

METODY LutowANIA DIAMENTÓW W NARZĘDZIACH

Brazing methods for connecting diamonds in tools

Andrzej BAKOŃ, Adam BARYLSKI

Streszczenie: Lutowanie jest jedną z technik wytwarzania narzędzi zawierających diamentowe kryształy, ziarna ściernie i polikrystaliczne spieki jako elementy robocze. Omówiono różne sposoby lutowania diamentów oraz przedstawiono obszary ich zastosowania.

Słowa kluczowe: narzędzia diamentowe, lutowanie, diamenty techniczne

Abstract: Brazing is one of the techniques for manufacturing of tools comprising diamond crystals, polycrystalline materials and abrasive grits as working elements. Discusses various ways brazing of diamonds and presents their application areas.

Keywords: diamond tools, brazing, technical diamonds

Wprowadzenie

Obecnie stosuje się kilka sposobów łączenia diamentów w narzędziach. Szacuje się [11, 9], że 24% to wyroby z diamentami mocowanymi za pomocą spoiw żywicznych, 6% ze spoiw ceramicznych, a 70% różnego rodzaju spoiwami metalowymi. Narzędzia diamentowe do obróbki plastycznej, skrawaniem i ścierno-polerskiej zbudowane są z elementu diamentowego trwale zamocowanego w oprawce lub na korpusie narzędzia. Jedną z technik wykonywania tego typu połączeń jest lutowanie, które w przypadku diamentów bardziej jest kojarzone z produkcją wyrobów jubilerskich niż narzędzi.

Diamenty stosowane w narzędziach skrawających i ścierno-polerskich oraz do obróbki plastycznej można podzielić na (rys. 1):

- kryształy,
- supertwarde spieki diamentowe w postaci kształtek warstwowych (popularnie tzw. materiały PCD – polycrystalline diamonds) lub monolitycznych,
- ziarna i mikroziarna ściernie.

Każda z tych grup charakteryzuje się odmiennymi właściwościami fizykochemicznymi, a tym samym ich mocowanie w narzędziu każdorazowo wymaga zastosowania innych warunków procesu łączenia i właściwej technologii [2, 24, 12].

Jednocześnie można wyodrębnić liniowe, monowarstwowe i przestrzenne rozmieszczenia diamentów, a także szczególny przypadek w postaci narzędzi zawierających jeden kryształ (kształtkę, ziarno) diamentu. W każdej z tych grup jest wiele różnych narzędzi o odmiennych konstrukcjach i właściwościach użytkowych, a także o szerokim zastosowaniu.

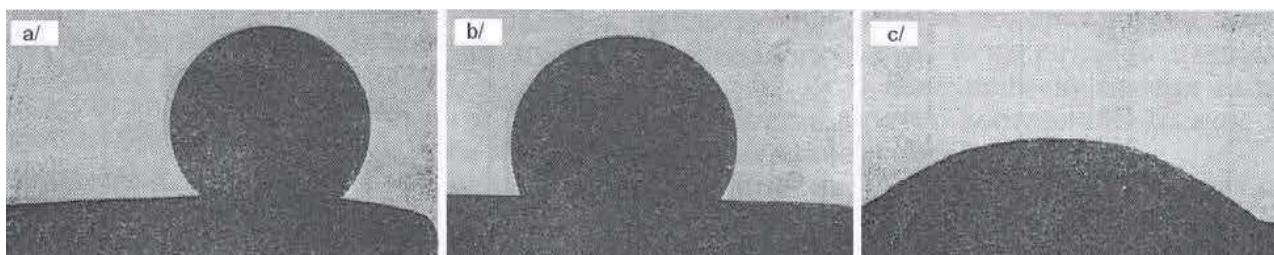
Narzędzia z pojedynczymi kryształami diamentowymi

Przykładami narzędzi z punktowym ułożeniem kryształów i kształtek z materiałów PCD są: narzędzia skrawające (płytki skrawające), obciągacze jednoziarniste, narzędzia chirurgiczne (np. do chirurgii oka), narzędzia grawerskie, narzędzia do cięcia szkła, ciągadła, itd. W tych przypadkach najbardziej popularnymi sposobami



Rys. 1. Przykłady surowca diamentowego stosowanego w narzędziach do obróbki skrawaniem, kontrolno-pomiarowych i ścierno-polerskich: a) kryształy, b) materiały PCD, c) ziarna ściernie [12]

Fig. 1. Examples of diamonds used in cutting tools, measurement and control instruments and abrasive wheels: a) crystals, b) PCD materials, c) abrasive grits [12]



Rys. 2. Obrazy zachowania się różnych lutów na powierzchni diamentu zarejestrowane w mikroskopie wysokotemperaturowym. Zwilżalność przez: a) miedź – temperatura 1150°C, b) srebro – temperatura 1000°C, c) stop 28% Cu i 72% Ag z dodatkiem tytanu – temperatura 900°C [19]

Fig. 2. Images of the different behavior of the brazing alloys on the surface of the diamond recorded in the high-temperature microscope. Wettability by: a) copper – 1150°C temperature, b) silver – temperature of 1000°C, c) an alloy of 28% Cu and 72% of Ag added tytanu- temperature of 900°C [19]

zamocowania diamentu w roboczych uchwytach narzędzia jest lutowanie lub spiekanie.

Lutowanie jest bardzo starą technologią łączenia diamentów, zwłaszcza w jubilerstwie [2, 24, 3, 6]. Podobnie w produkcji narzędzi z dobrze wykształconymi kryształami lub kryształami i okruchami kryształów o pokroju igłowym. Najbardziej popularnymi lutami są luty srebrne, zwłaszcza lut LS45 zawierający do ok. 45% (wag.) srebra oraz miedź i cynk. Lut ten topi się w temp. 675–735°C. Szeroko stosowany jest także tańszy lut LS25 o wyższej temperaturze topnienia, zawierający wagowo do ok. 25% srebra. Wiązanie ma charakter mechanicznego „zakleszczenia”. Powierzchnie kryształów diamentowych są źle zwilżane przez ciekłe metale, szczególnie te, które z węglem nie tworzą węglików w warunkach lutowania (rys. 2). W celu polepszenia zwilżalności zmienia się składy lutów, stosuje się topniki (np. boraks), a w szczególności nakłada się powłoki (np. tytan), poprawiające adhezję lutu do diamentu [19, 23, 4, 21, 12]. Dodatkowo powłoka lub roztopiony topnik chroni kryształ przed utlenianiem.

Gęstość lutów, w tym srebrnych, jest wyższa od gęstości diamentu, dlatego kryształy diamentowe mają tendencję „wypływania” na powierzchni ciekłego metalu. Podczas operacji kryształ musi być trzymany i „wciśnięty” w ciekły lut, aż do momentu jego zastygnięcia. Za zasadę przyjmuje się, że kryształ powinien wystawać ponad poziom lutu maksymalnie do 1/3 swojej wysokości.

Kryształy diamentu charakteryzują się anizotropią pod względem właściwości mechanicznych i każdorazowo muszą być ustawiane w narzędziu pod względem optymalnej ich twardości i odporności na ścieranie. Przed skierowaniem kryształów do produkcji narzędzi są one wnikliwie analizowane pod względem ich pokroju i budowy wewnętrznej. W zależności od rodzaju surowca są także łupane lub cięte w celu nadania im kształtu, w którym widoczne są charakterystyczne kierunki symetrii i ściany diamentu, a tym samym kierunki maksymalnych ich odporności na ścieranie, jak i twardości. Podczas operacji przygotowania kryształów oraz ich orientacji w narzędziu pod względem położenia wykorzystuje się często metody rentgenowskie.

Narzędzia z pojedynczymi kształtkami ze spieków diamentowych

Kształtki z supertwardych spieków diamentów lutuje się inaczej, gdyż charakteryzują się izotropowymi właściwościami fizykochemicznymi oraz dokładnie sprecyzowanym kształtem i wymiarami. Niestety wadą warstwowych materiałów PCD jest względnie niska ich odporność na podwyższoną temperaturę [21]. Konieczne jest stosowanie specjalnych lutów o niższych temperaturach topnienia (tab.1) i krótszych czasów lutowania (rys. 3). Jeżeli lutowanie kryształów diamentu można wykonywać ogrzewając indukcyjnie lub przy pomocy palnika, to w przypadku materiałów PCD o budowie warstwowej zaleca się tylko grzanie indukcyjne. Jeżeli kształt diamentu lub elementu z PCD i jego umiejscowienie w oprawce umożliwiają, stosuje się luty postaci pasków przyciętych do wielkości i kształtu złącza. W ten sposób wytwarza się narzędzia skrawające i ciągnące, a także świdry i koronki wiertnicze.

Tabela 1. Luty twarde zalecane do łączenia materiałów PCD ze stalowymi korpusami narzędzi do obróbki skrawaniem [12]
Table 1. Brazing materials recommended for joining the steel bodies with PCD materials in cutting tools [12]

Producent	Nazwa handlowa lutu	Charakterystyczne temperatury [°C]	
		solidus	liquidus
Jahson Matthey Metals	Easy-Flo No. 3	620	630
Degussa	5009	645	690
Handy & Harmann	Easy-flo No. 45	632	688

Rozwój inżynierii materiałowej sprawił, że dostępne są także supertwarde spieki diamentowe, charakteryzujące się opornością termiczną porównywalną z parametrami monokryształów diamentu [20, 10, 12]. Są to materiały uzyskane w warunkach wysokich ciśnień o monolitycznej budowie z nano- i mikroziaren diamentowych spojonych substancją o współczynniku rozszerzalności zbliżonym do rozszerzalności diamentu (np. węgiel krzemu, krzem).



Rys. 3. Zalecanie warunki lutowania materiału SYNDITE™ (materiał PCD produkowany przez firmę Element Six) w stalowych korpusach narzędzi do obróbki skrawaniem [21]

Fig. 3. Prescribing conditions for brazing alloys for SYNDITE™ (PDC materials manufactured by Element Six) on steel bodies cutting tools [21]

Są to kształtki o budowie monolitycznej, a ich główne obszary zastosowań to narzędzia wiertnicze, frezy do obróbki kamienia i obciągacze.

Narzędzia z diamentami lutowanymi w próżni

Łączenie diamentów w próżni (tzw. vacuum brazing) znalazło też szerokie zastosowanie zwłaszcza w przypadku narzędzi z ziarnami ściernymi rozmieszczonymi w postaci monowarstwy (np. różnego rodzaju ściernice, frezy). Technika ta jest stosowana także w przypadku pojedynczych i wielu kryształów, kształtek oraz ziaren [20, 22, 7, 17, 13, 1]. Próżnia zabezpiecza metalowe spoiwo przed utlenianiem, a także sprzyja usuwaniu porów na stykach lutu z ziarnami i korpusem. Proces wiązania przebiega we względnie wysokich temperaturach, które umożliwiają zwilżenie i „oblanie” całego ziarna diamentowego przez lut i mocnego związania z korpusem (rys. 4).

Dobre zwilżenie uzyskuje się stosując diamenty powlekane pierwiastkami tworzącymi węgliki oraz tzw. luty aktywne, w szczególności luty na bazie Ag – Cu z dodatkiem tytanu lub luty na bazie brązów niklowych, które umożliwiają uzyskanie mocniejszego spoiny i są bardziej odporne na korozję. Względnie wysokie temperatury topnienia lutów pociągają za sobą konieczność stosowania diamentów o wytrzymałości termicznej dostatecznie wysokiej i dopasowanej do warunków realizacji operacji łączenia.

Pod względem budowy, narzędzia lutowane w próżni są podobne do popularnych diamentowych narzędzi ściernych ze spoiwami galwanicznymi i konkurencyjne [1]. Ich praktyczne zastosowania szczególnie szybko się poszerzają [18, 20, 22, 7, 16, 17, 13, 10, 14]. Jak dotychczas są one przeznaczone do obróbek mniej precyzyjnych (zgrubne szlifowanie, frezowanie, cięcie i wiercenie) – rys. 5. Złącze wykonane w próżni jest znacząco mocniejsze od spajania galwanicznego lub za pomocą żywic i klejów.



Rys. 4. Urządzenie HLA do wytwarzania narzędzi diamentowych metodą lutowania w próżni produkcji firmy Trenker Diamant-Anlagen-Technik [16]

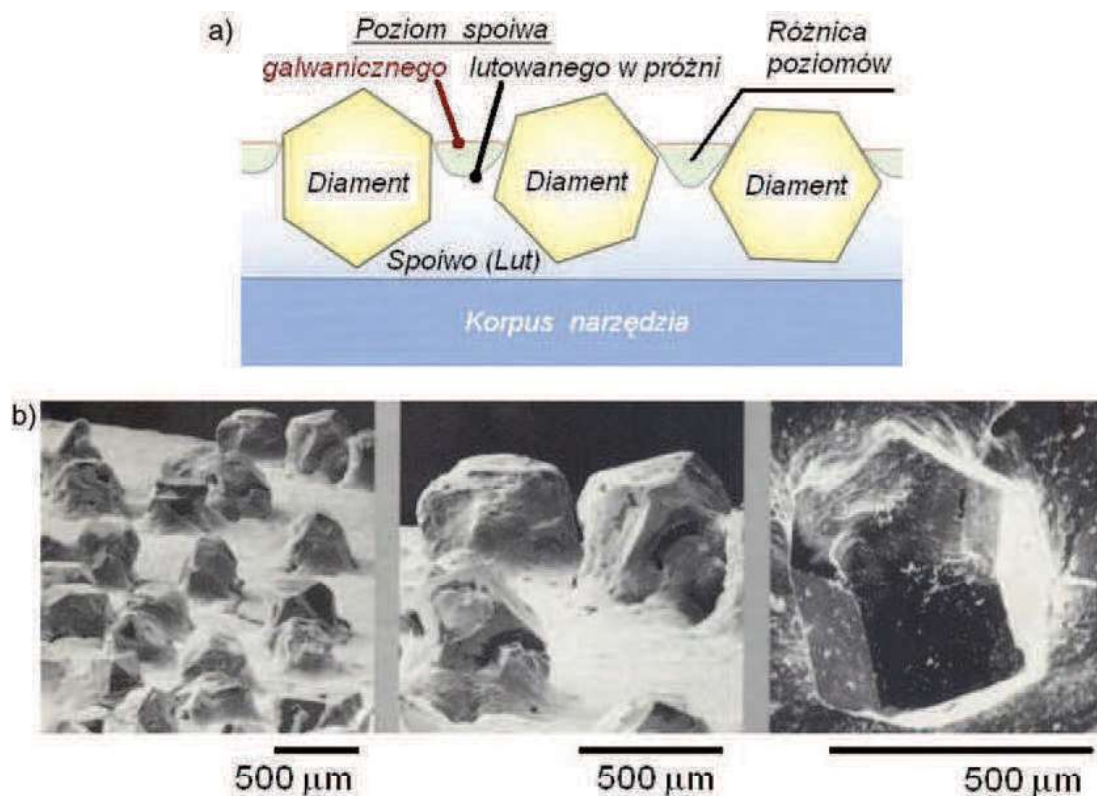
Fig. 4. The device HLA for manufacturing of diamond tools by brazing in a vacuum, produced by Trenker Diamant-Anlagen-Technik [16]



Rys. 5. Narzędzia diamentowe wytworzone metodą lutowania w próżni [14]

Fig. 5. Diamond tools made by brazing in a vacuum [14]

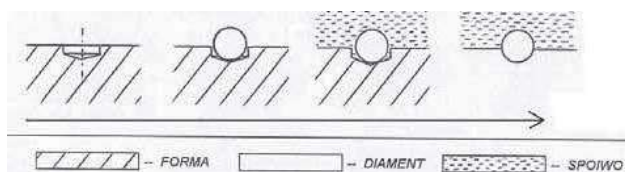
Połączenie ziaren z korpusem jest praktycznie bez porów, a lut może otaczać diamenty tylko powierzchniowo, dzięki czemu ziarna bardziej wystają ponad powierzchnię korpusu, a tym samym powierzchnia czynna narzędzia jest bardziej ostra (rys. 6). Lutowane monowarstwy diamentowe są bardziej odporne na drgania i przypadkowe uderzenia. Narzędzia z diamentami lutowanymi w próżni są droższe od narzędzi galwanicznych, ale umożliwiają bardziej wydajną pracę, w tym ręczną na sucho, z większymi naciskami. Ich podstawowy obszar zastosowań to kompozyty (np. stosowane w produkcji lotniczej i jachtów), czy kamień i ceramika – trudne do obróbki za pomocą innych narzędzi. Ich wydajność w tych operacjach jest do kilku do kilkunastu razy większa niż narzędzi galwanicznych.



Rys.6. a) Porównanie budowy wiązania ziaren ściernych lutowanych próżniowo i wiązanych galwanicznie, b) widok powierzchni narzędzia z diamentami lutowanymi próżniowo [22]
 Fig. 6. a) Comparison of construction bonds abrasive grains bonded by vacuum brazing and electroplating, b) view of the tool surface with a vacuum brazed diamonds [22]

Narzędzia z diamentami łączonymi metodą infiltracji metalu

Specyficznym sposobem łączenia diamentów i monolitycznych spieków za pomocą lutów jest metoda infiltracji [2, 9]. Polega ona na wprowadzeniu ciekłego lutu w porowaty szkielec, który po nasyceniu metalem będzie stanowił częściowo gotowy wyrób diamentowy. Proces produkcyjny jest kilkuetapowy, w którym pierwszy polega na wykonaniu „negatywu” przyszłej czynnej powierzchni narzędzia (rys. 7) – jest to ułożenie diamentów w gniazdach. W precyzyjnie wykonanej formie tworzy się gniazda, w które wkłada się diamentu lub kształtki z monolitycznych spieków. Na tym etapie produkcji istnieje możliwość krystalograficznej orientacji poszczególnych ziaren pod względem ich optymalnych właściwości na ścieranie i twardości. Anizotropię diamentu uwzględnia się formując odpowiednio kształt i ukierunkowanie gniazda [18, 5].



Rys. 7. Etapy powstawania narzędzia diamentowego metodą infiltracji [2]
 Fig. 7. Stages of the diamond tool manufacturing by infiltration [2]

Operację układania zorientowanych diamentów można zautomatyzować i czynnościami sterować ze wspomaganie komputerowym. Dodatkowo można też wspomagać się tu aparaturą do badań dyfrakcji rentgenowskiej i na podstawie sygnału z analizy odpowiednio ustawić przestrzennie kryształ diamentu, zgodnie z jego osiami krystalograficznymi.

Formy wykonuje się ze stali (wkładki z diamentu do obciążaczy) lub z materiałów bardziej odpornych na temperaturę jak grafit lub ceramika (np. narzędzia wiertnicze). Kolejnym etapem jest zasypanie formy wypełniaczem i kawałkami lutu (tab. 2). Do zadań wypełniacza należy „utrzymanie” diamentów w ich gniazdach w formie. Gęstości diamentu i metalu infiltrującego są bardzo różne i po stopieniu metalu diamenty wypływałyby na jego powierzchnię. Wypełniacz musi mieć większą gęstość także od metalu infiltrującego, jednocześnie jego obecność nadaje spoiwu założoną twardość i odporność na ścieranie. Jako wypełniacze używa się proszki metali, w tym ciężkich – jak wolframu lub molibden, a także węgiel wolframu w postaci proszku. W trakcie wygrzewania lub bezpośrednio po wyjęciu formy z pieca dociska się gorącą masę. Jeżeli mamy do czynienia z narzędziem z korpusem, do którego ma być przytwierdzony diamentowy element ścierny (np. koronki wiertnicze), na tym etapie wygrzewa i prasuje się całość, tj. element diamentowy łącznie z korpusem. Produkt wygrzewania wyjmuje się z formy po jej ostudzeniu i obrabia

w celu nadania monowarstwie diamentowej wymiarów w zakresie wymaganych tolerancji do określonej operacji.

Tabela 2. Charakterystyka lutów oferowanych przez firmę Kennametal Inc. przeznaczonych do wytwarzania narzędzi diamentowych metodą infiltracji [15]

Table 2. Characteristics brazing materials offered by Kennametal Inc. for the manufacture of diamond tools by infiltration [15]

Oznaczenie firmy Kennametal Inc.	Macrofil 49™	Macrofil 53™	Macrofil 56™	Macrofil 65™
Skład chemiczny:	% (wag.)			
miedź	49	53	56	65
nikiel	10	15	43	15
cynk	4	8	–	20
mangan	–	24	–	–
cyna	–	–	1	–
Gęstość [g/cm ³]	8,15	8,20	8,20	8,70
Temperatura topnienia [°C]	930	1090	870	1095

Metody infiltracji metalu stosuje się w produkcji narzędzi, w których kryształ diamentu kruszy obrabiany materiał na zasadzie zgniotu (obróbka kruchych materiałów o budowie wieloskładnikowej, wiercenie geologiczne, obciążanie ściernic) lub w przypadkach kiedy zależy nam na bardzo dokładnym zachowaniu kształtu przedmiotu obrabianego i potrzebna jest powierzchnia narzędzia bardzo odporna na ścieranie. Główne obszary zastosowań takich narzędzi to obciążacze (w tym rolkowe) oraz wiertła i frezy do obróbki kamienia, betonów i kompozytów ceramicznych.

Podsumowanie

Techniki lutowania mają szerokie zastosowanie w produkcji narzędzi diamentowych. Jednocześnie są one ciągle rozwijane, zwłaszcza przez opracowywanie nowych niżej topliwych lutów, czy lepiej zwilżających i wiążących diamenty. Wprowadzanie do przemysłu lutowania w próżni spowodowało wzrost ilości zastosowań narzędzi lutowanych z ziarnem ściernym w operacjach cięcia, wiercenia, frezowania i zgrubnego szlifowania.

LITERATURA

[1] Bakoń A., A. Barylski. 2016. „Monowarstwowe narzędzia diamentowe w produkcji nowoczesnych środków transportu”. *TTS – Technika Transportu Szybnego* (12): 386–390.

[2] Bakoń A., A. Szymański. 1992. „Practical Uses of Diamond”. Warszawa: PWN – Ellis Horwood.

[3] Dobrzański L.A. 2006. „Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo”. Warszawa: WNT.

[4] Egan D., J.A. Engels. 2014. “The use of coated diamonds in diamond impregnated tools”. *Industrial Diamond Review* (4): 34–38.

[5] Huang S. F., H.I. Tsai, S.T. Lin. 2002. “Laser brazing of diamond grits using a Cu-15Ti-10Sn brazing alloy”. *Materials Transactions* (43): 2604–2608.

[6] Jacobson D.M., G. Humpston. 2005. “Principles of Brazing”. ASM International, Materials Park.

[7] Jennings M. 2008. “Brazed single layer tools made their mark”. *Industrial Diamond Review* (1): 17–19.

[8] Jiang Y.D., G.S. Li, G.F. Li. 2001. “Manufacture and performance of electroplated diamond tools made with nanocrystalline nickel”. *Industrial Diamond Review* (2): 43–45.

[9] Konstany J. 2005. “Powder Metallurgy – Diamond Tools”. Elsevier.

[10] Materiały firmy China Grinding Wheel Corporation (Tajwan).

[11] Materiały firmy Dr. Fritsch AG (Niemcy).

[12] Materiały firmy Element Six.

[13] Materiały firmy Empire Scientific AG (Szwajcaria).

[14] Materiały firmy IJin Diamond (Chiny).

[15] Materiały firmy Kennametal Inc. (Kanada).

[16] Materiały firmy Trenker Diamant-Anlagen-Technik.

[17] Materiały firmy Trigon Technology (USA).

[18] Meng D. et. al. 2012. “Based on the brazing of abrasive orderity arranged diamond tool the new preparation technology research”. *Machine Manufacturing & Automation* (4): 10–11.

[19] Najdicz J.W. 1982. “Pajka i metalizacja swiercztwiordych instrumentalnych materiałów”. Kijów: Naukowa Dumka.

[20] Sung C.M. 1999. “Brazed diamond grid: a revolutionary design for diamond saws”. *Diamond and Related Materials* (8): 1540–1543.

[21] SYNDITE – Polykristalline Diamat (PKD) – Einsatz fuer den Besatz von Schneidwerkzeugen und Verschleissenteilen. Materiały firmy De Beers.

[22] Trenker A., H. Seidemann. 2002. “High-vacuum brazing of diamond tools”. *Industrial Diamond Review* (1): 49–61.

[23] Wang Y.H. et. al. 2002. “Properties and applications of Ti – Coated diamond grits”. *Journal of Materials Processing Technology* (129): 369–372.

[24] Wilks J., E. Wilks. 1992. “Properties and Applications of Diamond.” Butterworth-Heinemann.

dr Andrzej Bakoń – Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, e-mail: a.bakon@stegny.2a.pl

prof. dr hab. inż. Adam Barylski, prof. zw. PG – Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska. 80-233 Gdańsk, ul. G. Narutowicza 11/12, e-mail: abarylsk@pg.gda.pl