



# Gładkościowe nagniatanie ślizgowe stopów metali i kompozytów na osnowie metalowej

## Slide finishing burnishing of metal alloys and metal matrix composites

KAZIMIERZ CZECHOWSKI  
DANIEL TOBOŁA\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.70>

Przedstawiono wyniki badań prowadzonych w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW) dotyczących możliwości nagniatania ślizgowego stopów metali i kompozytów na osnowie metalowej. Zamieszczone wyniki obejmują m.in. analizę struktury geometrycznej powierzchni oraz mikrostruktury i zmian mikrotwardości warstwy wierzchniej wybranych materiałów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** nagniatanie ślizgowe, struktura geometryczna powierzchni, stopy metali, kompozyty na osnowie metalowej

*Results of the research performed at the Institute of Advanced Manufacturing Technology (IAMT) regarding the possibility of slide burnishing of metal alloys and metal matrix composites are presented. Results include among others, analysis of surface geometry, microstructure and microhardness changes of the surface layer for selected materials.*

**KEYWORDS:** slide burnishing, surface geometrical structure, metal alloys, metal matrix composites

Do głównych cech jakości technologicznej części maszyn należy odporność na zużywanie się, którą najczęściej determinują właściwości warstwy wierzchniej (WW), w tym m.in.: struktura geometryczna powierzchni (SGP), rozkład twardości i stan naprężeń własnych. Efektywną metodą kształtowania korzystnych właściwości WW jest nagniatanie, umożliwiające zwiększenie odporności części maszyn na zużycie ścierne i polepszenie ich wytrzymałości zmęczeniowej – dotyczy to zwłaszcza elementów współpracujących w połączeniach ruchomych i podlegających obciążeniom powierzchniowym.

W porównaniu z innymi metodami obróbki wykończeniowej, takimi jak szlifowanie, honowanie, docieranie czy polerowanie, obróbka nagniataniem ma wiele zalet natury technicznej i ekonomicznej. Pozwala uzyskać powierzchnie o bardzo małej chropowatości (nawet o  $Ra = 0,05 \pm 0,10 \mu\text{m}$ ), dużych promieniach zaokrągleń wierzchołków i wgłębień profilu (dużo większych niż po szlifowaniu) oraz dużym udziale materiałowym profilu nierówności, a także wytworzyć w WW zgniot (uzyskać wzrost twardości, której rozkład ma małe gradienty) i naprężenia ściskające z zachowaniem ciągłości wewnętrznych włókien metalu [1, 2].

Nagniatanie ślizgowe, zwłaszcza za pomocą diamentu (naturalnego lub polikrystalicznego), znajduje zastosowanie

w obróbce wykończeniowej zarówno elementów o większej twardości (np. z powierzchniami hartowanymi oraz twardymi powłokami dyfuzyjnymi i galwanicznymi), jak i elementów o małej lub średniej twardości, gdy wymagana jest nieduża siła zgniotu (np. podczas nagniatania elementów cienkościennych). Ważną zaletą nagniatania ślizgowego jest możliwość zastosowania go do obróbki wykończeniowej elementów o złożonych kształtach lub z miejscami o utrudnionym dostępie narzędzia, ponieważ końcówka robocza do nagniatania ślizgowego ma prostą konstrukcję i część roboczą o niewielkich wymiarach [3, 4].

### Metodyka badań

Przedstawione badania dotyczą:

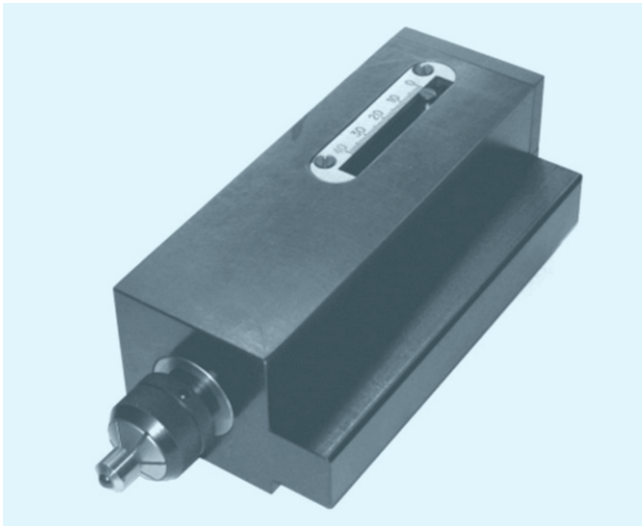
- stopu aluminium EN AW-AlCu4MgSi(A), w postaci wałków o średnicy ok.  $\varnothing 75 \text{ mm}$ , o składzie chemicznym [5]: 3,8÷4,8% Cu; 0,4÷1,1 Mg; 0,4÷1,0 Mn; reszta – Al;
- dwóch rodzajów kompozytów, w postaci wałków o średnicy  $\varnothing 35 \text{ mm}$ , na osnowie ze stopów aluminium o składzie chemicznym [6]:
  - A6061 + 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (cząstki o wielkości  $17 \mu\text{m}$ ); skład chemiczny osnowy: 0,4÷0,8% Si; 0,7% Fe; 0,15÷0,4% Cu; 0,8÷1,2% Mg; 0,15% Mn; reszta – Al;
  - A390 + 2,5% SiC (cząstki o średnicy  $10 \mu\text{m}$ ); skład chemiczny osnowy: 4÷5% Cu; 0,45÷0,65% Mg; 16÷18% Si; 0,5% Fe; 0,1% Mn; reszta – Al.

Proces nagniatania ślizgowego realizowano za pomocą zaprojektowanego i wykonanego w IZTW nagniataka z elementem roboczym z polikrystalicznego diamentu z ceramiczną fazą wiążącą  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ , w kształcie czaszy kulistej o promieniu  $3,5 \text{ mm}$  (rys. 1) [7]. Obróbkę toczeniem i nagniataniem przeprowadzano na centrum tokarsko-frezarskim typu NL2000SY firmy Mori Seiki. W procesie nagniatania podawano niewielkie ilości oleju Hysol R firmy Castrol.

Parametry nagniatania były następujące:

- w przypadku stopu aluminium: posuwy  $f = 0,04; 0,07$  i  $0,10 \text{ mm/obr}$ ; prędkość  $v = 40 \text{ m/min}$ ; siły  $F = 50; 80; 120; 160$  i  $200 \text{ N}$ ;
- w przypadku kompozytu na osnowie ze stopu aluminium A6061 z cząstkami twardymi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : posuwy  $f = 0,02; 0,05$  i  $0,07 \text{ mm/obr}$ ; prędkość  $v = 30 \text{ m/min}$ ; siły  $F = 50$  i  $70 \text{ N}$ ;
- w przypadku kompozytu na osnowie ze stopu aluminium A390 z cząstkami twardymi SiC: posuwy  $f = 0,02; 0,05$  i  $0,07 \text{ mm/obr}$ ; prędkość  $v = 30 \text{ m/min}$ ; siły  $F = 40; 60$  i  $80 \text{ N}$ .

\* Dr inż. Kazimierz Czechowski (kazimierz.czechowski@ios.krakow.pl), dr inż. Daniel Toboła (daniel.tobola@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania



Rys. 1. Nagniatak ślizgowy z elementem roboczym z kompozytu diamentowego

Przed procesem nagniatania powierzchnie wałków toczono, zapewniając parametr chropowatości powierzchni  $Ra'$  w zakresie  $0,75 \div 1,25 \mu\text{m}$ .

Pomiary 2D parametrów SGP wykonano za pomocą profilometru HOMMEL TESTER T1000. Określano różne parametry chropowatości powierzchni – w artykule przedstawiono parametr  $Ra$ .

Oprócz wielkości zmierzonych bezpośrednio określono również współczynnik zmniejszenia chropowatości  $K_{Ra}$ :

$$K_{Ra} = \frac{Ra'}{Ra}$$

gdzie:  $Ra'$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej przed nagniataniem,  $Ra$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej po nagniataniu.

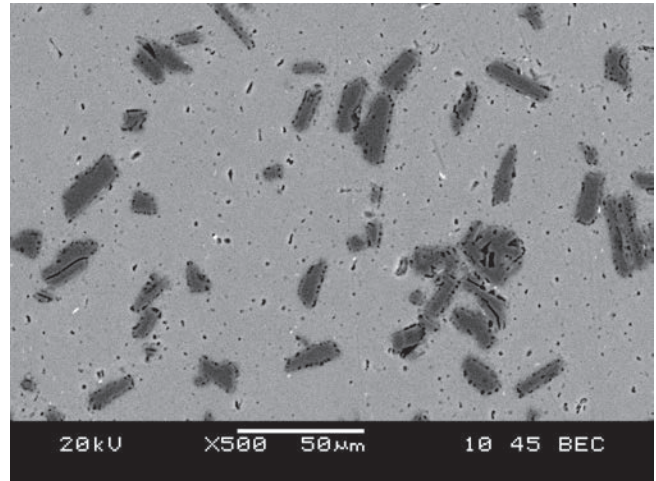
Badania metalograficzne przeprowadzono na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) typu JSM-6460LV firmy JEOL, wyposażonym w zestaw spektrometrów rentgenowskich: EDS, WDS, EBSD. Ponadto wykorzystano jonowe urządzenie Precision Etching Coating System, model 682 PECS, firmy Gatan, do precyzyjnego trawienia i pokrywania powierzchni, z przystawką do kąтового ścieniania próbek.

Pomiary mikrotwardości wykonano sposobem Vickersa na cyfrowym mikrotwardościomierzu FM-7 firmy Future Tech. Corp.

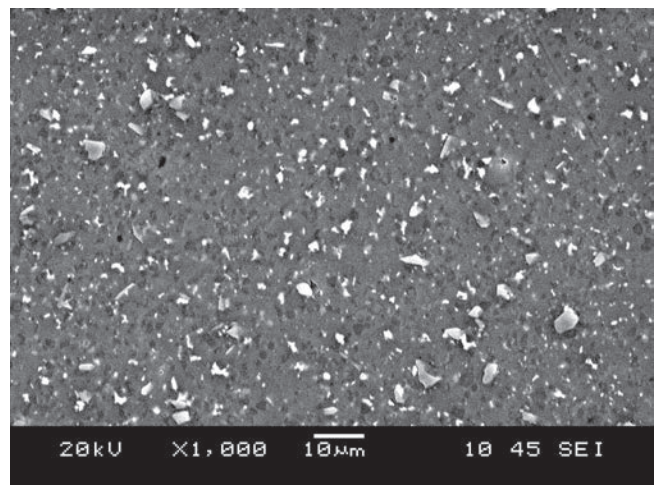
### Wyniki badań

Na rys. 2 i 3 przedstawiono mikrostruktury badanych kompozytów na osnowie metalowej, obserwowane na zglądach poprzecznych. Na rys. 2 widoczne są nieregularne podłużne cząstki fazy zbrojącej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (o średniej wielkości  $17 \mu\text{m}$ ), które miejscami grupują się w skupiska w osnowie kompozytu, stanowiącej stop A6061. Na rys. 3 widoczne są natomiast nieregularne cząstki fazy zbrojącej SiC (o średniej wielkości  $10 \mu\text{m}$ ) w osnowie kompozytu, stanowiącej stop A390.

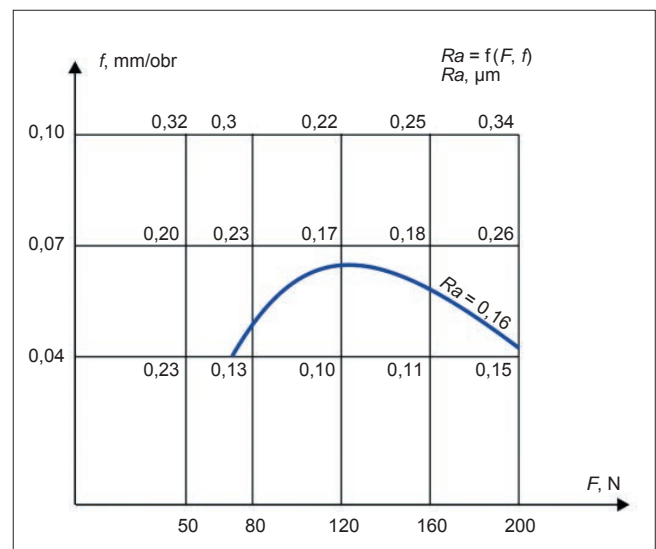
Na rys. 4 pokazano wyniki pomiarów (w postaci wykresu warstwicowego) parametru chropowatości powierzchni  $Ra$  po nagniataniu stopu EN AW-AlCu4MgSi(A) w zależności od posuwu i siły nagniatania. W całym badanym obszarze uzyskano wartości  $Ra = 0,10 \div 0,34 \mu\text{m}$  (parametr wyj-



Rys. 2. Mikrostruktura kompozytu A6061/15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$

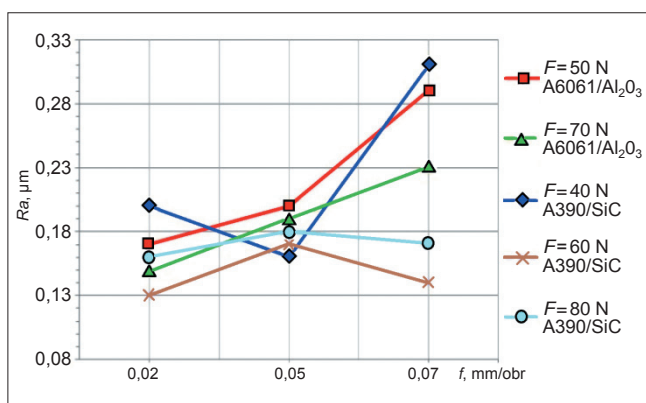


Rys. 3. Mikrostruktura kompozytu A390/2,5% SiC



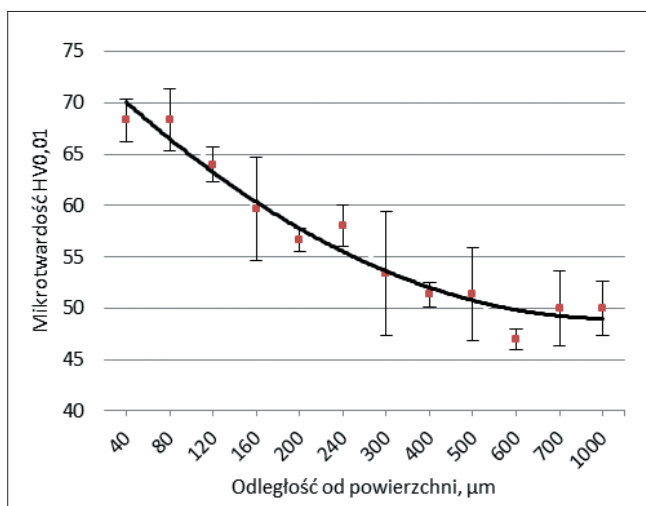
Rys. 4. Zależność parametru chropowatości powierzchni  $Ra$  od posuwu  $f$  i siły nagniatania  $F$  dla stopu EN AW-AlCu4MgSi(A) po nagniataniu ślizgowym z prędkością  $v = 40 \text{ m/min}$  za pomocą nagniataka z końcówką z kompozytu diamentowego o promieniu sfery  $3,5 \text{ mm}$

ściowy  $Ra'$  po obróbce toczeniem wynosił  $0,76 \div 1,08 \mu\text{m}$ ), przy czym wartości najmniejsze otrzymano dla posuwu  $f = 0,04 \text{ mm/obr}$  i siły nagniatania  $F = 120 \text{ N}$ . Wartość wskaźnika  $K_{Ra}$  w tym przypadku przekroczyła 10.

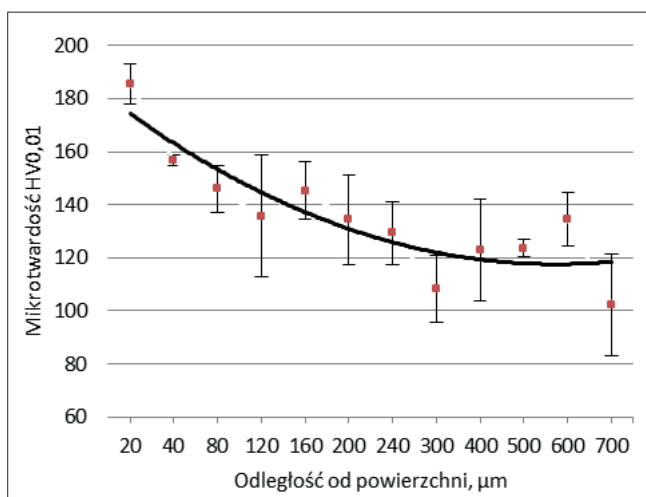


Rys. 5. Zależność parametru chropowości powierzchni  $R_a$  od posuwu  $f$  i siły nagniatania  $F$  dla kompozytów na osnowie ze stopów aluminium po nagniataniu ślizgowym z prędkością  $v = 30$  m/min za pomocą nagniatka z końcówką z kompozytu diamentowego o promieniu sfery 3,5 mm

W efekcie nagniatania kompozytów na osnowie ze stopów aluminium – A6061 + 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz A390 + 2,5% SiC – uzyskano wartości parametru chropowości powierzchni  $R_a = 0,13 \div 0,31$  µm ( $R_a' = 0,85 \div 1,15$  µm), przy czym najmniejsze wartości otrzymano dla posuwu  $f = 0,02$  mm/obr i siły nagniatania  $F = 60 \div 70$  N (rys. 5). W tym przypadku wartość wskaźnika  $K_{Ra}$  wyniosła 6÷8.



Rys. 6. Zmiany mikrotwardości w zależności od odległości od powierzchni dla kompozytu A6061/15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Rys. 7. Zmiany mikrotwardości w zależności od odległości od powierzchni dla kompozytu A390/2,5% SiC

Z kolei na rys. 6 i 7 przedstawiono wyniki pomiarów mikrotwardości na zgładach poprzecznych od krawędzi powierzchni nagniatanej do rdzenia próbki. Wykresy te wskazują na wzrost twardości warstwy wierzchniej obu badanych kompozytów. Po nagniataniu kompozytu A6061 + 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> uzyskano ponad 30-procentowy wzrost twardości warstwy wierzchniej, a po nagniataniu kompozytu A390 + 2,5% SiC ten wzrost był jeszcze większy i wyniósł ok. 50%.

## Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań wskazują na możliwość wykorzystania obróbki nagniataniem ślizgowym do uzyskania znacznej poprawy topografii powierzchni – nie tylko stopów metali, lecz także kompozytów na osnowie metalowej.

Dla stopu EN AW-AlCu4MgSi(A) wartość wskaźnika  $K_{Ra}$  przekraczała 10, natomiast dla kompozytów na osnowie ze stopów aluminium mieściła się w przedziale 6÷8.

Osiągnięcie znacznej poprawy topografii powierzchni kompozytów na osnowie metalowej (stosowanych m.in. w przemyśle motoryzacyjnym i aeronautycznym) jest bardzo ważne z punktu widzenia zastosowań wymagających dobrych właściwości tribologicznych.

Należy także zaznaczyć, że obróbka gładkościowa nagniataniem ślizgowym za pomocą kompozytu diamentowego umożliwiła zwiększenie mikrotwardości WW o ok. 30÷50% w stosunku do rdzenia kompozytów na osnowie metalowej.

W przypadku kompozytów na osnowie metalowej z twardymi cząstkami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lub SiC wpływ nagniatania na wytrzymałość zmęczeniową może być bardzo różny z uwagi na możliwość powstawania przy samej powierzchni pustych przestrzeni w miejsce twardych cząstek (zwłaszcza gdy mają one większe wymiary).

W IZTW określenie wpływu nagniatania na wytrzymałość zmęczeniową elementów z kompozytów jest możliwe dzięki metodzie obrotowego zginania. Wykonuje się tu zarówno badania porównawcze próbek z powierzchnią nagniecioną i uzyskaną w efekcie innych metod obróbki wykończeniowej (dla założonej wartości naprężenia okresowo zmiennego), jak i pełne badania w celu określenia granicznej wartości skrajnego naprężenia okresowo zmiennego, które mogą być powtarzane określoną liczbą razy aż do zniszczenia elementu (z wykreśleniem krzywej Wöhlera – zgodnie z normą ISO 1143:2010(E)).

## LITERATURA

1. Przybylski W. „Technologia obróbki nagniataniem”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1987.
2. Korzyński M. „Nagniatanie ślizgowe”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2007.
3. Korzyński M., Zarski T. “Slide diamond burnishing influence on of surface stereometric structure of an AZ91 alloy”. *Surface & Coatings Technology*. 307 (2016): s. 590–595.
4. Konefal K., Korzyński M., Byczkowska Z., Korzyńska K. “Improved corrosion resistance of stainless steel X6CrNiMoTi17-12-2 by slide diamond burnishing”. *Journal of Materials Processing Technology*. 213 (2013): s. 1997–2004.
5. Polowski W., Bednarski P., Tobała D. „Obróbka wykończeniowa narzędziami diamentowymi do nagniatania ślizgowego”. *Postępy Nauki i Techniki; Advances in Science and Technology*. 6 (2011): s. 40–49.
6. Bednarski P., Biało D., Brostow W., Czechowski K., Polowski W., Rusek P., Tobała D. “Improvement of tribological properties in metal matrix composites (MMCs) by means of slide burnishing”. *Materials Science-Medziagotyra*. 19 (2013): s. 367–372.
7. Jaworska L., Szutkowska M., Morgiel J., Stobierski L., Lis J. “Ti3SiC2 as a bonding phase in diamond composites”. *Journal of Materials Science Letters*. 20 (2001): s. 1783–1786.