

# Komputerowo wspomagane pomiary parametrów geometrycznych strefy deformacji w procesie nagniatania

Computer-aided measurement of geometric parameters of the deformation zone in the burnishing process

ANDRZEJ ZABORSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.8-9.64>

Omówiono możliwość zastosowania techniki komputerowej do określenia przestrzennego kształtu strefy kontaktu narzędzia nagniatającego z obrabianym materiałem. Przedstawiono potencjalne wykorzystanie zintegrowanego stanowiska pomiarowego do analizy zmian kształtu nagniatanych powierzchni walcowych na podstawie pomiaru stereometrii strefy deformacji wykonanego za pomocą profilografometru (New Form Talysurf 2D/3D 120 firmy Taylor Hobson) oraz na podstawie kolejnych pomiarów okrągłości (Talyrond 365 firmy Taylor Hobson).

**SŁOWA KLUCZOWE:** pomiary stereometrii powierzchni, obróbka nagniataniem

*The paper discusses the possibility of using computer technology for determining the spatial shape and stereometry of the burnishing tool contact zone with the machined material. The potential for use of the integrated measurement stand for the comprehensive analysis and virtual visualization of variations in the shape of burnished cylindrical surfaces based on stereometry measurement using a profilographometer (New Form Talysurf 2D/3D 120 by Taylor Hobson) and subsequent roundness measurements (Talyrond 365 by Taylor Hobson) has been presented.*

**KEYWORDS:** surface stereometry measurements, burnishing working

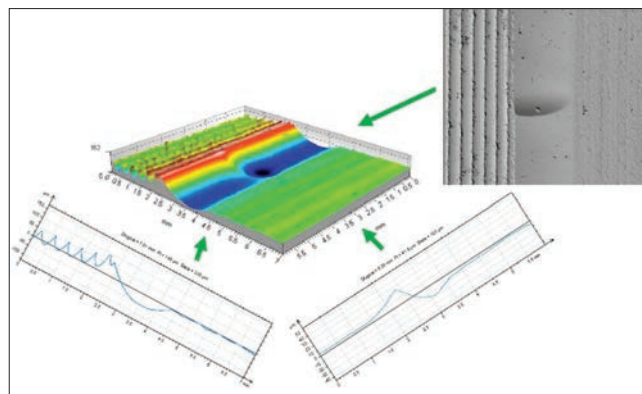
## Wprowadzenie

Obróbka powierzchniowa nagniataniem polega na wykorzystaniu miejscowego odkształcenia plastycznego w warstwie wierzchniej przedmiotu na skutek stykowego współdziałania narzędzia (w kształcie kuli, krążka, wałka itp.) z obrabianą powierzchnią [3, 6]. Podczas obróbki nagniataniem przy dostatecznie dużych naciskach płynięcie materiału może doprowadzić do tworzenia się na obrabianej powierzchni fali materiału spiętrzonego przed elementem nagniatającym – zarówno w kierunku osiowym, jak i obwodowym. Strefa formowanej nierówności ma skomplikowany, trójwymiarowy kształt [4–6]. W artykule przedstawiono opis zmian zachodzących w przestrzennym kształcie stref deformacji przy różnych parametrach technologicznych nagniatania.

## Badania stereometrii strefy kontaktu

Pomiary stereometrii strefy kontaktu wykonano na profilografometrze New Form Talysurf 2D/3D 120 firmy Taylor Hobson z oprogramowaniem Ultra Surface 5.16 i Taly-Map Platinum 5.1.1 do kompleksowych pomiarów parametrów chropowatości i stereometrii warstwy wierzchniej w układzie 2D i 3D z rozdzielczością głowicy pomiarowej od 3,2 nm [1, 2]. Oprogramowanie umożliwia wykonanie

pomiarów niezbędnych do trójwymiarowego odtworzenia kształtu strefy formowania nierówności, powstałej w trakcie kontaktu narzędzia z obrabianym materiałem (stalą C55). Podczas nagniatania nierówności powierzchni (pozostałe po obróbce poprzedzającej) są trwale odkształcane, a na obrabianej powierzchni powstaje nowa struktura nierówności, uwarunkowana kinematyką nagniatania – o odstępach między wierzchołkami nierówności zbliżonych do wartości posuwu nagniatania [7, 8]. Przed narzędziem przesuwa się fala zdeformowanego materiału (rys. 1).



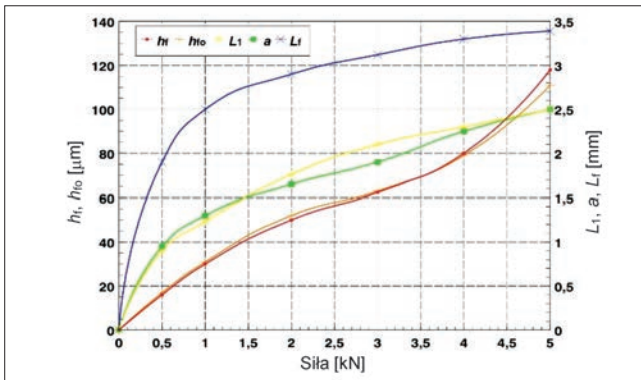
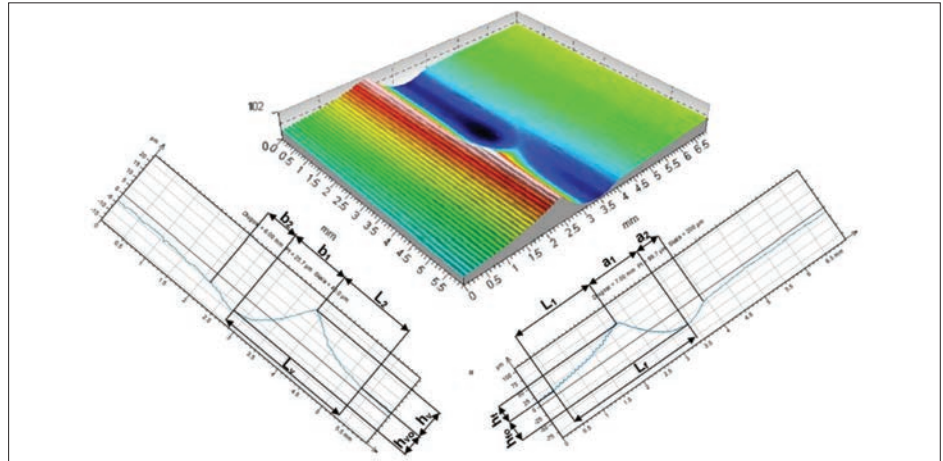
Rys. 1. Stereometryczny obraz strefy kontaktu narzędzia nagniatającego z powierzchnią nagniataną kulką  $R = 5$  mm; siła nagniatania  $F = 2,75$  kN, posuw  $f_{\text{ocz}} = 0,410$  mm/obr, posuw  $f_{\text{nagn}} = 0,102$  mm/obr (obszar po toczeniu:  $S_z = 91,7$   $\mu\text{m}$ ,  $S_a = 18,9$   $\mu\text{m}$ ; obszar po nagniataniu  $S_z = 21,2$   $\mu\text{m}$ ,  $S_a = 2,4$   $\mu\text{m}$ )

Najbardziej istotna dla opisu procesu nagniatania jest analiza zjawisk zachodzących podczas formowania nierówności w miejscu chwilowego styku narzędzia z materiałem. Strefa deformacji ma skomplikowany, trójwymiarowy kształt z charakterystycznymi falami materiału, biegnącymi w kierunku osiowym i obwodowym (w kierunku prostopadłym i równoległym do kierunku ruchu głównego obróbki). Na powierzchni materiału tworzą się dwie fale spiętrzonego, zdeformowanego materiału – jedna w kierunku obwodowym, a druga w kierunku osiowym. Nierówności po obróbce poprzedzającej zostają trwale odkształcone.

Przedstawiony na rys. 1 i 2 rzeczywisty kształt analizowanego obszaru stanowi wycinek bocznej powierzchni nagniatanego walca. Na rysunkach pokazano też przekroje strefy deformacji wyznaczone w kierunkach równoległym i prostopadłym do kierunku posuwu. Trójwymiarowy obraz zarejestrowanej strefy deformacji (po wstępnej obróbce cyfrowej polegającej na jego wypoziomowaniu i odrzuceniu zbędnych fragmentów badanego obszaru) umożliwia przeprowadzenie pełnej, przestrzennej analizy parametrów geometrycznych przyjętych do opisu otrzymanych obrazów strefy deformacji (rys. 2).

\* Dr hab. inż. Andrzej Zaborski, prof. PCz, zaborski@itm.pcz.czeszt.pl, <https://orcid.org/0000-0003-1738-5034> – Politechnika Częstochowska, Instytut Technologii Mechanicznych, Częstochowa, Polska

Rys. 2. Parametry geometrii ogniska odkształcenia



Rys. 3. Przykładowy przebieg wpływu siły nagniatania na zmianę niektórych parametrów ogniska odkształcenia w trakcie nagniatania kulką o promieniu  $R = 5 \text{ mm}$  ( $f = 0,102 \text{ mm/obr}$ ), wyznaczonych w przekroju osiowym ( $h_f, h_{f0}, L_1, a, L_f$ )

W ramach badań mierzono parametry geometryczne opisujące ognisko deformacji w przekroju osiowym (w płaszczyźnie posuwu:  $h_f, h_{f0}, L_1, a = a_1 + a_2, L_f$ ) oraz w płaszczyźnie obwodowej (płaszczyźnie ruchu głównego:  $h_v, h_{v0}, L_2, b = b_1 + b_2, L_v$ ). Analiza parametrów w przekroju obwodowym ma znaczenie uzupełniające. Pomiar wskazuje, że w trakcie nagniatania naporowego tocznego za pomocą kulki największy wpływ na wzrost wymiarów i głębokości formującej się strefy deformacji miała przede wszystkim wartość siły nacisku narzędzia (rys. 3).

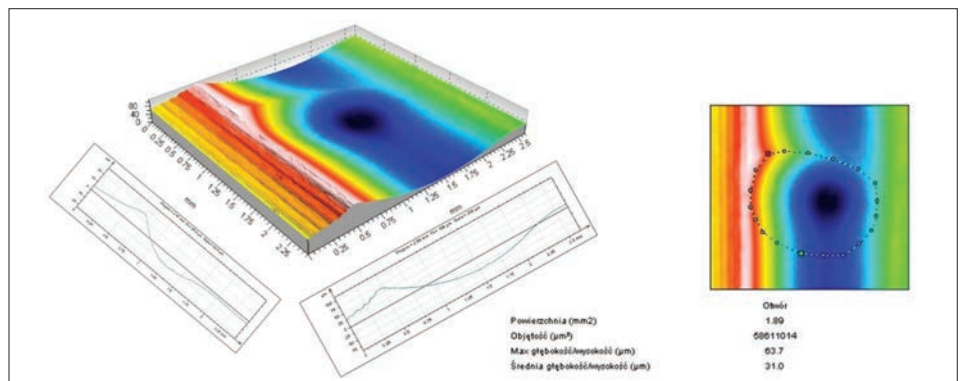
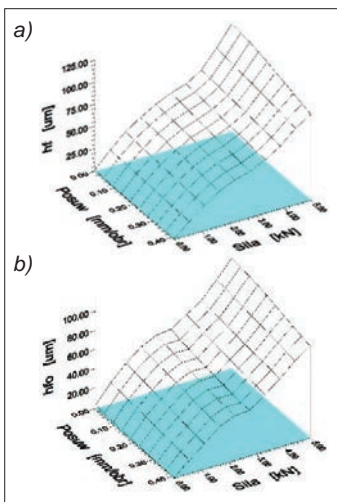
Przebieg zmian parametrów geometrycznych zależał również od promienia narzędzia nagniatającego. Dla powierzchni nagniatanych narzędziami o większych promieniach przejście od ogniska odkształcenia I rodzaju (charakterystycznego dla nieznacznych nacisków jed-

nostkowych) do ogniska odkształcenia II i III rodzaju wymaga zastosowania wyraźnie wyższych sił nagniatania. Wpływ wzrastającego posuwu nagniatania nie jest tak jednoznaczny. Prowadzone analizy pozwoliły na wyznaczenie wpływu zmienności najistotniejszych parametrów technologicznych (posuwu, siły nagniatania) na zmiany parametrów geometrycznych strefy odkształcenia przy nagniataniu naporowym kulką (rys. 4).

Analogiczne analizy wykonano dla procesów nagniatania naporowego tocznego krążkiem. W tym przypadku o wymiarach utworzonej strefy deformacji decydowała przede wszystkim wartość siły nagniatania [6, 7].

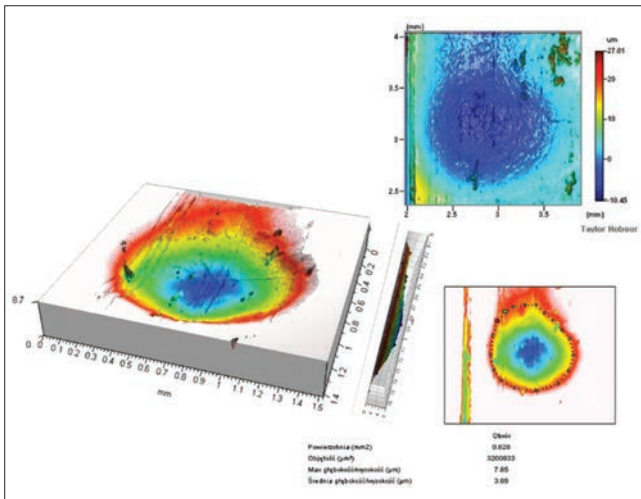
Z punktu widzenia prowadzonych badań istotne jest zwłaszcza wyznaczenie dokładnej wielkości pola powierzchni kontaktu narzędzia z materiałem (rys. 5). Dotychczasowe analizy wskazują, że w przypadku elementów nagniatających (kulki i krążka) rzeczywista powierzchnia kontaktu nie stanowi elipsy, jak najczęściej się przyjmuje w teoretycznych analizach procesu. Wyznaczenie rzeczywistej powierzchni kontaktu elementu nagniatającego z przedmiotem obrabianym było do tej pory bardzo utrudnione, jednak obecnie rozwiązanie tego problemu staje się możliwe, ponieważ zastosowanie najnowszej techniki komputerowej pozwala na precyzyjne wyznaczenie parametrów strefy kontaktu.

Dzięki cyfrowej obróbce otrzymanego obrazu strefy deformacji można też wyodrębnić z niego dowolny fragment. Można np. cyfrowo wyciąć jedynie obszar rzeczywistego kontaktu narzędzia nagniatającego z materiałem obrabianym oraz cyfrowo odrzucić materiał leżący poza strefą rzeczywistego kontaktu. To ułatwia analizę zjawisk zachodzących we właściwej strefie kontaktu (rys. 6).



Rys. 5. Przykładowa analiza obszaru kontaktu narzędzia z materiałem nagniatanym – nagniatanie kulką ( $R = 5 \text{ mm}$ ,  $F = 2,75 \text{ kN}$ ,  $f = 0,068 \text{ mm/obr}$ )

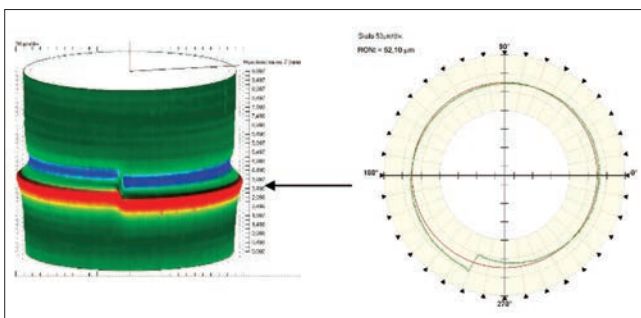
Rys. 4. Wymiary osiowej i obwodowej fali materiału w zależności od parametrów procesu nagniatania kulką ( $R = 5 \text{ mm}$ ): a)  $h_f$ , b)  $h_v$



Rys. 6. Analiza obrobionego cyfrowo obszaru kontaktu narzędzia z materiałem nagniatanym – nagniatanie krążkiem  $R_k = 10$  mm,  $F = 2,5$  kN

### Analiza przestrzenna kształtu obszaru deformacji

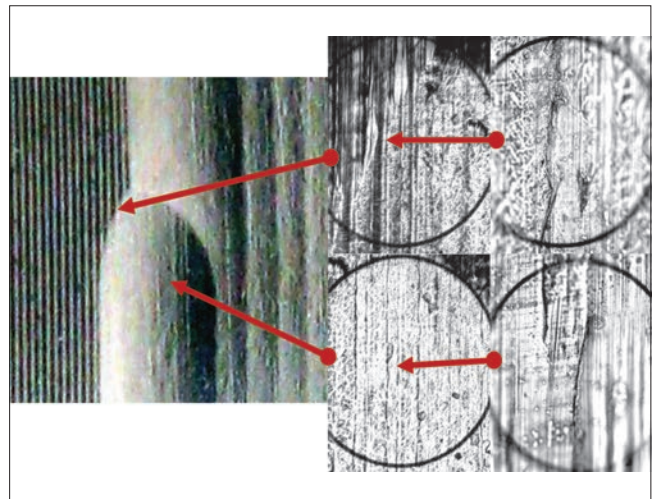
Analizę przestrzennego kształtu obszaru deformacji wykonano na stanowisku pomiarowym Talyrond 365 z oprogramowaniem Ultra Roundness 5.17. Zrealizowanie szeregu zarysów okrągłości w równoległych, przesuniętych względem siebie o zadany krok płaszczyznach pomiarowych pozwala na odtworzenie trójwymiarowego kształtu strefy nagniatania dla pełnego obwodu analizowanych powierzchni walcowych (rys. 7).



Rys. 7. Trójwymiarowy obraz strefy nagniatania powierzchni nagniatanej tocznie kulką ( $R = 5$  mm,  $F = 2,75$  kN,  $f = 0,41$  mm/obr)

### Analiza stereometrii strefy kontaktu z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego

Badanie stereometrii strefy deformacji uzupełniono analizą fotografii mikroskopowych, obrazujących zmiany zachodzące na powierzchni obrabianego materiału (rys. 8). Wykorzystano możliwości laboratoryjnego mikroskopu cyfrowego VMHT MOT. Ukształtowana w wyniku toczenia charakterystyczna dla tego procesu obróbki ukierunkowana struktura geometryczna, uzyskana na skutek przejścia narzędzia skrawającego, zostaje zastąpiona strukturą geometryczną ukształtowaną w wyniku odkształcenia plastycznego, wywołanego przejściem narzędzia nagniatającego. Widoczna jest bardzo wyraźna granica materiału w strefie zapoczątkowania obróbki (granica strefy deformacji). Jest to obszar silnego odkształcenia plastycznego, rozpoczynającego proces formowania tej strefy. W obszarze strefy deformacji, znajdującym się pod narzędziem nagniatającym, ujawnione zostają ślady deformacji odkształconego plastycznie materiału, o odstępach wynikających z posuwu obróbki poprzedzającej (toczenia).



Rys. 8. Analiza strefy nagniatania krążkiem ( $R_k = 5$  mm,  $F = 2,75$  kN,  $f = 0,41$  mm/obr) – powiększenie 30×, 100× i 500×

### Podsumowanie

Jak wykazały zrealizowane badania, na parametry geometryczne ogniska odkształcenia mają wpływ warunki związane z obrabianym materiałem i parametrami chropowatości powierzchni przed obróbką, a także kształt narzędzia nagniatającego oraz parametry technologiczne przeprowadzonego procesu obróbki nagniataniem.

Można stwierdzić, że z punktu widzenia ostatecznych efektów analizowanego procesu decydujące znaczenie ma płynięcie materiału w kierunku osiowym, determinujące ostateczną stereometrię uzyskaną w wyniku obróbki.

Ponadto wykazano, że parametrami najlepiej opisującymi charakter zachodzących zmian geometrii strefy deformacji są wyznaczona w płaszczyźnie przekroju osiowego wysokość fali deformacji ( $h_f$ ) oraz wielkość zagłębienia narzędzia względem powierzchni nieobrobionego materiału ( $h_{f0}$ ).

W toku analiz możliwe jest precyzyjne wyznaczenie pola kontaktu narzędzia nagniatającego z obrabianym materiałem i tym samym wyznaczenie rzeczywistych naprężeń kontaktowych w strefie styku.

### LITERATURA

- [1] Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni, zarysy kształtu, falistości i chropowatości”. Warszawa: WNT, 2008.
- [2] Oczko K, Liubimov V. „Struktura geometryczna powierzchni”. Rzeszów: Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, 2003.
- [3] Przybylski W. „Technologia obróbki nagniataniem”. Warszawa: WNT, 1987.
- [4] Zaborski A. „Komputerowa analiza procesu formowania nierówności powierzchni uzyskanych na drodze obróbki nagniataniem”. *Mechanik*. 7 (2011): 622 (pełny tekst na CD).
- [5] Zaborski A. „Komputerowa analiza procesu formowania strefy deformacji w trakcie nagniatania”. *Mechanik*. 7 (2012): 607 (pełny tekst na CD).
- [6] Zaborski A. „Analiza formowania strefy deformacji w procesie nagniatania”. Seria Monografie nr 260. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2013.
- [7] Zaborski A. „Stereometryczne pomiary parametrów geometrycznych strefy deformacji w procesie nagniatania”. *Mechanik*. 7 (2013): 551–555.
- [8] Zaborski A. „Stereometryczne pomiary parametrów geometrycznych strefy deformacji w procesie nagniatania”. *Materiały VI Kongresu Metrologii*. Kielce–Sandomierz, 19–22 czerwca 2013 r., s. 289–290. ■