

**Stefan Szczepanik<sup>1\*</sup>, Waldemar Polowski<sup>2</sup>, Kazimierz Czechowski<sup>3</sup>, Marek Wojtaszek<sup>4</sup>, Jerzy Krawiarz<sup>5</sup>**

<sup>1, 4, 5</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

e-mail: \*szczepan@metal.agh.edu.pl

<sup>2, 3</sup> Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, ul. Wroclawska 37a, 30-011 Kraków, Poland

Otrzymano (Received) 31.01.2007

## BADANIA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA NAGNIATANIA TOCZNEGO DO OBRÓBKI WYKAŃCZAJĄCEJ KOMPOZYTÓW Al-SiC

Współpracujące powierzchnie części maszyn muszą spełniać określone, przeważnie wysokie, wymagania odnośnie do ich stanu warstwy wierzchniej (WW). Warstwa ta o pożądanych właściwościach jest konstituowana w obróbkach wykańczających. Mając na uwadze trudności w obróbce skrawaniem kompozytów metalowych, podjęto próbę zastosowania nagniatania do obróbki powierzchniowej elementów konstrukcyjnych z nich wykonanych. Badania przeprowadzono na próbkach wyciskanych z proszku aluminium, tj. materiału osnowy i z kompozytu Al-10% mas. SiC. Analizowano stan powierzchni w zależności od zastosowanego wcisku podczas nagniatania. Pokazano próbki po nagniataniu tocznym głowicą NUDc-s ze wciskiem do 0,07 mm oraz profilogramy powierzchni materiałów w stanie wyjściowym po toczeniu oraz po nagniataniu. W oparciu o te badania przeprowadzono analizę parametrów geometrycznych powierzchni, takich jak:  $R_a$  - średnia arytmetyczna odchylenia profilu chropowatości,  $K_{Ra}$  - wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni,  $K_z$  - wskaźnik odkształceń nierówności oraz  $\Delta d/2$  - wskaźnik odkształcenia plastycznego w zależności od wielkości wcisku  $U$ . Pokazano również zmiany w strukturze materiałów w wyniku nagniatania. Przeprowadzone wstępne próby nagniatania tocznego kompozytów metalowych Al-SiC pozwalają stwierdzić, że istnieje możliwość uzyskania wyrobów o bardzo małej chropowatości powierzchni.

**Słowa kluczowe:** kompozyty Al-SiC, wyciskanie, nagniatanie toczne, struktura

## RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF BURNISHING AS A FINISHING PROCESS FOR Al-SiC COMPOSITES

Mating surfaces of machine elements must fulfill certain, mostly higher requirements, for their state of surface layer (WW). This surface with desirable properties is constituted during the finishing process. Taking into account the difficulties in the machining of these composites, the possibilities of application of burnishing to surface processing of structural elements was tested. The materials for burnishing were manufactured by extrusion of PM aluminium preforms and the aluminium-based Al-10% wt. SiC composite. The state of surface in dependence of allowance  $U$  during burnishing was analysed. The specimens after burnishing using NUDc-s head with allowance in range up to 0.07 mm and the surface profiles of materials in their initial state after machining and after burnishing are presented. Using these results, the following geometrical surface parameters were analysed:  $R_a$  - surface roughness parameter,  $K_{Ra}$  - ratio of reduction of surface roughness,  $K_z$  - ratio of surface roughness irregularity of deformation and  $\Delta d/2$  - ratio of plastic deformation in dependence of the magnitude of allowance  $U$ . The microstructure of Al material shows the material's continuity after burnishing process.

**Keywords:** Al-SiC composites, extrusion, burnishing, structure

## WPROWADZENIE

Ciągły i intensywny rozwój techniki wymaga stosowania materiałów o coraz lepszych właściwościach mechanicznych, elektrycznych, odporności na wysokie temperatury itp. Za obiecującą grupę materiałów, spełniającą oczekiwania konstruktorów i użytkowników w tym zakresie, uważa się materiały kompozytowe. Dużą zaletą tych materiałów jest możliwość projektowania właściwości przez odpowiedni dobór komponentów i procesów wytwarzania [1]. Materiał kompozytowy składa się przynajmniej z dwóch składników, tj.

osnowy i fazy umacniającej, wprowadzonej w celu osiągnięcia wzrostu właściwości mechanicznych w tzw. kompozytach konstrukcyjnych lub osnowy i fazy modyfikującej, wprowadzonej w celu osiągnięcia określonych właściwości użytkowych, np. elektrycznych, magnetycznych, chemicznych itp. Wśród materiałów kompozytowych o osnowie metalowej szczególne zainteresowanie wzbudzają tworzywa wytwarzane na osnowie stopów aluminium [1]. Ich szczególnie korzystne właściwości powodują, że znajdują one coraz szersze zastosowanie

w konstrukcjach mocno obciążonych w warunkach eksploatacyjnych. Podstawowymi procesami otrzymywania takich kompozytów są: odlewanie, metalurgia proszków oraz przeróbka plastyczna półwyrobów otrzymanych metodami metalurgii proszków [2, 3, 7-9]. Często wyroby otrzymane tymi technologiami z metalowych materiałów kompozytowych umocnionych twardymi cząstkami wymagają dalszej obróbki wykańczającej metodami skrawania lub erozji [4]. Ich obróbka skrawaniem jest kłopotliwa i trudna. Przy skrawaniu takich materiałów występują dynamiczne obciążenia ostrzy skrawających, spowodowane obecnością twardych cząstek, co prowadzi do katastroficznego ich zużycia w wyniku zatarcia powierzchniowego oraz makro- i mikrowykruszania. Nawet w przypadku zużycia o innym charakterze jest ono duże w stosunku do innych tworzyw obrabianych. Również trudna jest obróbka materiałów kompozytowych metodami ściernymi. W metalicznych materiałach kompozytowych osnowę stanowią z reguły metale lub ich stopy, które trudno jest obrabiać metodami ściernymi. Materiał osnowy w trakcie takiej obróbki wbija się w narzędzie ściernie lub lepi do jego powierzchni, co utrudnia uzyskanie powierzchni o odpowiedniej jakości. Mając na uwadze trudności w obróbce skrawaniem kompozytów metalowych oraz fakt, że obróbka skrawaniem nie zawsze jest w stanie zapewnić właściwy stan WW z punktu widzenia właściwości użytkowych, uważa się za celowe zbadanie możliwości zastosowania nagniatania do obróbki wykańczającej elementów konstrukcyjnych wykonanych z kompozytów metalowych. Plastyczna powierzchniowa deformacja (PPD) na zimno jest obróbką wykańczającą powierzchni, a jednocześnie nie się ze sobą typowe i znane zalety obróbki plastycznej.

Elementy konstrukcyjne z kompozytów metalowych często podlegają obróbce cieplnej, co wiąże się z określonymi kosztami. Nagniatanie może wyeliminować w wielu przypadkach obróbkę cieplną. Przyrost wytrzymałości uzyskany w wyniku zgniotu może być równoważny zwiększeniu wytrzymałości w wyniku obróbki cieplnej i zastąpić ten kosztowny zabieg. Na wytrzymałość ma również wpływ ciągłość włókien materiału po nagniataniu jako obróbki nieubytkowej, w przeciwieństwie do obróbki wiórowej i ścierniej. Zastosowanie obróbki nagniataniem powierzchni elementów wykonanych z kompozytów na osnowie aluminium i jego stopów może wnieść nowe możliwości ich uszlachetniania, wykorzystując najlepsze cechy technologii stosowanych do ich wytwarzania [5, 10, 11].

W Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (dawniej Instytut Obróbki Skrawaniem) w Krakowie przeprowadzono wstępne próby nagniatania materiałów kompozytowych na osnowie aluminium wytworzonych w Zakładzie Plastycznej Przeróbki Metali na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH w Krakowie. W pracy przedstawiono wyniki prób tocznego nagniatania statycznego przeprowadzonych przy użyciu typowej głowicy wielo-

rolkowej NUDc-s o regulowanej średnicy, działającej na zasadzie docisku sztywnego.

## CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań jest uzyskanie informacji o możliwości tocznego nagniatania statycznego materiału kompozytowego na osnowie aluminium umocnionego cząstkami węgla krzemu jako zabiegu wykańczającego i nadającego właściwości powierzchni wyrobów. Do prób tocznego nagniatania użyto głowicy wielorolkowej NUDc-s o regulowanej średnicy, działającej na zasadzie docisku sztywnego (rys. 1). Badano wpływ wcisku podczas nagniatania materiału osnowy i kompozytu na stan powierzchni i charakteryzujące ją parametry.

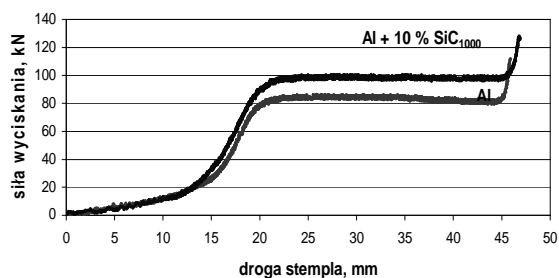


Rys. 1. Głowica rolkowa typu NUDc-s zaprojektowana do badań nagniatania kompozytów

Fig. 1. Roll head NUDc-s type, designed for the examination of burnishing of composites

## MATERIAŁ DO BADAŃ I JEGO CHARAKTERYSTYKA

W pracy zastosowano próbki wytworzone przez wyciskanie wyprasek z proszku materiału osnowy i materiału kompozytowego Al-10% mas. SiC. W wyniku wyciskania na gorąco wyprasek z proszku aluminium o względnej gęstości  $79,4 \pm 4\%$  otrzymano wyroby o gęstości względnej  $99,3 \pm 0,15\%$ , a z materiałów kompozytowych o gęstości względnej  $76,3 \pm 1,8\%$  wyroby o gęstości względnej  $95,1 \pm 0,15\%$ .



Rys. 2. Zależność siły od przemieszczenia stempla podczas wyciskania wyprasek z proszku aluminium i kompozytu Al-10% SiC ze współczynnikiem  $\lambda = 13,32$  w temperaturze  $490^\circ\text{C}$

Fig. 2. Dependence of force vs punch displacement during the extrusion of PM aluminium preforms and Al-10% SiC with the ratio  $\lambda = 13,32$ , at  $490^\circ\text{C}$

Na rysunku 2 przedstawiono zależności siły od przemieszczenia stempla podczas wyciskania wyprasek w temperaturze 490°C ze współczynnikiem wyciskania 13,32.

## PRZEBIEG PROCESU NAGNIATANIA

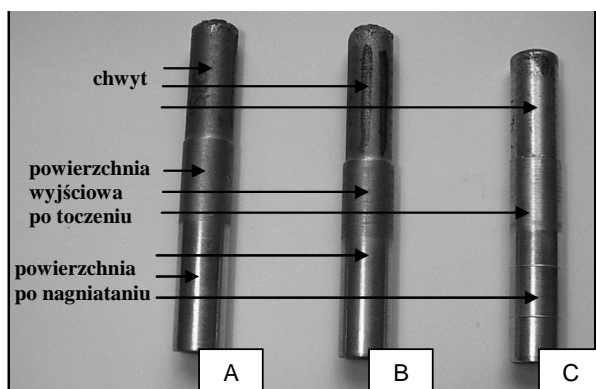
Nagniatanie realizowano na uniwersalnej tokarce z napędem bezstopniowym. Próbki mocowane w uchwycie tokarskim wykonywały ruch obrotowy, a głowica rolkowa zamocowana w imaku narzędziowym wykonywała ruch posuwowy. Po zakończeniu procesu nagniatania głowica była wycofywana z powierzchni obrabianej ruchem przyspieszonym.

W narzędziach wielorolkowych pracujących z dociskiem sztywnym operuje się w praktyce technologicznej nie wielkością siły docisku, lecz wielkością wcisku. Wcisk jest tym czynnikiem technologicznym, który wpływa na fizyczne parametry procesu nagniatania i siłę docisku rolek do materiału obrabianego. Zastosowano wcisk wynoszący od 0,01 do 0,07 mm.

Czynniki ustalonymi w próbach były parametry nagniatania tocznego:

- posuw osiowy narzędzia  $f = 0,20$  mm/obr,
- prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego  $n = 450$  obr/min.

Stałe były również czynniki związane ze strukturą geometryczną powierzchni przed nagniataniem. Próbki były toczone przy tych samych parametrach ostrzami skrawającymi o takiej samej geometrii i gatunku materiału. Chropowatość powierzchni próbek po toczeniu wynosiła  $R_a = 3,80-4,20$   $\mu\text{m}$  (w próbkach podstawowych). Na rysunku 3 przedstawiono wyroby po zabiegu nagniatania materiałów wyciskanych z proszku aluminium i na jego osnowie kompozytu Al-cząstki SiC.



Rys. 3. Wyroby po nagniataniu tocznym jednostopniowym próbek kompozytu Al-SiC (próbki A i B) oraz wielostopniowym próbki z aluminium (C)

Fig. 3. Products after burnishing in one step of Al-SiC composite (specimen A, B), and after multi-step burnishing (specimen C)

## WYNIKI BADAŃ

Badania tak otrzymanych materiałów objęły określenie stanu geometrycznego powierzchni po nagniataniu,

tj. charakterystykę wieloparametrową chropowatości powierzchni oraz stan fizyczny warstwy wierzchniej, jak odkształcenie plastyczne i strefę jego przenikania w materiale, wielkość jego umocnienia i strukturę.

## WYNIKI BADAŃ PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH POWIERZCHNI

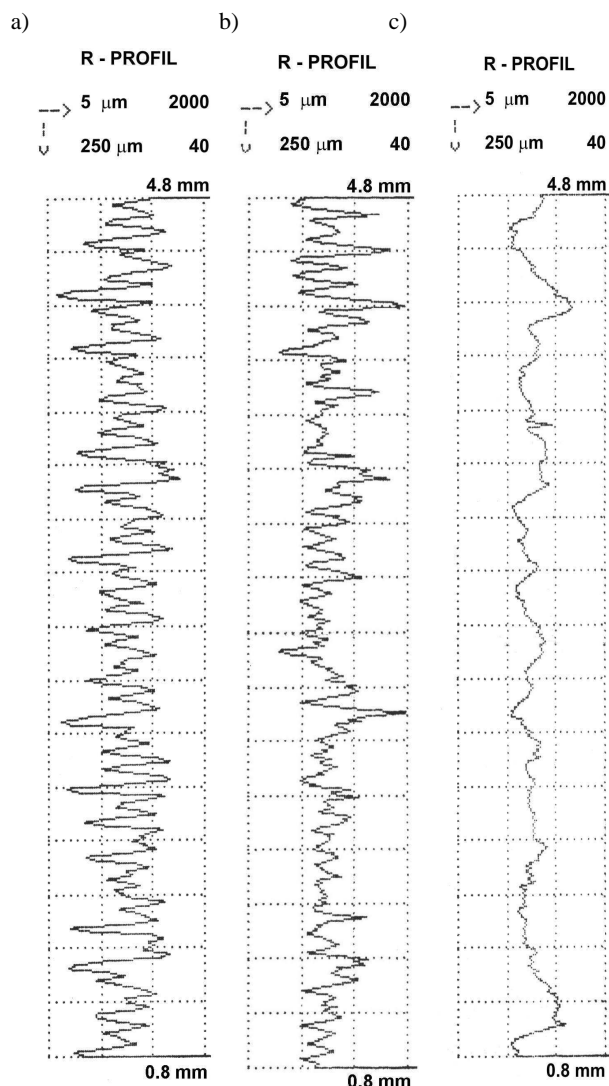
Podstawowym wynikiem pomiarów stanu powierzchni są profilogramy wykonane przy użyciu profilografometru Hommel-Tester T1000. Pomiary parametrów struktury geometrycznej powierzchni wykonywano po toczeniu i po nagniataniu. Jako czynnik zmienny niezależny przyjęto wcisk  $U$  określony wzorem:

$$U = d'_w - D_N$$

gdzie:

$d'_w$  - średnica wałka przed nagniataniem,

$D_N$  - średnica nastawienia głowicy rolkowej.



Rys. 4. Profilogram materiału wyjściowy po toczeniu (a) oraz po nagniataniu tocznym z wciskiem: (b)  $U1 = 0,02$  mm, (c)  $U3 = 0,07$  mm

Fig. 4. Profilogram of initial material after machining (a) and after burnishing with negative allowance: (b)  $U1 = 0.02$  mm, (c)  $U3 = 0.07$  mm

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe profilogramy z badań warstwy wierzchniej materiału osnowy aluminiowej w stanie wyjściowym po toczeniu (a) oraz po nagniataniu tocznym (b i c).

Na rysunkach 5-8 przedstawiono w zależności od wielkości wcisku  $U$  zmiany parametrów geometrycznych powierzchni dla materiału kompozytowego, takich jak:

$\Delta d = d'_w - d$  - wielkość zmiany średnicy wałka w wyniku nagniatania ( $\Delta d/2$  wielkość odkształcenia plastycznego materiału),

$K_{R_a} = R'_a / R_a$  - wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni,

$K_z = \Delta d / 2R'_z$  - wskaźnik odkształceń nierówności.

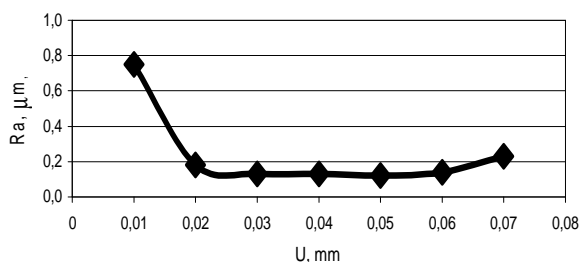
Poszczególne wielkości opisujące te parametry oznaczają:

$R'_a$  - średnia arytmetyczna rzędnych profilu powierzchni przed nagniataniem,

$R_a$  - średnia arytmetyczna rzędnych profilu powierzchni (chropowatości) po nagniataniu,

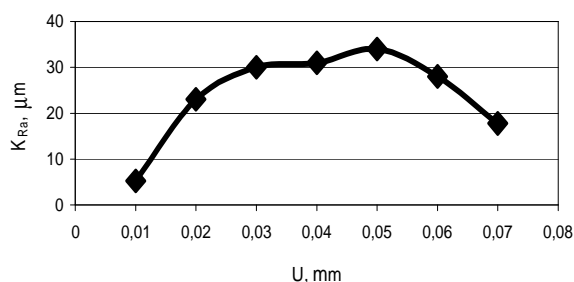
$R'_z$  - wysokość chropowatości określona dla 10 punktów przed nagniataniem,

$R_z$  - wysokość chropowatości określona dla 10 punktów po nagniataniu.



Rys. 5. Zależność  $R_a$  od wcisku  $U$  po nagniataniu tocznym kompozytu metalowego Al-SiC

Fig. 5.  $R_a$  - surface roughness parameter in dependence of negative allowance  $U$  after burnishing of Al-SiC composite



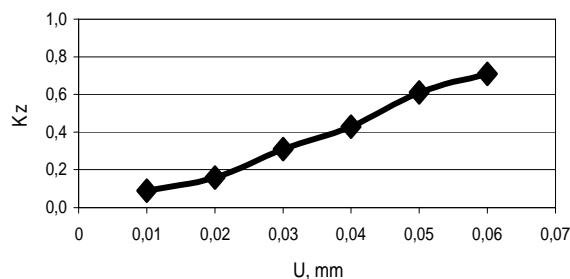
Rys. 6. Zależność wskaźnika zmniejszenia chropowatości  $K_{R_a}$  od wcisku  $U$  po nagniataniu tocznym kompozytu metalowego Al-SiC

Fig. 6.  $K_{R_a}$  ratio of reduction of surface roughness in dependence of the negative allowance  $U$  after burnishing of Al-SiC composite

Po nagniataniu kompozytu Al-SiC uzyskano chropowatości powierzchni określone parametrem  $R_a$  w zakresie  $0,12 \div 0,75 \mu\text{m}$  przy chropowatości przed nagniataniem  $R'_a = 3,80 \div 4,2 \mu\text{m}$ . Otrzymane wyniki wskazują,

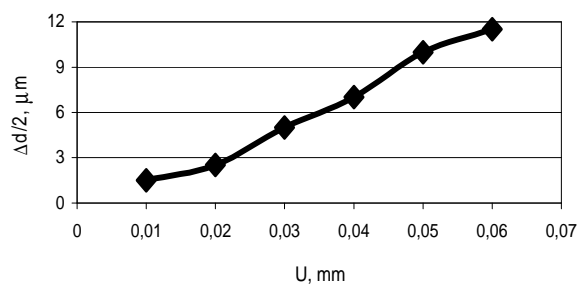
że wzrost wcisku powoduje zmniejszenie chropowatości powierzchni po nagniataniu (rys. 5). Obserwuje się duże zmniejszenie chropowatości początkowej  $R'_a$  ze wzrostem wartości wcisku  $U$ . Wartość  $R_a$  obniża się do pewnej wartości minimalnej dla danych warunków nagniatania i utrzymuje się prawie na stałym poziomie, w przedziale wartości wcisków  $U = 0,03 \div 0,05 \text{ mm}$ . Dalsze zwiększanie wielkości wcisku  $U$  prowadzi do zwiększenia wartości  $R_a$  i może spowodować naruszenie spójności materiału i dekohezję, a w efekcie jego łuszczenie. Dla badanego kompozytu Al-SiC początku tego zjawiska wystąpiły przy wcisku  $U = 0,07 \text{ mm}$ .

Na rysunku 6 przedstawiono zależność  $K_{R_a}$  od wielkości wcisku  $U$ . Wskaźnik ten zawierał się w przedziale wartości  $5,3 \div 34,1$ . Uzyskane w próbach wartości  $K_{R_a}$  nie są zbyt duże i należy sądzić, że przy opracowaniu na drodze doświadczalnej korzystnych parametrów nagniatania mogą być znacznie wyższe. Przy nagniataniu miękkich stali wskaźnik ten może osiągać wartości zbliżone do 100.



Rys. 7. Zależność wskaźnika odkształcenia nierówności  $K_z$  od wcisku  $U$  dla kompozytu metalowego Al-SiC po nagniataniu tocznym

Fig. 7.  $K_z$  - ratio of surface roughness irregularity of deformation in dependence of the negative allowance  $U$  after burnishing of Al-SiC composite



Rys. 8. Odkształcenie plastyczne materiału kompozytowego  $\Delta d/2$  w zależności od wcisku  $U$  dla kompozytu metalowego Al-SiC po nagniataniu tocznym

Fig. 8.  $\Delta d/2$  ratio of plastic deformation in dependence of the negative allowance  $U$  after burnishing of Al-SiC composite

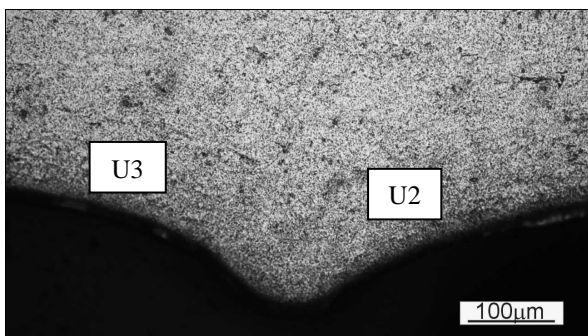
Na rysunku 7 przedstawiono przebieg zależności wskaźnika odkształcenia nierówności  $K_z$  od wcisku  $U$ . Wskaźnik ten informuje, w jakim stopniu zostały odkształcone w wyniku nagniatania nierówności pozostałe po poprzedzającej obróbce. Im jego wartość jest mniejsza, tym nierówności te są mniej odkształcone, a więc powierzchnia nagniatana nie osiągnęła jeszcze dosta-

tecznej gładkości. Gdy  $K_z = 1$ , świadczy to o całkowitym odkształceniu nierówności pozostałych po toczeniu. Wzrost wcisku  $U$  powoduje wzrost wartości wskaźnika  $K_z$  w całym przedziale zastosowanych jego wartości. Podobny jest przebieg zależności  $\Delta d/2$  przedstawiony na rysunku 8. Jest to następstwem faktu, że wartości parametru  $R'_z$  dla różnych próbek mieściły się w niewielkim przedziale wartości i były prawie stałe. Należy nadmienić, że wielkość odkształceń plastycznych kompozytu Al-SiC po nagniataniu tocznym jest mniejsza niż dla miękkich materiałów. Są one także mniejsze niż dla nagniatanych miękkich stali. Wymaga to przeprowadzenia dalszych badań w celu wyjaśnienia takiego zachowania się materiału kompozytowego.

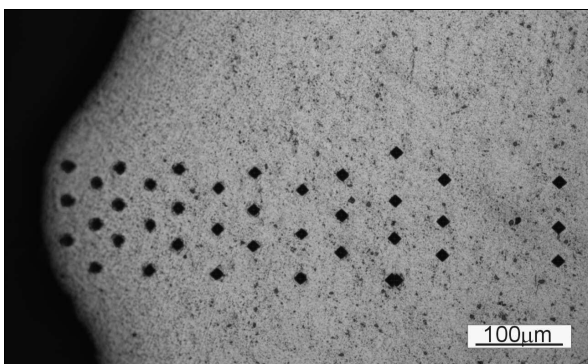
## MIKROSTRUKTURA

Mikrostrukturę obserwowano z zastosowaniem mikroskopu świetlnego na zglądach nietrawionych. Widoczna jest strefa przenikania odkształcenia w warstwie przypowierzchniowej (rys. 9a). Głębokość przenikania odkształcenia można jakościowo oszacować w oparciu o pomiar mikrotwardości (rys. 9b).

a)



b)



Rys. 9. Mikrostruktura materiałów w strefie odkształcenia po nagniataniu tocznym z wciskiem  $U_2 = 0,04$  mm i ponownym nagniataniu z wciskiem  $U_3 = 0,07$  mm (a) oraz odciski HV0,005 w strefie odkształcenia (b)

Fig. 9. Microstructure of the materials in the deformation zones after burnishing with the negative allowance  $U_2 = 0.04$  mm followed by another burnishing with negative allowance  $U_3 = 0.07$  mm (a) and HV0.005 indentations within the zone (b)

## WNIOSKI

Przeprowadzone wstępne próby nagniatania tocznego kompozytów metalowych Al-SiC pozwalają stwierdzić, że istnieje możliwość otrzymania z nich wyrobów o bardzo małej chropowatości. Uzyskano wskaźnik zmniejszenia chropowatości  $K_{Ra} = 34,1$ . Uważa się, że w wyniku optymalizacji parametrów technologicznych procesu nagniatania tocznego oraz odpowiednich zestawień wcisku nagniatania i chropowatości wstępnej (po toczeniu) można znacznie zwiększyć wartości tego wskaźnika. Odkształcenia plastyczne powstałe podczas nagniatania materiału kompozytowego są mniejsze od uzyskiwanych dla materiału osnowy i miękkich stali przy zastosowaniu tej samej głowicy.

W warstwie odkształconej nie występuje naruszenie spójności materiału. Mikrotwardość materiału obniża się w kierunku od powierzchni do środka próbki.

Uzyskane wstępne wyniki wskazują na potrzebę prowadzenia dalszych badań nad nagniataniem materiałów kompozytowych w celu opracowania najkorzystniejszych warunków z punktu widzenia realizacji technologii oraz uzyskiwanych właściwości warstwy wierzchniej i jej cech użytkowych.

*Badania nagniatania tocznego realizowano w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IOS) w Krakowie w ramach działalności statutowej w 2007 roku.*

*Materiały kompozytowe do badań wytworzono w ramach prowadzonej działalności statutowej na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH w Krakowie w 2007 roku.*

## LITERATURA

- [1] Biało D., Zużycie tribologiczne kompozytów na osnowie stopów aluminium otrzymanych z proszków, *Prace Naukowe Mechanika*, z. 192, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
- [2] Biało D., Wytwarzanie kompozytów o osnowie Al z twardeymi wtrąceniami przez ekstruzję na gorąco, *I Polska Konferencja Metaliczne Materiały Kompozytowe*, Wydawnictwo Instytutu Odlewnictwa w Krakowie, Kraków 22-23.10.2002, ref. 14,1-9.
- [3] Biało D., Wytwarzanie kompozytów w procesach metalurgii proszków, *Kompozyty (Composites)* 2001, 1, 1, 89-92.
- [4] Biało D., Kudła L., Perończyk J., Problemy wiercenia i drążenia elektroerozyjnego mikrootworów w kompozytach Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Mechanik* 2001, 10, 631-635.
- [5] Polowski W., Pofelska-Filip J., Wszolek J., Czechowski K., Finishing of sculptured surfaces by machining and surface deformation, *The 3<sup>rd</sup> International Conference of Machining and Measurement of Sculptured Surfaces*, Kraków 24-26 September 2003, 141-145.
- [6] Stós J., Polowski W., Wszolek J., Czechowski K., Nagniatanie toczne powierzchni zewnętrznych i wewnętrznych, *Narzędziownia* 2006, 4.

- [7] Szczepanik S., Krawczyk S., Pytko S., Materiały na osnowie aluminium wzmocnione cząstkami węgla krzemowego, otrzymane w procesie wyciskania, IV Opolska Konferencja Naukowo-Techniczna Poltrib 97 - Tribologia dla eksploatacji 1997, Białobrzegi 10-12.06.1997, 52-58.
- [8] Wojtaszek M., Szczepanik S., Kusiński J., Structure of hot extruded aluminium powder based composite with 1,5% by mass additive of  $Al_2O_3$  fibres, Inżynieria Materiałowa 1984, XIX, 758-761.
- [9] Sobczak J., Metalowe materiały kompozytowe, Stan aktualny i perspektywy rozwoju, Seminarium Kompozyty, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 8.11.1996, 23-64.
- [10] Szczepanik S., The forming of the Al-5% SiC composite obtained using P/M method, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials 1996, 4, 14, 15-25.
- [11] Szczepanik S., Przeróbka plastyczna materiałów spiekanych z proszków i kompozytów, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2003.