

**PRZERWA Michał**

## ZUŻYWANIE POWŁOK POLIMEROWYCH POD WPŁYWEM CZĄSTEK EROZYJNYCH

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono ocenę erozyjnego zużycia trójwarstwowych powłok epoksydowych oraz poliuretanowych, poddanych klimatycznemu starzeniu. Zmiany starzeniowe w strukturze powłok przyczyniły się do zwiększenia ich chropowatości powierzchni. Dominującym procesem erozyjnego zużycia badanych powłok polimerowych jest mikroskrawanie oraz wykruszanie się powłoki. Destrukcyjny wpływ cząstek erozyjnych, na warstwy powierzchniowe powłok polimerowych potwierdziły również badania mikroskopowe.*

### **WSTĘP**

Zmiany starzeniowe w strukturze powłoki polimerowej mają zasadniczy wpływ na ich intensywność zużycia erozyjnego, a charakter tego procesu istotnie zależy od fizyko-chemicznych właściwości powłoki polimerowej, chroniącej powierzchnię elementów maszyn: rolniczych, budowlanych oraz górniczych. Podczas eksploatacji, w wyniku oddziaływania czynników otoczenia, zachodzi destrukcja (zużywanie) kolejnych warstw powłoki polimerowej, aż do momentu osiągnięcia przez powłokę stanu granicznego, warunkującego jej uszkodzenie [1-3].

Podczas erozji można zaobserwować uderzania twardych cząstek o powierzchnię powłoki, które zachodzą w warunkach plastycznego lub sprężystego kontaktu, charakterystycznych dla danego środowiska eksploatacji. Usuwanie materiału podczas erozji jest zależne od wielu powiązanych ze sobą czynników, które determinują szybkość erozji. Dodatkowe trudności wynikają z faktu, iż podczas erozji różne procesy występują jednocześnie [4, 5]. Szybkość zużycia powłoki stanowi jej kryterium odporności na erozyjne oddziaływanie czynników środowiskowych. Jest ona wprost proporcjonalna do: wytrzymałości na rozciąganie, modułu sprężystości, twardości a odwrotnie proporcjonalna do naprężenia powodującego zerwanie powłoki i współczynnika tarcia cząstki erozyjnej po powłoce polimerowej [6-8].

Przebieg procesu zużycia erozyjnego może mieć różny charakter. Jest to złożony proces, który istotnie zależy od wielu czynników [9-14]:

- a) powiązanych z materiałem poddanym erozji, takich jak: twardość, chropowatość powierzchni, mikrostruktura, skład chemiczny, właściwości mechaniczne, osnowa polimerowa oraz rodzaj napełniacza (rozmiar jego cząstek lub długość włókna) kompozytu, wytrzymałość połączenia adhezyjnego,
- b) związanych z cząstkami erozyjnymi, np.: materiał, kształt i rozmiar cząstki erozyjnej, jej prędkość względna oraz kąt pomiędzy kierunkiem padania cząstki a powierzchnią powłoki polimerowej (zawarty w płaszczyźnie normalnej do powierzchni powłoki), natężenie strumienia cząstek erozyjnych,

c) dotyczących samego zderzenia, np.: współczynnik tarcia pomiędzy cząstką erozyjną a powłoką polimerową, naprężenia, poślizg cząstek lub ich wnikanie w powłokę.

Niezależnie od tych czynników silny wpływ na proces zużycia erozyjnego ma prędkość ( $v$ ) cząstki erozyjnej. Wraz ze wzrostem prędkości cząstek erozyjnych szybkość zużywania erozyjnego wzrasta i zależność ta ma charakter nieliniowy [15, 16]. Natomiast charakter oddziaływania cząstki erozyjnej na powierzchnię powłoki polimerowej (występowanie poślizgu, zmęczenie materiału lub mikroskrwanie), zależy w głównej mierze od kąta padania cząstki erozyjnej w chwili uderzenia [11, 17].

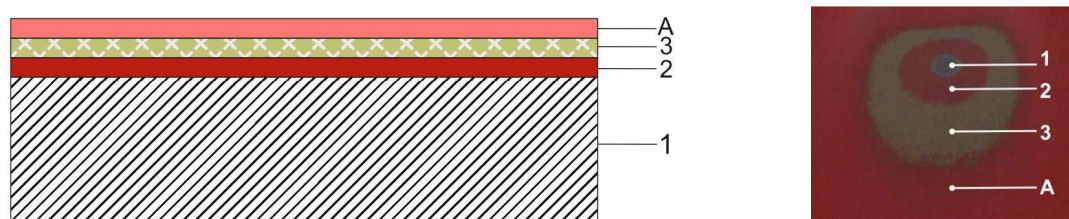
Dla powłok wykonanych z elastycznych polimerów obserwuje się największą wartość szybkości zużywania erozyjnego dla małych kątów padania cząstek erozyjnych. Dla takiego rodzaju erozji zwanego przebiegiem erozji plastycznej, maksymalne usuwanie materiału występuje dla małych kątów oddziaływania strumienia cząstek erozyjnych, zawartych w przedziale  $(30 \div 50)^\circ$  [18].

Jeśli szybkość erozji ciągle wzrasta wraz ze wzrostem kąta padania i osiąga maksimum dla kąta  $90^\circ$ , erozja materiału jest uważana za kruchą. W przypadku tym, powtarzające się uderzenia cząstek powodują przekroczenie wytrzymałości materiału po wystąpieniu całkowitej deformacji. W wyniku lokalnego zmęczenia materiału, rozwój i łączenie się mikro-pęknięć wewnątrz materiału doprowadzają do jego odpryskiwania z powierzchni, co objawia się odrywaniem fragmentów powłoki [19, 20].

Należy jednak pamiętać, że mechanizmy erozji mogą być sklasyfikowane, jako plastyczne i kruche, które nie pasują bezpośrednio do tradycyjnego grupowania materiałów ze względu na ich zniszczenie a powyższa kategoryzacja rodzaju erozji nie jest bezwzględna [21].

## 1. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK POWŁOK DO BADAŃ

Badano trójwarstwowe systemy powłokowe: epoksydowe (EP) oraz poliuretanowe (PUR). Podłoże stalowe próbek (o wymiarach 160 x 80 x 2 mm), było czyszczone za pomocą obróbki ścierniej (w specjalistycznych bębnach), pod wpływem oddziaływania wałeczków ceramicznych. Przed nałożeniem powłok dokonano ich odtłuszczenia. Powłoki były nałożone na podłoże stalowe, metodą natrysku pneumatycznego. Naniesiono dwie warstwy podkładowe wykonane z farby epoksydowej, a następnie warstwę nawierzchniową wykonaną z farby epoksydowej (EP) lub poliuretanowej (PUR) (rys. 1).



**Rys. 1.** Schemat badanego systemu powłokowego oraz ślad przetarcia powłoki pod wpływem erozyjnego oddziaływania cząstek elektrokorundu: 1 – podłoże stalowe; 2 – warstwa podkładowa I (epoksydowa), 3 – międzywarstwa (epoksydowa); A – warstwa nawierzchniowa epoksydowa (EP) lub poliuretanowa (PUR)

Po uzyskaniu powłok poddano je aklimatyzacji w ciągu 10 dni, w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , w otoczeniu o wilgotności  $65 \pm 5\%$ . Po aklimatyzacji powłok i wykonaniu badań wstępnych (grubości, twardości oraz chropowatości) próbki umieszczono na stojakach, usytuowanych na stacji klimatycznej w pobliżu Instytutu Eksploatacji Pojazdów i Maszyn w Radomiu. Badania te powtórzono po trzech latach starzenia powłok. Własności fizykochemiczne badanych systemów powłokowych: epoksydowego (EP) oraz poliuretanowego (PUR), przedstawiono w tabeli 1.

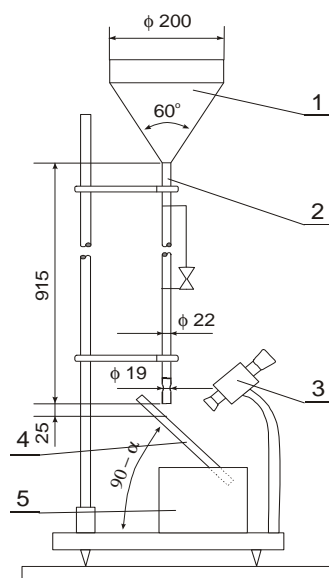
**Tab. 1.** Własności fizykochemiczne systemów powłokowych, niestarczonych oraz poddanych starzeniu pod wpływem czynników klimatycznych w ciągu 3 lat

Oznaczenie systemu powłokowego	Nazwa warstwy	Rodzaj warstwy	Twardość wg Buchholza $H$		Grubość $G$ , [ $\mu\text{m}$ ]	
			system powłokowy niestarzony	system powłokowy starzony	system powłokowy niestarzony	system powłokowy starzony
EP	podkładowa	epoksydowa I	90	89	180	165
	międzywarstwa	epoksydowa II				
	nawierzchniowa	epoksydowa				
PUR	podkładowa	epoksydowa I	83	92	179	182
	międzywarstwa	epoksydowa II				
	nawierzchniowa	poliuretanowa				

Twardość powłok polimerowych badano metodą Buchholza (PN-EN ISO 2815:2004). Grubość powłok badano za pomocą przyrządu Mega-Check FE (zgodnie z normą PN-EN ISO 2808:2000). Destrukcję powłok polimerowych analizowano na podstawie badań mikroskopowych, do których posłużył mikroskop metalograficzny Optek 2601. Do pomiaru chropowatości powierzchni badanych powłok epoksydowych oraz poliuretanowych zastosowano profilometr firmy Hommel-Werke T500 z głowicą T5E (zgodnie z normami: PN-87/M-04251, PN-ISO 8501-1:1996, PN-ISO 8501-1:1998).

## 2. BADANIA ODPORNOŚCI EROZYJNEJ POWŁOK POLIMEROWYCH

Metoda oznaczania odporności erozyjnej powłok polimerowych za pomocą swobodnie spadających cząstek erozyjnych, polega na poddaniu powłoki oddziaływaniu strumienia materiału ściernego. W badaniach procesu erozyjnego zużycia powłok wykorzystano aparat zalecany w polskiej normie PN-76/C-81516 (rys. 2).



**Rys. 2.** Urządzenie do badania zużycia erozyjnego powłoki polimerowej: 1 – pojemnik na materiał erozyjny, 2 – rura transportująca materiał erozyjny, 3 – mikroskop; 4 – uchwyt obrotowy do mocowania próbki metalowej z powłoką polimerową; 5 – pojemnik zbierający przesypyany materiał erozyjny

Do oceny odporności powłok polimerowych na zużycie erozyjne przyjęto kryterium  $S$  wyrażające stosunek całkowitej masy cząstek erozyjnych  $M$ , powodujących zużycie

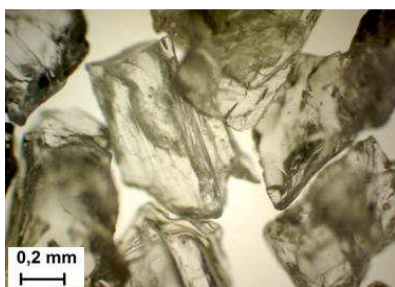
powłoki w badanym obszarze (odstąpienie przez startą powłokę fragmentu powierzchni podłoża o kształcie elipsy o mniejszej średnicy  $d = 3,6 \pm 0,1$  mm), do grubości powłoki  $G$ .

$$S = \frac{M}{G}, \quad (1)$$

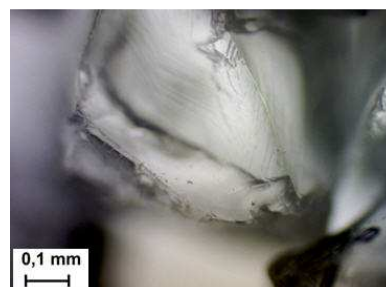
gdzie:  $S$  – odporność erozyjna,  $[\text{kg}/\mu\text{m}]$ ;  $M$  – masa cząstek erozyjnych,  $[\text{kg}]$ ;  $G$  – średnia grubość badanej powłoki,  $[\mu\text{m}]$ .

Materiał erozyjny stanowiły cząstki elektrokorundu szlachetnego, granulowanego 99A (wg PN-76/M-59111), o numerze ziarna 30 wg PN-ISO 8486-2 (rys. 3 i 4). Rozmiary ziaren elektrokorundu wynosiły  $0,60 \div 0,71$  mm. Głównym składnikiem materiału erozyjnego jest trójtlenek glinu (minimum 99 %), zaś pozostałe składniki to: dwutlenek krzemu, trójtlenek żelaza, tlenek wapnia i tlenek sodu. Cząstki erozyjne spadały swobodnie z wysokości 0,915 m.

Badana próbka z powłoką polimerową nachylona była pod kątem  $\alpha = 45^\circ$ . Oznaczenie wykonano w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , w otoczeniu o wilgotności względnej  $65 \pm 5\%$ .



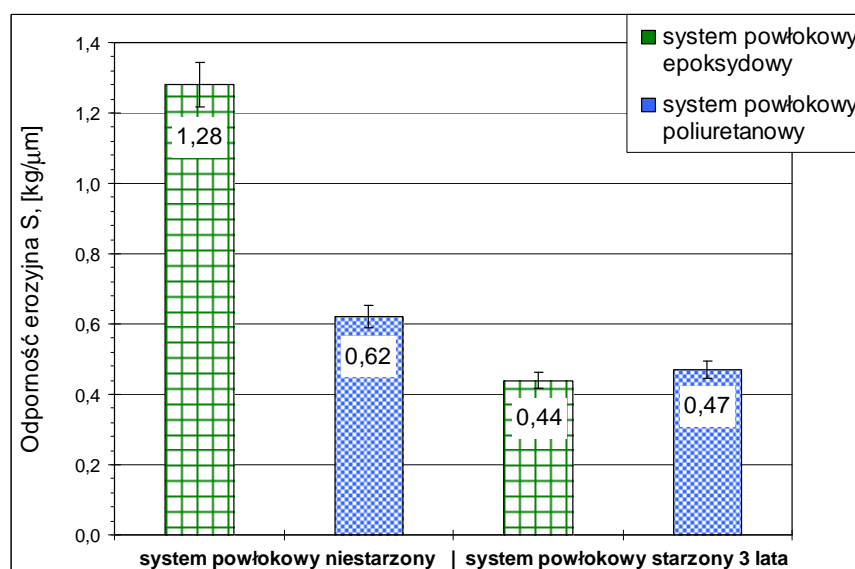
Rys. 3. Morfologia cząstek elektrokorundu



Rys. 4. Morfologia cząstki elektrokorundu

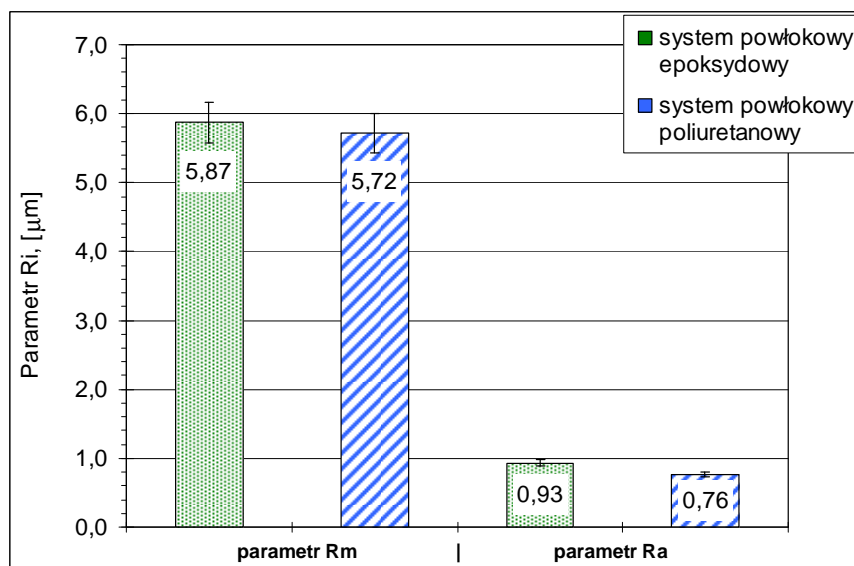
### 3. WYNIKI BADAŃ

W wyniku przeprowadzonych badań odporności erozyjnej powłok polimerowych, poddanych oddziaływaniu czynników klimatycznych można stwierdzić, że przyczyniają się one do destrukcji powłok, co wpływa na obniżenie ich odporności erozyjnej (rys. 5).



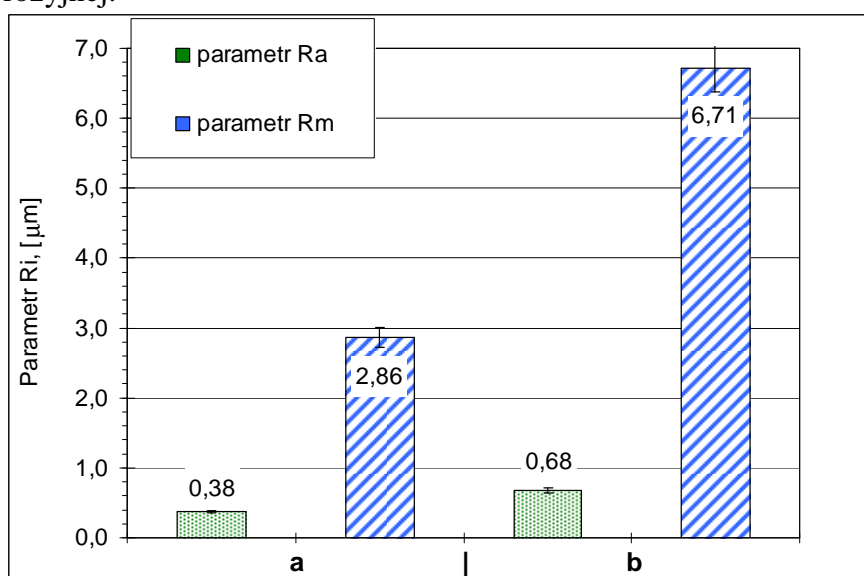
Rys. 5. Wpływ starzenia powłok polimerowych pod wpływem czynników klimatycznych w ciągu 3 lat na ich odporność erozyjną

Zbadano również chropowatość powierzchni międzywarstwy (w tych systemach powłokowych), odsłoniętej po przeprowadzonych badaniach odporności erozyjnej. Również badania chropowatości powierzchni międzywarstwy, odsłoniętej w wyniku oddziaływania cząstek elektrokorundu, potwierdzają większą odporność erozyjną systemu powłokowego z warstwą nawierzchniową poliuretanową w porównaniu do warstwy nawierzchniowej epoksydowej. Zwiększenie wartości parametru  $Ra$  o blisko 22% świadczy o prawdopodobnym odrywaniu się fragmentów epoksydowej warstwy nawierzchniowej (rys. 6).



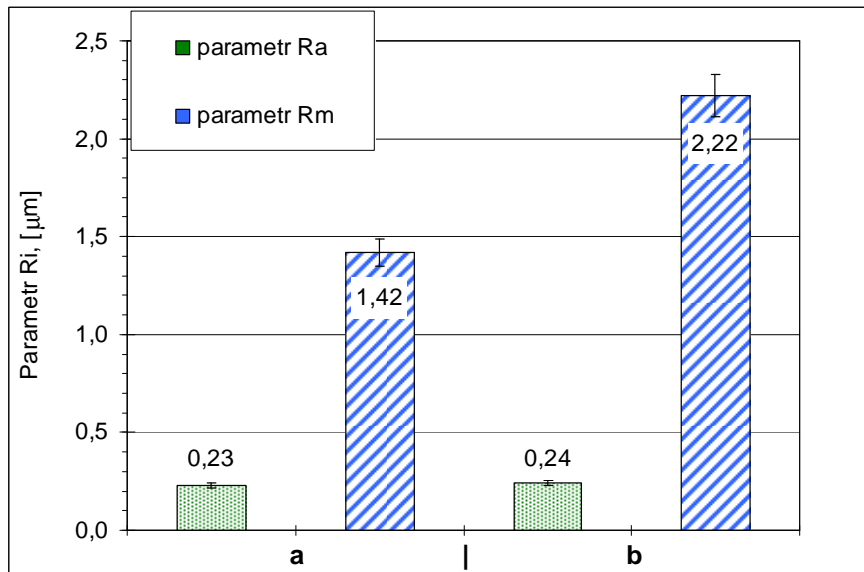
**Rys. 6.** Charakterystyka chropowatości powierzchni międzywarstwy, odsłoniętej w wyniku oddziaływania cząstek erozyjnych

W wyniku starzenia pod wpływem czynników klimatycznych, wydostawanie się składników: napelniaczy oraz pigmentów (tzw. kredowanie powłoki) przyczyniło się do podwyższenia chropowatości powierzchni warstwy nawierzchniowej systemów powłokowych, ocenianej za pomocą parametrów:  $Ra$  i  $Rm$  (rys. 7 i 8). Zwiększona kruchość powłok, jak również wyższa chropowatość powierzchni miały wpływ na obniżenie ich odporności erozyjnej.



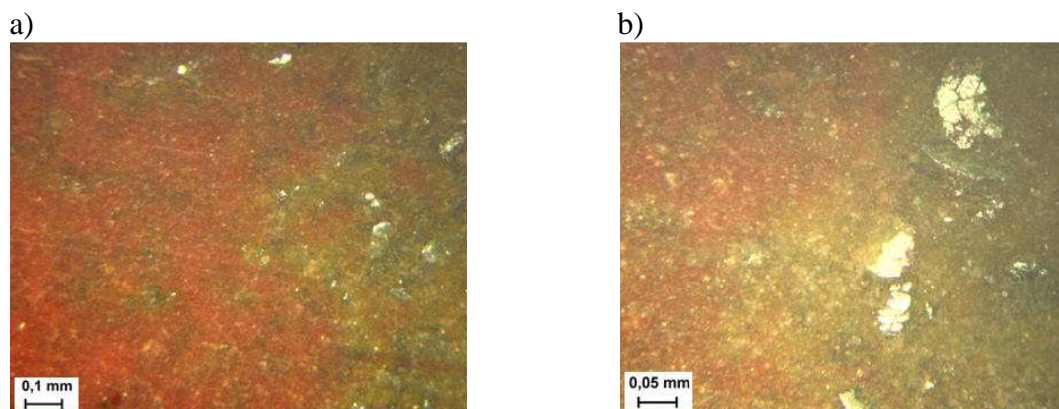
**Rys. 7.** Charakterystyki chropowatości powierzchni warstwy nawierzchniowej epoksydowej: a – powłoka niestarzona, b – powłoka starzona w ciągu 3 lat





**Rys. 8.** Charakterystyki chropowatości powierzchni warstwy nawierzchniowej poliuretanowej: a – powłoka niestarzona, b – powłoka starzona w ciągu 3 lat

Badania mikroskopowe udokumentowały tworzenie się w nawierzchniowej warstwie systemów powłokowych bruzd (rys. 9a), jakie powstały w wyniku oddziaływania cząstek materiału ściernego, zwłaszcza tych o ostrych krawędziach (rys. 4), padających na powierzchnię powłoki. Powtarzające się uderzenia cząstek elektrokorundu przyczyniły się również do powstawania pęknięć i kraterów (rys. 9b).



**Rys. 9.** Morfologia nawierzchniowej warstwy systemu powłokowego, pod wpływem oddziaływania cząstek elektrokorundu

## PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań powłok, po starzeniu klimatycznym w ciągu trzech lat, stwierdza się, obniżenie odporności powłok na uderzenie cząstek elektrokorundu granulowanego. Odporność erozyjna systemu powłokowego z nawierzchniową warstwą epoksydową uległa zmniejszeniu o blisko 66%, natomiast dla nawierzchniowej warstwy poliuretanowej odporność erozyjna uległa zmniejszeniu o 24%. Jednakże, w wyniku starzenia w ciągu 3 lat na stacji klimatycznej, to system powłokowy z nawierzchniową warstwą poliuretanową wykazał większą odporność erozyjną w porównaniu do nawierzchniowej warstwy epoksydowej. Może to być tłumaczone zwiększeniem twardości o ponad 10% (wg Buchholza), w następstwie dodatkowego utwardzenia powłok, w wyniku oddziaływania promieniowania ultrafioletowego.

Ponadto przeprowadzone badania wykazały, że oddziaływanie czynników klimatycznych ma istotny wpływ na stan powierzchni powłok. Starzona, epoksydowa warstwa nawierzchniowa charakteryzowała się ponad trzykrotnie większymi parametrami chropowatości  $R_a$  i  $R_m$ , w porównaniu do warstw niestarzonej.

Zwiększona chropowatość powierzchniowych warstw powłok wpływa na obniżenie ich skuteczności ochronnej, w tym odporności na oddziaływanie czynników erozyjnych. Erozyjne oddziaływanie cząstek na powłoki polimerowe skutkuje: ścieraniem, zarysowaniem powłok oraz wykruszaniem ich fragmentów.

## BIBLIOGRAFIA

1. Kotnarowska D., *Destrukcja powłok polimerowych pod wpływem czynników eksploatacyjnych*. Monografia, Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno Humanistycznego w Radomiu, Radom 2013, 209 s.
2. Kotnarowska D., *Rodzaje procesów zużycia powłok polimerowych*. Monografia Nr 60, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2003.
3. Kotnarowska D., Wpływ procesu starzenia na trwałość powłoki epoksydowej. Monografia Nr 12, WSI, Radom 1994.
4. *Characterization and failure analysis of plastics*. ASM International, 2003.
5. Kleis I., Kulu P., *Solid particle erosion - Occurrence, Prediction and Control*. Springer 2008.
6. Zahavi J., Schmitt G.F., *Solid particle erosion of rein coatings*. Wear, Vol. 71, 1981, p. 191 ÷ 210.
7. Zahavi J., Schmitt G.F., *Solid particle erosion of reinforced composite materials*. Wear, Vol. 71, 1981, p. 179 ÷ 190.
8. Ratner S.B., Styller E.E., *Characteristics of impact friction and wear of polymeric materials*. Wear, Vol. 73, 1981, p. 213 ÷ 234.
9. Kotnarowska D., *Examination of dynamics of polymeric coatings erosive wear process*. Material Science, Vol. 12, 2006, p. 138 ÷ 143.
10. Zhou R., Lu D.H., Jiang Y.H., Li Q.N., *Mechanical properties and erosion wear resistance of polyurethane matrix composites*. Wear, Vol. 259, Issues 1 ÷ 6, 2005, p. 676 ÷ 683.
11. Kotnarowska D., *Kinetics of wear of epoxide coating modified with glass microspheres and exposed to the impact of alundum particles*. Progress in Organic Coatings, Vol. 31, 1997, p. 325 ÷ 330.
12. Tilly G.P., *Erosion caused by airborne particles*. Wear, Vol. 14, 1969, p. 63 ÷ 79.
13. Tilly G.P., *Sand erosion of metals and plastics: A brief review*. Wear, Vol. 14, 1969, p. 241 ÷ 248.
14. Barkoula N.-M., *Review processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites*. Journal of Materials Science, Vol. 37, 2002, p. 3807 ÷ 3820.
15. Hutchings I.M., *Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach*. Tribology International, Vol. 31, No. 1 ÷ 3, 1998, p. 5 ÷ 15.
16. Scattergood R.O., Routbort J.L., *Velocity and size dependence of the erosion rate in silicon*, Wear, Vol. 67, 1981, p. 227 ÷ 232.
17. Kotnarowska D., *Erozja powłok polimerowych*. Monografia Nr 134, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2009.
18. Zahavi J., Schmidt G.F., *Solid particle erosion of polymeric coatings*. Wear, Vol. 71, 1981, p. 191 ÷ 210.
19. Pool K.V., Dharan C.K.H., Finnie I., *Erosive wear of composite materials*. Wear, Vol. 107, 1986, p. 1 ÷ 12.
20. Roy M., Vishvanathan B., Sundararajan G., *The solid particle erosion of polymer matrix composites*. Wear, Vol. 171, 1994, p. 149 ÷ 161.
21. Venugopal Reddy A., Sundararajan G., *Erosion behaviour of ductile materials with a spherical non-friable erodent*. Wear, Vol. 111, 1986, p. 313 ÷ 323.

# POLYMER COATINGS WEAR UNDER THE INFLUENCE OF EROSIIVE PARTICLES

## *Abstract*

*An assessment of erosive wear of three-layer epoxy and polyurethane coatings, aged in natural climatic factors, is presented in the paper. The ageing changes in the structure of the coatings contributed to increase of surface roughness. The microcutting and chipping of coatings is dominant process of examined coatings wear. Also microscopic examination confirmed destructive effect of erosive particles on the surface layers of polymeric coatings.*

## ***Autor:***

**mgr inż. Michał Przerwa** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu,  
Wydział Mechaniczny, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn  
e-mail: m.przerwa@student.uthrad.pl