

Anita MAŃKOWSKA-SNOPCZYŃSKA\*, Edyta OSUCH-SŁOMKA\*,  
Witold PIEKOSZEWSKI\*, Marian SZCZEREK\*\*, Slavomír HOŘEJŠ\*\*\*

## WPLYW WARSTW HYBRYDOWYCH NA POWIERZCHNIOWĄ TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ STALI

## THE INFLUENCE OF HYBRID COATINGS ON THE FATIGUE LIFE STEEL

### Słowa kluczowe:

pitting, powierzchniowa trwałość zmęczeniowa, powłoki niskotarciowe, PVD

### Key words:

pitting, surface fatigue life, low friction coatings, PVD

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych ze stali 17HMN, które poddano technologii nawę-

---

\* Zakład Tribologii Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, Polska.

\*\* Zakład Tribologii Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom, Polska

\*\*\* VÚHŽ a.s. Dobrá 240, 739 51 Dobrá, Czechy.

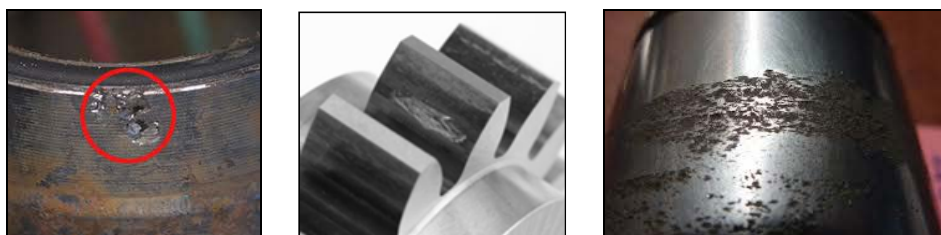
glania niskociśnieniowego wspomaganego azotowaniem PreNitLPC<sup>®</sup> oraz próbek nawęglonych z naniesionymi technologią PVD powłokami niskotarciowymi typu: a-C:H:W (WC/C) a-C:H (DLC Comp) oraz Si-DLC (DLC SiliComp). Temperatura procesu nanoszenia powłok we wszystkich przypadkach nie przekraczała 200°C. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że cienkie powłoki PVD, nanoszone na wysokoobciążone stalowe elementy węzłów tarcia, w zróżnicowany sposób wpływają na powierzchniową trwałość zmęczeniową pokrytej nimi stali. Aby wyjaśnić przyczyny tego zróżnicowania, konieczne są dogłębne badania analityczne.

## WPROWADZENIE

Do innowacyjnych technologii konstituowania warstw wierzchnich należą technologie laserowe [L. 1], próżniowego nawęglania [L. 2] i azotowania [L. 3] oraz nakładania powłok metodami PVD i CVD [L. 4, 5]. Obecnie powłoki nanoszone tymi metodami z powodzeniem stosuje się do zwiększenia trwałości narzędzi skrawających i formujących. Cienka warstwa ceramiczna chroni narzędzie przed przegrzaniem i utlenianiem oraz zmniejsza tendencję do szepiania materiału skrawanego z materiałem ostrza narzędzia, co pozwala na zwiększenie trwałości narzędzia skrawającego, a także na zwiększenie parametrów ich pracy, np. prędkości skrawania [L. 6, 7]. W ostatnich latach rozwój technologii spowodował eksplozję nowych zastosowań powłok przeciwzużyciowych. Zastosowanie dwustopniowej obróbki typu duplex (warstwa azotowana / TiN) na formy odlewnicze do ciśnieniowego odlewania aluminium spowodowało kilkakrotny wzrost ich trwałości [L. 8]. W literaturze spotyka się także opisy nowatorskich prób zastosowania technologii duplex do ochrony powierzchni matryc do obróbki plastycznej na zimno miedzi, aluminium i miękkich stali oraz matryc kuźniczych. Obecnie prawie 80% narzędzi skrawających może być pokrywanych cienkimi powłokami przeciwzużyciowymi. Odmienna jest sytuacja w przypadku zastosowanych cienkich twardych powłok na trące powierzchnie elementów maszyn i urządzeń. Szacuje się, że tylko ok. 2% wszystkich części współpracujących tarciowo pokrywa się tymi powłokami.

Istniejący stan wiedzy jednoznacznie wskazuje, że pary kinematyczne takie jak: koła zębate, łożyska toczne czy mechanizmy krzywka-popychacz, wykonywane głównie ze stali, narażone są, oprócz zużycia ściernego, na zużycie mogące spowodować awarię urządzenia poprzez zatarcie czy zmęczenie powierzchniowe (pitting) – Rys. 1. Modelowe badania zacierania elementów z naniesionymi metodami PVD powłokami, tworzących smarowany styk skoncentrowany, potwierdziły możliwość zwiększenia odporności na zacieranie [L. 9, 10]. Jednakże zadowalającym rezultatom konstituowania warstw powierzchniowych elementów trących poprzez nałożenie powłok w przypadku zacierania nie odpowiada zwiększenie, a wręcz zmniejszenie powierzchniowej

trwałości zmęczeniowej. Przeprowadzone badania własne autorów, mające na celu weryfikację nielicznych jeszcze i bardzo sprzecznych doniesień literaturowych, wykazały, że elementy poddane obróbkom powierzchniowym z wykorzystaniem typowych powłok PVD, zdecydowanie pogarszają odporność na powierzchniową trwałość zmęczeniową [L. 11, 12]. Jest to główna przyczyna braku ich aplikacji na trące, w szczególności wysokoobciążone, smarowane elementy maszyn.



**Rys. 1. Fotografia elementów ze śladami zniszczenia powierzchni na skutek pitingu**  
Fig. 1. The surface damages as a result of pitting

Jak już zaznaczono wcześniej, zastosowanie cienkich powłok przeciwzużyciowych dedykowanych specjalnie na części maszyn pracujące w smarowanym styku, jest zagadnieniem stosunkowo nowym i jeszcze słabo rozpoznany. Dzięki zastosowaniu powłok PVD można bardzo znacząco zwiększyć odporność na zacieranie elementów stalowych, nawet przy zastosowaniu ekologicznych środków smarowych (bez szkodliwych na ogół dodatków smarnościowych) [L. 13].

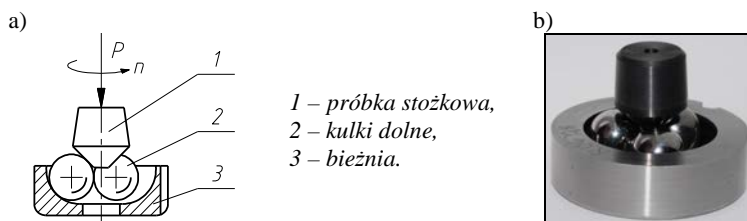
Efektu tego nie można było wykorzystać w technice w odniesieniu do wysokoobciążonych elementów maszyn (np. łożyska toczne, koła zębate), ponieważ barierę stanowił wciąż nierozwiązany problem pitingu.

Obrazują to efekty badań przeprowadzonych przez jednego z autorów, z których wynika, że nowoczesne, próżniowe metody nakładania powłok PVD na powierzchnie robocze wysokoobciążonych elementów maszyn, w większości przebadanych przypadków typowych powłok, do jakich należy zaliczyć powszechnie stosowane powłoki TiN, CrN, radykalnie obniżają powierzchniową trwałość zmęczeniową, niezależnie od tego, czy smarowane są olejami bazowymi, czy olejami z dodatkami przeciwzużyciowymi lub przeciwzatarciowymi [L. 14].

## **METODYKA I OBIEKTY BADAŃ**

Celem badań było określenie wpływu wybranych powłok PVD nanoszonych na stalowe elementy poddane nawęglaniu i pracujące w smarowanym styku skoncentrowanym.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem aparatu czterokulowego posiadającego toczny węzeł tarcia (**Rys. 2**) składający się z 3 kulek stalowych toczących się w specjalnej bieżni i napędzanych obracającą się próbką w postaci stożka [**L. 10**].



**Rys. 2.** Zmodernizowany węzeł tarcia aparatu T-03 do badania zużycia zmęczeniowego materiałów stosowanych na wysokoobciążone elementy toczne: a) schemat, b) fotografia

**Fig. 2.** The cone – three balls friction joint of T-03 test rig intended for fatigue wear investigation of heavily loaded rolling elements: a) schematic view, b) a photograph

Wskaźnikiem trwałości badanego skojarzenia był czas pracy smarowanego, tocznego węzła tarcia do wystąpienia pittingu. Dla każdego skojarzenia materiałowego wykonano po 23 biegi badawcze zakończone wystąpieniem wykruszenia zmęczeniowego na próbce (stożku).

Obiektami badań były próbki wykonane ze stali 17HNM, które poddano technologii nawęglania niskociśnieniowego wspomaganego azotowaniem Pre-NitLPC® [**L. 15, 16**] oraz próbki nawęglone z naniesionymi powłokami niskotarciowymi.

Nawęglanie odbywało się w temperaturze 1000°C, a otrzymana grubość warstwy nawęglanej próbek zawarta była w granicach 0,65÷0,70 mm. Na nawęglone próbki naniesiono trzy rodzaje powłok niskotarciowych. Były to powłoki nanoszone technologią PVD: typu a-C:H:W (WC/C), powłoka typu a-C:H (DLC Comp) oraz powłoka Si-DLC (DLC SiliComp). Temperatura procesu nanoszenia powłok we wszystkich przypadkach nie przekraczała 200°C. Grubość powłok na powierzchnia trących próbek wynosiła ok. 2 μm.

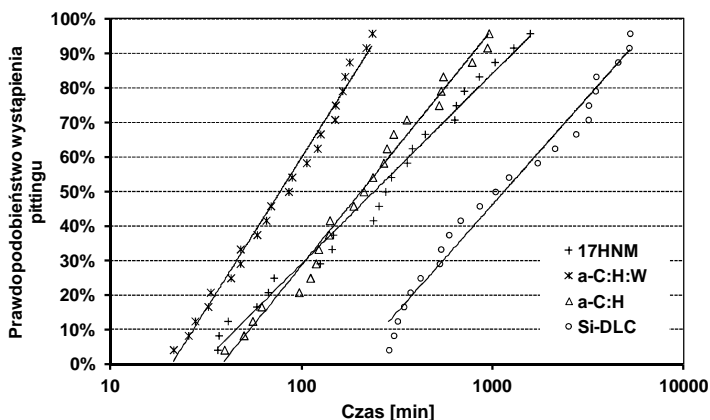
Jako bazę odniesienia dla badanych skojarzeń przyjęto skojarzenie z próbkami nawęglanymi. Badane skojarzenie smarowane było czystym olejem syntetycznym bez dodatków – PAO 8.

## WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej badanych skojarzeń materiałowych przedstawiono na **Rys. 3 i 4**, a wyliczone wartości trwałości  $L_{10}$

z ich wartościami granicznymi oraz współczynnikiem rozrzutu  $W$  zestawiono w **Tabeli 1**.

Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że tylko w przypadku skojarzeń z powłoką typu a-C:H:W (WC/C) następuje obniżenie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej w odniesieniu do skojarzenia, w którym próbka była tylko nawęglana. W przypadku naniesienia tej powłoki na stal 100Cr6 zaobserwowano podobny spadek trwałości [L. 14]. Odporność na pitting wyrażona trwałością  $L_{10}$  skojarzenia z powłoką a-C:H (DLC Comp) jest nieznacznie większa niż stali 17HNM nawęglonej próżniowo. Bardzo istotny, bo ponad 5-krotny wzrost trwałości  $L_{10}$  odnotowano dla skojarzenia, w którym nawęglona próbka pokryta była powłoką typu Si-DLC. Należy przy tym zaznaczyć, że w przypadku skojarzeń elementów z powłoką a-C:H:W odnotowano najniższy współczynnik rozrzutu wyników badań „ $W$ ” (**Tabela 1**), co pozytywnie świadczy o technologii nakładania tej powłoki.



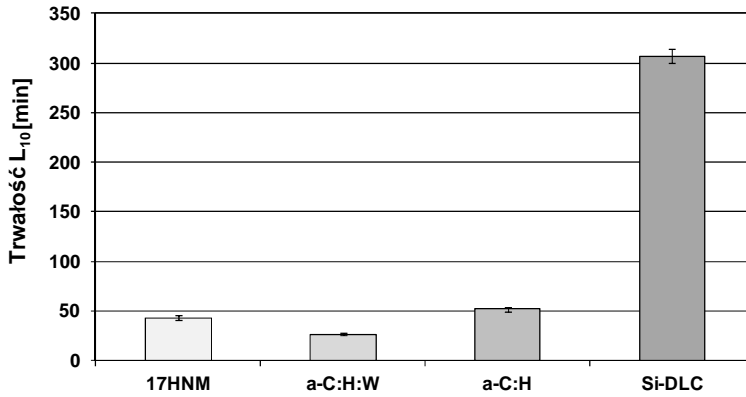
**Rys. 3.** Wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej badanych elementów w skojarzeniu z kulkami stalowymi ze stali 100Cr6 smarowanymi olejem syntetycznym PAO 8

Fig. 3. The results of surface fatigue life of friction joint consisting of investigated cones rolling on 100Cr6 steel balls, lubricated with PAO 8 synthetic oil

**Tabela 1.** Zestawienie powierzchniowej trwałości  $L_{10}$  dla badanych skojarzeń

Tabela 1. The combination of  $L_{10}$  fatigue life for the investigated friction joints

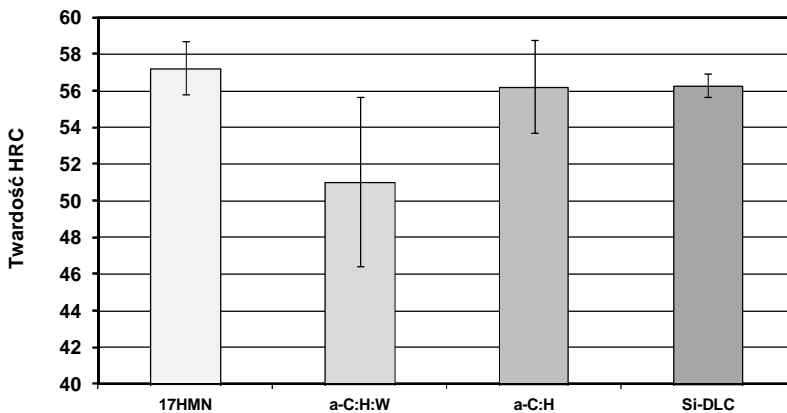
Materiał próbki	17 HNM	17 HNM + a-C:H:W	17 HNM + a-C:H	17 HNM + Si-DLC
$L_{10}$ [min.]	45,08	27,44	54,05	314,52
	42,79	26,36	51,73	307,02
	40,67	25,29	49,48	300,44
$W=L_{90}/L_{10}$	30,84	8,60	15,12	19,90



**Rys. 4. Powierzchniowa trwałość zmęczenia  $L_{10}$  badanych elementów w skojarzeniu z kulkami stalowymi ze stali 100Cr6 smarowanymi olejem syntetycznym PAO 8**

Fig. 4. The  $L_{10}$  surface fatigue life for investigated elements in combination with 100Cr6 steel balls, lubricated with PAO 8 synthetic oil

Przy tak znaczących różnicach w powierzchniowej trwałości zmęczeniowej badanych skojarzeń materiałowych nasuwa się przypuszczenie, że mogą być wynikiem różnic w twardości próbek, na którą mają wpływ procesy technologiczne konstytuowania ich warstw powierzchniowych [L. 17]. Z tego względu przeprowadzono pomiary twardości próbek, których wyniki zestawiono na Rys. 5 i w Tabeli 2.



**Rys. 5. Wyniki badań twardości próbek**

Fig. 5. The results of HRC hardness

**Tabela 2. Zestawienie twardości próbek wraz z odchyleniem standardowym**

Tabela 2. The results of HRC hardness with standard deviation obtained for test samples

Materiał próbki	17HNM	17HNM + a-C:H:W	17HNM + a-C:H	17HNM + Si-DLC
Wartość średnia HRC	57,22	51,03	56,22	56,28
Odchylenie std. HRC	1,45	4,61	2,53	0,65

Porównując wyniki trwałości  $L_{10}$  z twardością próbek, można stwierdzić, że obniżenie trwałości skojarzenia z powłoką a-C:H:W w odniesieniu do skojarzenia z próbką nawęglaną wydaje się oczywiste. Różnica w średniej twardości rozpatrywanych próbek wynosiła 6 stopni HRC. Jest to zgodne z wynikami badań skojarzeń próbek ze stali 100Cr6 o różnej twardości, przedstawione w monografii [L. 14]. Odmienne jest zachowanie skojarzeń z próbkami z powłoką Si-DLC. Pomimo że twardość tych próbek jest mniejsza od twardości stali 17HMN nawęglanej o 1 stopień HRC, to odporność na pitting wzrosła ponad sześciokrotnie. Interesujące jest również zachowanie się skojarzenia z powłoką a-C:H, gdzie próbki podobnie jak w poprzednim przypadku miały twardość o 1 stopień mniejszą, to jednak trwałość  $L_{10}$  nieznacznie większą. Wyjaśnienie powodów tak odmiennych zachowań rozpatrywanych skojarzeń wymaga przeprowadzenia badań analitycznych po testach tribologicznych.

## WYNIKI ANALIZY POWIERZCHNI

Hipotetycznie powierzchniowa trwałość zmęczeniowa elementów z powłokami może mieć związek z odpornością na zużycie ściernie powłoki, gdyż w warunkach tarcia mieszanego z tego typu zużyciem mamy do czynienia. W tym celu przeprowadzono obserwacje na mikroskopie skaningowym (SEM) wyposażonym w mikroanalizator rentgenowski (EDX). Wyniki tych obserwacji i analiz zestawiono na **Rys. 6**. Podczas wykonywania analiz skupiono się przede wszystkim na tych pierwiastkach, które są głównymi składnikami powłok i współpracujących elementów.

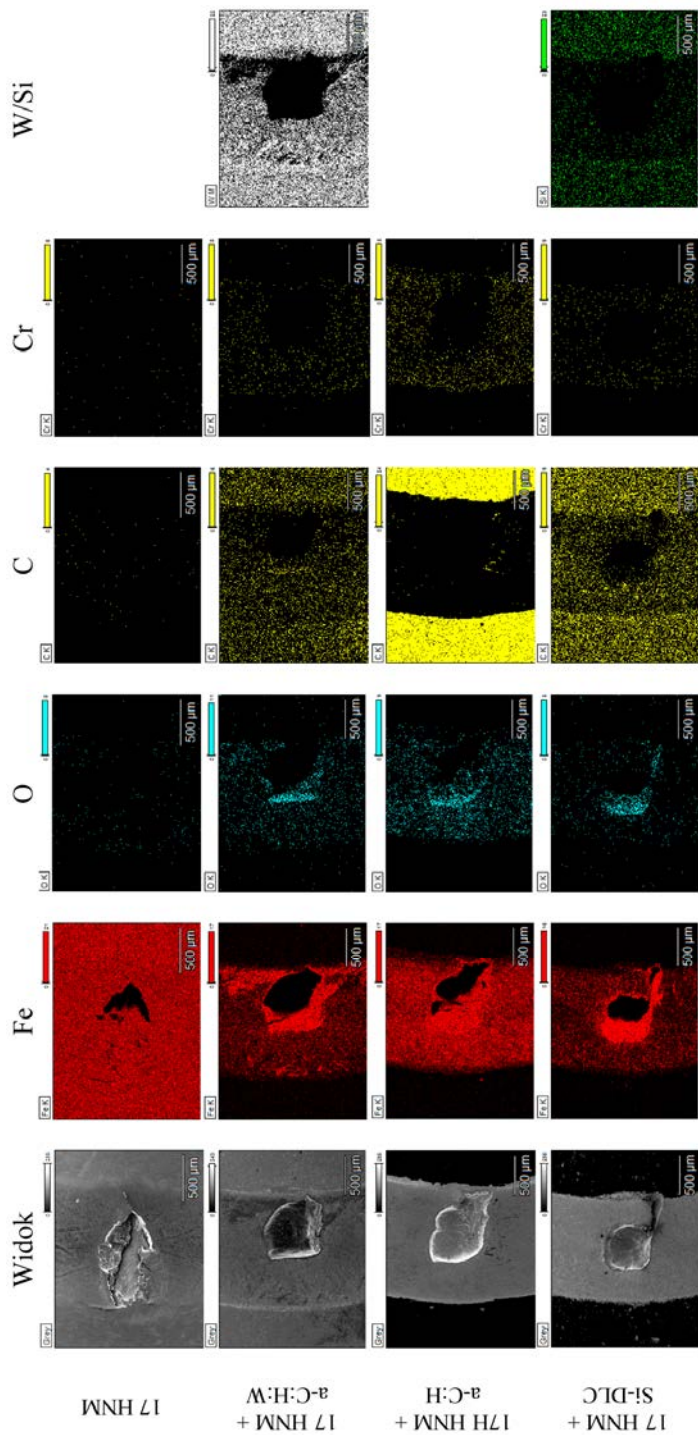
W pierwszym wierszu zestawiono obrazy i „mapy” otoczenia uszkodzenia zmęczeniowego próbki stożkowej wykonanej ze stali 17HNM. Zarys uszkodzenia, widoczny na mapie żelaza „Fe”, świadczy o jego głębokiej penetracji. Mapy pozostałych pierwiastków świadczą o ich równomiernym rozmieszczeniu na analizowanej powierzchni. Odmienne są obrazy rozkładu żelaza dla pozostałych próbek pokrytych powłokami. Na mapach tych wyraźnie zarysowana jest ścieżka tarcia (współpraca toczna z kulkami dolnymi), chociaż intensywność żelaza jest największa dla powłoki a-C:H. Analiza tego problemu

wykazała, że może to być efekt łącznego występowania wzajemnie nakładających się procesów:

- pierwszy z nich to powstanie licznych mikroskopijnych uszkodzeń powłoki, a tym samym odsłonięcie podłoża bogatego w żelazo;
- drugi to transfer żelaza na powłokę ze współpracujących tarciowo kulek – wskazuje na to obecność tlenu zawartego w analizowanym obszarze;
- kolejnym procesem powodującym pojawienie się żelaza w śladzie tarcia jest ścieranie się powłok podczas testu tribologicznego (zmniejszanie ich grubości), co może prowadzić do błędów metody przedstawionego poniżej;
- ostatnia przyczyna wykrycia Fe w śladach tarcia może wynikać z ograniczeń metody mikroanalizy – przy cienkich powłokach istnieje możliwość uzyskania sygnałów od pierwiastków zalegających pod powłoką, w tym przypadku żelaza zawartego w podłożu, co w przypadku powłok nanoszonych metodami PVD jest realne ze względu na ich małą grubość (ok. 2,0  $\mu\text{m}$ ). Należy ją jednak wykluczyć ze względu na to, że na obszarach sąsiadujących ze śladami tarcia brak jest śladowych ilości „Fe”.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wysnuto wniosek, że powłoka a-C:H jest mniej odporna na ścieranie niż dwie pozostałe. Świadczy o tym mapa węgla, który na śladzie tarcia nie istnieje, natomiast istnieje duża ilość żelaza, porównywalna z ilością zidentyfikowaną w próbce 17HNM. To, że następuje przeniesienie materiału przeciwpróbek na próbki dla wszystkich skojarzeń z powłokami, potwierdzają mapy chromu oraz tlenu, który jest wynikiem utlenienia przetransferowanego żelaza. Przeprowadzone analizy potwierdzają dużą odporność na zużycie ściernie powłok a-C:H:W oraz Si-DLC. Wniosek ten oparty jest na obserwacji mapy wolframu „W” w przypadku pierwszej z powłok oraz mapy krzemu „Si” w przypadku powłoki Si-DLC. Ilość tych pierwiastków w śladach tarcia jest nieco mniejsza niż poza nimi. Niewielkie różnice w odporności na zużycie ściernie tych dwóch powłok nie tłumaczą jednak tak znaczącej różnicy (ponad 10-krotnej) w odporności na zużycie zmęczeniowe elementów nimi pokrytymi. Mogą one wynikać nie tylko z różnicy twardości próbek (ok. 1 HRC), ale również z technologii nakładania powłok oraz ich właściwości (budowy, stanu naprężeń).





**Rys. 6.** Mapy rozkładu pierwiastków w pobliżu wykruszenia zmęczeniowego  
 Fig. 6 Maps of elements distribution of *in the vicinity of fatigue pits*

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- powłoki PVD nanoszone na stalowe elementy pracujące w smarowanym styku skoncentrowanym w zróżnicowany sposób wpływają na pitting,
- nawęglanie niskociśnieniowe oraz odpowiednio dobrana niskotarciowa powłoka PVD pozwalają na wielokrotne zwiększenie odporności na pitting,
- konieczne jest, oprócz badań trwałościowych, prowadzenie szeroko zakrojonych badań analitycznych, mających na celu wyjaśnienie tak odmiennych zachowań pokrytych nimi elementów stalowych pracujących w smarowanym styku skoncentrowanym.

Na przykładzie powłoki Si-DLC wykazano, że jest możliwe wyselekcjonowanie takich powłok, które nie tylko nie spowodują pogorszenia powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów stalowych, ale nawet poprawę.

Należy również zaznaczyć, że przeprowadzone badania potwierdziły zaobserwowaną wcześniej przez autorów konieczność utrzymania twardości warstw powierzchniowych elementów pokrytych powłokami niskotarciowymi w bardzo wąskim zakresie wartości, co wymaga zachowania ścisłych reżimów technologicznych przygotowania podłoża i nakładania powłoki.

*Praca naukowa wykonana w ramach programu strategicznego „Innowacyjne Systemy Wsparcia Technicznego na rzecz Zrównoważonego Rozwoju Gospodarki w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, Nr POIG.01.01.02-14-034/09-00.*

## LITERATURA

1. Napadłek W., Przetakiewicz W., Bogdanowicz Z.: Rozwój pęknięć zmęczeniowych w stali 40H hartowanej laserowo. Inżynieria Materiałowa nr 5/2002, s. 557–562.
2. Wołowicz E., Kula P.: „Practical Application of Artificial Neural Networks in Designing Parameters of Steel Heat Treatment Processes”, LNCS 7267, 2012, pp. 196–203. Springer.
3. Kula P., Wołowicz E., Pietrasik R., Dybowski K., Januszewicz B.: Non-steady state approach to the vacuum nitriding for tools. Vacuum 88 (2013) 1–7.
4. Holmberg K., Matthews A.: Coating Tribology. Elsevier. Amsterdam, 1994.
5. Podgornik B.: Coated machine elements—fiction or reality? Surface and Coatings Technology, 2001, nr 146–147, s. 318–322.
6. Michalczyński R., Szczerek M., Tuszyński W.: Badanie powłok PVD w warunkach zacierania. Materiały VI Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej POLTRIB'2001. Tribologia dla eksploatacji. Kazimierz Dolny 2001, s. 75–84.
7. Navinsek B., Panjan P., Milosev I.: Industrial applications of CrN (PVD) coatings, deposited at high and low temperatures. Surface and Coating Technology, 1997, t. 97, s. 182–191.

8. Walkowicz J., Smolik J., Miernik K., Bujak J.: Duplex surface treatments of moulds for pressure casting of aluminium. *Surface and Coating Technology*, 1997, t. 97, s. 453–464.
9. Hedenqvist P., Hansson G.: PVD-coating of machine components. *Proc. 8th International Conference in Tribology NORDTRIB '98*, Ebeltoft (Dania), 7–10 czerwca 1998, s. 943–948.
10. Kalin M., Vižintin J.: The tribological performance of DLC-coated gears lubricated with biodegradable oil in various pinion/gear material combinations. *Wear*, 2005, nr 259, s. 1270–1280.
11. Michalczewski R., Piekoszewski W.: The Method for Assessment of Rolling Contact Fatigue of PVD/CVD Coated Elements in Lubricated Contacts. *Tribologia, Finnish Journal of Tribology*, vol. 25/2006, s. 34–42.
12. Piekoszewski W.: Wpływ na powierzchniową trwałość zmęczeniową wybranych materiałów i technologii konstituowania warstw powierzchniowych elementów wężła tocznego. *Tribologia*, vol. 225 (3/2009), s. 185–196.
13. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszynski W.: The lubricant-coating interaction in rolling and sliding contacts. *Tribology International* 42 (2009) 554–560.
14. Piekoszewski W.: Wpływ powłok na zmęczenie powierzchniowe smarowanych stalowych wężłów tarcia. Radom 2011.
15. Kula P., Pietrasik R., Dybowski K., Paweta S., Wołowiec E.: „Properties of surface layers processed by a new, high-temperature vacuum carburizing technology with prenitriding – PreNitLPC”, *Advanced Materials Research* Vol. 452–453, 2012, pp. 401–406
16. Korecki M., Olejnik J., Kula P., Pietrasik R., Wołowiec E.: „Hornos de vacío LPC+LPN+HPGQ 25 BAR N2/HE”, *Tratamientos Termicos*, Abril 2011, pp. 17–21.
17. Michalak M., Piekoszewski W., Wulczyński J., Szczerek M.: Wpływ twardości podłoża na pitting elementów z powłokami PVD. *Inżynieria Materiałowa* 6 (196)/2013, s. 756–759.

## Summary

**The paper presents the results of research on the surface fatigue life (i.e. the resistance to pitting) of samples made of 17HMN steel, low-pressure carburized and PreNitLPC® nitriding assisted, as well as carburized samples with low-friction PVD coatings deposited onto the surface – a-C:H:W (trademark: WC/C), a-C:H (DLC Comp), and Si-DLC (DLC SiliComp) coatings were deposited. The coating process temperature in all the cases did not exceed 200°C. The investigated tribosystems were lubricated with a synthetic oil without additives. On the basis of the research results, it can be stated that thin PVD coatings, deposited onto heavy-loaded steel tribosystems, significantly and in a differentiated way affect the surface**

**fatigue life. It seems necessary, apart from the fatigue wear investigation, to conduct profound analytical examinations aimed at explaining such a strongly different behaviour of elements working in a lubricated non-conformal contact.**