy a i c , a w próbce z pęknięciem skośnym (rys. 3b) – przez jego długość l i grubość próbki g :

$$S_s = 0.5 \cdot \pi \cdot a \cdot c, \quad S_s = 2 \cdot l \cdot g \quad (12)$$

Pole szczeliny w próbce z pęknięciem skośnym zależy tylko od jego długości ($g = \text{const.}$).

Sygnał napięciowy ΔE jest funkcją dwóch wielkości charakteryzujących pęknięcie, tj. rozwarcia brzegów pęknięcia – czyli grubości szczeliny δ_s i jej pola S_s określanego wymiarami pęknięcia w płaszczyźnie jego rozwoju. Rozwarcie δ_s brzegów pęknięcia zależy od jego wymiarów, np. dla pęknięcia skośnego w II etapie pęknięcia δ_s rośnie liniowo ze wzrostem jego długości l . Stąd sygnał napięciowy ΔE będzie ostatecznie jedynie funkcją wymiarów pęknięcia.

Wyniki badań

Przetwornik magnetyczny użyto do badania wzrostu powierzchniowego pęknięcia półeliptycznego w próbce ze stali 18G2AV-specjal oraz pęknięcia przechodzącego na wskroś złącza spawanego ze stali 15G2ANb, przy naprężeniu zmęczeniowym: $\sigma = 150 \pm 50$ MPa w stali 18G2AV-specjal i $\sigma = 131 \pm 87$ MPa w złączu spawanym. Długości pęknięć $2c$ i $2l$ na powierzchni próbek mierzono optycznie z dokładnością 0.025 mm za pomocą dwóch mikroskopów o powiększeniu 24. Jednocześnie badano wzrost pęknięcia za pomocą w/w czujnika magnetycznego. Głębokość pęknięcia półeliptycznego mierzono na podstawie linii przystankowych czoła pęknięcia na powierzchni przetłomu zmęczeniowego próbki.

Na podstawie wyników badań określono prędkość pęknięcia dp/dN i wyrażono ją w funkcji wymiaru pęknięcia albo w funkcji zakresu współczynnika intensywności naprężeń ΔK , co umożliwiło jej opis wzorem Parisa [1]:

$$\frac{dp}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (13)$$

gdzie: $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – zakres współczynnika intensywności naprężeń adekwatny do zmiany naprężenia w cyklu zmęczeniowym $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ wg zależności dla pęknięć:

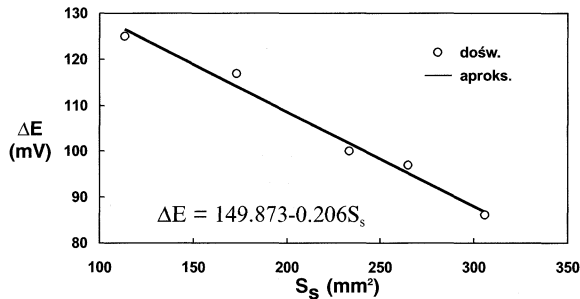
$$\text{- półeliptycznych - } \Delta K = M \frac{\Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot a}}{\Phi(a, c)} \sqrt{4 \sin^2 \varphi + \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \varphi} \quad (11)$$

$$\text{- skośnych - } \Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot l \cdot M} \quad (12)$$

C i m – współczynniki materiałowe, M – współczynnik korekcyjny przekroju próbki, np. dla pęknięć skośnych w próbce o szerokości b ma następującą postać:

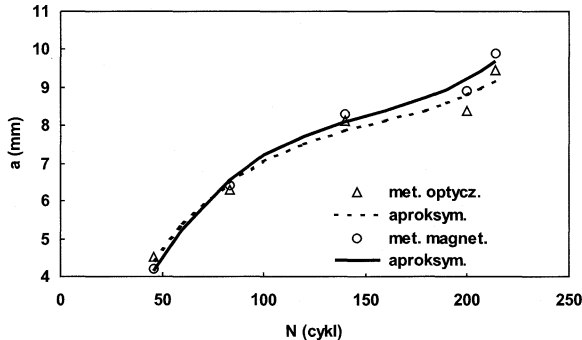
$$M = 1 - 0.1 \cdot \left(\frac{2 \cdot l}{b} \right) + \left(\frac{2 \cdot l}{b} \right)^2 \quad (13)$$

Przeprowadzone badania wskazują, że przebieg wzorcowania w próbce ze stali 18G2AV-special z pęknięciem półeliptycznym jest funkcją liniową wzrostu powierzchni pęknięcia S_s (rys. 4).



Rys. 4. Charakterystyka wzorcowania (pęknięcie półelipt.)

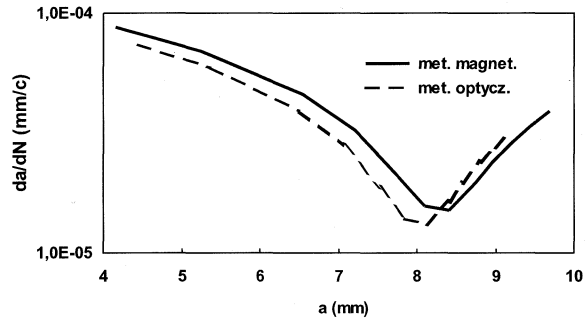
Wyniki badań głębokości a pęknięcia półeliptycznego w tej próbce, określone na podstawie pomiaru sygnału napięciowego sensorem magnetycznym są porównywalne z wynikami pomiarów optycznych w zasadniczym etapie pęknięcia (rys. 5). Większe różnice występują jedynie w końcowym etapie wzrostu pęknięcia. Błąd pomiaru metodą magnetyczną nie jest zbyt wielki (< 10% mierzonej wartości). Dobrą korelację wyników badań, w II etapie pęknięcia dla obu metod, potwierdzają wykresy prędkości pęknięcia $da/dN = f(a)$ (rys. 6).



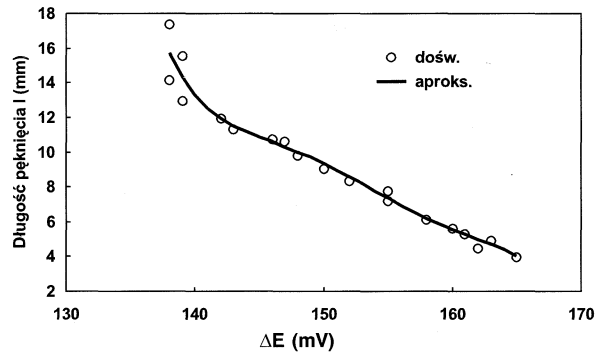
Rys. 5. Wyniki badań głębokości pęknięcia półeliptycznego aproksymowane wielomianem 3 stopnia

Na wykresie wzorcowania układu komparacyjnego dla pęknięcia skośnego w złączu spawanym (rys. 7) wyniki badań długości

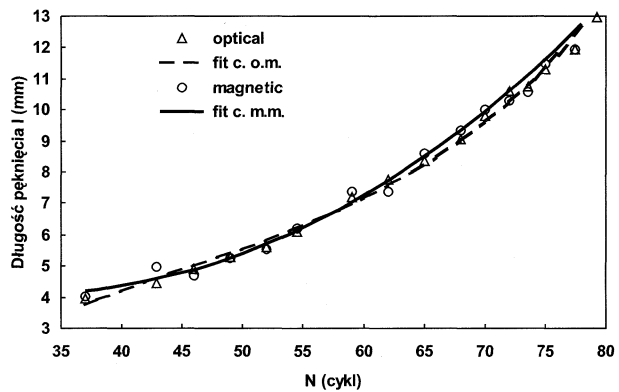
pęknięcia l i sygnału napięciowego ΔE opisano wielomianem 5 stopnia [5].



Rys. 6. Prędkość da/dN dla pęknięcia półeliptycznego

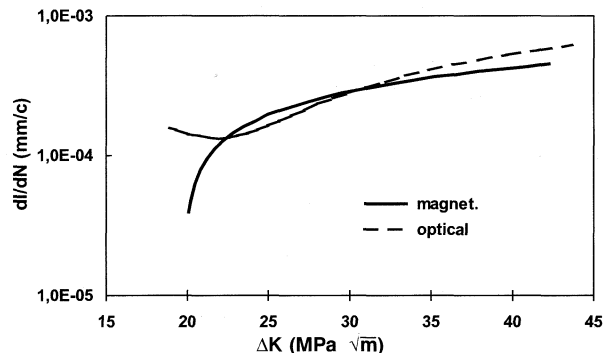


Rys. 7. Charakterystyka wzorcowania (pęknięcie skośne)



Rys. 8. Wzrost pęknięcia skośnego

Wyniki badań długości pęknięcia l wyrażone w funkcji liczby cykli N (rys. 8) wskazują na dobrą zgodność obu metod badań: magnetycznej i optycznej w zasadniczym etapie wzrostu pęknięcia oraz na nieco gorszą ich korelację w początkowym jego etapie. Potwierdzają to także wyniki prędkości pęknięcia dl/dN , które wykazują dobrą zgodność obu metod badań w II etapie wzrostu pęknięcia oraz wyraźnie gorszą w I etapie (rys. 9).



Rys. 9. Prędkość dl/dN dla pęknięcia skośnego

Wnioski

1. Według dostępnej literatury stwierdza się niewielkie wykorzystanie metod magnetycznych do badań zmęczeniowych.
2. Opracowany układ komparacyjny z przetwornikiem magnetycznym stwarza nowe możliwości badania rozwoju pęknięć zmęczeniowych w stalach konstrukcyjnych.
3. Zaprojektowany magnetyczny układ pomiarowy umożliwia zastosowanie techniki komputerowej do opracowywania wyników badań.
4. Wyniki pomiarów pęknięć zmęczeniowych metodami optyczną i magnetyczną potwierdzają dobrą zbieżność obu metod.
5. Zaproponowany przetwornik magnetyczny może być szczególnie przydatny do badania pęknięć powierzchniowych półeliptycznych, czego nie można realizować inną metodą.

Literatura

- [1] S. Kocańda: *Zmęczeniowe pękanie metali*. WNT, 1985.
- [2] J. Kuryłowicz: *Badanie materiałów magnetycznych*. WNT. Warszawa, 1962.
- [3] M. Łapiński: *Pomiary elektryczne i elektroniczne wielkości nieelektrycznych*. WNT. Warszawa, 1974.
- [4] Z. Biernacki, K. Werner: *The Measurements of Crack in The Structural Steels by Using Magnetic Comparative Method*. Proc. 2-nd International Conference on Measurement „Measurement'99” Institute of Measurement Science Bratislava, Smolenice (S. R.) 1999, s. 270-273.
- [5] Z. Biernacki, K. Werner.: *The investigation of fatigue cracks in higher strength steels by using system with the magnetic comparator*. Mat. Int. Conf. „Mechatronics 2000”, Warsaw 2000, s. 431-434.

ZAPRASZAMY do PRENUMERATY czasopisma PAK w 2003 roku

PRENUMERATĘ I KOLPORTAŻ PROWADZĄ

Redakcja

POMIARY-AUTOMATYKA-KONTROLA

ul. Świętokrzyska 14A p. 535, 00-050 Warszawa
tel./fax (022) 827 25 40, tel. (022) 826 74 17
e-mail: pak@data.pl, marketing: dorpak@data.pl
<http://www.iss.pl/pak>

JARD PRESS SA

Przyjmujemy prenumeratę na terenie czterech miast:
Warszawa – tel. (022) 631 48 88 prosić Dział Prenumeraty
Lublin – tel. (081) 747 65 21, Olsztyn – tel. (089) 527 48 74
Płock – tel. (024) 264 79 33

GARMOND PRESS SA

Oddział w Warszawie

ul. Nakielska 3, 01-106 Warszawa, tel. (022) 836 69 21

KOLPORTER SA

ul. Kolberga 11, 25-620 Kielce, tel. (041) 368 36 20 do 25
Oddziały w całym kraju

*Indywidualną sprzedaż prowadzi Centralna Księgarnia Techniczna, 00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A
oraz bezpośrednio Redakcja*