

Przemysław J. BORKOWSKI, Józef A. BORKOWSKI, Marzena SUTOWSKA
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, INSTYTUT NIEKONWENCJONALNYCH TECHNOLOGII HYDROSTRUMIENIOWYCH,
ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin

Jakościowy model procesu cięcia stali nierdzewnej wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną

Prof. dr hab. inż. Przemysław J. BORKOWSKI

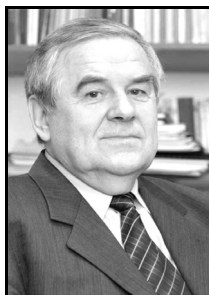
Profesor zwyczajny Politechniki Koszalińskiej. Cała droga naukowa to wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe i proekologiczne. Autor około 300 publikacji (w tym 11 książek), ponad 100 prac zastosowanych w praktyce, z których 7 uzyskało patenty. Czynnny uczestnik 6 międzynarodowych stowarzyszeń, recenzent wielu czasopism naukowych, współorganizator konferencji międzynarodowych. Laureat indywidualnych nagród naukowych PAN, organizacji technicznych krajowych i zagranicznych.



e-mail: przemyslaw.borkowski@tu.koszalin.pl

Prof. dr hab. inż. Józef A. BORKOWSKI

Wyróżniony absolwent Politechniki Wrocławskiej, profesor zwyczajny Politechniki Koszalińskiej. Specjalista z obróbki ściernej i erozyjnej, zwłaszcza obróbki wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną a także proekologicznych i niekonwencjonalnych technologii hydrostrumieniowych. Autor ponad 330 publikacji (w tym 15 książek), około 200 prac zastosowanych w praktyce, z których 31 uzyskało patenty. Opracował około 120 różnych opinii i ekspertyz oraz 80 raportów naukowo-technicznych.



e-mail: jozef.borkowski@tu.koszalin.pl

Dr inż. Marzena SUTOWSKA

Absolwentka Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W latach 2002-2006 doktorantka w Katedrze Inżynierii Mechanicznej. Po ukończeniu studiów doktoranckich rozpoczęła pracę w Instytucie Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych, gdzie pracuje do dnia dzisiejszego na stanowisku kierownika zespołu. W swojej działalności naukowej zajmuje się m. in. zastosowaniem wysokociśnieniowej strugi wodno-ściernej do cięcia różnego rodzaju materiałów.



e-mail: marzena.sutowska@tu.koszalin.pl

Streszczenie

Przez ostatnie dwie dekady nastąpił wyraźny rozwój technologii hydrostrumieniowych, wykorzystujących skoncentrowane strumienie energii w postaci strugi wodnej, często zawierającej ziarniste domieszki. Szczególny przypadek stanowi cięcie materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. Ostatnie lata wskazują na gwałtowną dynamikę rozwoju tego sposobu obróbki materiałów. Jest to związane z postępem technicznym, który pozwala na stosowanie wysokich ciśnień wody uwyplukających liczne zalety tej metody obróbkowej. Ze względu na brak komplementarnej wiedzy upowszechniającej wzajemne zależności czynników wejściowych i wyjściowych procesu cięcia w artykule zaprezentowano jakościowy model omawianego sposobu kształtowania materiałów, opracowany empirycznie dla stali nierdzewnej gatunku 0H18N9.

Słowa kluczowe: struga wodno-ścierna, cięcie materiałów, jakość powierzchni, model procesu cięcia.

Qualitative model of high-pressure abrasive-water jet cutting of stainless still

Abstract

High-pressure hydro-jetting technologies, utilizing concentrated energy streams in the form of water jet usually including abrasive additives have been noticeably developed during last two decades. Particular aspect of that is high-pressure abrasive-water jet AWJ cutting and one can notice rapid development of this technology in recent years. The reason for that is technical progress that let to use high pressure of water emphasizing numerous advantages of this method. Having in mind the lack of complementary knowledge that describes mutual relations of input and output factors of cut process, the paper presents qualitative model of material shaping empirically elaborated for stainless steel type 0H18N9. Elaborated dependence was successfully used for prototype research stand TOPAZ-S, modified to work as a high-pressure abrasive-water jet. Control tests have proved that the model ensures effective (in respect of the quality) steering of process dynamic of stainless steel curvilinear cutting.

Keywords: abrasive-water jet, material cut, surface quality, model of cut.

1. Wstęp

W ciągu ostatnich 20 lat obserwuje się bardzo dynamiczny rozwój hydrostrumieniowych metod obróbkowych, wykorzystujących skoncentrowane strumienie energii w postaci wysokociśnieniowej strugi wodnej, często zawierającej ziarniste domieszki. Ostatnie lata wskazują na gwałtowną dynamikę rozwoju metod cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną [1, 2]. Wynika to niewątpliwie z postępu technicznego, który pozwala na stosowanie znacznie wyższych ciśnień wody [3, 4], a także licznych zalet tej metody obróbki, z których najważniejsze to: niskotemperaturowy przebieg operacji cięcia strugą, wywierająca jedynie niewielkie siły naporu w strefie erozji, możliwość kształtowania praktycznie każdego rodzaju materiału, brak konieczności zmiany narzędzia. Wszystko to stanowi poważną zaletę, stwarzając trudną do pokonania konkurencję dla bardziej tradycyjnych metod obróbkowych. W związku z tym, wysokociśnieniowa struga wodno-ścierna, stanowiąca uniwersalne narzędzie technologiczne, zapewnia sobie coraz to szerszy zakres zastosowań obróbkowych, umożliwiających kształtowanie praktycznie każdego rodzaju materiału [5].

Podstawowymi parametrami procesu technologicznego, charakteryzującymi cięcie materiałów strugą wodno-ścierną, są: ciśnienie strugi wodnej, prędkość posuwu, wydatek ścierniwa, średnica dyszy wodnej, średnica dyszy ogniskującej oraz odległość dyszy ogniskującej od materiału [6]. Znajomość oddziaływania warunków obróbki na jakość otrzymywanych przecięć stwarza możliwość opracowania modelu procesu przecinania materiałów, z jednoczesnym zapewnieniem wysokiej jakości cięcia szczególnie według trajektorii krzywoliniowej [7, 8].

W niniejszym artykule podjęto próbę określenia modelu procesu cięcia stali nierdzewnej gatunku 0H18N9 wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, prognozującego jakość otrzymywanych przecięć, wyrażoną średnim kwadratowym odchyleniem chropowatości powierzchni.

2. Metodyka badań

Prace badawcze zaplanowano pod kątem określenia zależności występujących między ukształtowaniem struktury geometrycznej przeciętych powierzchni (S_q) a zasadniczymi parametrami obróbki (ciśnieniem wody p , prędkością posuwu głowicy tnącej v_f i promieniem krzywizny r kształtu wycinanego wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną). Badania wykonywano przy użyciu maszyny RCT 32, przeznaczonej do cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną firmy Resato (rys. 1).

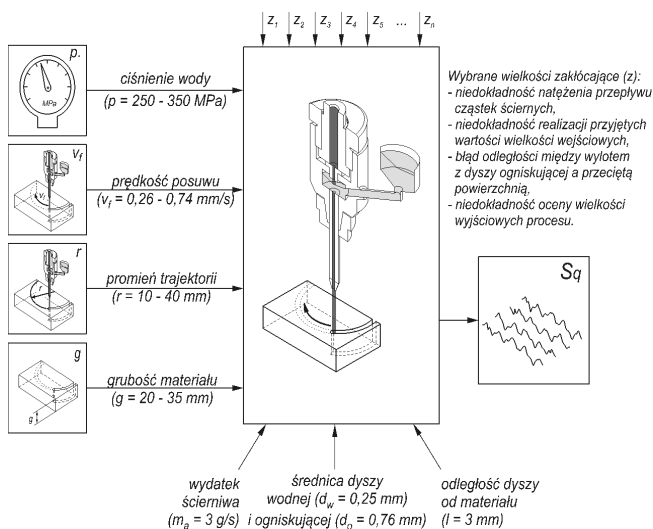
Do wytwarzania wysokociśnieniowej strugi wodnej stosowano wzmacniacz ciśnienia Power Jet PJE-4-4000, napędzany silnikiem elektrycznym o mocy 37 kW ($p_{max} = 380$ MPa, $Q_{max} = 3,8$ dm³/min).

Do badań została zastosowana głowica tnąca typu VJW1-2R-C60-ABR firmy Resato wraz z osadzonymi w jej korpusie dyszą wodną i ogniskującą. Podczas badań ustalanie prędkości posuwu następowało automatycznie zgodnie z wartościami przypisywanymi domyślnie przez program Cadcraft GEMS R4.



Rys. 1. Centrum obróbkowe AWJ typ RCT 32
Fig. 1. Abrasive-water jet cutting machine type RCT 32

Eksperymenty realizowano przy użyciu granatu #80 będącego ścierniwem powszechnie używanym do wytwarzania strugi wodno-ścierniej. Badania wykonywano na stali nierdzewnej gatunku 0H18N9. Głównym powodem zastosowania tego materiału do badań jest fakt, że jest on często używany w konstrukcjach technicznych. Graficzną postać modelu badań ukazano na rys. 2.

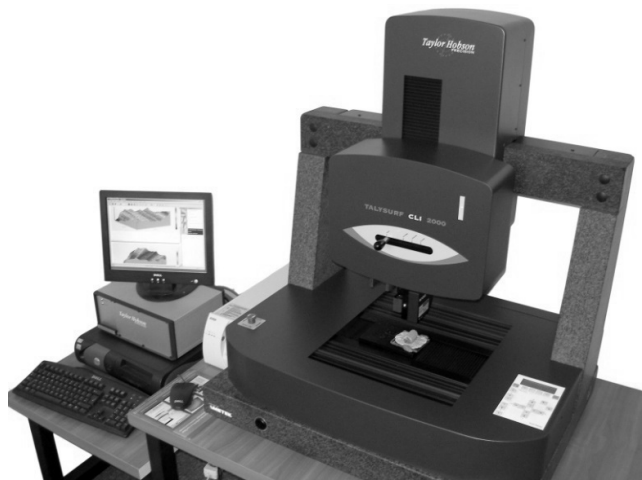


Rys. 2. Schemat modelu badań
Fig. 2. The schematic diagram of the research model

Po zakończeniu eksperymentów, strukturę geometryczną przeciętych powierzchni odwzorowywano stosując profilografometr przestrzenny Talysurf CLI 2000 (rys. 3). Do pomiarów używano bezstykowy czujnik laserowy, umożliwiający pomiar w zakresie nierówności nawet do 30 μm .

Pomiary mikrotopografii odbywały się w 401 przejściach z krokiem co 5 μm . W jednym przejściu rejestrowanych było 4001 punktów co 0,5 μm z prędkością stolika $v = 750 \mu\text{m/s}$. Każdy pomiar był realizowany w trybie jednorobocowym. Dane, otrzymane podczas pomiarów, poddawano obróbce przy użyciu specjalistycznego oprogramowania TalyMap Universal. Dla każ-

dej z otrzymanych mikrotopografii wyznaczano wartość średniego kwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni.



Rys. 3. Talysurf CLI 2000
Fig. 3. Talysurf CLI 2000

Do opracowania modelu cięcia stali nierdzewnej wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną został użyty moduł Estymacja Nieliniowa programu STATISTICA, dzięki któremu, możliwa jest aproksymacja danych doświadczalnych wskazaną przez użytkownika zależnością regresyjną oraz oszacowanie z maksymalną dokładnością wartości współczynników zaproponowanego równania regresji. Wspomniany moduł wykorzystuje domyślnie, jako funkcję kryterium (straty) metodę najmniejszej sumy kwadratów, która jak sama nazwa wskazuje, polega na minimalizacji sumy kwadratów różnic występujących między wartościami obserwowanymi (wynikami eksperymentów) i wielkościami obliczonymi przy użyciu wyznaczonego modelu matematycznego [9].

Do estymacji zależności nieliniowej została wykorzystana metoda Rosenbrocka i quasi-Newtona. Takie łączenie metod jest polecane w sytuacji, gdy nie ma pewności co do właściwych wartości początkowych estymacji [10].

3. Jakościowy model procesu cięcia stali nierdzewnej

Aby określić postać jakościowego modelu procesu krzywoliniowego przecinania stali nierdzewnej strugą wodno-ścierną, przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań oddziaływania warunków obróbki (p_w , v_f , r , g) na ukształtowanie przeciętej powierzchni. Oceny jakości struktury geometrycznej przecięć dokonywano za pomocą średniego kwadratowego odchylenia chropowatości Sq .

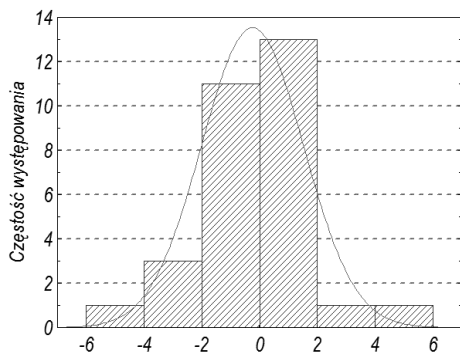
Model matematyczny opisujący oddziaływanie ciśnienia wody p_w , prędkości posuwu v_f , promienia trajektorii głowicy tnącej r oraz grubości przecinanego materiału g na jakość obszaru umiejscowionego w dolnej strefie przeciętej powierzchni stali gatunku 0H18N9, wyrażony średnim kwadratowym odchyleniem chropowatości powierzchni, zawarto w formie następującego wzoru:

$$Sq = 54,8 \cdot 14041 p^{-2,387} \cdot 39,64 v_f^{1,687} \cdot 668 r^{-0,386} \cdot 5270 g^{1,886} \quad (1)$$

Dla wyznaczonej zależności udział wariancji wyjaśnionej, wyrażony za pomocą współczynnika determinacji i określony dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$, wynosi $R^2 = 0,97$. Uzyskana wartość świadczy o dobrym dopasowaniu modelu do danych eksperymentalnych.

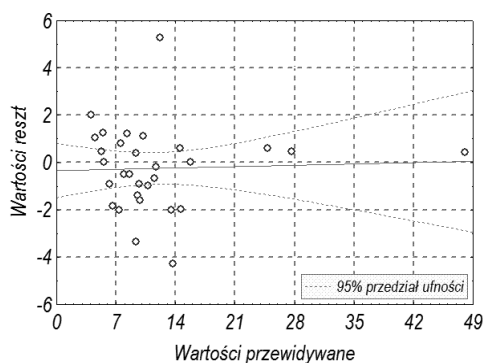
Aby potwierdzić adekwatność wyznaczonej zależności, wykonano statystyczne badanie reszt, czyli różnic występujących między wartościami przewidywanymi (oszacowanymi przy pomocy modelu) i wartościami ustalonymi eksperymentalnie. W analizie regresji przyjęto założenia, że odchylenia losowe reszt są niezależne i podlegają rozkładowi normalnemu. Oznacza to, że proponowany model można uznać za adekwatny do danych eksperymentalnych tylko w przypadku, gdy otrzymane reszty będą wykazywać tendencje potwierdzające poczynione założenia. Oceny słuszności założenia o rozkładzie normalnym reszt dokonano na podstawie histogramu liczebności reszt (rys. 4).

Pomimo tego, że na wykresie nie zauważono żadnych istotnych różnic, które wskazywałyby na sprzeczność z założeniem normalności rozkładu, dokonano analitycznego sprawdzenia poprzez wykonanie testu normalności Shapiro-Wilka.



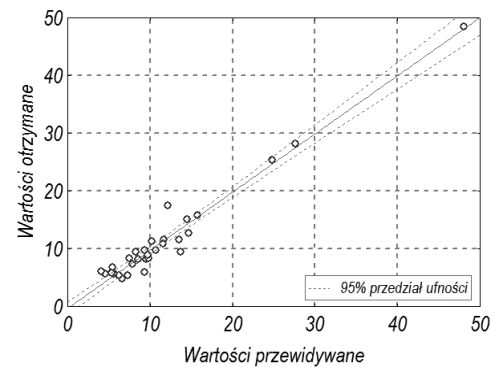
Rys. 4. Histogram liczebności wartości reszt
Fig. 4. Histogram of the rest value size

Wyznaczona wartość statystyki testowej $W = 0,943$ jest wyższa od wartości krytycznej testu ($W_{0,05;30} = 0,927$), ustalonej dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i liczności próby $N = 30$. Względnie wysokie prawdopodobieństwo $p = 0,107$, przekracza wartość przyjętego poziomu istotności α . Na tej podstawie, analizowany rozkład reszt może być traktowany jako rozkład normalny.



Rys. 5. Wykres rozrzutu wartości reszt względem wartości przewidywanych
Fig. 5. Dispersion of the rest values vs. prediction values

Biorąc pod uwagę fakt, że reszty podlegają rozkładowi normalnemu, co zostało udowodnione, należy uznać, że wyznaczony model opisany równaniem (1) jest adekwatny do wyników badań. Potwierdza to wykres rozrzutu wartości reszt (rys. 5) i wartości obserwowanych (rys. 6) względem wartości przewidywanych. Oba rysunki nie ujawniają żadnych szczególnych osobliwości, wskazujących na nieadekwatność omawianej zależności.



Rys. 6. Wykres rozrzutu wartości obserwowanych względem przewidywanych
Fig. 6. Dispersion of observed values vs. prediction values

Fig. 6. Dispersion of observed values vs. prediction values

4. Analiza poprawności modelu jakościowego

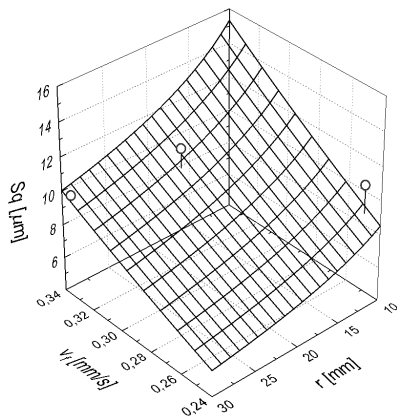
Docelowym zastosowaniem opracowanego modelu procesu cięcia stali nierdzewnej 0H18N9 wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną, prognozującego średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni otrzymywanych przecięć, stało się jego użycie do sterowania prototypowym stanowiskiem badawczym zbudowanym na bazie przecinarki plazmowej typu TOPAZ-S firmy ECKERT (rys. 7). Przekształcając pierwotny układ podzespołów stanowiska, pozostawiono w nieziennej postaci układ sterowania komputerowego NEC 2000 S. Pozwala on na dokładną kontrolę i regulację prędkości posuwu podczas procesu przecinania materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną.



Rys. 7. Prototypowe stanowisko badawcze
Fig. 7. Prototype research stand

Aby zweryfikować efektywność wyznaczonego modelu, przeprowadzono badania kontrolne. Precyzując warunki badań, założono, że ciśnienie wody i grubość przecinanego materiału będą stałe i przyjmą wartość odpowiednio $p = 300$ MPa i $g = 20$ mm. Zakres zmienności promienia krzywizny wycinanego kształtu r określono w przedziale 10–30 mm. Następnie, wykorzystując opracowany statystycznie model procesu cięcia, określający średnie kwadratowe odchylenie chropowatości Sq , oszacowano wartości prędkości posuwu głowicy tnącej, niezbędne do uzyskania wcześniej założonej jakości przeciętych powierzchni ($Sq = 9-10 \mu\text{m}$). Ustalono w ten sposób wielkości parametru obróbki (v_f)

wprowadzono do sterownika NEC 2000 S. Otrzymane rezultaty badań kontrolnych przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Położenie wyników badań względem powierzchni modelu dla 0H18N9

Fig. 8. Position of experimental results vs. model surface for 0H18N9 steel

Analizując położenie uzyskanych wyników eksperymentów (punktów) względem opracowanego statystycznie modelu (powierzchni) można wywnioskować, że różnice występujące między rezultatami badań weryfikacyjnych i wartościami oczekiwanymi nie przekraczają 1,3 µm (12%). To względnie niewielkie zróżnicowanie stanowi podstawę do stwierdzenia, że wyznaczony model jest adekwatny statystycznie do zbioru danych zgromadzonych w badaniach. Ponadto, ten sam model, określający oddziaływanie warunków obróbki na jakość przeciętych powierzchni, wyrażony wskaźnikiem S_g , może być z powodzeniem wykorzystywany do efektywnego sterowania procesem cięcia, realizowanym na prototypowym stanowisku badawczym.

Należy jednak pamiętać, że przy ustalaniu wymaganej wartości parametru S_g powinno się uwzględnić jego 12% odchyłkę. Biorąc pod uwagę położenie punktów pomiarowych względem powierzchni wykresu 3D, można uznać, że wymagana poprawka jest korektą dodatnią, tzn. wartość bazowa obliczona na podstawie modelu musi być zwiększona o odpowiednią wartość procentową.

5. Podsumowanie

W rezultacie przeprowadzonych badań doświadczalnych wykazano, że istnieje ścisła zależność między zasadniczymi parametrami procesu cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wod-

no-ścierną i jakością otrzymywanych przecięć. Znajomość oddziaływania warunków obróbki na strukturę geometryczną przeciętych powierzchni umożliwiła opracowanie modelu procesu przecinania stali nierdzewnej wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną.

Przeprowadzone badania weryfikacyjne dowiodły, że wyznaczona zależność zapewnia efektywne, pod względem jakości uzyskiwanej powierzchni, sterowanie procesem przecinania stali nierdzewnej. Dodatkowo wyznaczony model może posłużyć do sterowania pracą już gotowych obrabiarek, przeznaczonych do cięcia materiałów wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną z niewielkim kosztem jego wdrożenia.

6. Literatura

- [1] Borkowski P.: Podstawy wysokociśnieniowych technologii hydrostrumieniowych. Monografia Instytutu Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych, Nr 174, Koszalin, 2010.
- [2] Hashish M.: Precision cutting of thick materials with AWJ. Proceedings of 17th International Conference on Water Jetting, Germany, 2004, pp. 33-45.
- [3] Hoogstrate, A., Susuzlu, T., Karpushevski B.: High performance cutting with abrasive waterjets beyond 400 MPa. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 55, 2006, pp. 339-342.
- [4] Susuzlu T., Hoogstrate A., Karpushevski B.: Initial research on the ultra-high pressure waterjet up to 700 MPa. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, 2004, pp. 30-36.
- [5] Kulecki M.: Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, 2002, pp. 1297-1306.
- [6] Jegaraj J., Babu N.: A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive waterjets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, 2005, pp. 1443-1450.
- [7] Akkurt A., Kulecki M., Seker U., Ercan F.: Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 147, 2004, pp. 389-396.
- [8] Borkowski J., Sutowska M.: Wpływ warunków procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na parametry SGP. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, Vol. 27, 2007, No. 2, str. 43-51.
- [9] Gajek L., Kałuszka M.: Wnioskowanie statystyczne. Modele i metody. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
- [10] Klonecki W.: Statystyka dla inżynierów. Wydawnictwo PWN, Warszawa, 1999.

otrzymano / received: 07.02.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.06.2013

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Wersja elektroniczna miesięcznika PAK

Pomiary Automatyka Kontrola – Measurement Automation and Monitoring

Artykuły opublikowane w PAK po roku 1989 są dostępne w wersji elektronicznej m.in. w bazie artykułów PAK (www.pak.info.pl), w folderze „Archiwum numerów miesięcznika PAK”:

- pełne teksty artykułów starszych niż 3 lata oraz streszczenia artykułów najnowszych można pobrać bezpłatnie,
- pełne teksty artykułów najnowszych można otrzymać za opłatą (5 PLN +1,15 PLN VAT).