

Grzegorz CHOMKA, Tadeusz BIL
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY,
75-620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17

Interpretacja wyników pomiarów powierzchniowej wydajności usuwania powłok lakierniczych strugą wodno-lodową

Dr inż. Grzegorz CHOMKA

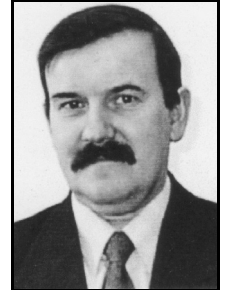
Jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Od 2007 roku zatrudniony jako adiunkt w Zakładzie Teorii Mechanizmów i Podstaw Konstrukcji Maszyn w Katedrze Inżynierii Mechanicznej. Przedmiotem jego zainteresowań jest wytwarzanie i stosowanie wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej do obróbki różnych materiałów.



e-mail: grzegorz.chomka@tu.koszalin.pl

Dr hab. inż. Tadeusz BIL

Jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Od 2010 roku kieruje Zakładem Teorii Mechanizmów i Podstaw Konstrukcji Maszyn w Katedrze Inżynierii Mechanicznej. Przedmiotem jego zainteresowań jest analiza i synteza mechanizmów przestrzennych. Do modelowania i wizualizacji mechanizmów maszyn, identyfikacji parametrów procesów i opracowania wyników badań wykorzystuje metody optymalizacji.



e-mail: tadeusz.bil@tu.koszalin.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów powierzchniowej wydajności usuwania powłok lakierniczych wysokociśnieniową strugą wodno-lodową przy zastosowaniu różnych dysz. Wyniki badań eksperymentalnych poddano aproksymacji z zastosowaniem iloczynu funkcji wykładniczych. Aproksymację wykonano z zastosowaniem metody optymalizacji nieliniowej funkcji wielu zmiennych. Odpowiednio dobrana funkcja aproksymująca pozwoliła na ekstrapolację wyników i wybór dysz, które należy poddać dalszym badaniom.

Słowa kluczowe: aproksymacja, ekstrapolacja, usuwanie powłok lakierniczych, wysokociśnieniowa struga wodno-lodowa.

Interpretation of measurement results of surface coating removal efficiency by water-ice jet

Abstract

New realizations of technical coatings require regeneration of the structures already in service. In this case the significant importance is to carefully remove the old coating, to ensure intactness of the substrate material. One method is to use air jets doped ice particles, or jets such as the stream of cryogenic liquid nitrogen or ammonia. Measurements results of the surface coating removal efficiency by high-pressure stream of water ice using different nozzles are presented in the paper. It was found that irrespective of the pressure water jets, and expense of dry ice treatment, best performance is obtained for the four-hole nozzle having a hole diameter of water amounting to $d_w = 1,2$ mm. Measurement results were approximated using the optimization method for the nonlinear function of many variables. Mathematical description of the measurement results by multiplying the efficiency ratio, ratio dependent on the pressure, and rate-dependent sufficient number of layers removed correctly is given in the paper (approximation error of about 9%). Suitably chosen approximating function allowed for the extrapolation and for the choice of nozzles. They should be subjected to further experiments. Research should be conducted for the maximum pressures possible to application, because the use of lower pressures is not justified in the described experiments. Extreme values of hole diameters less influence on pressure. Similarly, the layer number does not affect the value of the optimum parameters.

Keywords: approximation, extrapolation, lacquer coating removing, high-pressure water-ice jet.

1. Wstęp

Właściwe przygotowanie powierzchni materiału podłoża przed malowaniem jest podstawowym czynnikiem decydującym o jakości powłoki lakierniczej i o jej trwałości. Zaniedbania oraz błędy w tym zakresie wpływają niekorzystnie na zdolność ochronną i dekoracyjną pokrycia malarskiego. Niejednokrotnie stanowią one przyczynę wcześniejszego remontu, lub nawet wymiany niektórych części, co bezpośrednio przekłada się na koszty, które odgrywają istotną rolę przy wszelkich inwestycjach. Należy zauważyć,

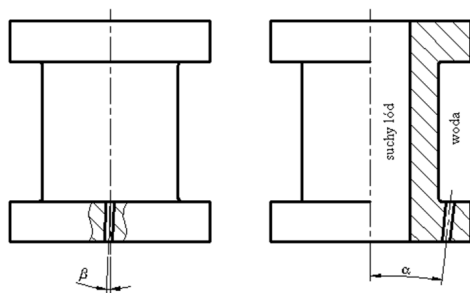
że koszt przygotowania powierzchni przed malowaniem najczęściej przewyższa cenę materiału malarskiego i robocizny. Dłatego niestaranne przygotowanie powierzchni obniżające trwałość i jakość powłok malarskich jest niedopuszczalne. Oprócz malowania nowych konstrukcji technicznych, regeneracji powłok lakierniczych wymagają także konstrukcje już użytkowane. W ich przypadku istotnego znaczenia nabiera dokładne usunięcie starych powłok w sposób zapewniający nienaruszenie materiału podłoża.

Usuwanie rozległych, zbędnych warstw znajdujących się na materiale podłoża jest najczęściej realizowane metodą piaskowania. Dzięki niemu uzyskuje się dobrze przygotowaną strukturę geometryczną powierzchni do nałożenia powłok lakierniczych. Jednak pozostające w materiale podłoża drobiny ścierniwa, powodujące tzw. zbrojenie powierzchni obrabianej, są źródłem korozji i w konsekwencji zmniejszenia trwałości nakładanych powłok lakierniczych. Oprócz nich na znaczeniu zyskują również metody obróbki wysokociśnieniową strugą wodną. Struga taka pozwala bowiem zarówno na dokładne mycie powierzchni, jak i przygotowanie podłoża do ponownego malowania, czy też usuwanie starych powłok, rdzy, bądź innych osadów i zanieczyszczeń. Ponadto obróbka strugą wodną nie powoduje iskrzenia materiału obrabianego, co w przypadku przemysłu chemicznego, a przede wszystkim petrochemicznego, ma znaczenie fundamentalne. Coraz częściej sięga się więc po metody obróbki „bezpieczne” dla materiału podłoża. Niejednokrotnie są one mniej wydajne, lecz w tym wypadku ważniejszy jest stan powierzchni materiału podłoża uzyskany po obróbce. Jedną z takich przyjaznych metod jest zastosowanie strugi powietrza domieszkowanej cząstkami lodu [1, 2, 3], bądź też strugi kriogenicznej jak np. struga ciekłego azotu [4, 5] lub amoniaku [6], a także zamrożonego gazu [5, 7].

Stosowanie wysokociśnieniowej strugi wodnej z dodatkiem cząstek suchego lodu CO_2 nabiera dużego znaczenia w technice, bowiem gwarantuje nienaruszenie struktury geometrycznej materiału podłoża. Ponadto istotne są również względy ekologiczne i ekonomiczne. Jak dowiedziono [8, 9] usuwanie zbędnego pokrycia powierzchni odbywa się bez wprowadzania naprężeń w materiale podłoża.

2. Stanowisko badawcze

Prace badawcze przeprowadzono na prototypowym stanowisku zbudowanym zgodnie z założeniami wynikającymi z analiz termodynamicznych [9]. Zasadniczym jego zespołem jest stacjonarny hydromonitor służący do wytwarzania wysokociśnieniowej strugi wodnej. Do zasilania pompy wodnej hydromonitora używa się wody czerpanej z sieci wodociągowej. Maksymalne ciśnienie wody jakie można uzyskać wynosi $p_w = 57$ MPa, a jej wydatek określony jest maksymalnie na 80 dm³/min.



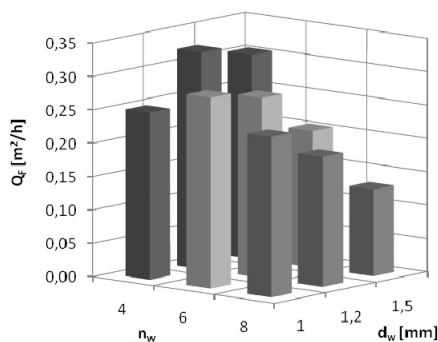
Rys. 1. Dysza koncentryczna
Fig. 1. Concentric nozzle

Z hydromonitora woda pod ciśnieniem dostarczana jest do pistoletu wodnego. Do końca jego „lufy” przykręcono wysokociśnieniowy wąż hydrauliczny, za pomocą którego woda trafia do tryskacza. Tryskacz składa się z korpusu, wewnątrz którego umieszcza się dyszę koncentryczną (rys. 1), której dotyczą przedstawione wyniki badań. Badano rozmieszczenie i średnice otworów służących do doprowadzenia wody. Otwory były rozmieszczone równomiernie na obwodzie dyszy.

Do pomiarów powierzchni usuniętych powłok lakierniczych i obliczania powierzchniowej wydajności obróbki stosowano mikroskop stereoskopowy z kamerą podłączoną do komputera klasy PC z zainstalowanym oprogramowaniem.

3. Wyniki badań i ich analiza

Parametrami mającymi wpływ na wydajność obróbki są m.in. liczba i średnice stosowanych dysz. Do badań użyto dziewięć dysz o zróżnicowanej liczbie (4; 6; 8) i średnicy (1; 1,2; 1,5 mm) otworów wodnych, ustawionych skośnie do osi dyszy (rys. 1). Stwierdzono, że niezależnie od stosowanego ciśnienia strugi wodnej oraz wydatku suchego lodu największą powierzchniową wydajność usuwania powłok lakierniczych pokrywających stop aluminium PA2 uzyskuje się dla dyszy czterootworowej o średnicy otworów wodnych wynoszących $d_w=1,2$ mm (rys. 2). Zwiększenie i zmniejszenie średnicy otworów wodnych w dyszach czterootworowych powoduje spadek wydajności. Dla dysz sześci- i ośmiootworowych zwiększanie średnicy otworów wodnych prowadzi każdorazowo do zmniejszenia wydajności obróbki.



Rys. 2. Wpływ liczby (n_w) i średnicy (d_w) otworów wodnych na powierzchniową wydajność usuwania dwóch warstw farby podkładowej z powierzchni stopu aluminium PA2, przy wydatku suchego lodu $\dot{m}_L = 104$ kg/h i zastosowaniu strugi wodno-lodowej o ciśnieniu $p_w = 35$ MPa

Fig. 2. Effect of the number (n_w) and diameter (d_w) of the holes in the surface into water removal efficiency of two layers of primer from the PA2 alloy surface, at the expense of dry ice $\dot{m}_L = 104$ kg/h using an ice-water jet with pressure $p_w = 35$ MPa

Należy zauważyć, że zastosowanie dysz sześciotworowych z otworami wodnymi o średnicach $d_w=1$ mm oraz $d_w=1,2$ mm zapewnia mniejszą wydajność obróbki niż przy użyciu dyszy czterootworowej o średnicy otworów wodnych $d_w=1,5$ mm. Analogicznie jest w przypadku dyszy ośmiotworowej, w której śred-

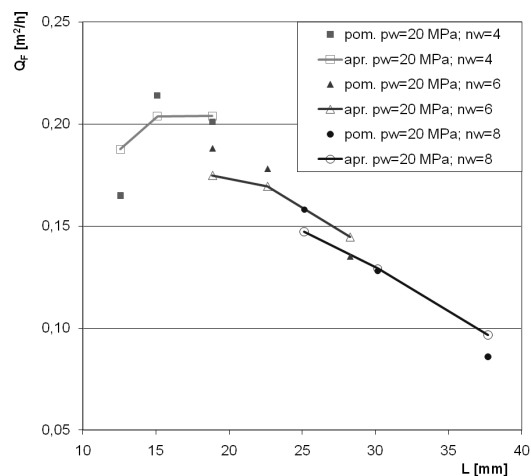
nica otworów wodnych wynosi $d_w=1$ mm. Wspomniane dysze, zarówno sześci- jak i ośmiotworowa, gwarantują mniejszy wydatek wody niż dysza czterootworowa o średnicy otworów wodnych $d_w=1,5$ mm. W tym przypadku nie można więc różnic wydajności usuwania powłok lakierniczych tłumaczyć jedynie „dławieniem” się dyszy wskutek nadmiaru wody. Zaistniałe różnice wyjaśnia fakt, że przy zastosowaniu dysz sześci- i ośmiotworowych występuje większa koncentracja cząstek suchego lodu wewnątrz strugi wodno-lodowej niż przy zastosowaniu dysz czterootworowych. Powoduje ona, że w przypadku dysz o większej liczbie otworów wodnych dochodzi do niekorzystnego spadku erozyjności strugi. O takich prawidłowościach donosi autor opracowania [10] przy rozważaniu zagadnień związanych ze strukturą strugi wodno-lodowej.

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że na powierzchniową wydajność usuwania powłok lakierniczych wpływ wywiera zarówno ilość jak i średnica otworów wodnych dyszy koncentrycznej. Wydajność obróbki powinna zmniejszać się do zera wraz ze zmniejszaniem się obwodu otworów, dla najmniejszych obwodów dysz wodnych, po czym powinna rosnać wraz ze zwiększaniem średnicy dysz. Jednocześnie wzrost liczby otworów przy takim samym sumarycznym przekroju powinien powodować zmniejszanie się wydajności. W celu opisu takiego charakteru zmian przeprowadzono aproksymację wyników badań w oparciu o iloczyn dwóch funkcji wykładniczych. Pierwszy człon opisuje malejący wpływ wzrostu obwodu otworów wodnych, a drugi, rosnący, wpływ wzrostu ich pola powierzchni na powierzchniową wydajność procesu:

$$Q_F = \exp(-\pi d_w n_w A) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-\pi d_w^2 n_w B}{4}\right) \right) \cdot C, \quad (1)$$

gdzie:

n_w – ilość otworów wodnych w dyszy koncentrycznej,
 d_w – średnica otworów wodnych,
 A, B, C – współczynniki funkcji aproksymującej.



Rys. 3. Aproksymacja wyników badań
Fig. 3. Approximation of test results

Zastosowanie równania (1) do aproksymacji wyników badań usuwania dwóch warstw farby podkładowej ze stopu aluminium PA2 przy zastosowaniu strugi wodno-lodowej o ciśnieniu $p_w=20$ MPa i wydatku suchego lodu $\dot{m}_L = 104$ kg/h przedstawiono na rys. 3.

W przeprowadzonej aproksymacji do wyznaczenia wartości współczynników A, B, C wykorzystano moduł Solver programu Excel. Komórką celu (kryterium) w module Solver była suma kwadratów różnic wartości funkcji aproksymującej i wyników pomiaru. Po określeniu współczynników stwierdzono, że najwięk-

szy błąd aproksymacji wynosi około 14%, czyli równanie (1) dość dobrze opisuje badany proces. Wprowadzona funkcja była identyczna dla trzech zakresów pomiarowych.

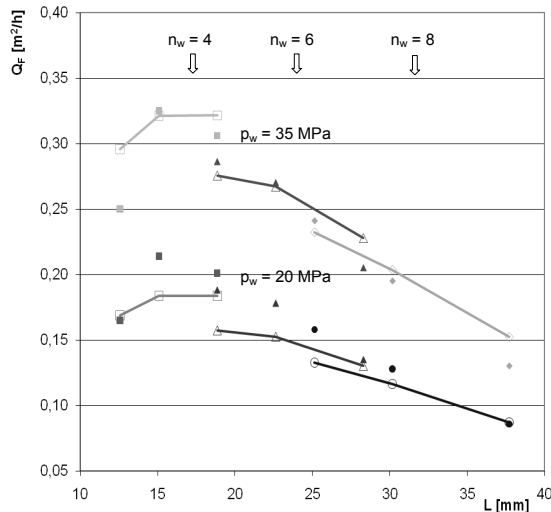
W związku z faktem, że na powierzchniową wydajność obróbki wpływa ciśnienie strugi wodno-łodowej przeprowadzono próbę uwzględnienia go w zaproponowanym równaniu (1). Po wprowadzeniu składnika ciśnienia, który oddziałuje na obie części równania otrzymano zależność (2):

$$Q_F = \exp(-\pi d_w n_w A) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\pi d_w^2 n_w B}{4}\right) \right) \cdot p_w \cdot C, \quad (2)$$

gdzie:

p_w – ciśnienie strugi wodnej.

Równanie (2) zastosowano do aproksymacji wyników badań obróbki strugą wodno-łodową o różnych ciśnieniach. Wpływ sumarycznego obwodu otworów dyszy wodnej na powierzchniową wydajności usuwania dwóch warstw farby podkładowej ze stopu aluminium PA2 przy zastosowaniu strugi wodno-łodowej o ciśnieniu $p_w=20$ MPa i $p_w=35$ MPa oraz wydatku suchego lodu $\dot{m}_L = 104$ kg/h przedstawiono na rys. 4. Maksymalny błąd aproksymacji wynosi około 18% dla większego ciśnienia strugi. Aproksymację przeprowadzono przy identycznych wartościach współczynników A , B , C dla obu wartości ciśnienia.



Rys. 4. Aproksymacja wyników badań dla strugi wodno-łodowej o ciśnieniu $p_w=20$ MPa i $p_w=35$ MPa

Fig. 4. Result approximation for the ice-water jet with pressure $p_w=20$ MPa and $p_w=35$ MPa

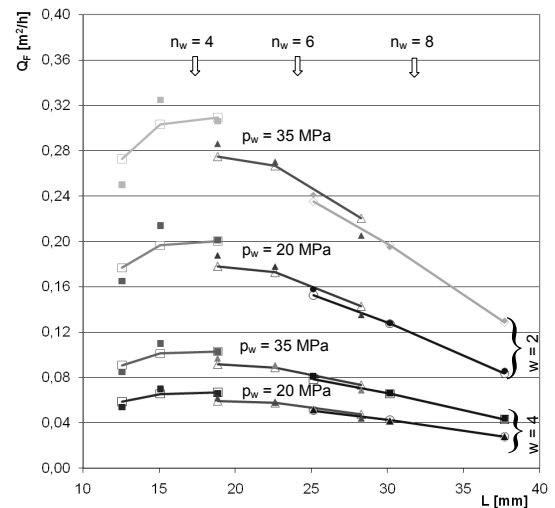
Chcąc osiągnąć lepsze dopasowanie wyników badań do proponowanej funkcji modelowej podjęto próbę uszczegółowienia oddziaływania obwodu otworów wodnych oraz ciśnienia strugi wodnej na proces erozji. Ponadto uwzględniono ilość naniesionych warstw farby (w) na materiał podłoża, gdyż ma ona wpływ na wydajność obróbki. W tym celu uzupełniono równanie (2) do postaci:

$$Q_F = \exp(-(\pi d_w n_w)^2 A) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\pi d_w^2 n_w B}{4}\right) \right) \cdot (p_w + D\sqrt{p_w}) \cdot (w-1) \cdot C \quad (3)$$

Aproksymacji poddano wyniki badań powierzchniowej wydajności usuwania dwóch oraz czterech warstw farby z powierzchni stopu aluminium PA2, przy zastosowaniu strugi wodno-łodowej o ciśnieniu $p_w=20$ MPa i $p_w=35$ MPa, oraz wydatku suchego lodu

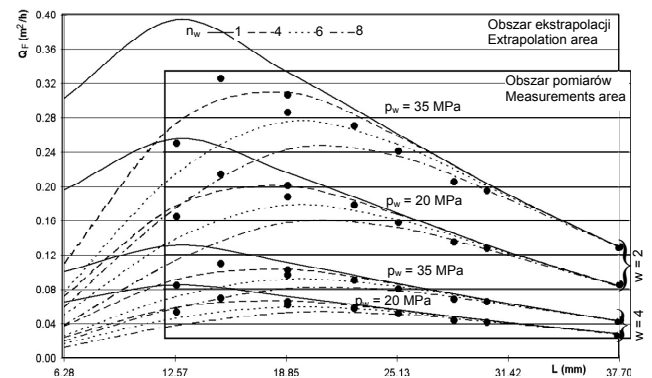
$\dot{m}_L = 104$ kg/h, dla dysz 4, 6 i 8 otworowych (rys. 5). Stwierdzono, że aproksymacja zaproponowanym równaniem (3) odznacza się dobrym dopasowaniem, a największy błąd, występujący tylko w przypadku dwóch punktów, nie przekroczył 9,1%. Dla pozostałych punktów uzyskane wartości są dużo niższe.

Na podstawie funkcji (3) przeprowadzono ekstrapolację poza zakres badawczy (rys. 6). Ze względu na uzyskiwanie w badaniach eksperymentalnych największej wydajności obróbki dla dyszy czterotworowej o średnicy otworów wodnych $d_w=1,2$ mm najbardziej interesujący był obszar o jak najmniejszej liczbie otworów wodnych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że należy stosować jeden otwór wodny o średnicy około 3,5 mm (co odpowiada obwodowi $L=11$ mm). Jednak ze względu na przewidywaną możliwość wystąpienia zaburzeń koncentryczności strugi należy przeprowadzić badania dla dysz z dwoma i trzema otworami wodnymi o średnicach odpowiednio 2,2 mm dla dyszy dwuotworowej i 1,7 mm dla trzyotworowej.



Rys. 5. Aproksymacja wyników badań przy zastosowaniu równania (3)
Fig. 5. Result approximation using equation (3)

Nałożenie obszaru ekstrapolacji na obszar pomiarów przedstawiono na rys. 6. Widać, że wraz ze zwiększaniem ilości otworów doprowadzających wodę należy nieco zwiększać sumaryczny ich obwód, czyli zmniejszać odpowiednio średnicę. Ponadto należy zauważyć, że stosowanie maksymalnego ciśnienia roboczego gwarantuje uzyskanie największe wydajności obróbki, przy czym osiąga się ekstremum dla niemal identycznych średnic dysz przy różnych ciśnieniach. W związku z tym, nie ma potrzeby prowadzenia badań dla różnej ilości warstw farby gdyż nie wpływa ona na wartość optymalnych parametrów.



Rys. 6. Złożenie obszaru badań i ekstrapolacji
Fig. 6. Composition of an area of research and extrapolation

4. Podsumowanie

W procesie badań stwierdzono znaczny wpływ liczby otworów zasilających dyszę w wodę i ich średnic na wydajność procesu usuwania powłok lakierniczych. W badaniach zastosowano od 4 do 8 otworów o różnych średnicach. Opis matematyczny (aproksymacja) wyników pomiarów przy pomocy iloczynu współczynnika efektywności, współczynnika zależnego od ciśnienia i współczynnika zależnego od liczby warstw usuwanych dostatecznie poprawnie opisuje zjawisko (błąd aproksymacji około 9%).

Współczynnik efektywności opisany przy pomocy iloczynu dwóch funkcji wykładniczych spełnia postawione warunki aproksymacji i możliwość ekstrapolacji otrzymanej funkcji poza zakres badawczy.

Otrzymane na podstawie optymalizacji współczynnika efektywności wartości średnic dysz zasilających, przy ich liczbie mniejszej od przyjętych w badaniach daje uzasadnione podstawy do dalszych badań właśnie w tym zakresie. Otrzymana najwyższa wartość współczynnika efektywności dla dyszy z jednym otworem zasilającym, może być oceniona krytycznie ze względu na możliwość zaburzenia koncentryczności strugi, której wpływ podczas badania od 4 do 8 otworów nie został ujawniony. (Proponowany model matematyczny, wzór (3), nie uwzględnia zaburzeń koncentryczności strugi, które mogą się pojawić podczas stosowania dysz z mniejszą liczbą otworów. Do tej pory nie są znane opracowania uwzględniające takie czynniki, a nawet badania dostarczające niezbędnych informacji na interesujący nas temat. Dlatego rozwiązania jednootworowe poddano ocenie krytycznej. Po przeprowadzeniu dodatkowych badań niewykлучzone jest rozbudowanie modelu matematycznego o wpływ czynników zaburzających koncentryczność strugi).

Wskazaniem do dalszych badań jest przeprowadzenie testów dysz z dwoma i trzema otworami zasilającymi, o średnicach zbliżonych do wymiarów otrzymanych na podstawie ekstrapolacji otrzymanej funkcji aproksymującej. Badania powinny być prowadzone dla maksymalnych wartości ciśnień możliwych do zastosowania w praktyce gdyż stosowanie niższych ciśnień nie ma uzasadnienia w opisanych eksperymentach. Wartości ekstremalne średnic otworów mało zależą od ciśnienia. Podobnie badana liczba warstw lakierniczych nie wpływa na wartości optymalne param-

trów. Nie ma więc konieczności eksperymentowania na różnej ich liczbie.

5. Literatura

- [1] Geskin E. S., Shishkin D., Babets K.: Application of ice particles for precision cleaning of sensitive surfaces. Proc. of the 10th American Waterjet Conference. Vol. 1, Houston, Texas, 1999, s. 315-333.
- [2] Ivey R. B.: Carbon dioxide pellets blasting paint removal for potential application on Warner Robins Managed Air Force Aircraft. 1st Ann. Int. Workshop on Solvent Substitution. Phoenix, 1990, s. 88-90.
- [3] Spur G., Uhlmann E., Elbing F.: Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application Wear. Vol. 233-235, 1999, s. 402-411.
- [4] Dunskey C. M., Hashish M.: Observations on cutting with abrasive-cryogenic jets. Proc. of the 13th International Conference on Jetting Technology – Applications and Opportunities. Sardinia, 1996, s. 679-690.
- [5] Liu H. T., Fang S., Hibbard C., Maloney J.: Enhancement of ultrahigh-pressure technology with LN2 cryogenic jets. Proc. of the 10th American Waterjet Conference. Vol. 1, Huston, Texas, 1999, s. 297-313.
- [6] Hashish M., Dunskey C. M.: The formation of cryogenic and abrasive-cryogenic jets. Proc. of the 14th International Conference on Jetting Technology. Brugge, Belgium, 1998, s. 329-343.
- [7] Dunskey C. M., Hashish M.: Feasibility study of the use of ultrahigh-pressure liquefied gas jets for machining of nuclear fuel pins. Proc. Of the 8th American Water Jet Conference, Vol. II, Houston, Texas, 1995, s. 505-517.
- [8] Borkowski P., Chomka G.: Thermodynamics and kinetics of high-pressure water-ice jet creation and its application for surface treatment. International Symposium on: Unconventional HydroJetting Technologies. Koszalin, 2007, pp. 77-90.
- [9] Chomka G.: Podstawy stosowania wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej do usuwania powłok lakierniczych. Praca doktorska, Politechnika Koszalińska, 2006.
- [10] Borkowski P. J.: Teoretyczne i doświadczalne podstawy hydrostrumieniowej obróbki powierzchni. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin, 2004.

otrzymano / received: 03.02.2011

przyjęto do druku / accepted: 04.04.2011

artykuł recenzowany

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