

Prof. dr hab. inż. Dariusz OZIMINA, mgr inż. Joanna KOWALCZYK,  
dr hab. inż. Monika MADEJ, dr inż. Łukasz NOWAKOWSKI,  
dr inż. Justyna KASIŃSKA (Politechnika Świętokrzyska):

## BIODEGRADOWALNE CIECZE CHŁODZĄCO-SMARUJĄCE W SYSTEMACH TRIBOLOGICZNYCH Z POWŁOKAMI DIAMENTOPODOBNYMI

### Streszczenie

Prezentowano wpływ biodegradowalnej cieczy chłodząco-smarującej na zużywanie się powłok diamentopodobnych typu a-C:H. Wykonano badania tribologiczne oraz pomiary kąta zwilżania cieczy obróbkowej na tarczy niepowlekanej i z powłoką DLC. Przeprowadzono obserwacje struktury, a także analizę EDS powłoki DLC na skaningowym mikroskopie elektronowym, a strukturę geometryczną powierzchni przed testami oraz po testach tribologicznych zbadano za pomocą profilometru optycznego. Badania wykazały, że użyta do badań ciecz chłodząco-smarująca doskonale spełnia swoje funkcje.

**Słowa kluczowe:** *biodegradowalne ciecze chłodząco-smarujące, powłoki DLC, tarcie, zużycie*

## BIODEGRADABLE CUTTING FLUIDS IN TRIBOLOGICAL SYSTEMS WITH DIAMOND-LIKE COATINGS

### Abstract

The paper presents the impact of a biodegradable cutting fluid on the wear of diamond-like carbon coatings of the a-C:H type. The tribological tests as well as wetting angle measurements of the cutting fluid on a both uncoated and DLC-coated disc were performed. An observation of the coating structure was carried out using a scanning electron microscope SEM JSM - 7100F. Analysis of the geometric structure of the surface before and after tribological tests were performed optical profilometer Talysurf CCI Lite. The tests have shown that the cutting fluid used for the tests performs its functions excellently.

**Keywords:** *biodegradable cutting fluids, DLC coatings, friction, wear*

# **BIODEGRADOWALNE CIECZE CHŁODZĄCO-SMARUJĄCE W SYSTEMACH TRIBOTECHNOLOGICZNYCH Z POWŁOKAMI DIAMENTOPODOBNYMI**

Dariusz OZIMINA, Joanna KOWALCZYK, Monika MADEJ<sup>1</sup>, Łukasz NOWAKOWSKI<sup>2</sup>, Justyna KASIŃSKA<sup>3</sup>

## **1. WPROWADZENIE**

W procesie obróbki skrawaniem ważną rolę spełniają ciecze chłodząco-smarujące. Mają one wpływ m. in. na zmniejszenie tarcia, chłodzenie obrabianego przedmiotu oraz odprowadzanie wiórów. Ponadto zmniejszają zużycie narzędzi, umożliwiają otrzymanie lepszej jakości obrabianych powierzchni oraz chronią je przed korozją, a także minimalizują siły tnące oszczędzając energię [2, 4, 7, 15, 16].

Obecnie stosowane w przemyśle ciecze obróbkowe są niebezpieczne dla ludzi oraz środowiska. Mogą one wywoływać reakcje alergiczne, zapalenia skóry, podrażnienia oczu, a nawet nowotwory. Odpady cieczy obróbkowych zanieczyszczają wody powierzchniowe i gruntowe. Poważnym wyzwaniem jest utylizacja i/lub recyrkulacja zużytego płynu obróbkowego. W związku, z czym nowoczesne ciecze obróbkowe powinny być całkowicie bezpieczne, a także biodegradowalne [2, 4, 15].

Podczas obróbki skrawaniem można stosować minimalną ilość cieczy obróbkowej MQL, która przyczynia się do ochrony środowiska, poprawy warunków pracy i ekonomii obróbki. Jest to możliwe dzięki nanoszeniu na narzędzia skrawające cienkich powłok diamentopodobnych DLC [4, 6, 7, 9, 10, 11, 12]. Narzędzia te mają doskonałe właściwości tribologiczne - niskotarciowe, przeciwzużyciowe, dużą twardość oraz stabilność termiczną, dobre odprowadzanie ciepła, odporność na ścieranie oraz korozję, a co za tym idzie przedłużają czas użytkowania narzędzi [1, 3, 5, 8, 9, 12, 13, 14].

## **2. CEL BADAŃ**

Celem badań było wykazanie, że biodegradowalne ciecze chłodząco-smarujące nowej generacji mogą być zastosowane do obróbki metali narzędziami pokrytymi powłokami diamentopodobnymi. Jako substancję smarującą użyto ciecz chłodząco-smarującą w skład, której wchodzi m.in.: boran alkanoloaminy, biodegradowalny

---

<sup>1</sup> Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

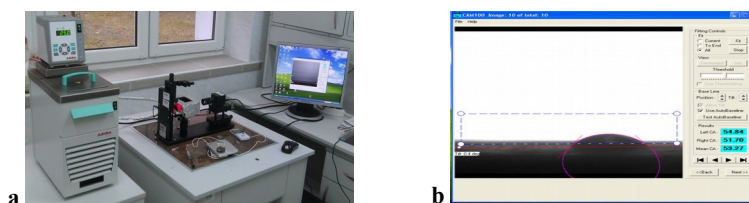
<sup>2</sup> Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

<sup>3</sup> Katedra Technik Komputerowych i Uzbrojenia Politechniki Świętokrzyskiej

polimer - asparginian cynku oraz woda demineralizowana DEMI. Do badań wyselekcjonowane zostały powłoki DLC typu a-C:H naniesione techniką chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą PACVD.

### 3. APARATURA I METODYKA BADAŃ

Pomiary kąta zwilżania wykonano za pomocą urządzenia KSV CAM 100 wraz z urządzeniem chłodniczym JULABO (rys. 1). Do badań użyto: wody destylowanej i cieczy chłodząco-smarującej o różnych stężeniach vol. 1%, 5% oraz 10%. Krople nakładano na metalowe próbki ze stali HS6-5-2C bez powłoki i z powłoką a-C:H.



Rys. 1. Kąt zwilżania: a) urządzenie KSV CAM 100 z komorą termostatyczną, b) widok okna programu

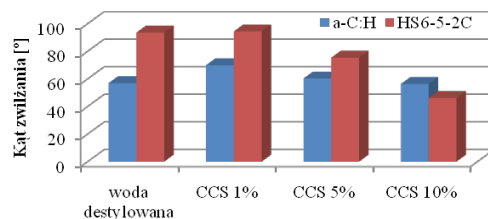
Badania tribologiczne zrealizowano na testerze T-01M pracującym w skojarzeniu kula-tarcza. Tarcze były wykonane ze stali narzędziowej HS6-5-2C bez powłoki i z naniesioną powłoką diamentopodobną typu a-C:H, a kule ze stali 100Cr6. Testy zrealizowano przy stałej prędkości ślizgania równej 0,1 m/s, obciążeniu 10 N oraz 50 N, na drodze tarcia równej 1000 m w warunkach tarcia technicznie suchego i ze smarowaniem biodegradowalną cieczą chłodząco-smarującą zawierającą dodatek 5% vol. wodnego roztworu asparginianu cynku. Doświadczenia wykonano w atmosferze laboratoryjnej przy wilgotności względnej  $50 \pm 5\%$  oraz temperaturze  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego JSM 7100F wyposażonego w mikroanalizator rentgenowski EDS obserwowano przekroje poprzeczne oraz przeprowadzono identyfikację pierwiastków będących składnikami powłok DLC. Przy użyciu profilometru optycznego Talysurf CCI Lite wykonano analizę struktury geometrycznej powierzchni próbek i przeciwpróbek przed oraz po testach tribologicznych. Badania te wykonano w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

### 4. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań kąta zwilżania powierzchni tracz ze stali HS6-5-2C bez powłoki oraz z powłoką a-C:H. Mniejszy kąt zwilżania zaobserwowano dla tarczy z powłoką DLC zarówno dla wody destylowanej, jak i badanej cieczy chłodząco-smarującej CCS o różnych stężeniach. Wyjątek stanowiła 10% ciecz obróbkowa, gdzie mniejszy kąt zwilżania odnotowano dla tarczy bez naniesionej

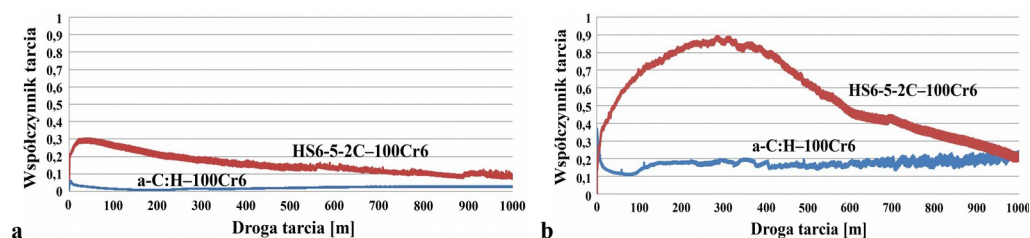
powłoki DLC. Niskie wartości kąta zwilżania ( $< 90^\circ$ ) wskazują, że płyn dobrze nawilża i smaruje powierzchnie poddawane obróbce [2].



Rys. 2. Kąt zwilżania powierzchni tarcz ze stali HS6-5-2C bez i z naniesioną powłoką a-C:H

Rysunek 3a prezentuje współczynniki tarcia zarejestrowane podczas badań tribologicznych z użyciem badanego chłodziwa o stężeniu 5% dla skojarzenia stal HS6-5-2C – stal 100Cr6 oraz powłoka a-C:H – stal 100Cr6 przy obciążeniu  $L = 10$  N. Analizując wykres można zaobserwować, że współczynnik tarcia dla węzła tarcia stal HS6-5-2C – stal 100Cr6 wzrastał na początku testu, a następnie malał do końca testu osiągając wartość  $\mu \approx 0.09$ . Natomiast dla skojarzenia powłoka a-C:H – stal 100Cr6 współczynnik tarcia  $\mu$  na początku testu wzrastał, po czym malał, później stopniowo przyrastał i w końcowej fazie testu wyniósł  $\mu \approx 0.025$ . Stosując badaną ciecz dla skojarzenia z powłoką DLC zaobserwowano mniejszy oraz bardziej ustabilizowany charakter krzywej obrazującej współczynnik tarcia niż dla skojarzenia bez powłoki.

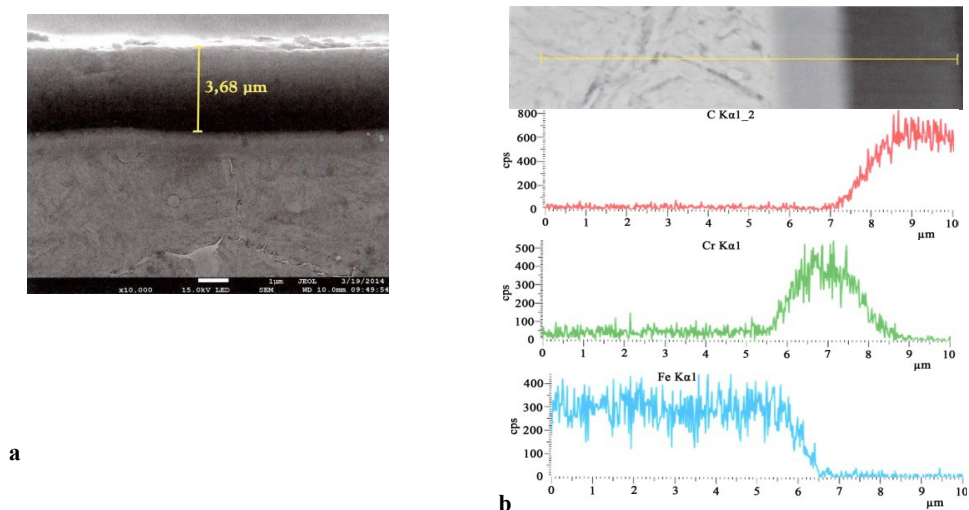
Analizując współczynnik tarcia z użyciem cieczy obróbkowej przy obciążeniu 50 N dla skojarzenia stal HS6-5-2C – stal 100Cr6 (rys. 3b) odnotowano wzrost, następnie spadek, na końcu testu współczynnik tarcia osiągnął wartość  $\mu \approx 0.23$ . Z kolei dla skojarzenia powłoka a-C:H – stal 100Cr6 współczynnik tarcia  $\mu$  na początku testu wzrósł, po czym malał, znów stopniowo wzrastał, a w końcowej fazie testu wyniósł  $\mu \approx 0.23$ . Z przeprowadzonych testów można zaobserwować, że bardziej ustabilizowany przebieg współczynnika tarcia odnotowano dla skojarzenia z powłoką DLC, choć na końcu trwania testu osiągnął tę samą wartość, jak w węźle tarcia bez powłoki DLC typu a-C:H.



Rys. 3. Współczynniki tarcia ze smarowaniem cieczą chłodziwo-smarującą. Tester T-01M. Obciążenie: a)  $L = 10$  N, b)  $L = 50$  N

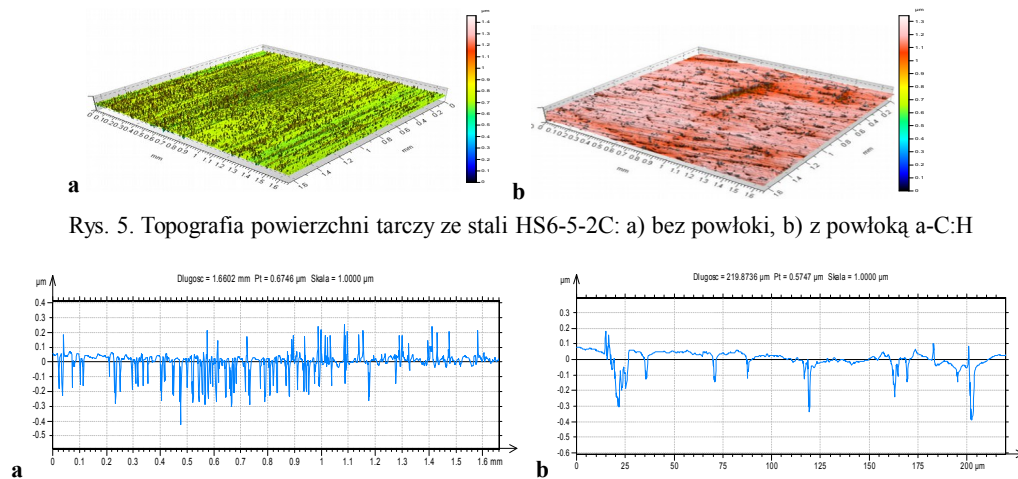
Na rysunku 4 przedstawiono obrazy SEM powłoki diamentopodobnej. Zdjęcie 4a

obrazuje przekrój poprzeczny powłoki a-C:H osadzonej na stali HS6-5-2C, której grubość wynosi 3,68  $\mu\text{m}$ . Analiza EDS (rys. 4b) wykazała, że warstwę między podłożem a powłoką diamentopodobną stanowił chrom, który zapewniał dobrą adhezję do podłoża [9].

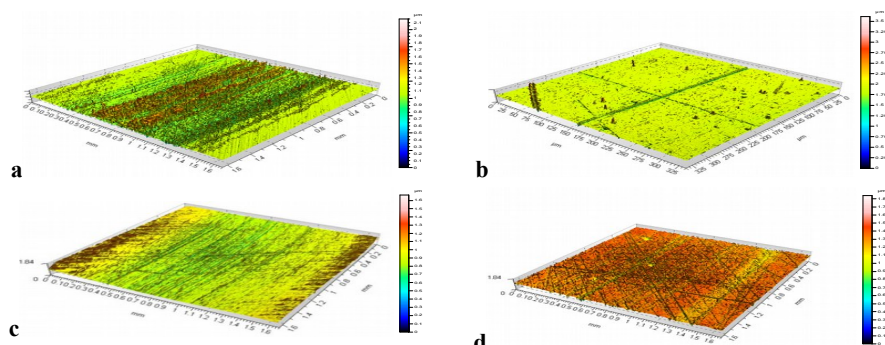


Rys. 4. SEM: a) przekrój poprzeczny powłoki a-C:H, b) analiza EDS

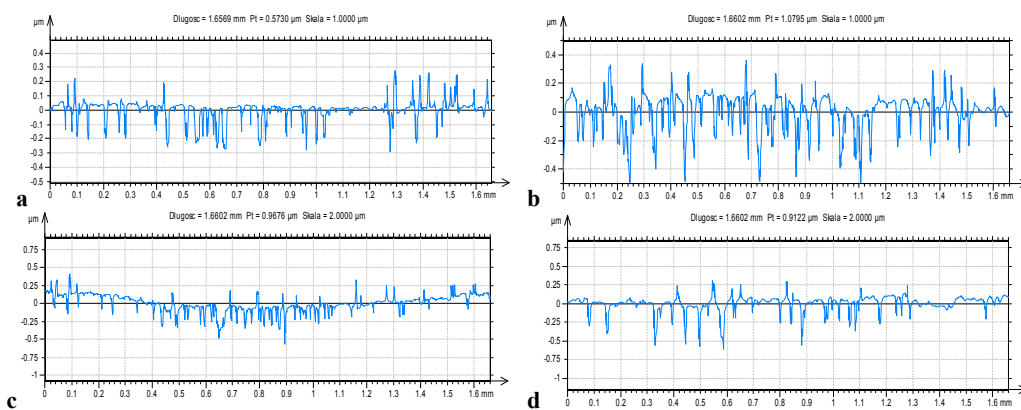
Na rysunku 5 i 6 przedstawiono topografię oraz profil chropowatości powierzchni tarcz bez powłoki i z naniesioną powłoką a-C:H przed testami tribologicznymi.



Rys. 6. Profil powierzchni tarczy ze stali HS6-5-2C: a) bez powłoki, b) z powłoką a-C:H



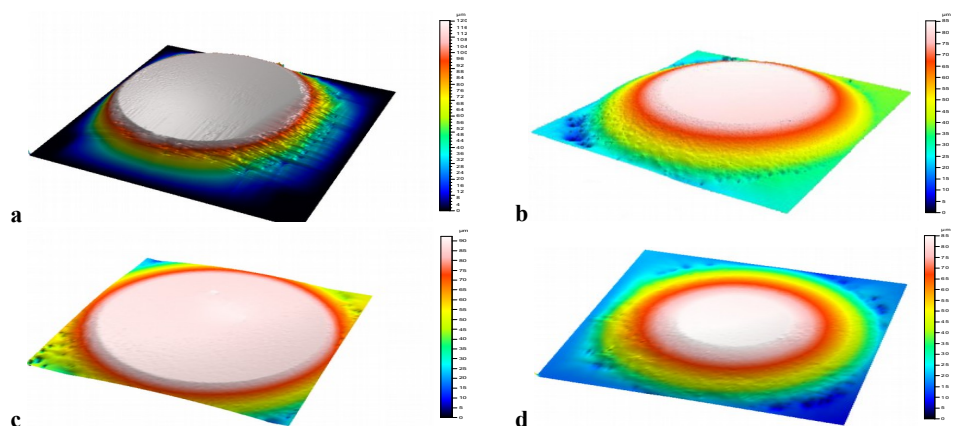
Rys. 7. Topografia powierzchni tarczy ze stali HS6-5-2C: a) bez powłoki, L = 10 N, b) z powłoką a-C:H, L = 10 N, c) bez powłoki, L = 50 N, d) z powłoką a-C:H, L = 50 N współpracującą z kulą ze stali 100Cr6



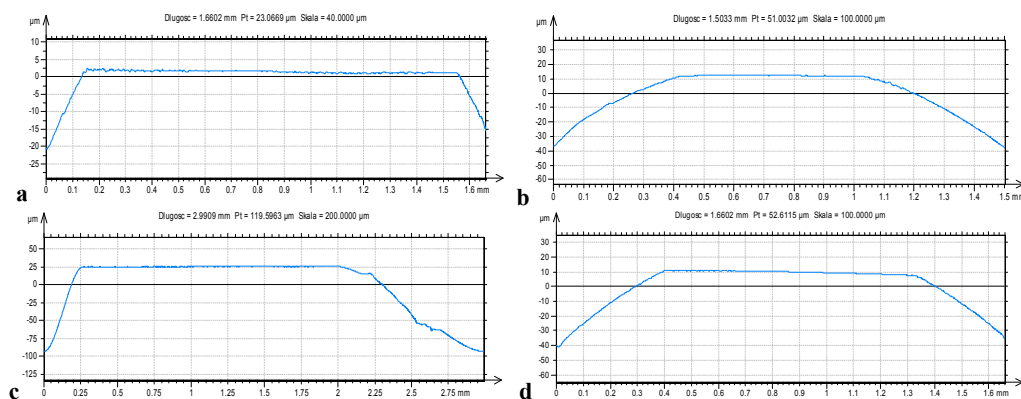
Rys. 8. Profil powierzchni tarczy ze stali HS6-5-2C: a) bez powłoki, L = 10 N, b) z powłoką a-C:H, L = 10 N, c) bez powłoki, L = 50 N, d) z powłoką a-C:H, L = 50 N współpracującą z kulą ze stali 100Cr6

Na rysunkach 7 – 10 przedstawiono strukturę geometryczną powierzchni tarcz oraz kul po testach tribologicznych dla badanych skojarzeń trących.

Z analizy porównawczej profilów chropowatości sporządzonych dla tarcz po testach tribologicznych przy obciążeniu 10 N i 50 N wynika, że dla tarczy ze stali HS6-5-2C (SW7M) w skojarzeniu ze stalową kulą zaobserwowano zużycie w postaci wgłębienia o wysokości analogicznie ok. 0,2  $\mu\text{m}$  i 0,25  $\mu\text{m}$ . Natomiast na tarczach z powłoką a-C:H po testach tribologicznych zaobserwowano niewielkie żłobienia. Oznacza to, że powłoka a-C:H jest bardziej odporna na zużywanie. Porównując profile kształtu kul (rys. 10) mniejszy promień wytarcia koła ograniczającego odcinek kuli o ok. 50% oraz gładszą powierzchnię odnotowano w skojarzeniu z powłoką a-C:H niż w skojarzeniu z tarczą bez powłoki.



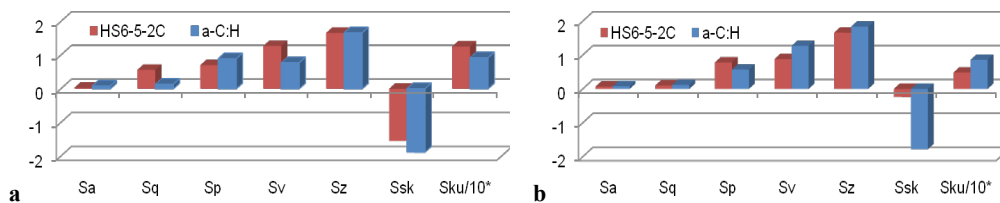
Rys. 9. Topografia powierzchni kuli ze stali 100Cr6 współpracującej z tarczą ze stali HS6-5-2C: a) bez powłoki, L = 10 N, b) z powłoką a-C:H, L = 10 N, c) bez powłoki, L = 50 N, d) z powłoką a-C:H, L = 50 N



Rys. 10. Profil kształtu kuli ze stali 100Cr6 współpracującej z tarczą ze stali HS6-5-2C: a) bez powłoki, L = 10 N, b) z powłoką a-C:H, L = 10 N, c) bez powłoki, L = 50 N, d) z powłoką a-C:H, L = 50 N

Diagramy na rysunkach 11a i 11b przedstawiają parametry chropowatości tarcz ze stali HS6-5-2C bez powłoki oraz z naniesioną powłoką a-C:H po testach tribologicznych. Największe rozrzuty wysokości zaobserwowano dla parametrów  $S_q$  oraz  $S_v$  przy obciążeniu 10 N, natomiast przy obciążeniu 50 N były to parametry amplitudowe:  $S_{sk}$  i  $S_{ku}$ . Parametry te są wrażliwe na charakterystyczne wzniesienia, wgłębienia, a także defekty. Wartości parametrów  $S_{sk}$ , w przypadku tarcz po testach tribologicznych mają wartości ujemne, świadczy to o płaskowyżowym ukształtowaniu ich powierzchni. Natomiast parametr  $S_{ku}$  jest miarą smukłości krzywej rozkładu rzędnych. Dla normalnego rozkładu rzędnych  $S_{ku} = 3$ . Uzyskane wartości kurtozy świadczą, że rozkłady rzędnych dla obu tarcz nie są zbliżone do rozkładu normalnego. Na wykresie  $S_{ku}/10^*$  oznacza wartość parametru podzieloną przez 10.





Rys. 11. Parametry chropowości tarcz ze stali HS6-5-2C bez oraz z powłoką a-C:H po testach tribologicznych. Obciążenie: a) L = 10 N, b) L = 50 N

## 5. PODSUMOWANIE

Biodegradowalne ciecze obróbkowe stanowiące funkcje płynów eksploatacyjnego oraz powłoki diamentopodobne stanowią stale rozwijający się, aktualny obszar naukowo-badawczy. Reprezentują one materiały nowej generacji stosowane w systemach tribotechnologicznych. Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Badanie kąta zwilżania pozwoliło ustalić, że dla wody demineralizowanej jest on większy niż dla modelowej cieczy chłodząco-smarującej.
2. Zaobserwowano, że dla elementu z powłoką a-C:H kąt zwilżania jest mniejszy niż dla stali HS6-5-2C.
3. Wyniki z analizy składu chemicznego EDS wykazały zgodność budowy powłok z zakładaną podczas procesów ich wytwarzania.
4. Powłoka typu a-C:H charakteryzuje się lepszymi parametrami struktury geometrycznej powierzchni i wykazuje lepsze właściwości przeciwzużyciowe niż stal HS6-5-2C.
5. Zastosowanie biodegradowalnej cieczy obróbkowej z asparginianem cynku zapewniło stabilną pracę systemu tribotechnologicznego oraz ze względu na swoje właściwości użytkowe gwarantują bezpieczną pracę operatorów tokarek.
6. Badana biodegradowalna ciecz chłodząco-smarująca tworzy warstwy graniczne, które zmniejszają opory tarcia, a tym samym zużywanie energii podczas pracy systemu tribotechnologicznego.
7. Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych można wnioskować, że zastosowanie cieczy biodegradowalnej nowej generacji do obróbki metali oraz narzędzi pokrytych powłokami diamentopodobnymi a-C:H znajduje pełne uzasadnienie.

## LITERATURA

- [1] Adamczak S., Radziszewski L., *Selected Problems of Modeling and Control in Mechanic*, Kielce, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2011.
- [2] Astakhov V. P., Joksch S., *Metalworking fluids (MWFs) for cutting and grinding. Fundamentals and recent advances*, United Kingdom, Woodhead Publishing, 2012.
- [3] Cloutier M., Harnagea C., Hale P., Seddiki O., Rosei F., Mantovani D., *Long-term stability of hydrogenated DLC coatings: Effects of aging on the structural, chemical and mechanical*



- properties*, Diamond and Related Materials, 48, 2014, 65–72.
- [4] Dixit, U.S., Sarma, D.K., Davim, J. P. *Environmentally Friendly Machining*, London, Springer, 2012.
  - [5] Hassan M., Qayyum A., Ahmad S., Mahmood S., Shafiq M., Zakaullah M., Lee P., Rawat R.S., *DLC coating on stainless steel by pulsed methane discharge in repetitive plasma focus*, Applied Surface Science, 303, 2014, 187–195.
  - [6] Hu Z., Wielage H., Vollertsen F., *Economic micro forming using dlc- and tincoated tools*, Journal for Technology of Plasticity, 36/2, 2011, 51–59.
  - [7] Klocke F., *Manufacturing Processes I*, Berlin, Springer, 2011.
  - [8] Madej M., *Właściwości systemów tribologicznych z powłokami diamentopodobnymi*, M46, Kielce, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2013.
  - [9] Madej M., Marczevska-Boczkowska K., Ozimina D., *Wpływ wolframu na odporność powłok diamentopodobnych stosowanych w przemyśle chemicznym*, W: Przemysł Chemiczny, M. Madej (red.), 93/4, 2014, 505–505.
  - [10] Miko E., Nowakowski Ł., *Pomiar minimalnej grubości warstwy skrawanej dla procesu frezowania czołowego*. W: Mechanik, M. Miko (red.), 7, 2013, 521–525.
  - [11] Najiha M.S., Rahman M.M., *A computational fluid dynamics analysis of single and three nozzles minimum quantity lubricant flow for milling*. W: International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, M.S. Najiha (red.), 10, 2014, 1891–1900.
  - [12] Ozimina D., *Prezyciwużyciowe warstwy wierzchnie w układach tribologicznych*, M48, Kielce, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2013.
  - [13] Ozimina D., *Eksploatacja systemów tribologicznych. Tom I. Znaczenie tribologii w eksploatacji obiektów technicznych*, M48, Kielce, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2013.
  - [14] Ozimina D., Madej M., Kowalczyk J., Suchanek J., Taticek F., Kolariikova M., *Zużycie powłok diamentopodobnych w zależności od kompozycji powłokowej i materiałów pary trącej*. W: Tribologia, D. Ozimina (red.), 3, 2012, 157–166.
  - [15] Smith G. T., *Cutting Tool Technology. Industrial Handbook*, London, Springer, 2008.
  - [16] Trent E., Wright P., *Metal Cutting*, United States of America, Butterworth-Heinemann, 2000.