

Analiza struktury geometrycznej powierzchni systemów powłokowych antygraffiti przeznaczonych do zabezpieczania taboru kolejowego

Analysis of the surface geometric structure of the anti-graffiti coating systems intended for rolling stock

NORBERT RADEK
ŁUKASZ PASIECZYŃSKI
JACEK PIETRASZEK
JOZEF BRONČEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.2.21>

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości systemów powłokowych antygraffiti do zabezpieczania taboru kolejowego. Ocenę tych właściwości przeprowadzono na podstawie pomiarów struktury geometrycznej powierzchni oraz analizy mikrostruktury. Badano następujące systemy powłokowe antygraffiti: XPC 60011, XPC 60012, XPC 60036, BO100-AGR. Składały się one z następujących warstw: antykorozyjnego podkładu epoksydowego, szpachli, podkładu wypełniającego, lakieru bazowego oraz bezbarwnych lakierów antygraffiti. Powłoki zostały naniesione na próbki ze stali S355 za pomocą pistoletów firmy SATA. Ze względu na swoje właściwości systemy powłokowe antygraffiti mogą być z powodzeniem stosowane do zabezpieczania pojazdów szynowych.

SŁOWA KLUCZOWE: system powłokowy antygraffiti, struktura geometryczna powierzchni, tabor kolejowy

The paper presents the results of the properties of anti-graffiti coating systems for rolling stock. The determination was based on measurements of surface geometric structure and analysis of microstructure. The tests were carried out on the following anti-graffiti coating systems: XPC 60011, XPC 60012, XPC 60036, BO100-AGR. The above systems consisted of the following layers: corrosion epoxy primer, putty, primer filler, basecoat and clearcoats anti-graffiti. The coatings were applied to the sample with S355 steel using guns SATA. Because of its properties, anti-graffiti coating systems can be successfully used on rail vehicles.

KEYWORDS: anti-graffiti coating system, surface geometric structure, rolling stock

W czasie eksploatacji powłoki lakiernicze są wystawiane na oddziaływanie różnego typu czynników, które przyczyniają się do utraty właściwości ochronnych i dekoracyjnych tych powłok. Są to czynniki klimatyczne, tj. promieniowanie ultrafioletowe, ciepło i wilgoć, a także agresywne media i cząstki erozyjne [1–3].

Struktura geometryczna powierzchni ma znaczący wpływ na wiele procesów występujących w warstwie wierzchniej i jest jednym z ważniejszych czynników decydujących o jej walorach jakościowych. Decyduje o własnościach eksploatacyjnych elementów maszyn, np. o warunkach tarcia na powierzchniach styku współpracujących elementów,

naprężeniach stykowych, wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na korozję, szczelności połączeń, powierzchniowym promieniowaniu cieplnym czy własnościach magnetycznych. Strukturą geometryczną powierzchni (SGP) określa się zbiór wszystkich nierówności, powstałych w wyniku procesów obróbki i zużycia materiału. Dane eksploatacyjne dowodzą, że ok. 90% wszystkich braków produkcyjnych ma swoje źródło w uszkodzeniach mechanicznych powierzchni, takich jak: pęknięcia zmęczeniowe, pęknięcia wywołane naprężeniami spowodowanymi korozją, zużycie ścierno-korozyjne, korozja czy erozja.

Przyjmuje się podział SGP na składowe: chropowatość powierzchni, falistość powierzchni i odchyłki kształtu. Ten podział jest oparty na proporcjach wysokości i długości fali nierówności. Dla kompleksowej charakterystyki chropowatości powierzchni stosuje się parametry profilu powierzchni – wysokościowe, odległościowe i hybrydowe (R_a , R_c , R_z , R_t , R_p , R_v , R_q , R_{Sm} , R_{dq}) – oraz funkcje (krzywą gęstości amplitudowej, krzywą udziału materiału, funkcję gęstości widmowej mocy) [4]. Do charakterystyki stereometrii powierzchni wykorzystuje się najczęściej parametry S_a , S_z , S_p , S_v , S_q , S_{sk} , S_{ku} [5]. Dane dotyczące zasad filtracji wyników pomiarów topografii powierzchni są zawarte w normie PN-EN ISO 25178-3:2012 [6].

Problematyce związanej z metodami pomiarów oraz oceną chropowatości i falistości powierzchni poświęcono wiele publikacji [7–12]. W tym artykule przedstawiono wyniki pomiarów SGP oraz analizę mikrostruktury systemów powłokowych antygraffiti z przeznaczeniem dla taboru kolejowego.

Materiały i parametry obróbki

Próbki o wymiarach 150 mm × 100 mm × 1 mm wykonano ze stali stopowej S355. Powierzchnie próbek stalowych umyto w rozpuszczalniku nitro, a następnie przeszlifowano maszynką rotacyjną z papierem ściernym o uziarnieniu P80 i przemyto rozpuszczalnikiem XPA10003. Podczas wykonywania próbek ściśle przestrzegano technologii producenta dostarczającego materiały powłokowe, wykorzystywane w czołowych firmach produkujących tabor kolejowy. Powierzchnia stalowa miała temperaturę wyższą od punktu rosy o co najmniej 3°C. Podczas nakładania kolejnych warstw tego samego produktu szczególną uwagę zwracano na czas odparowania oraz reżimy temperatury procesu suszenia.

W celu przygotowania powierzchni oraz naniesienia systemu powłokowego wykorzystano maszynki rotacyjne oraz papier ścierny firmy Festool, pistolety (wraz z dyszami) firmy SATA oraz kabinę lakierniczą firmy Blowtherm.

* Dr hab. inż. Norbert Radek, prof. PŚk (norrad@tu.kielce.pl) – Centrum Laserowych Technologii Metali, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej; mgr inż. Łukasz Pasiecznyński (l.pasiecznynski@gmail.com) – F.H. BARWA Jarosław Czajkowski; dr hab. inż. Jacek Pietraszek, prof. PK (pmpietra@mech.pk.edu.pl) – Instytut Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej; dr hab. inż. Jozef Bronček (jozef.broncek@fstroj.uniza.sk) – University of Žilina, Department of Machine Element and Design

Kabina miała funkcję odciążenia nadmiaru rozpylonej farby oraz była oklejona folią i zabezpieczona żelam zapobiegającym osiadaniu na powierzchni naniesionej powłoki zanieczyszczeń w postaci kurzu. Ponadto była wyposażona w termostat utrzymujący stałą temperaturę z możliwością jej podwyższenia do ok. 60°C w przypadku suszenia próbek o większych gabarytach. Do suszenia mniejszych próbek wykorzystano kabinę klimatyczną WKL 64/70 firmy Weiss Umwelttechnik GmbH, pozwalającą na regulowanie temperatury i wilgotności.

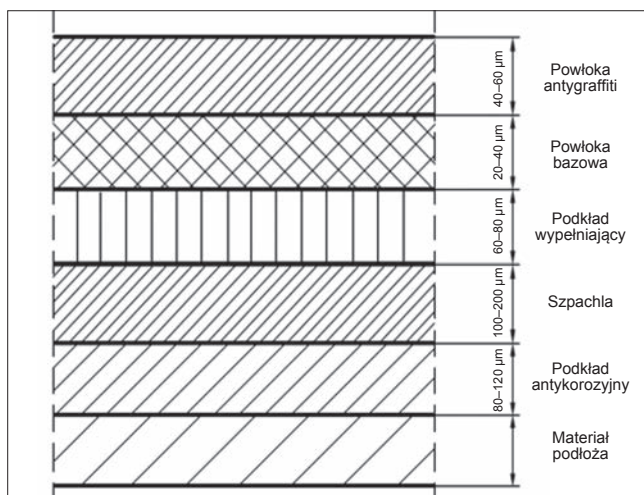
Stalowe próbki zabezpieczono systemami powłokowymi zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1. W badaniach nie brano pod uwagę podkładu antykorozyjnego – ze względu na jego małą grubość i niewielki wpływ na wyniki testów eksploatacyjnych.

Do badań porównawczych wybrano lakier BO100-AGR, opracowany w firmie F.H. BARWA, oraz trzy lakiery firmy PPG: XPC 60011, XPC 60012, XPC 60036.

Parametry nanoszenia warstwy antygraffiti były następujące:

- temperatura powierzchni: 24±26°C,
- ciśnienie robocze 0,18±0,2 MPa,
- czas odparowania pojedynczej warstwy: 15 min,
- grubość suchej powłoki: 40±60 µm,
- technika nanoszenia: natrysk pneumatyczny,
- liczba nanoszonych warstw: 2,
- temperatura suszenia: 60°C,
- czas suszenia: 60 min.

Pozostałe warstwy zostały naniesione zgodnie z opisami technicznymi dostarczonymi przez producenta danego materiału.



Rys. 1. Schemat systemu powłokowego antygraffiti

Omówienie wyników badań

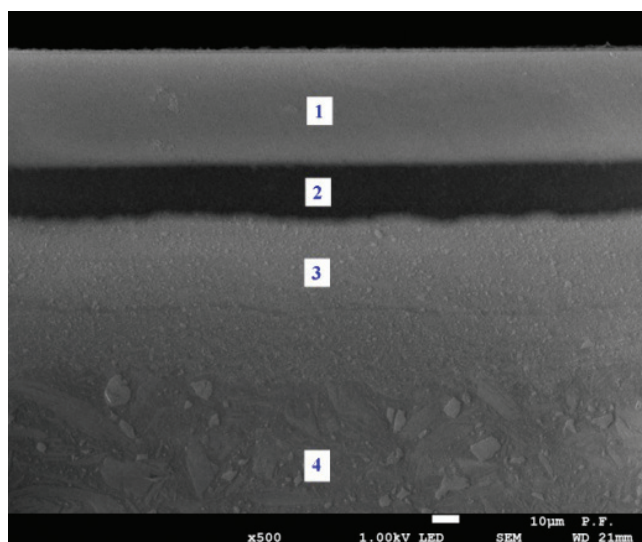
■ **Analiza mikrostruktury.** Próbki do badań metalograficznych wycięto za pomocą przecinarki ISOMET. Następnie wycięte próbki zostały zatopione w termoutwardzalnej żywicy przewodzącej BUEHLER KonductoMet z użyciem prasy do inkludowania BUEHLER SimplyMet 3000. Zgłady metalograficzne szlifowano na szlifierce BUEHLER MetaServ 250 papierami wodnymi o gradacji ziarna od 80 do 2500, każdorazowo pod kątem 90° do kierunku rys powstałych w wyniku poprzedzającej obróbki. Polerowanie próbek przeprowadzono na szlifierko-polerce BUEHLER EcoMet 250 z regulowanym pneumatycznie dociskiem oraz regulowaną prędkością obrotową. Zgłady polerowano na suknach MicroDiamant Mambo w zawieszynie MicroDiamant O.P.S. 0,05 µm.

Otrzymane zgłady metalograficzne poddano obserwacjom mikroskopowym. Do badań mikrostruktury wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy firmy JEOL, typu JSM-7100F z emisją polową (SEM).

Na fotografii (rys. 2) przedstawiono przykładową mikrostrukturę systemu powłokowego antygraffiti XPC 60012. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że minimalna grubość powłoki lakierniczej antygraffiti wyniosła ok. 37 µm, a maksymalna grubość – ok. 41 µm. Analiza SEM potwierdziła, że grubość warstwy lakieru bazowego mieściła się w granicach 19±20 µm. Powłoka lakieru podkładowego miała grubość od ok. 30 µm do 35 µm. Największą grubość miała warstwa ze szpachli – ok. 2210±2250 µm.

Na rys. 2 widoczne są wyraźne granice pomiędzy poszczególnymi warstwami. Wyraźna jest także granica między warstwami lakierniczymi a szpachlą. Powłoki lakiernicze są pozbawione porów i mikropęknięć.

Analizując morfologię pozostałych systemów powłokowych antygraffiti (XPC 60011, XPC 60036, BO100-AGR) stwierdzono, że grubości poszczególnych warstw były porównywalne z grubościami warstw systemu powłokowego antygraffiti XPC 60012. Grubość wytworzonych systemów powłokowych antygraffiti wyniosła od ok. 2300 µm do ok. 2400 µm.



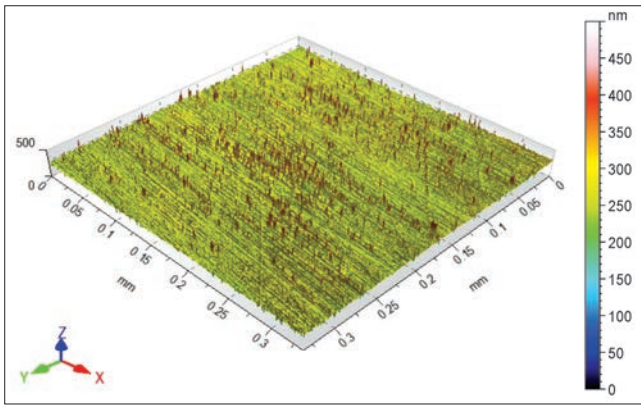
Rys. 2. Mikrostruktura SEM przekroju poprzecznego systemu powłokowego antygraffiti XPC 60012 na podłożu ze stali stopowej S355: 1 – warstwa lakieru antygraffiti, 2 – warstwa lakieru bazowego, 3 – warstwa lakieru podkładowego, 4 – szpachla

■ Pomiary struktury geometrycznej powierzchni.

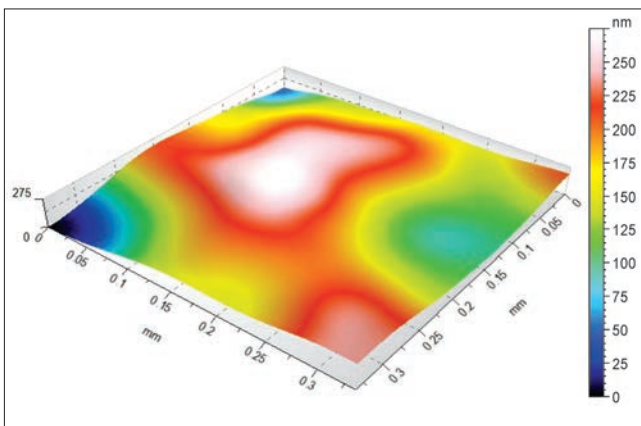
Pomiary SGP przeprowadzono w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Wykorzystano w nich przyrząd optyczny Talysurf CCI, bazujący na metodzie koherentnej interferometrii korelacyjnej, umożliwiającą pomiar z rozdzielczością w osi z dochodzącą do 10 pm. 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 każdej próbki z systemami powłokowymi antygraffiti oraz próbki ze stali S355, co pozwoliło na uśrednienie wyników badań.

Analiza otrzymanej stereometrii powierzchni z wykorzystaniem oprogramowania TalyMap Platinum umożliwiła ocenę struktury geometrycznej badanych powierzchni.



Rys. 3. Obraz izometryczny powierzchni S-L (chropowatości) systemu powłokowego antygraffiti XPC 60012



Rys. 4. Obraz izometryczny falistości powierzchni systemu powłokowego antygraffiti XPC 60012

Na rys. 3 przedstawiono przykładowy obraz izometryczny struktury geometrycznej powierzchni S-L (chropowatości) systemu powłokowego antygraffiti XPC 60012, uzyskany po zastosowaniu filtra Gaussa $0,08 \text{ mm} \times 0,08 \text{ mm}$, na rys. 4 – obraz izometryczny falistości powierzchni, a na rys. 5 – rozkład rzędnych z krzywą nośności tego systemu powłokowego. W tabl. I zestawiono najważniejsze uśrednione wartości parametrów SGP dla powierzchni S-L.

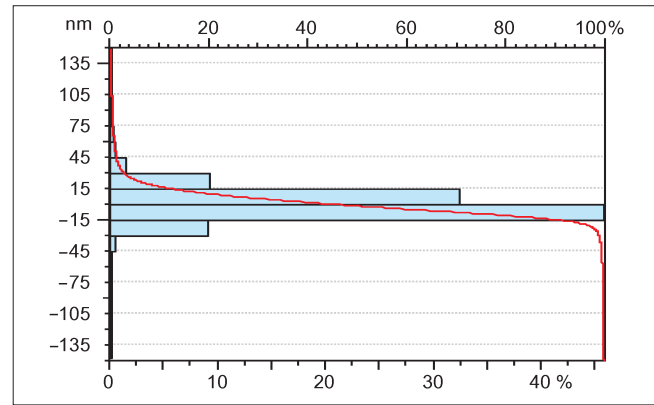
Badane systemy powłokowe antygraffiti miały uśrednione wartości średniego arytmetycznego odchylenia chropowatości powierzchni od powierzchni średniej S_a rzędu $6,4 \div 24,6 \text{ nm}$. Dla próbek ze stali S355 po szlifowaniu papierem ściernym o uziarnieniu P80, na które nanoszono powłoki, parametr S_a wynosił $1234,5 \div 1863,2 \text{ nm}$.

Parametr S_a jest podstawowym parametrem amplitudowym do ilościowej oceny stanu analizowanej powierzchni.

Podobną tendencję w wynikach pomiarów systemów powłokowych antygraffiti i stali S355 zaobserwowano dla średniokwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni S_q , które charakteryzowało się silną korelacją z parametrem S_a . W efekcie naniesienia powłoki nastąpiło zdecydowane zmniejszenie chropowatości powierzchni.

Występująca składowa falistości powierzchni o dość znaczącym udziale może wynikać z zastosowanej metody nanoszenia powłoki.

Wysokie wartości współczynnika nachylenia powierzchni S_{ku} (kurtozy), uzyskane dla wszystkich badanych powłok, świadczą o małym rozproszeniu rzędnych powierzchni. W przypadku każdej powierzchni otrzymano dodatnie wartości współczynnika asymetrii powierzchni S_{sk}



Rys. 5. Rozkład rzędnych i krzywa nośności powierzchni S-L (chropowatości) systemu powłokowego antygraffiti XPC 60012

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

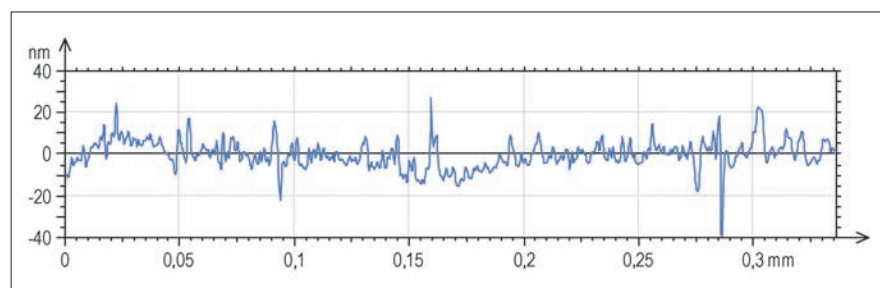
System powłokowy antygraffiti	XPC 60012	XPC 60036	XPC 60011	BO100-AGR
S_q , nm	17,9	28,5	65,1	9,1
S_{sk}	2,4	3,8	0,7	1,4
S_{ku}	35,2	29,1	18,0	19,5
S_p , nm	242,7	288,4	432,6	108,2
S_v , nm	283,7	129,1	370,6	112,8
S_z , nm	526,4	417,6	803,2	221,0
S_a , nm	11,3	15,6	24,6	6,4

(skośności), które natomiast świadczą o tym, że mamy do czynienia z powierzchniami gładkimi, pozbawionymi głębokich rys. Najmniejsza wartość parametru S_{sk} , zmierzona dla powłoki XPC 60011, wynika z zarysowań występujących na jej powierzchni.

Parametry profilu chropowatości zostały obliczone jako wartości średnie ze 102 profili. Systemy powłokowe antygraffiti charakteryzowały się wartością parametru R_a rzędu $5,5 \div 23,3 \text{ nm}$. Próbki ze stali S355 (po szlifowaniu papierem ściernym P80), na które nanoszono powłoki, miały chropowatość R_a równą $706,4 \div 741,8 \text{ nm}$.

Przykładowy profil systemu powłokowego antygraffiti BO100-AGR przedstawiono na rys. 6. W tabl. II zestawiono najważniejsze uśrednione parametry profilu chropowatości badanych systemów powłokowych antygraffiti.

Analiza przedstawionych wyników (tabl. II) potwierdza, że bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na strukturę geometryczną powłoki jest właściwe przygotowanie materiału podłoża. Mimo że chropowatość powierzchni zabezpieczonej powłoką jest znacznie mniejsza w porównaniu z chropowatością materiału wyjściowego, to jednak na obrazach izometrycznych powierzchni S-L (chropowatości) badanych powłok można zaobserwować ślady poprzedzającej obróbki, jaką było szlifowanie.



Rys. 6. Przykładowy profil chropowatości systemu powłokowego antygraffiti BO-100 AGR

TABLICA II. Uśrednione parametry profilu chropowatości

System powłokowy antygraffiti	XPC 60012	XPC 60036	XPC 60011	BO100-AGR
R_p , nm	95,8	194,2	319,4	57,5
R_v , nm	62,4	115,1	242,0	25,6
R_z , nm	158,2	309,3	561,5	83,1
R_c , nm	54,1	94,6	386,0	26,4
R_t , nm	308,2	485,7	961,9	197,7
R_a , nm	10,0	16,5	23,3	5,5
R_q , nm	16,3	30,7	57,2	9,3
R_{sk}	1,1	2,1	2,2	1,6
R_{ku}	21,4	23,0	32,8	18,6
R_{Sm} , μm	11,4	8,9	30,9	10,6
R_{dq} , $^\circ$	1,7	3,1	5,4	0,3

Podsumowanie

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

- Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na strukturę geometryczną systemu powłokowego jest właściwe przygotowanie materiału podłoża. Systemy malarskie charakteryzują się mniejszą chropowatością w stosunku do materiału podłoża (o dwa rzędy wielkości). Ponadto na uzyskanych obrazach izometrycznych systemów powłokowych widoczne są ślady poprzedzającej obróbki, jaką było szlifowanie.
- Grubość systemów powłokowych antygraffiti mieści się w zakresie 2300÷2400 μm . Systemy malarskie są pozbawione porów i mikropęknięć.

LITERATURA

1. Kotnarowska D. „Destrakcja powłok polimerowych pod wpływem czynników eksploatacyjnych”. Monografia. Radom: Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego, 2013.
2. Pasiarczyński 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): s. 127–134.
3. Radek N., Pasiarczyński Ł., Makrenek M., Dudek A. “Mechanical properties of anti-graffiti coating systems used in the railway industry”. *Materials Research Proceedings*. 5 (2018): s. 243–247.
4. PN-ISO 4287:1999/A1:2010 Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
5. PN-EN ISO 25178-2:2012 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
6. PN-EN ISO 25178-3:2012 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 3: Specyfikacje operatorów.
7. Adamczak S., Makiela W. “Analyzing variations in roundness profile parameters during the wavelet decomposition process using the Matlab environment”. *Metrology and Measurement Systems*. XVIII, 1 (2011): s. 25–34.
8. Adamczak S., Świdorski J., Dobrowolski T. „Analiza wpływu gęstości próbkowania poziomego na parametry chropowatości”. *Mechanik*. 4 (2017): s. 332–334.
9. 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): s. 53–61.
10. Oczko K., Lubimov V. „Struktura geometryczna powierzchni”. Rzeszów: Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, 2003.
11. Grzesik W. „Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 587–593.
12. Zawada-Tomkiewicz A., Storch B. „Analiza struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem krzywej udziału materiału”. *Mechanik*. 11 (2016): s. 1728–1729