

Dariusz LIPIŃSKI, Wojciech KACALAK, Katarzyna TANDECKA

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY,
Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin

Zastosowanie systemu skanowania przestrzennego do oceny zużycia narzędzi ściernych

Dr inż. Dariusz LIPIŃSKI

W latach 1999 – 2005 asystent a od roku 2005 adiunkt w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się zastosowaniem metod sztucznej inteligencji do monitorowania, optymalizacji i oceny jakości procesów obróbki.



e-mail: dariusz.lipinski@tu.koszalin.pl

Prof. dr inż. Wojciech KACALAK

Kierownik Katedry Mechaniki Precyzyjnej. Specjalność naukowa: mechatronika, diagnostyka, optymalizacja i automatyzacja procesów mikroobróbki oraz procesów bardzo dokładnej obróbki ścierniej, w tym zwłaszcza materiałów trudno obrabialnych, a także budowa i eksploatacja precyzyjnych urządzeń technologicznych.



e-mail: wojciech.kacalak@tu.koszalin.pl

Mgr inż. Katarzyna TANDECKA

Od roku 2006 doktorantka, a od roku 2011 pracownik na stanowisku Samodzielny referent inżyniersko-techniczny w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się procesami mikrowyglądania z zastosowaniem folii ściernych o nieciągłej powierzchni oraz rolek dociskowych o strefowo zmiennej podatności.



e-mail: katarzyna.tandecka@tu.koszalin.pl

1. Wprowadzenie

Szlifowanie należy do podstawowych metod obróbki precyzyjnej. Zużycie ściernie i kształtowe narzędzia ściernego oraz zalepanie jego powierzchni czynnej niekorzystnie wpływa na wynik obróbki. Utrata zdolności skrawnej narzędzi ściernych lub zmiana ich pierwotnego kształtu wpływa na jakość powierzchni obrabianej oraz dokładność wymiarów i kształtu obrabianych przedmiotów. Z tego też względu zużycie narzędzia ściernego jest podstawowym kryterium oceny szlifowalności materiału obrabianego, które ma w konsekwencji decydujący wpływ na okres trwałości narzędzi ściernych.

Zagadnienie to nabiera decydującego znaczenia w przypadku szlifowania stopów trudnoobrabialnych, stosowanych szeroko w przemyśle lotniczym, obronnym oraz medycznym, z uwagi na swe właściwości wytrzymałościowe oraz odporność na degradację powierzchni. Właściwości fizyczne i chemiczne tych stopów niekorzystnie wpływają na ich obrabialność istotnie zmniejszając trwałość narzędzi ściernych.

O zużyciu ziaren ściernych, decyduje zwykle bardzo złożony proces, który obejmuje między innymi [1]: zjawisko kruchej fragmentacji, plastycznego odkształcania, nagrzewania i utleniania ziaren ściernych oraz chemicznego oddziaływania wzajemnego ziaren z wierzchnimi warstwami materiału obrabianego. Badania nad formą zużycia ściernic [1, 2] pozwalają stwierdzić, że zużycie jest zależne przede wszystkim od właściwości materiału obrabianego, użytego ścierniwa, sił skrawania, temperatury, długości strefy styku oraz czasu styku. Wyniki powyższych prac pozwalają wyodrębnić dwa główne typy zużycia narzędzi:

- zużywanie ściernic z przewagą zjawiska tępienia będące wynikiem zużycia ściernego ziaren skrawnych;
- zużywanie się ściernic z przewagą zjawiska samoostrenia następującego głównie w wyniku zużycia wytrzymałościowego ziaren skrawnych;

Zmiany właściwości skrawnych ściernicy w wyniku zużycia, mają wpływ na charakter i intensywność zjawisk zachodzących w strefie szlifowania [2, 3]. Praca ściernicy w warunkach samoostrenia charakteryzuje się wzrostem ilości aktywnych wierzchołków ziaren, a zarazem zmniejszeniem przekrojów warstwy skrawanej. Taki przebieg procesu szlifowania jest szczególnie pożądany w operacjach wstępnych, w których z przedmiotu obrabianego usuwa się znaczne objętości materiału. Z kolei zużycie ściernicy z przewagą postępującego tępienia wierzchołków ziaren, charakteryzuje się wzrostem ich powierzchni starcia. Ściernica traci swą zdolność skrawną, lecz dłużej zachowuje zadany profil powierzchni czynnej. Jest to cecha szczególnie korzystna w przypadku operacji obróbki dokładnej.

Zwiększenie okresu trwałości narzędzi ściernych wymaga odpowiedniego doboru parametrów i warunków obróbki. Dobór parametrów i warunków obróbki jest jednym z podstawowych zadań systemów nadzorowania procesów szlifowania. Podstawą

Streszczenie

Zużycie narzędzia ściernego jest podstawowym kryterium oceny szlifowalności materiału obrabianego, które ma w konsekwencji decydujący wpływ na okres trwałości narzędzi ściernych. W pracy dokonano oceny zużycia narzędzi ściernych z zastosowaniem skanowania laserowego. Zastosowana metoda skanowania laserowego umożliwiła wyznaczenie cech stereometrycznych narzędzi ściernych. Przedstawiono przykłady zastosowania opracowanej metody do oceny zużycia narzędzi ściernych w procesach szlifowania.

Słowa kluczowe: szlifowanie, zużycie narzędzia, cechy stereometryczne, skanowanie laserowe.

Application of the three-dimensional scanning system to evaluation of the abrasive tool wear

Abstract

Grinding is one of the basic precise machining methods. Abrasive and shape wear, as well as smearing of the tool active surface handicap the processing results. The loss of cutting capacity in abrasive tools or alteration of their shape influences the surface quality and precision of the workpiece dimensions and its shape. Evaluation of the abrasive tool surface is the basic criterion of forecasting the tool durability and the process results. The applied method of laser scanning enabled determination of the surface coordinates and subsequently of its stereometric features. Using the information on the abrasive tool surface stereometric structure, evaluation of the level of changes in stereometric features of the tool during the machining process is presented. The developed method allowed for evaluation of the level of abrasive tool wear and, subsequently, formed foundations for assessment of the influence of machining parameters on the durability of abrasive tools, evaluation of the influence of the parameters of the process of shaping the abrasive tool active surfaces on their stereometric characteristics and evaluation of the level of correlation between the monitored process parameters and the degree of the abrasive tool wear.

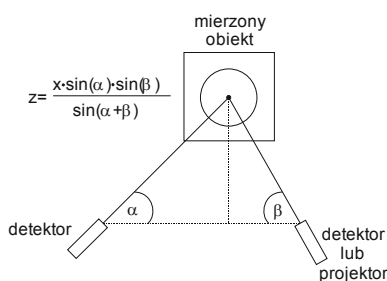
Keywords: grinding, tools wear, stereometric features, laser scanning.

takiego doboru jest monitorowanie zmian zdolności skrawnych narzędzi ściernych w trakcie procesu obróbki.

W poniższej pracy autorzy przedstawili możliwości zastosowania systemu skanowania przestrzennego do oceny stanu narzędzia ściernego. Zastosowany system pomiarowy umożliwił pomiar całej powierzchni narzędzia ściernego bezpośrednio na stanowisku pracy z dokładnością mikrometryczną.

2. Opis zastosowanej metody pomiarowej

Zasada działania systemów optycznych wykorzystywanych do uzyskiwania obrazów 3D mierzonych powierzchni oparta jest na wykorzystaniu trzech głównych technik pomiarowych [4, 5, 6]: pomiarów stereoskopowych, pomiarów z wykorzystaniem pojedynczej linii światła laserowego oraz pomiarów wykorzystujących światło strukturalne. Wszystkie trzy metody bazują na wykorzystaniu metody triangulacyjnej do wyznaczania położenia punktu w przestrzeni (rys. 1).

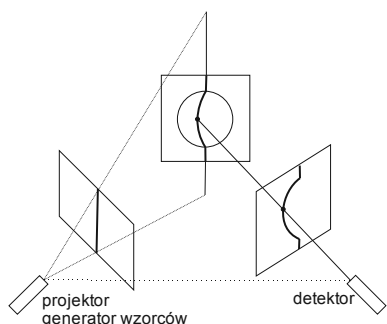


Rys. 1. Ogólny schemat zastosowania metody triangulacyjnej w systemach optycznych wykorzystywanych do uzyskiwania obrazów 3D

Fig. 1. General scheme of the triangulation method of optical systems used to obtain 3D images

Systemy stereoskopowe wykorzystują obraz pochodzący z dwóch lub więcej kamer i stosując metodę triangulacyjną określają położenie w przestrzeni wspólnego punktu znajdującego się na uzyskanych obrazach. Metoda pozwala na szybkie uzyskanie wyników, a jej dokładność wynika między innymi z dokładności ustalenia wspólnych punktów na obrazie stereoskopowym.

Dokładniejszą, choć wolniejszą metodą jest skanowanie obiektu pojedynczą linią światła laserowego. Obraz obiektu oświetlanego linią światła laserowego rejestrowany jest przez kamerę, a następnie poprzez analizę odkształceń linii wyznaczane jest położenie mierzonych punktów w przestrzeni. W przypadku systemów wykorzystujących światło strukturalne mierzony obiekt oświetlany jest światłem zawierającym znany wzorec (rys. 2). Wzorec stanowić może linia (1D) lub układ linii - siatka (2D). Pozwala to na zmniejszenie czasu skanowania z zachowaniem wysokiej dokładności rejestracji mierzonych punktów.



Rys. 2. Ogólny schemat zastosowania metody obrazowania 3D z zastosowaniem światła laserowego lub światła strukturalnego

Fig. 2. General scheme of the imaging 3D method using laser or structured light

Do pomiaru powierzchni czynnej narzędzia ściernego zastosowano skaner wykorzystujący światło strukturalne (rys. 3).



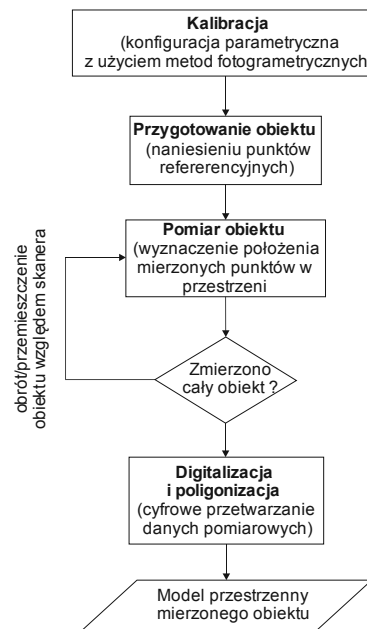
Rys. 3. Triangulacyjny skaner ATOS III SO (Small Object) na stanowisku laboratoryjnym

Fig. 3. Triangulation scanner ATOS III SO (Small Object) on a laboratory stand

Konfiguracja geometryczna detektora i parametrów dystorsji jest kalibrowana przy użyciu metod fotogrametrycznych. Powierzchnia narzędzia ściernego została oświetlona zestawem linii światła niebieskiego tworzących na mierzonej powierzchni siatkę, o określonej gęstości, tworząc tak zwany raster.

Wzorce w postaci obrazów prążkowych zostały zarejestrowane przez dwie kamery CCD. Na podstawie optycznych równań transformacji wyznaczone zostały, dla każdego piksela zarejestrowanego obrazu, niezależne współrzędne 3D. W wyniku powyższych operacji otrzymywana jest chmura punktów, a ilość tych punktów jest zależna głównie od rozdzielczości zastosowanych kamer.

Szczegółową metodykę pomiaru z zastosowaniem systemu skanowania przestrzennego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat metodyki pomiaru z zastosowaniem systemu skanowania przestrzennego

Fig. 4. General scheme of the methodology for measuring with use of the spatial scan system

3. Ocena stopnia zużycia narzędzia ściernego

Ocena stopnia zużycia narzędzi ściernych leży u podstaw monitorowania i optymalizacji procesów szlifowania. Stanowi również podstawę do podejmowania decyzji o odnowieniu powierzchni czynnej narzędzia ściernego.

Cechy stereometryczne narzędzi ściernych modyfikowane są podczas procesu obróbki na skutek działania występujących w procesie skrawania sił oraz temperatury skrawania. Zmiana topografii ściernicy jest spowodowana głównie poprzez zużycie ziaren ściernych (ściernie i wytrzymałościowe) oraz zalepienia powierzchni czynnej przez wióry [1, 2, 3].

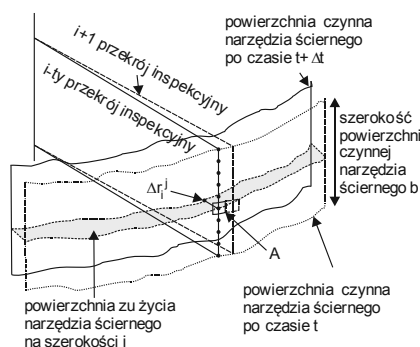
Proponowana metodyka oceny stopnia zużycia ziaren ściernych oraz stopnia zalepienia powierzchni czynnej obejmuje poniższe kroki:

- Pomiar powierzchni narzędzia ściernego $Z(x,y)$. Pomiar dokonywany jest z wykorzystaniem metod bezstykowych umożliwiających pomiar z dokładnością kilkukrotnie (5-7 krotnie) wyższą niż wymiar charakterystyczny ziarna ściernego;
- Ocena stopnia makrozużycia narzędzia ściernego.
- Ocena stopnia zmian zdolności skrawnych narzędzia ściernego. Wyznaczenie wskaźników opisujących zmianę mikrotopografii powierzchni narzędzia ściernego.

Zmianę cech makrogeometrycznych ściernicy oceniano z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania do inspekcji cyfrowych modeli rzeczywistych z modelami konstrukcyjnymi CAD. Jako obiekt referencyjny, na potrzeby badań zużycia, przyjęto ściernicę po procesie kondycjonowania jej czynnej powierzchni.

Narzędzie zostało zmierzone z wykorzystaniem obiektywu o wielkości pola $170 \times 130 \times 130$ mm. Dla zapewnienia dopasowania przestrzennego modeli 3D ściernicy przed i po obróbce, podczas pomiarów zastosowano markery umieszczone na powierzchni narzędzia, która nie brała udziału w procesie obróbki.

Poprzez porównanie modeli ściernic wyznaczono zmiany kształtu w postaci mapy odchyłek geometrycznych całego narzędzia. W celu szczegółowej analizy zmian kształtu narzędzia ściernego wyznaczono na obwodzie ściernicy punkty inspekcyjne oraz przekroje inspekcyjne (rys. 5).



Rys. 5. Schemat do oceny stopnia zużycia objętościowego narzędzia ściernego V_s
Fig. 5. General scheme for evaluation of volumetric grinding tool wear V_s

Zużycie objętościowe narzędzia ściernego wyznaczono zgodnie z zależnością:

$$V_s = \sum_i \sum_j A \cdot r_i^j$$

gdzie: A – powierzchnia elementarna (zależna od kroku dyskretyzacji – liczby przekrojów i punktów inspekcyjnych), Δr_i^j – różnica rzędnych powierzchni czynnej narzędzia ściernego wyznaczona dla j -tej szerokości narzędzia ściernego w i -tym punkcie inspekcyjnym.

Wartości odchyłek geometrycznych powierzchni czynnej narzędzia ściernego poddano dalszej analizie w pakiecie do obliczeń i symulacji inżynierskich Matlab w celu wyznaczenia podstawowych wskaźników zużycia narzędzia ściernego. Opracowany system oceny stopnia makrozużycia narzędzia ściernego umożliwia wyznaczenie i analizę podstawowych parametrów zużycia odniesionych do całej powierzchni czynnej ściernicy lub jej fragmentu.

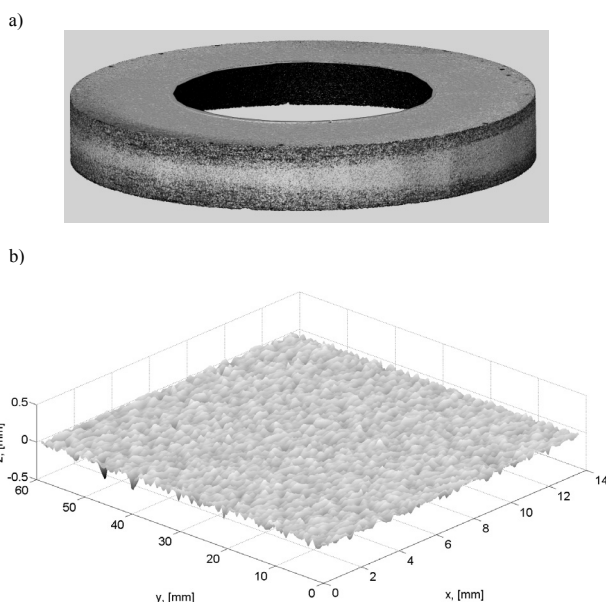
Ocenę stopnia zmian zdolności skrawnych narzędzia ściernego prowadzono na podstawie analizy zmian cech geometrycznych obszarów płaskich na powierzchni narzędzia ściernego. Powierzchnię czynną narzędzia ściernego skanowano z zastosowaniem obiektywu o rozmiarze pola $38 \times 29 \times 15$ mm. Detekcji obszarów płaskich dokonano z wykorzystaniem filtra logicznego oceniającego stopień zmienności rzędnych punktu centralnego okna analizy oraz punktów sąsiednich. Wartość progowa użyta w detekcji powiązana jest z charakterystycznymi cechami geometrycznymi ziaren ściernych. Umożliwia to zastosowanie metod

detekcji do analizy powierzchni narzędzi ściernych o różnej charakterystyce. Szczegółowe informacje dotyczące proponowanej metodyki oceny zawarto w pracy [7].

4. Wyniki badań

Badania stopnia zużycia narzędzia ściernego przeprowadzono na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 3. Analizowano proces zużycia ściernicy o ziarnach ściernych z elektrokorundu (Al_2O_3) o rozmiarze około $250 \mu m$ umieszczonych w spoiwie żywicznym. Proces prowadzono na szlifierce do płaszczyzn, szlifując próbkę współbieżnie obwodem ściernicy. Szlifowano próbkę stalową o twardości 52 HRC i wymiarach 120×240 mm usuwając naddatek $0,02$ mm z posuwem wzdłużnym 10 m/min i posuwem poprzecznym 2 mm na przejście stołu. Po usunięciu sumarycznego naddatku $0,1$ mm dokonywano pomiaru stanu narzędzia ściernego.

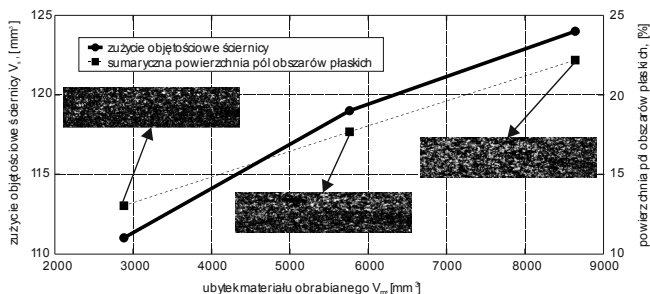
Przykładowy rezultat pomiaru powierzchni narzędzia ściernego przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wyniki pomiaru powierzchni narzędzia ściernego: a) ocena stopnia makrozużycia, b) wycinek powierzchni narzędzia ściernego do oceny stopnia zmian zdolności skrawnych

Fig. 6. The measurement results of the grinding tool surface: a) evaluation of the tool wear rate, b) segment of the grinding tool surface for evaluation of the cutting ability

Na podstawie analizy różnicowej cech makrogeometrycznych narzędzia ściernego w kolejnych stanach obróbki wyznaczono zmiany zużycia objętościowego ściernicy oraz sumarycznej powierzchni obszarów zidentyfikowanych jako płaskie w funkcji ubytku materiału obrabianego (rys. 7).



Rys. 7. Zużycie objętościowe narzędzia ściernego V_s oraz sumaryczna powierzchnia obszarów płaskich w funkcji ubytku materiału obrabianego V_m

Fig. 7. Volumetric grinding tool wear V_s and the total surface flat area as a function of material removal V_m

Detekcję obszarów płaskich dokonano z zastosowaniem przesuwnego okna analizy o wymiarze 3x3 oraz czteropolowej definicji sąsiedztwa. Następnie przeprowadzono segmentację i indeksację obszarów płaskich. W jej wyniku wyodrębniono odpowiednio 7366, 8362 i 7473, obiektów płaskich dla kolejnych stanów narzędzia ściernego. Sumaryczna powierzchnia pól obiektów płaskich wynosiła odpowiednio 13,02%, 17,67% i 22,17% powierzchni narzędzia ściernego.

5. Wnioski

Zastosowanie systemów skanowania przestrzennego do oceny stanu narzędzia ściernego umożliwia jego prowadzenie w warunkach przemysłowych bezpośrednio na stanowisku pracy. Daje to możliwość opracowania podstaw stosowania tego rodzaju urządzeń do bezpośredniej oceny stanu narzędzia ściernego w automatycznych systemach nadzorowania jakości procesów obróbki.

Pomiar powierzchni narzędzia ściernego z zastosowaniem systemu skanowania przestrzennego umożliwia ocenę stopnia makrozużycia narzędzia. Ponadto opracowana metodyka oceny stanu zużycia narzędzia ściernego umożliwia ocenę zmian powierzchni narzędzia ściernego następującą w trakcie obróbki.

Podstawowym problemem w ocenie stanu zużycia narzędzia ściernego jest opracowanie zbioru parametrów oceny ich struktury stereometrycznej, tworzących komplementarny zbiór, zapewniających wysoką skuteczność identyfikującą charakter zużycia narzędzia ściernego oraz łatwość interpretacji ocen.

Opracowanie syntetycznych wskaźników oceny stanu narzędzia ściernego umożliwi włączenie systemu bezpośredniej oceny stanu narzędzia ściernego do systemów monitorowania, optymalizacji i nadzorowania procesów szlifowania. Stanowi również podstawę opracowania modeli zależności parametrów obróbki, mierzonych cech procesowych oraz monitorowanych parametrów jakości procesu obróbki.

Powyższy artykuł powstał w ramach prac badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki.

6. Literatura

- [1] Borkowski J.: Wear and durability of grinding wheels, PWN, Warsaw, 1990.
- [2] Kacalak W.: Wear and durability of diamond grinding wheels in the automated processes of ceramics grinding, Monographs, Koszalin University of Technology, 1989.
- [3] Shaw M.C.: Principles of abrasive processing, Oxford University Press, New York, 1996.
- [4] Sansoni G., Carocci M., Rodella R.: Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors, Applied Optics, Vol. 38, No. 31, s.6565-6573, 1999.
- [5] Gupta M., Agrawal A., Veeraraghavan A., Narasimha A.G.: A practical approach to 3D scanning in the presence of interreflections, subsurface scattering and defocus, International Journal of Computer Vision, Vol. 102, No. 1-3, s. 33-55, 2013.
- [6] Muhr R., Schutte G., Vincze M.: A triangulation method for 3D-measurment of specular surfaces, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 38, Part 5, s. 466-471, 2010.
- [7] Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R.: Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy, Journal of Scanning Microscopy, Wiley, 2013, dx.doi.org/10.1002/sca.21088.

otrzymano / received: 10.05.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2013

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo–technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.

Tadeusz SKUBIS
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK