

# Wybrane zagadnienia stykowych pomiarów struktury geometrycznej powierzchni

## Selected problems of contact measurements of surface texture

STANISŁAW ADAMCZAK  
JACEK ŚWIDERSKI  
TOMASZ DOBROWOLSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.4.51>

Przedstawiono analizę wybranych czynników wpływających na uzyskiwane wartości parametrów chropowatości. Badania, przeprowadzone z wykorzystaniem wzorca materialnego typu PSS (*periodic sinusoidal shape*), polegały na wykonaniu pomiarów profilometrem stykowym z ostrzem odwzorowującym. **SŁOWA KLUCZOWE:** struktura geometryczna powierzchni, wiarygodność pomiarów, wzorce materialne

*The article presents an analysis of selected factors affecting obtained values of roughness parameters of surface texture. The study was conducted by applying a material standard of PSS (periodic sinusoidal shape) type and for measurements carried out with the use of stylus instrument.*

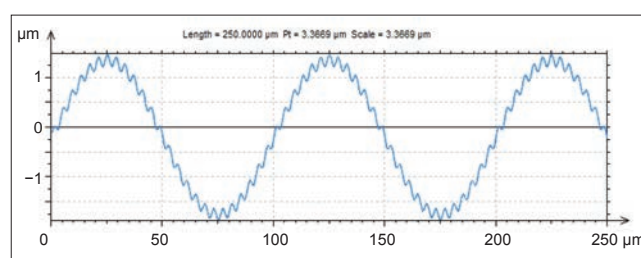
**KEYWORDS:** surface texture, credibility of measurement, material measures

Nowoczesne technologie związane z wytwarzaniem maszyn i urządzeń mechanicznych umożliwiają kształtowanie elementów o założonej dokładności wymiarowo-kształtowej oraz jakości struktury geometrycznej powierzchni [1]. Stan struktury geometrycznej powierzchni jest jednym z ważniejszych czynników decydujących o takich właściwościach mających wpływ na funkcjonowanie elementów, jak: zdolności ślizgowe i smarujące, odporność na ścieranie, wytrzymałość zmęczeniowa, przewodnictwo cieplne, odporność na korozję czy szczelność połączeń. Wydaje się więc, że zidentyfikowanie źródeł błędów mających wpływ na niepewność pomiarów profilometrami stykowymi z ostrzem odwzorowującym ma kluczowe znaczenie [2–4].

Przedstawione rozważania dotyczą powierzchni o charakterze okresowym. W celu zapewnienia wiarygodności pomiarów stykowych nierówności powierzchni o amplitudzie kilkudziesięciu nanometrów i odstępie nierówności rzędu kilkunastu mikrometrów konieczna jest analiza wpływu poszczególnych parametrów pomiaru i czynników mających decydujący wpływ na jego wynik. Najważniejsze z tych czynników można podzielić na następujące grupy [5]:

- zakłócenia zewnętrzne: gradient temperatury [6] oraz drgania;
- przyrząd pomiarowy: geometria ostrza odwzorowującego, gęstość próbkowania poziomego, rozdzielczość pionowa przetwornika pomiarowego, szum przyrządu, prędkość ruchu ostrza odwzorowującego, nacisk pomiarowy;

\* Prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak (adamczak@tu.kielce.pl), mgr inż. Jacek Świdorski (swiderski@tu.kielce.pl), mgr inż. Tomasz Dobrowolski (t.dobrowolski@tu.kielce.pl) – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej



Rys. 1. Profil wzorca PSS

- mierzony przedmiot: czystość powierzchni, odkształcenia plastyczne materiału;
- oprogramowanie: dokładność procedur obliczeniowych parametrów chropowatości.

Aby zweryfikować sposób, w jaki wybrane czynniki wpływają na wyniki pomiarów powierzchni o charakterze okresowym, posłużono się stalowym wzorcem typu PSS (*periodic sinusoidal shape*) [7] o parametrach nominalnych  $RSm = 100 \mu\text{m}$ ,  $Pt = 3 \mu\text{m}$ ,  $Ra = 1 \mu\text{m}$  w postaci dwóch nałożonych na siebie profili sinusoidalnych o długości fali  $\lambda_1 = 100 \mu\text{m}$  i  $\lambda_2 = 4 \mu\text{m}$  (rys. 1).

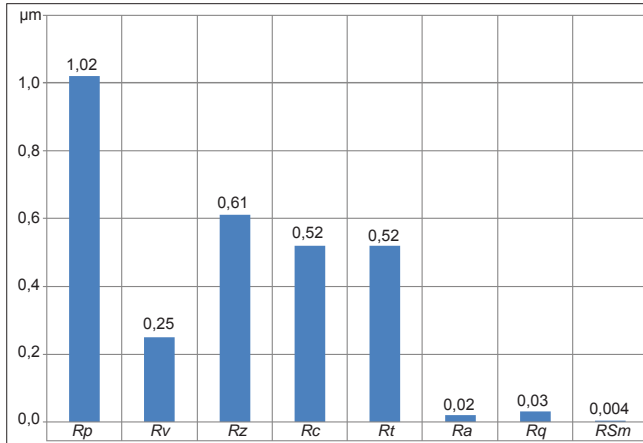
### Powtarzalność pomiarów

W celu wyznaczenia precyzji pomiarów wzorca w warunkach powtarzalności przeprowadzono serię 50 jego pomiarów w tym samym miejscu i w następujących warunkach:

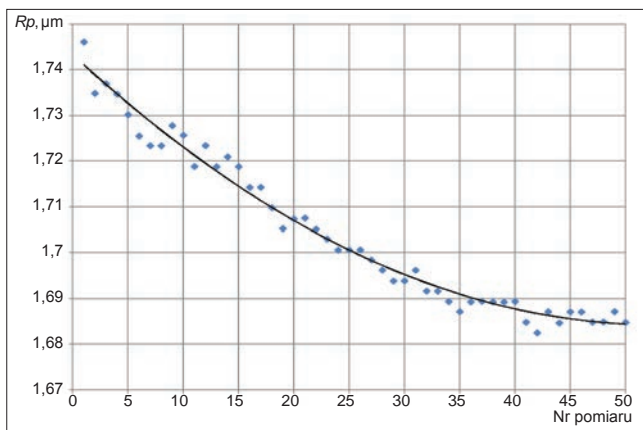
- kształt ostrza odwzorowującego:  $\alpha = 60^\circ$ ,  $r_{\text{tip}} = 2 \mu\text{m}$ ;
- siła nacisku ostrza odwzorowującego:  $F < 1 \text{ mN}$ ;
- prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego:  $v = 0,1 \text{ mm/s}$ ;
- gęstość próbkowania wzdłuż osi X:  $\Delta x = 0,125 \mu\text{m}$ .

Jako miarę precyzji pomiaru w warunkach powtarzalności przyjęto współczynnik zmienności. Na rys. 2 przedstawiono wartości współczynników zmienności dla poszczególnych parametrów. Wyniki kolejnych pomiarów parametru  $Rp$  pokazano na rys. 3. Widoczna tendencja polegająca na obniżaniu się kolejnych wartości parametru jest najprawdopodobniej związana z odkształceniami plastycznymi wierzchołków fali o długości  $\lambda_2 = 4 \mu\text{m}$ . Podobna tendencja występuje w przypadku parametrów  $Rz$ ,  $Rc$  i  $Rt$ . Potwierdzeniem tego faktu są wartości rozstępu wyników tych parametrów na poziomie 60 nm przedstawione w tabl. I. Zdecydowanie inny trend wykazują wartości parametru  $Rv$  dla kolejnych pomiarów oraz wartość rozstępu wynosząca 18 nm.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że największemu rozproszeniu podlegają wyniki parametrów wysokościowych, dotyczących maksymalnych cech wzniesień i wgłębień:  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_c$ ,  $R_t$ . Zdecydowanie mniejsze rozproszenie charakteryzuje parametry amplitudowe dotyczące wartości średnich rzędnych profilu  $R_a$  i  $R_q$ , a najmniejsze – parametr poziomy odległościowy  $R_{Sm}$ .



Rys. 2. Wartości współczynników zmienności dla poszczególnych parametrów chropowatości



Rys. 3. Wartości parametru  $R_p$  dla kolejnych pomiarów

**TABLICA I. Rozstęp otrzymanych wyników dla poszczególnych parametrów**

Rozstęp							
$R_p$ , nm	$R_v$ , nm	$R_z$ , nm	$R_c$ , nm	$R_t$ , nm	$R_a$ , nm	$R_q$ , nm	$R_{Sm}$ , μm
64	18	77	65	63	1	1	0,01

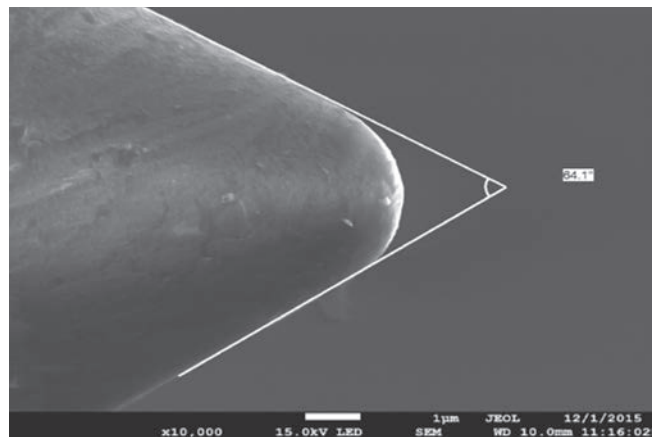
### Wpływ geometrii ostrza odwzorowującego

Ostrze odwzorowujące profilometru stykowego jest elementem bezpośrednio stykającym się z mierzoną powierzchnią i od jego geometrii (kąta stożka i promienia zaokrąglenia) oraz stanu technicznego (ewentualnych uszkodzeń) zależy profil odwzorowany, który wraz z profilem odniesienia stanowi podstawę do wyznaczenia profilu całkowitego. Profil całkowity po wyeliminowaniu nominalnej krzywizny i zastosowaniu filtra  $\lambda_s$  daje w efekcie profil pierwotny, który jest podstawą do wyznaczenia parametrów profilu.

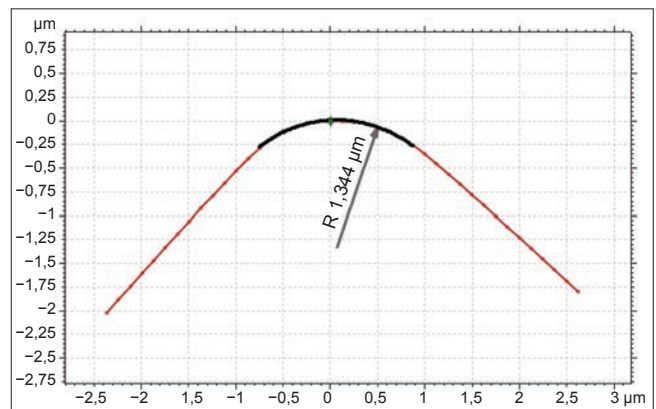
W pomiarach wykonanych w celu sprawdzenia, jaki wpływ na uzyskiwane wartości parametrów chropowatości ma geometria ostrza odwzorowującego, wykorzystano trzy ostrza odwzorowujące o następującej nominalnej geometrii:

- ostrze nr 1:  $\alpha = 60^\circ$ ,  $r_{tip} = 1 \mu\text{m}$ ;
- ostrze nr 2:  $\alpha = 60^\circ$ ,  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ ;
- ostrze nr 3:  $\alpha = 90^\circ$ ,  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ .

Stan ostrzy odwzorowujących został sprawdzony na skaningowym mikroskopie elektronowym. Obraz SEM ostrza nr 2 przedstawiono na rys. 4. Pomiary promieni ostrzy odwzorowujących przeprowadzono na wzorcu typu PRB (*razor blade*). Wynik pomiaru odwzorowujący kształt ostrza nr 2 z wyznaczonym promieniem przedstawiono na rys. 5. Wszystkie wykorzystane do pomiarów ostrza odwzorowujące miały promienie mniejsze od wartości nominalnych.



Rys. 4. Obraz SEM ostrza odwzorowującego nr 2



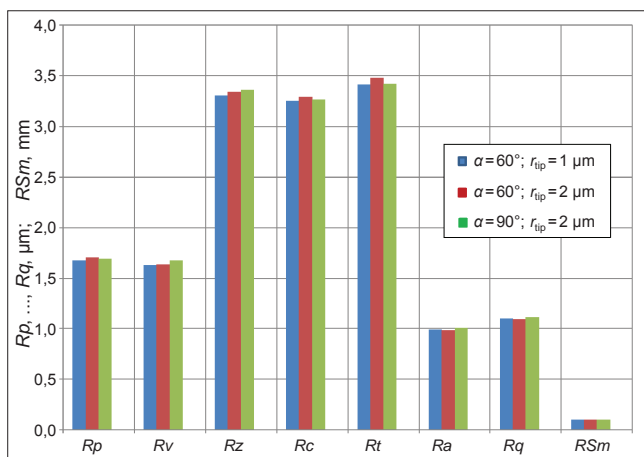
Rys. 5. Wyznaczenie promienia ostrza odwzorowującego nr 2

Parametry, przy których przeprowadzono pomiary wzorca, były następujące:

- siła nacisku ostrza:  $F < 1 \text{ mN}$ ,
- prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego:  $v = 0,1 \text{ mm/s}$ ,
- gęstość próbkowania wzdłuż osi X:  $\Delta x = 0,125 \mu\text{m}$ .

Każde z ostrzy poddano serii 10 pomiarów. Uzyskane wartości średnich parametrów chropowatości dla poszczególnych ostrzy odwzorowujących przedstawiono na rys. 6 i w tabl. II.

Biorąc pod uwagę geometrię profilu o długości fali  $\lambda_2 = 4 \mu\text{m}$  (promień profilu wyznaczony na podstawie wyniku pomiaru na mikroskopie sił atomowych wynosi  $r = 4,92 \mu\text{m}$ ), ostrza odwzorowujące wykorzystane do pomiarów nie powinny stanowić filtra mechanicznego profilu ze względu na ich geometrię ( $r_{tip} = 1$  i  $2 \mu\text{m}$ ). Rozrzut wyników dla poszczególnych ostrzy odwzorowujących należy traktować raczej jako brak precyzji pomiarów w warunkach odtwarzalności. Oprócz geometrii ostrza odwzorowującego na zmienione warunki pomiaru składa się rozrzut parametrów chropowatości w zależności od miejsca pomiaru na wzorcu.



Rys. 6. Wartości parametrów chropowatości

TABLICA II. Wartości parametrów chropowatości uzyskane dla poszczególnych ostrzy odwzorowujących

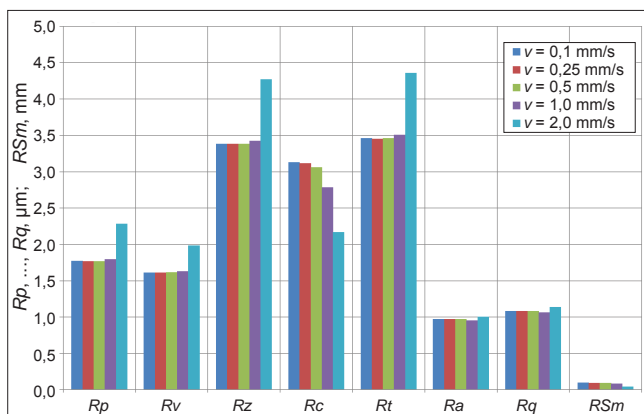
	$\alpha = 60^\circ$ $r_{\text{tip}} = 1 \mu\text{m}$	$\alpha = 60^\circ$ $r_{\text{tip}} = 2 \mu\text{m}$	$\alpha = 90^\circ$ $r_{\text{tip}} = 2 \mu\text{m}$	Wartość średnia	Współczynnik zmienności, %
$R_p, \mu\text{m}$	1,679	1,704	1,688	1,690	0,7
$R_v, \mu\text{m}$	1,628	1,636	1,678	1,647	1,6
$R_z, \mu\text{m}$	3,307	3,340	3,365	3,338	0,9
$R_c, \mu\text{m}$	3,256	3,294	3,269	3,273	0,6
$R_t, \mu\text{m}$	3,413	3,477	3,425	3,439	1,0
$R_a, \mu\text{m}$	0,991	0,986	1,004	0,994	0,9
$R_q, \mu\text{m}$	1,101	1,095	1,113	1,103	0,8
$R_{Sm}, \text{mm}$	0,10151	0,10150	0,10160	0,10154	0,05

### Wpływ prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego

Pomiary mające na celu ustalenie, jaki wpływ na uzyskiwane parametry chropowatości i kształt odwzorowanego profilu ma prędkość ruchu ostrza odwzorowującego, wykonano przy następujących ustawieniach:

- ostrze odwzorowujące nr 2:  $\alpha = 60^\circ$ ;  $r_{\text{tip}} = 2 \mu\text{m}$ ;
- siła nacisku ostrza:  $F < 1 \text{ mN}$ ;
- gęstość próbkowania wzdłuż osi X:  $\Delta x = 0,125 \mu\text{m}$ ;
- prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego:  $v = 0,1 \text{ mm/s}$ ,  $v = 0,25 \text{ mm/s}$ ,  $v = 0,5 \text{ mm/s}$ ,  $v = 1 \text{ mm/s}$ ,  $v = 2 \text{ mm/s}$ .

Dla każdej wartości prędkości przeprowadzono serię 10 pomiarów. Uzyskane wartości średnich parametrów chropowatości przedstawiono na rys. 7 oraz w tabl. III, a wpływ prędkości na kształt odwzorowanego profilu – na rys. 8.

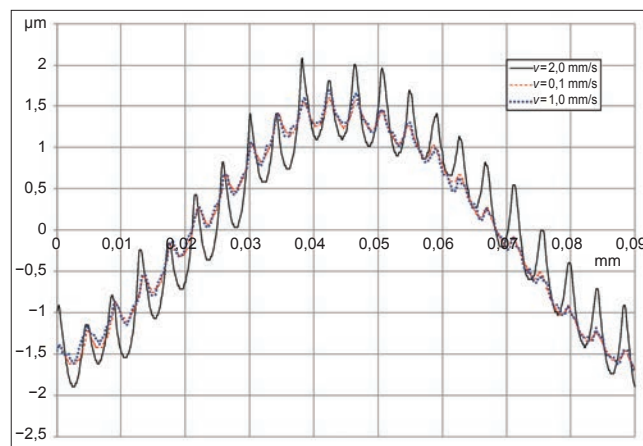


Rys. 7. Wartości parametrów chropowatości w zależności od prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego

TABLICA III. Wartości parametrów chropowatości uzyskane dla poszczególnych prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego

Prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego $v$ , mm/s	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0
$R_p, \mu\text{m}$	1,773	1,770	1,767	1,797	2,284
$R_v, \mu\text{m}$	1,613	1,614	1,615	1,630	1,983
$R_z, \mu\text{m}$	3,386	3,383	3,383	3,426	4,267
$R_c, \mu\text{m}$	3,130	3,119	3,064	2,784	2,168
$R_t, \mu\text{m}$	3,464	3,452	3,464	3,507	4,358
$R_a, \mu\text{m}$	0,972	0,971	0,970	0,954	1,002
$R_q, \mu\text{m}$	1,084	1,083	1,082	1,065	1,135
$R_{Sm}, \text{mm}$	0,094	0,094	0,091	0,080	0,038

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że zmiana prędkości ruchu ostrza w zakresie od  $v = 0,1 \text{ mm/s}$  do  $v = 1 \text{ mm/s}$  ma niewielki wpływ na wartości uzyskiwanych parametrów chropowatości oraz zmianę kształtu odwzorowanego kształtu fali o długości  $\lambda_2 = 4 \mu\text{m}$ . Wyniki dla prędkości ruchu ostrza  $v = 2 \text{ mm/s}$  charakteryzują się zdecydowanym wzrostem wartości parametrów  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$  i  $R_t$  – odpowiednio o: 28,6%, 22,6%, 25,7% i 25,5% w stosunku do wartości średnich obliczonych dla prędkości od  $v = 0,1 \text{ mm/s}$  do  $v = 1 \text{ mm/s}$  – oraz zdecydowanym spadkiem wartości parametru  $R_{Sm}$  – o 57,3%. Nastąpił również umiarkowany wzrost parametrów  $R_a$  i  $R_q$  – odpowiednio o 3,7% i 5,3%. Wzrost parametrów amplitudowych dla prędkości  $v = 2 \text{ mm/s}$  jest związany z wystąpieniem zjawiska „lotu” ostrza, o czym świadczy charakter profilu (rys. 8) [8].



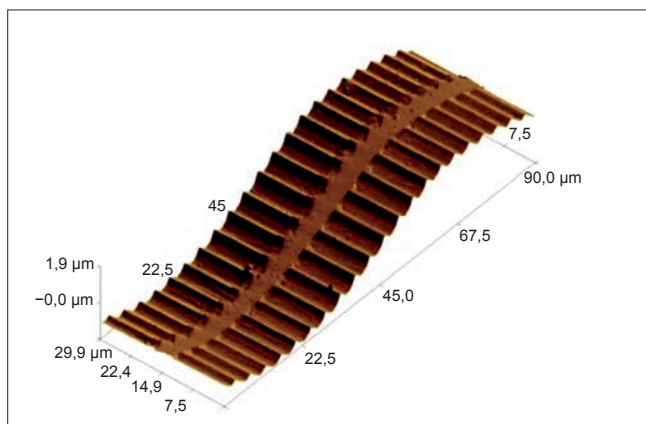
Rys. 8. Zmiana kształtu profilu w zależności od prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego

### Wpływ siły nacisku ostrza odwzorowującego

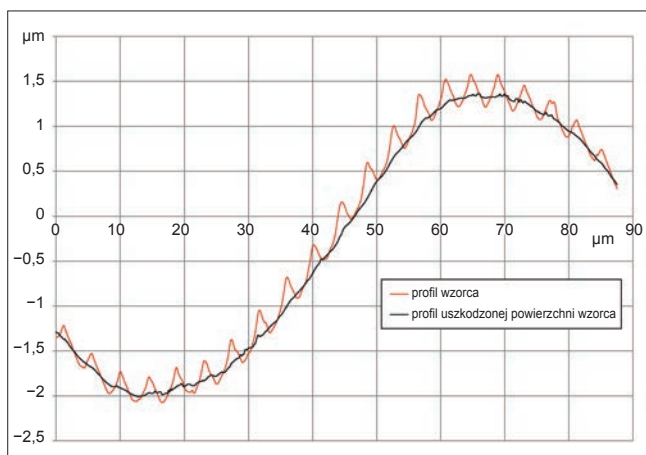
W celu ustalenia skutków, jakie powoduje zwiększony nacisk pomiarowy, wzorec zmierzono profilometrem, którego nacisk pomiarowy kilkakrotnie przekraczał wartość nominalną. Na skutek oddziaływania zwiększonej siły ostrza na wzorec występują odkształcenia plastyczne materiału, powodujące uszkodzenia jego powierzchni.

Efekt oddziaływania zwiększonych nacisków jednostkowych na powierzchnię wzorca przedstawiono na jego obrazie izometrycznym, wykonanym na mikroskopie sił atomowych (rys. 9). Zbyt duże naciski jednostkowe wywierane przez ostrze odwzorowujące powodują całkowite zniszczenie nierówności o długości fali  $\lambda_2 = 4 \mu\text{m}$  i amplitudzie  $A_2 = 0,15 \mu\text{m}$ . Przeprowadzenie pomiarów w takich warunkach powoduje, że otrzymuje się fałszywy obraz

stereometrii powierzchni i błędne wartości parametrów chropowatości. Na rys. 10 porównano dwa wyodrębnione profile: jeden z powierzchni wzorca bez odkształceń plastycznych, a drugi – z obszaru, gdzie wystąpiło uszkodzenie powierzchni.

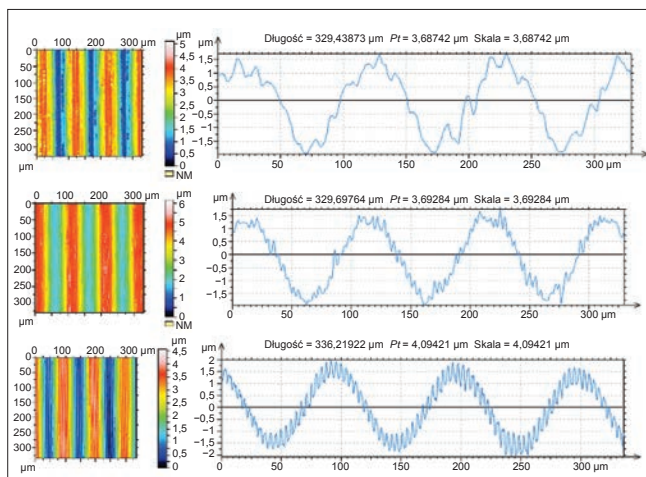


Rys. 9. Obraz izometryczny uszkodzonej powierzchni wzorca



Rys. 10. Wyodrębnione profile wzorca bez odkształceń plastycznych oraz z odkształceniami plastycznymi

Problem trwałej deformacji powierzchni wywołanej przez ostrze odwzorowujące profilometru stykowego dotyczy zwłaszcza pomiaru elementów z materiałów o niższej twardości. W takim przypadku jedynym rozwiązaniem jest zastosowanie bezkontaktowej metody pomiaru struktury geometrycznej powierzchni.



Rys. 11. Wyniki pomiaru wzorca za pomocą przyrządu optycznego z obiektywami  $\times 10$ ,  $\times 20$  i  $\times 50$

Z pomiarami optycznymi wiążą się liczne problemy dotyczące: uzależnienia próbkowania poziomego od zastosowanego obiektywu, występowania punktów niezmiernych w przypadku zbroczy o dużym nachyleniu lub rozpraszania światła przez materiał mierzzonego elementu.

Wpływ zastosowanego obiektywu i tym samym rozdzielczości poziomej na dokładność odwzorowania struktury geometrycznej wzorca z wykorzystaniem przyrządu optycznego zobrazowano na rys. 11. Pomiary wykonano przyrządem optycznym wykorzystującym metodę koherentnej interferometrii korelacyjnej, wyposażonym w obiektywy o powiększeniu  $\times 10$ ,  $\times 20$  i  $\times 50$ . Obiektywy te zapewniają rozdzielczość poziomą odpowiednio:  $1,65 \mu\text{m} \times 1,65 \mu\text{m}$ ;  $0,88 \mu\text{m} \times 0,88 \mu\text{m}$  oraz  $0,33 \mu\text{m} \times 0,33 \mu\text{m}$ . Pełne odwzorowanie powierzchni wzorca uzyskano w przypadku obiektywu  $\times 50$ .

## Podsumowanie

Pomiary precyzyj w warunkach powtarzalności wykazały, że największym rozrzutem charakteryzują się wyniki dotyczące parametru  $R_p$ . Zaobserwowano tendencję, że dla kolejnych pomiarów otrzymywano mniejsze wartości tego parametru oraz związanych z nim parametrów  $R_z$ ,  $R_c$  i  $R_t$ , co może być spowodowane odkształceniami plastycznymi profilu na poziomie kilkudziesięciu nanometrów.

Zauważono znaczącą zmianę parametrów amplitudowych w przypadku zwiększenia prędkości pomiaru powyżej  $1 \text{ mm/s}$ . Ta zmiana jest spowodowana utratą styku pomiędzy ostrzem odwzorowującym a mierzoną powierzchnią wzorca.

Dla powierzchni zawierających składowe o amplitudzie na poziomie kilkuset nanometrów ważne jest, aby siła nacisku ostrza nie przekraczała wartości dopuszczalnych, ponieważ w przeciwnym razie wystąpią odkształcenia plastyczne materiału próbki, w wyniku czego otrzymane wartości parametrów chropowatości nie będą wiarygodne.

**Badania zostały zrealizowane w ramach projektu PBS2 finansowanego z NCBR (Nr PBS2/A6/20/2013) „Badania i ocena wiarygodności nowoczesnych metod pomiaru topografii powierzchni w skali mikro i nano”.**

## LITERATURA

- Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość”. Warszawa: WNT, 2008.
- Adamczak S., Miller T., Świderski J., Wieczorowski M., Majchrowski R., Łętocha A. “A concept of the project research and evaluation of reliability of modern methods of surface topography measurements in micro and nano scale”. Bielsko-Biała, 2015.
- Pawlus P., Wieczorowski M., Mathia T. “The errors of stylus methods in surface topography measurements”. Szczecin: ZAPOL, 2014.
- Wieczorowski M. „Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni”. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2009.
- Miller T. „Źródła niewiarygodności pomiarów topografii powierzchni”. *Mechanik*. 11 (2016): s. 1722–1723.
- Miller T., Adamczak S., Świderski 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 (dostęp: 17.02.2017 r.).
- EN ISO 25178-70:2014 Geometrical product specification (GPS) – Surface texture – Part 70: Material Measures.
- Pawlus P., Śmieszek M. “The influence of stylus flight on change of surface topography parameters”. *Precision Engineering*. 29 (2005): s. 272–280.