

Analysis of the surface geometric structure of camouflage coating systems for military applications

Analiza struktury geometrycznej powierzchni maskujących systemów powłokowych do zastosowań militarnych

MAREK MICHALSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.10.19>

The paper presents the results of experimental tests of coating systems for military applications. The determination was based on measurements of surface geometric structure. The tests were carried out for two-layer masking coating systems made in three variants: coating system (SP1), coating system modified with carbon nanotubes (SP2), coating system modified with glass microspheres (SP3). Paint coating systems were applied by pneumatic spraying to DC01 steel samples using SATA guns. Due to their properties, painting systems can be used on military equipment and vehicles.

KEYWORDS: camouflage, coatings system, surface geometric structure, military equipment, military vehicles

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych systemów powłokowych do zastosowania w technice wojskowej. Ocenę właściwości oparto na pomiarach struktury geometrycznej powierzchni. Badania przeprowadzono dla dwuwarstwowych maskujących systemów powłokowych wykonanych w trzech wariantach: system powłokowy (SP1), system powłokowy modyfikowany nanorurkami węglowymi (SP2), system powłokowy modyfikowany mikrosferami szklanymi (SP3). Lakiernicze systemy powłokowe nanoszono metodą natrysku pneumatycznego na próbki ze stali DC01 za pomocą pistoletów firmy SATA. Ze względu na swoje właściwości systemy malarskie mogą być stosowane na sprzęcie i pojazdach wojskowych.

SŁOWA KLUCZOWE: maskowanie, system powłokowy, struktura geometryczna powierzchni, sprzęt wojskowy, pojazdy wojskowe

Maskujące systemy powłokowe są wystawiane na różne oddziaływania eksploatacyjne, które mogą powodować utratę ich właściwości ochronnych oraz funkcji specjalnych. Wśród kluczowych czynników wpływających na degradację powłok znajdują się czynniki klimatyczne, takie jak ciepło, promieniowanie ultrafioletowe (UV) oraz wilgoć. Ekspozycja na promieniowanie UV może powodować fotochemiczne reakcje w materiałach powłokowych, prowadząc do ich uszkodzenia, pęknięcia oraz osłabienia struktury. W warunkach wysokiej wilgotności maskujące systemy powłokowe mogą stopniowo tracić przyczepność do podłoża. Powoduje to pęcherzenie, łuszczenie się lub odpryskiwanie farby, co zmniejsza jej skuteczność maskującą i ochronną. Oprócz oddziaływań klimatycznych maskujące systemy powłokowe są narażo-

ne na działanie agresywnych mediów, takich jak olej napędowy, benzyna, smary i płyny eksploatacyjne, zanieczyszczenia przemysłowe oraz substancje do usuwania skażeń stosowane w wojsku. Kontakt z tymi substancjami może prowadzić do reakcji chemicznych na powierzchniach powłok, zmniejszając ich zdolność do maskowania i trwałość eksploatacyjną [1–4].

Struktura geometryczna powierzchni (SGP) odgrywa istotną rolę w wielu procesach zachodzących w warstwie wierzchniej. Należy do głównych czynników determinujących jakość powierzchni, a co za tym idzie również trwałość i funkcjonalność gotowego produktu. Wpływ SGP na właściwości użytkowe materiału jest szczególnie widoczny w kontekście odporności korozyjnej oraz odporności na zarysowanie. Powierzchnia o optymalnie dobranej strukturze może skutecznie minimalizować ryzyko wystąpienia korozji, co jest niezwykle ważne w przypadku materiałów narażonych na działanie agresywnych środowisk. Podobnie struktura geometryczna wpływa na odporność powierzchni na zarysowania. W zależności od jej ukształtowania materiał może wykazywać większą lub mniejszą podatność na uszkodzenia mechaniczne.

Strukturą geometryczną powierzchni określa się zbiór wszystkich nierówności, tj. odchyłek kształtu i położenia, wad powierzchni, falistości i chropowatości powstałych w wyniku procesów nakładania powłoki polimerowej i jej zużycia w trakcie eksploatacji. Składowe SGP to: chropowatość powierzchni, falistość powierzchni i odchyłki kształtu. Podział ten jest oparty na proporcjach wysokości i długości fali nierówności. W celu kompleksowego scharakteryzowania chropowatości powierzchni stosuje się parametry profilu powierzchni: wysokościowe, odległościowe i hybrydowe (Ra , Rc , Rz , Rt , Rp , Rv , Rq , RSm , Rdq) oraz funkcje: krzywą gęstości amplitudowej, krzywą udziału materiału i funkcję gęstości widmowej mocy [5]. W charakterystyce stereometrii powierzchni wykorzystuje się najczęściej parametry: Sa , Sz , Sp , Sv , Sq , Ssk , Sku [6]. Dane dotyczące zasad filtracji wyników pomiarów topografii powierzchni znajdują się w normie PN-EN ISO 25178-3 [7].

Analiza SGP obejmuje trzy etapy: metodę (technikę) pomiaru, przedstawienie powierzchni oraz jej ocenę parametryczną. Problematyce metod pomiarów oraz oceny chropowatości i falistości powierzchni poświęcono wiele publikacji [8–15].

* Mgr inż. Marek Michalski – mmichalski@barwa.kielce.pl, <https://orcid.org/0000-0003-0419-7886> – F.H. Barwa, Kielce, Polska

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów struktury geometrycznej powierzchni maskujących systemów powłokowych przeznaczonych do zastosowania w technice wojskowej.

Materiały i parametry obróbki

Próbki do badań wykonano ze stali stopowej DC01 o wymiarach: 150 mm × 100 mm × 1 mm. Powierzchnie próbek stalowych przygotowano w następujący sposób: zmyto zmywaczem XPA10006, przeszlifowano maszynką rotacyjną z papierem ściernym o uziarnieniu P80 i przemyto rozpuszczalnikiem XPA10006. Do nanoszenia systemów malarskich wykorzystano pistolety firmy SATA z dyszami oraz kabinę lakierniczą firmy Blowtherm.

Na przygotowane próbki stalowe naniesiono metodą natrysku pneumatycznego maskujące systemy powłokowe w trzech wariantach:

1) system powłokowy dwuwarstwowy (SP1): powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka maskująca BW400-6031,

2) system powłokowy dwuwarstwowy (SP2): powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka maskująca BW400-6031 + modyfikacja nanorurkami węglowymi,

3) system powłokowy dwuwarstwowy (SP3): powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka maskująca BW400-6031 + modyfikacja mikrosferami szklanymi.

Wytworzone systemy powłokowe wygrzano w temperaturze 60°C przez 60 min. Tak wykonane próbki były starzone przez 21 dni w temperaturze pokojowej. Schemat powłoki okazano na rys. 1.

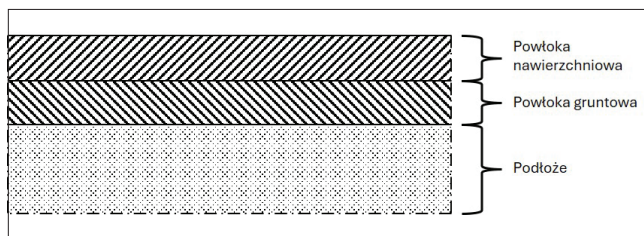


Fig. 1. Scheme of the masking coating system
Rys. 1. Schemat maskującego systemu powłokowego

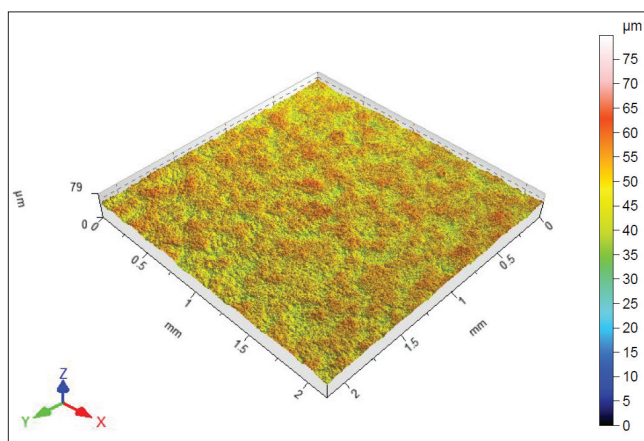


Fig. 2. Isometric image of the S-L surface (roughness) of the SP1 masking coating system
Rys. 2. Obraz izometryczny powierzchni S-L (chropowatości) maskującego systemu powłokowego SP1

Omówienie wyników badań

Pomiary SGP przeprowadzono w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Badania wykonano z użyciem przyrządu optycznego Talysurf CCI, wykorzystującego metodę koherentnej interferometrii korelacyjnej, umożliwiającego pomiar z rozdzielczością w osi z dochodzącą do 10 pm. Wynik pomiarów jest zapisywany w macierzy 1024 × 1024 punktów pomiarowych, co przy zastosowanym obiektywie o powiększeniu ×50 daje zmierzony obszar 0,33 mm × 0,33 mm i rozdzielczość poziomą 0,33 μm × 0,33 μm. Wykonano 10 pomiarów na każdej próbce z systemami powłokowymi.

Analiza otrzymanej stereometrii powierzchni z użyciem oprogramowania TalyMap Platinum pozwoliła na ocenę struktury geometrycznej badanych powierzchni.

Na rys. 2–4 przedstawiono obrazy izometryczne struktury geometrycznej powierzchni S-L (chropowatości) uzyskanej po zastosowaniu filtra Gaussa 0,08 mm × 0,08 mm dla maskujących systemów powłokowych.

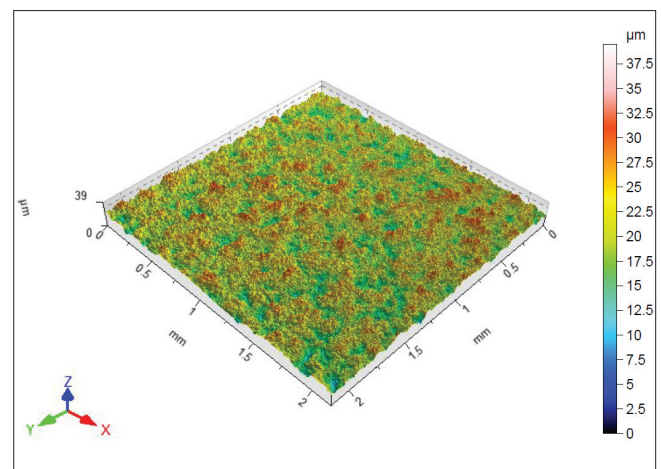


Fig. 3. Isometric image of the S-L surface (roughness) of the modified SP2 masking coating system
Rys. 3. Obraz izometryczny powierzchni S-L (chropowatości) zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego SP2

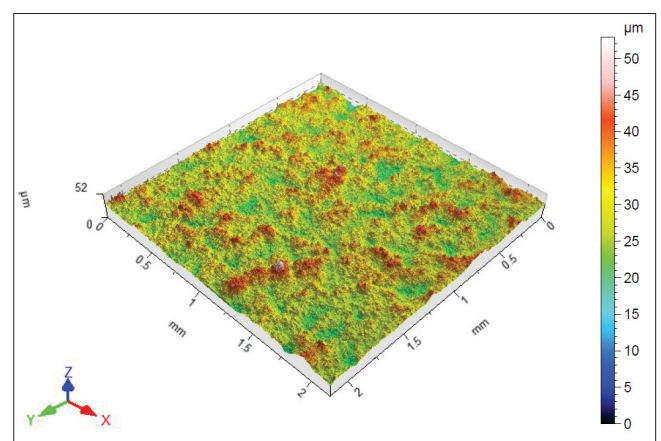


Fig. 4. Isometric image of the S-L surface (roughness) of the modified SP3 masking coating system
Rys. 4. Obraz izometryczny powierzchni S-L (chropowatości) zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego SP3

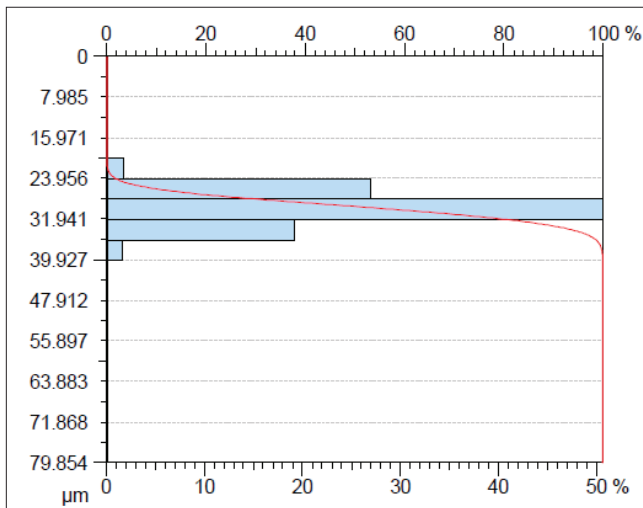


Fig. 5. Distribution of ordinates and load-bearing curve of the *S-L* surface (roughness) of the *SP1* masking coating system
Rys. 5. Rozkład rzędnych i krzywa nośności powierzchni *S-L* (chropowatości) maskującego systemu powłokowego *SP1*

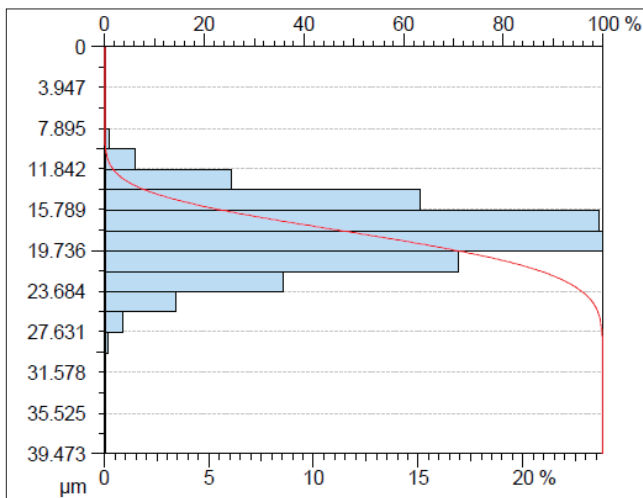


Fig. 6. Distribution of ordinates and load-bearing curve of the *S-L* surface (roughness) of the modified *SP2* masking coating system
Rys. 6. Rozkład rzędnych i krzywa nośności powierzchni *S-L* (chropowatości) zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego *SP2*

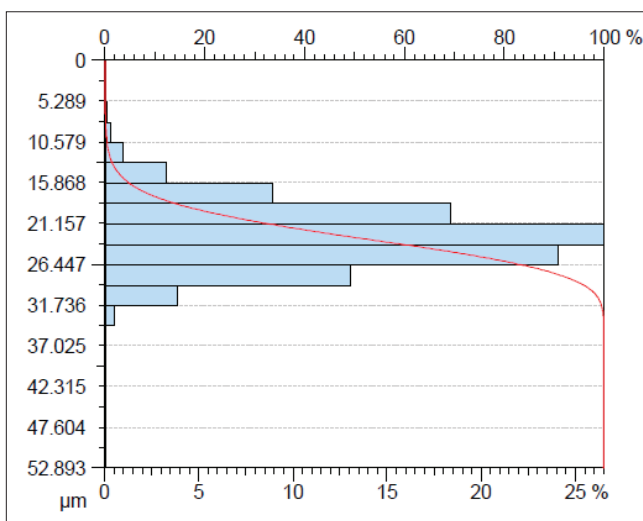


Fig. 7. Distribution of ordinates and load-bearing curve of the *S-L* surface (roughness) of the modified *SP3* masking coating system
Rys. 7. Rozkład rzędnych i krzywa nośności powierzchni *S-L* (chropowatości) zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego *SP3*

Na rys. 5–7 zaprezentowano rozkłady rzędnych z krzywą nośności badanych systemów powłokowych dla powierzchni *S-L* (chropowatości).

Na rys. 8–10 pokazano przykładowe profile chropowatości powierzchni badanych systemów malarskich.

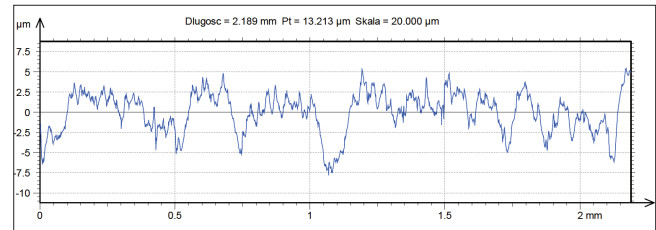


Fig. 8. Roughness profile of the *SP1* masking coating system
Rys. 8. Profil chropowatości maskującego systemu powłokowego *SP1*

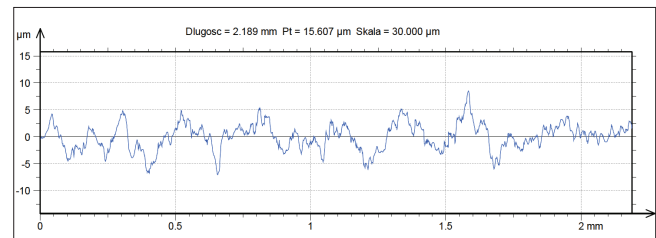


Fig. 9. Roughness profile of the modified *SP2* masking coating system
Rys. 9. Profil chropowatości zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego *SP2*

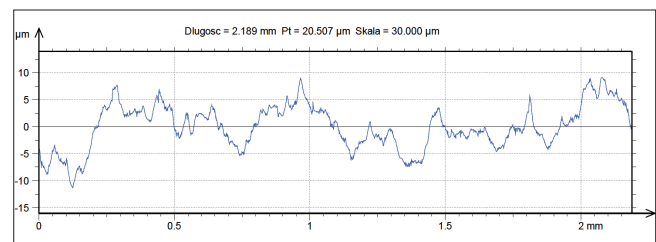


Fig. 10. Roughness profile of the modified *SP3* masking coating system
Rys. 10. Profil chropowatości zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego *SP3*

TABLE I. Average values of parameters of the geometric structure of the *S-L* surface (roughness)

TABLICA I. Uśrednione wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni *S-L* (chropowatości)

Parametry SGP	Maskujący system powłokowy		
	<i>SP1</i>	<i>SP2</i>	<i>SP3</i>
<i>Sq</i> [μm]	2,841	3,110	3,949
<i>Ssk</i>	-0,217	-0,169	0,393
<i>Sku</i>	3,285	2,954	3,565
<i>Sp</i> [μm]	29,616	18,150	22,781
<i>Sv</i> [μm]	50,238	21,323	30,112
<i>Sz</i> [μm]	79,853	39,473	52,893
<i>Sa</i> [μm]	2,272	2,486	3,111

W tabl. I zestawiono najważniejsze uśrednione wartości parametrów SGP dla powierzchni *S-L*.

Badane maskujące systemy powłokowe miały uśrednione wartości średniego arytmetycznego odchylenia chropowatości powierzchni od powierzchni średniej $Sa = 2,3 \div 3,1 \mu\text{m}$. Próbkę ze stali DC01 po szlifowaniu papierem ściernym o uziarnieniu P80, na które

nanoszono powłoki, miały $Sa = 0,8 \pm 0,9 \mu\text{m}$. Sa jest podstawowym parametrem amplitudowym do ilościowej oceny stanu analizowanej powierzchni. Podobną tendencję w wynikach pomiaru maskujących systemów powłokowych i stali DC01 zaobserwowano dla średniokwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni Sq , które charakteryzowało się silną korelacją z parametrem Sa . W wyniku naniesienia powłoki nastąpił nieznaczny wzrost chropowatości powierzchni.

Dodatkową informację na temat ukształtowania powierzchni badanych modyfikacji dają parametry amplitudowe: współczynnik skośności Sku oraz współczynnik skupienia Ssk . Parametry te są wrażliwe na występowanie na powierzchni miejscowych wzniesień czy wgłębień, w tym również defektów. Uzyskane wartości kurtozy zbliżone do $Sku = 3$ świadczą o tym, że rozkład rzędnych dla wszystkich próbek jest zbliżony do rozkładu normalnego. Najwyższą wartość uzyskano dla modyfikacji systemu maskującego mikrosferami szklanymi.

Z analizy tabl. I wynika, że tylko system malarski SP3 miał dodatnią wartość współczynnika asymetrii powierzchni Ssk (skośność), co świadczy o tym, że mamy do czynienia z powierzchnią gładką, pozbawioną głębokich rys. Powłoka bez modyfikacji (SP1) oraz powłoka modyfikowana nanorurkami węglowymi (SP2) miały wartości ujemne Ssk , co świadczyło raczej o płaskowyżowym ukształtowaniu tych powierzchni w porównaniu z powłoką modyfikowaną mikrosferami szklanymi (SP3). Najmniejszą wartość parametru Ssk zmierzono dla systemu powłokowego SP1.

Parametry profilu chropowatości zostały obliczone jako wartości średnie ze 102 profili. Maskujące systemy powłokowe charakteryzowały się wartością parametru $Ra = 1,8 \pm 2,3 \mu\text{m}$. Próbkki ze stali DC01 (po szlifowaniu papierem ściernym P80), na które nanoszono powłoki dwuwarstwowe, miały chropowatość $Ra = 0,5 \pm 0,7 \mu\text{m}$.

W tabl. II zestawiono najważniejsze uśrednione parametry profilu chropowatości badanych systemów powłokowych. Z analizy przedstawionych wyników wychodzi, że najniższą wartość parametru Ra uzyskano dla systemu powłokowego SP2, natomiast największą wartość parametru Ra uzyskał system malarski SP3. Również wspomniany lakierniczy system maskujący miał najwyższą wartość parametru Rz .

TABLE II. Average roughness profile parameters
TABLICA II. Uśrednione parametry profilu chropowatości

Parametr	Maskujący system powłokowy		
	SP1	SP2	SP3
Rp [μm]	5,496	5,252	7,487
Rv [μm]	6,766	7,200	5,947
Rz [μm]	12,262	12,452	13,435
Rc [μm]	5,092	8,356	6,006
Rt [μm]	12,262	15,329	13,435
Ra [μm]	2,219	1,761	2,257
Rq [μm]	2,716	2,289	2,693
Rsk	-0,826	-0,408	-0,010
Rku	2,660	3,374	2,563
RSm [μm]	0,100	0,153	0,134
Rdq [$^\circ$]	15,365	15,541	12,986

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i otrzymanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- maskujące systemy powłokowe miały większe parametry struktury geometrycznej powierzchni niż materiał podłoża (ponad trzykrotnie),
- najmniejszą wartość parametru chropowatości Ra zmierzono dla lakierniczego systemu SP2,
- uzyskane wartości kurtozy dla powłok dwuwarstwowych były zbliżone do rozkładu normalnego,
- system malarski SP3 miał dodatnią wartość współczynnika asymetrii powierzchni Ssk , co świadczy o tym, że mamy do czynienia z powierzchnią gładką, pozbawioną głębokich rys.

LITERATURA

- [1] Kotnarowska D. „Destrakcja powłok polimerowych pod wpływem czynników eksploatacyjnych”. Radom: Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego (2013).
- [2] Pasiecznyński Ł., Radek N., Radziszewska-Wolińska J. „Operational properties of anti-graffiti coating systems for rolling stock”. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 12, 1 (2018): 127–134, <https://doi.org/10.12913/22998624/85705>.
- [3] Radek N., Pasiecznyński Ł., Makrenek M., Dudek A. „Mechanical properties of anti-graffiti coating systems used in the railway industry”. *Materials Research Proceedings*. 5 (2018): 243–247, <https://dx.doi.org/10.21741/9781945291814-43>.
- [4] Michalski M., Pisarek U., Radek N., Przybył W., Szczepaniak M., „The influence of operational exposure on changes in parameters of effective camouflage of coatings used in military technology.” *Advances in Science and Technology Research Journal*. 17 (2023): 182–196, <https://doi.org/10.12913/22998624/156940>.
- [5] PN-ISO 4287:1999/A1:2010 – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [6] PN-EN ISO 25178-2:2012 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [7] PN-EN ISO 25178-3:2012 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 3: Specyfikacje operatorów.
- [8] Adamczak S., Makieta W. „Analyzing variations in roundness profile parameters during the wavelet decomposition process using the MATLAB environment”. *Metrology and Measurement Systems*. XVIII, 1 (2011): 25–34, <https://doi.org/10.2478/v10178-011-0003-6>.
- [9] Adamczak S., Świdorski J., Dobrowolski T. „Analiza wpływu gęstości próbkowania poziomego na parametry chropowatości”. *Mechanik*. 4 (2017): 332–334, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.4.52>.
- [10] Miller T., Adamczak S., Świdorski J., Wieczorowski M., Łętocha A., Gapiński B. „Influence of temperature gradient on surface texture measurements with the use of profilometry”. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*. 65, 1 (2017): 53–61, <https://doi.org/10.1515/bpasts-2017-0007>; ISSN 2300-1917.
- [11] Oczko K., Lubimov V. „Struktura geometryczna powierzchni”. Rzeszów: Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej (2003).
- [12] Grzesik W. „Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn”. *Mechanik*. 8–9 (2015): 587–593, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.8-9.493>.
- [13] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B. „Analiza struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem krzywej udziału materiału”. *Mechanik*. 11 (2016): 1728–1729, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.11.512>.
- [14] Pawlus P. „Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej (2006).
- [15] Stout K.J., Blunt L. „Three-Dimensional Surface Topography”. London: Penton Press (2000). ■

Praca wykonana w ramach projektu MNiSW „Doktorat wdrożeniowy I” (V edycja) Nr DWD/5/0043/2021 – pt. „Wpływ dodatków modyfikujących na właściwości eksploatacyjne lakierniczych systemów powłokowych stosowanych w technice wojskowej”.