

	Organizatorzy: Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Analiza naprężeń i odkształceń oraz sił i energii w początkowej strefie kontaktu ziarna ściernego z obrabianym materiałem

Analysis of stress and strains, forces and energy in initial contact zone abrasive grain with treating material

WOJCIECH KACALAK
 ŁUKASZ RYPINA
 TOMASZ KRÓLIKOWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.360

W pracy autorzy przeanalizowali procesy oddzielania materiału, których złożoność wynika ze zmienności właściwości geometrycznych ostrzy ziaren ściernych. Znajomość naprężeń i odkształceń oraz sił i energii, pozwala uzyskać wiele cennych informacji dotyczących zjawisk zachodzących w procesie mikroskrawania. Analizy przeprowadzone zostały w systemie Ansys, a założenia oraz wyniki symulacji poddane zostały walidacji eksperymentalnej.

SŁOWA KLUCZOWE: Ansys, mikroskrawanie, szlifowanie, modelowanie, MES

The authors analyzed the material separation processes, whose complexity follows from the volatility the blades geometric properties of the abrasive grains. Knowledge of stress and strain and the strength and energy, allows you to get a lot of valuable information on the phenomena occurring in the process of Microcutting. Analyses were carried out in the system Ansys and assumptions and the simulation results were subjected to experimental validation.

KEYWORDS: Ansys, microcutting, grinding, modeling, FEM

Wstęp

Modelowanie procesów szlifowania jest niezwykle kłopotliwe z uwagi na złożoność zjawisk występujących w samym procesie [8]. Ocena zjawisk zachodzących w mikroobjętościach skupionych w otoczeniu wierzchołka ziarna jest możliwa jedynie poprzez budowę złożonych modeli

komputerowych.

Wiele prac naukowych poświęconych badaniom modelowym procesu mikroskrawania, sprowadza się do analiz dwuwymiarowych procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem. Takie podejście jest oczywiście właściwe jeśli analizuje się ostrza o określonej geometrii oraz skrawanie, które można uznać za ortogonalne. Można wówczas ocenić proces formowania się wióra oraz tworzenia się strefy zastoju, która tworzy się przed ziarnem ściernym, jednak modele takie mają głównie znaczenie ilustracyjne [1, 2, 3].

W Politechnice Koszalińskiej na Wydziale Mechanicznym w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej opracowano metodykę modelowania procesów mikroskrawania ostrzami ziaren, których modele geometryczne utworzono z wykorzystaniem danych dotyczących określonych materiałów ściernych, z uwzględnieniem ich położenia w procesie badań eksperymentalnych. Obserwacje procesu mikroskrawania przeprowadzono z wykorzystaniem zintegrowanego systemu akwizycji obrazu składającego się z kamery szybkościowej typu Phantom v210 oraz aplikacji TEMA [5, 6].

Metodyka przygotowania geometrii ziarna ściernego

Przygotowanie do symulacji polegało na zeskanowaniu ziarna za pomocą triangulacyjnego skanera ATOS III SO (Small Object) (rys. 1). Powierzchnia ziarna ściernego została oświetlona zestawem linii światła niebieskiego, tworzących na mierzonej powierzchni siatkę, o określonej gęstości. Wzorce w postaci obrazów prążkowych zostały zarejestrowane przez dwie kamery CCD. Na podstawie optycznych równań transformacji wyznaczone zostały, dla każdego piksela zarejestrowanego obrazu, niezależne współrzędne 3D. W wyniku powyższych operacji otrzymana jest chmura punktów, a ilość tych punktów jest zależna głównie od rozdzielczości kamer. Konfiguracja

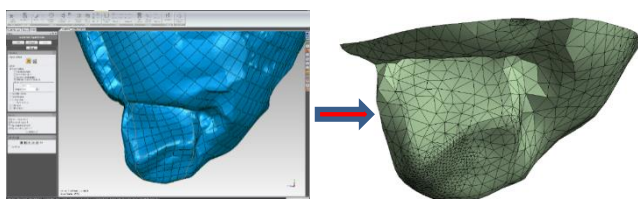
*prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak (wk5@tu.koszalin.pl)
 mgr inż. Łukasz Rypina (lukasz@rypina.pl)
 prof. nadzw. dr hab. inż. Tomasz Królikowski (tomasz@krolikowski.pl)

geometryczna detektora i parametrów dystorsji jest kalibrowana przy użyciu metod fotogrametrycznych [10].



Rys. 1. Triangulacyjny skaner ATOS III SO (Small Object)

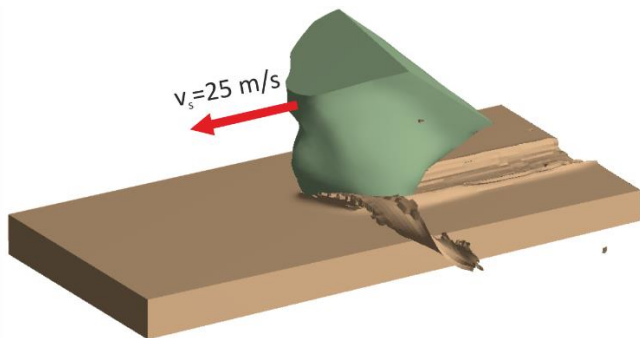
Kolejnym krokiem było przetworzenie zeskanowanego ziarna (chmury punktów) do formatu umożliwiającego zaimportowanie geometrii do programu Ansys. Do tego celu użyto pakietu narzędzi Geomegic Studio, który służy do modyfikacji danych pochodzących ze skanera laserowego w modele 3D służące do inżynierii rekonstrukcji. Gotowy model został zaimportowany do systemu Ansys, który został pokryty siatką elementów skończonych (rys. 2).



Rys. 2. Transformacja zeskanowanej chmury punktów do modelu CAD

Opis analizy numerycznej

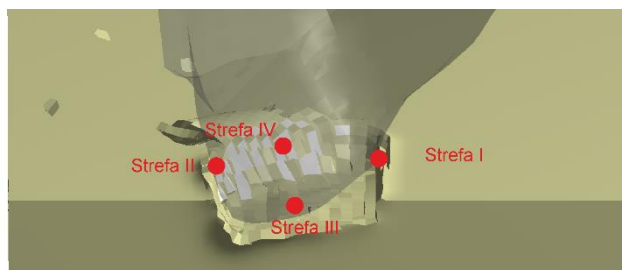
Badano procesy mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym (rys. 3) stopu tytanu typu Grade 5 dla prędkości $v_s=25$ m/s. Wzrastające zagłębienie ziarna zapewniło przez pochylenie płaszczyzny nominalnej badanej próbki.



Rys. 3. Geometria badanego obiektu, wizualizacja procesu mikroskrawania

Celem symulacji była analiza naprężeń i odkształceń oraz sił i energii w procesie mikroszlifowania pojedynczym ziarnem ściernym. Przeprowadzono analizę procesu formowania wiórów oraz wypływek, wyznaczono wartości naprężeń oraz częstości ich pulsacji, określono odkształcenia, siły i energię w analizowanych punktach strefy. Przeprowadzono analizę stanu naprężeń w czterech strefach kontaktu ziarna z materiałem obrabianym (oznaczone na rys. 4 jako

strefa I, II, III i IV). Przeprowadzona analiza pozwoliła opisać charakterystyczne cechy procesu mikroskrawania ziarnem ściernym w tym zjawiska nieciągłości tworzenia wióra.

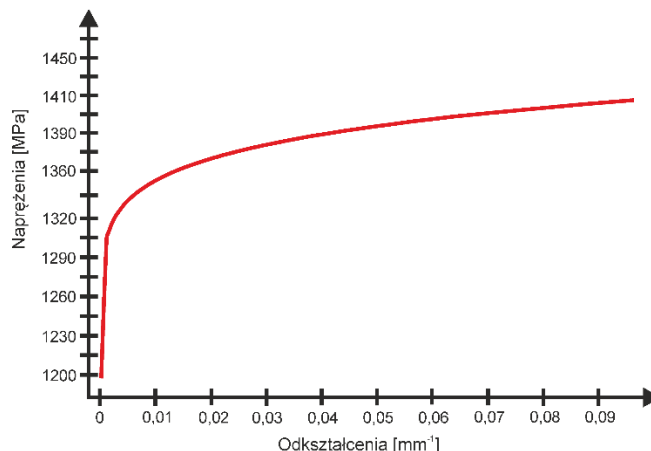


Rys. 4. Schemat stref mikroskrawania

W analizie komputerowej użyto modelu materiałowego Johnsona-Cook'a, który odnosi się do przepływu naprężeń, odkształceń, prędkości odkształceń oraz rozkładu temperatury w badanym obiekcie. Równania Johnsona-Cook'a są powszechnie stosowane do modelowania materiałów narażonych na odkształcenia w szerokim zakresie prędkości odkształceń i temperatury (rys. 4). Ogólna postać równania Johnsona-Cook'a jest następująca [4, 7, 13, 14]:

$$\sigma = (A + B(\bar{\epsilon}_p)^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - (T^*)^m) \quad (1)$$

gdzie: A – początkowa, statyczna granica plastyczności, B – parametr umocnienia plastycznego, n – wykładnik umocnienia odkształcenia plastycznego, m – wykładnik uplastycznienia termicznego, $\bar{\epsilon}_p$ – odkształcenie plastyczne rzeczywiste, T^* – temperatura homologiczna.



Rys. 5. Model materiałowy użyty w symulacji.

Rozwiązując postawiony problem określenia naprężeń, odkształceń, sił oraz energii w obrabianym materiale posłużono się metodą całkowania jawnego, zwaną również metodą różnic centralnych, bądź metodą explicit. W metodzie tej równanie opisujące ruch obiektu można zapisać w postaci [11, 12]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}}(\tau) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{r}}(\tau) + \mathbf{K}\mathbf{r}(\tau) = \mathbf{R}(\tau) \quad (2)$$

$$\tau \in [t_0, t_s]$$

gdzie, \mathbf{M} , \mathbf{C} i \mathbf{K} są odpowiednio stałymi w czasie macierzami: masy, tłumienia i sztywności układu. Przez \mathbf{R} oznaczono wektor obciążenia zewnętrznego, a \mathbf{r} , $\dot{\mathbf{r}}$, $\ddot{\mathbf{r}}$ są wektorami przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia węzłów układu. Równanie to, jest całkowane względem czasu τ , metodą krok po kroku i nie jest przed tą operacją przekształcane.

Wyniki analizy numerycznej

Analizując naprężenia normalne w kierunku X, Y i Z dla każdej ze stref (rys. 4), można zaobserwować, że ich zmienność charakteryzuje się pewną częstotliwością (rys. 6). W strefie nr 1 obserwuje się dominację naprężeń ściskających w kierunku X, Y, Z, których wartości mieszczą się w zakresie od -50 MPa do -800 MPa. Można więc stwierdzić, że w tej strefie dominuje trójosiowe ściskanie. W strefie nr 2 tylko w osi X dominowały naprężenia ściskające, natomiast w kierunku Y oraz Z występowały naprężenia rozciągające. W kierunku Z dopiero po pokonaniu przez ziarno odległości skrawania 4 mm zaczęły dominować naprężenia ściskające. Występowanie naprężeń ściskających w kierunku osi X, dla strefy I i II, gdy przemieszczania boczne materiału stają się coraz większe, wynika z oporu bocznych przemieszczeń cząstek materiału. Analizując wyniki naprężeń dla strefy III można zauważyć dominację naprężeń ściskających jedynie w kierunkach X i Z, w których boczna składowa sił jest największa. Natomiast w kierunku Y, zaobserwować można było dużą zmienność naprężeń. Zaobserwowana zmienność ma wpływ na formowanie się naprężeń w strefie IV, która jest strefą intensywnych odkształceń oraz zastoju materiału. Analizując wyniki naprężeń (rys. 6) oraz mapy naprężeń (rys. 7) można zauważyć, że w chwili kiedy obrabiany materiał ulega spęczaniu, strefa intensywnych odkształceń narasta a naprężenia rosną. W chwili kiedy naprężenia osiągają swoje wartości graniczne, materiał zaczynał oddzielać się w postaci wióra przedniego przed ostrzem.

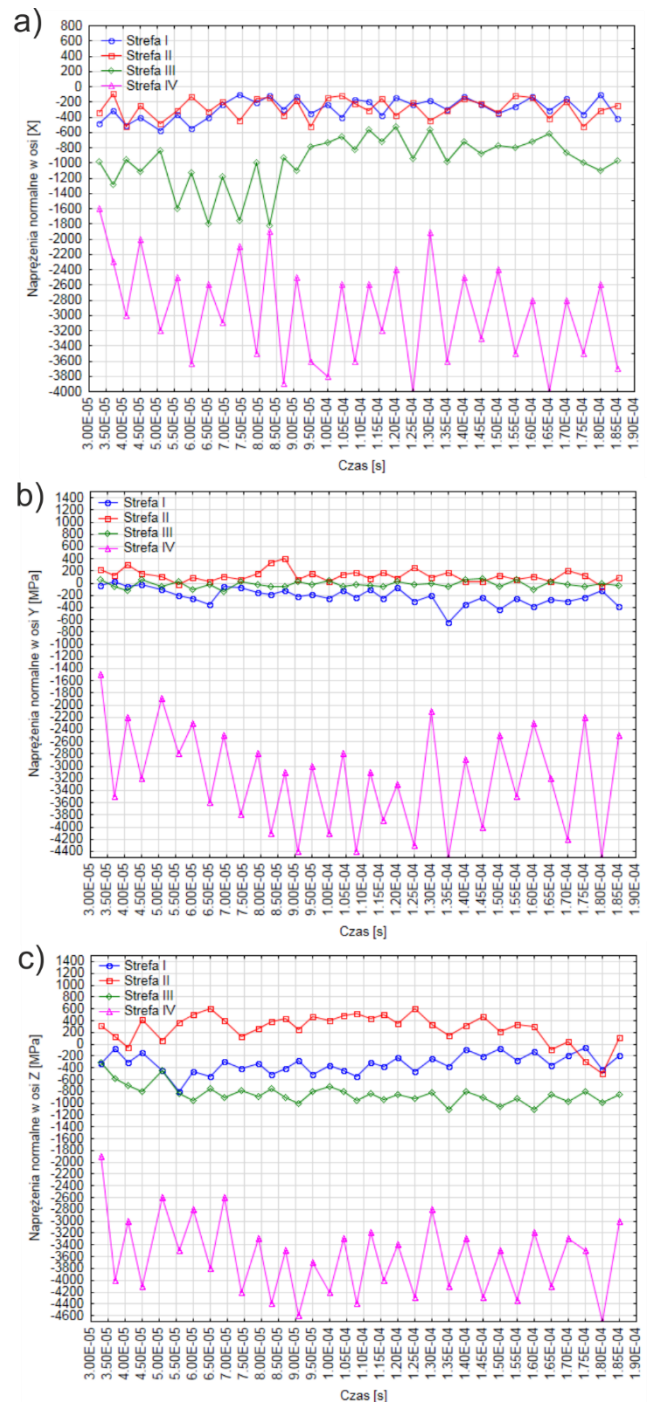
Z powyższych spostrzeżeń wynika, że nieciągłość procesu tworzenia wióra nie jest odstępstwem od stanu stabilnego, wywołanego zakłóceniami, lecz jest stanem stabilizowanych fluktuacji, stanowiących typową cechę procesu.

Analizie poddano odkształcenia plastyczne normalne, które zdefiniowane są jako przemieszczenia węzłów elementów skończonych w stosunku do węzłów sąsiednich. Na rysunku 8 umieszczono mapy odkształceń plastycznych normalnych w osi X, Y i Z. Należy zauważyć, że największe wartości odkształceń rozciągających w kierunku X widoczne są w lewej bocznej wyływce. Natomiast w dnie rysy występują maksymalne odkształcenia spowodowane naprężeniami ściskającymi wywołanymi przez geometrię mikronaróża ziarna ściernego. Analizując wyniki odkształceń w osi Y, które wywołane są siłą normalną oddziaływania ziarna ściernego na materiał, można zaobserwować dużą ich kumulację w wyływkach bocznych oraz w dnie rysy. Duże wartości odkształceń normalnych w kierunku Y występują także podczas formowania wióra.

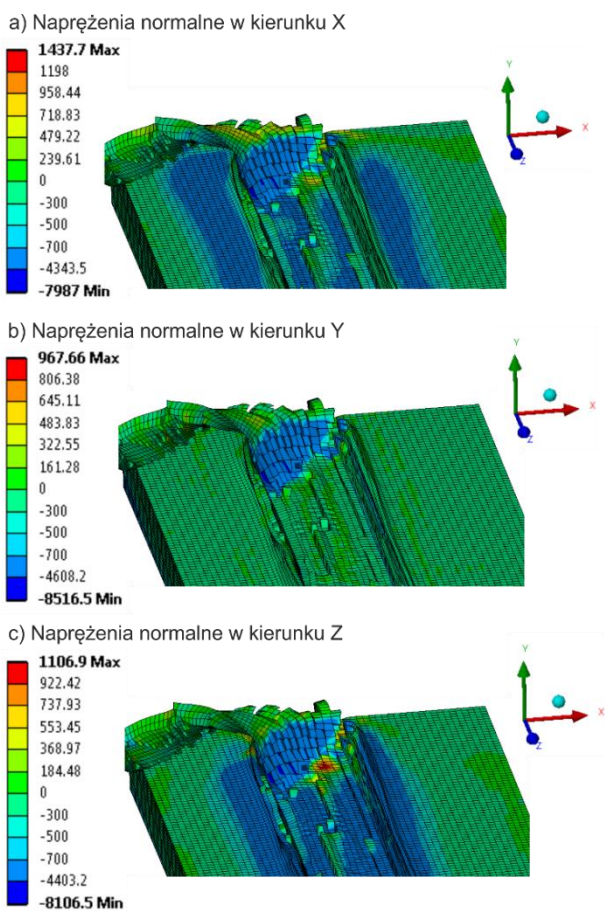
Przeprowadzone badania symulacyjne umożliwiają przeprowadzenie analizy zmienności siły normalnej F_n , która jest jednym z ważniejszych parametrów oceny procesu szlifowania. W celu uzyskania informacji o wpływie zagłębienia ostrza na proces mikroskrawania powierzchnię przedmiotu pochylono pod kątem 1° . Podczas mikroskrawania stopu tytanu typu Grade 5 wartości sił normalnych charakteryzują się dużą zmiennością, czego powodem jest nieciągłość procesu oraz nierównomierne usuwanie materiału. Jak pokazują badania eksperymentalne prowadzone przez wiele ośrodków naukowych, istotny wpływ na zmianę obciążeń ziaren w strefie szlifowania ma głębokość szlifowania, co potwierdzają wykresy siły normalnej F_n przedstawione na rysunku 9.

Badania modelowe procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym umożliwiają uzyskanie cennych informacji o procesie takich jak na przykład wpływ zmiany głębokości szlifowania na wartość energii w procesie [9].

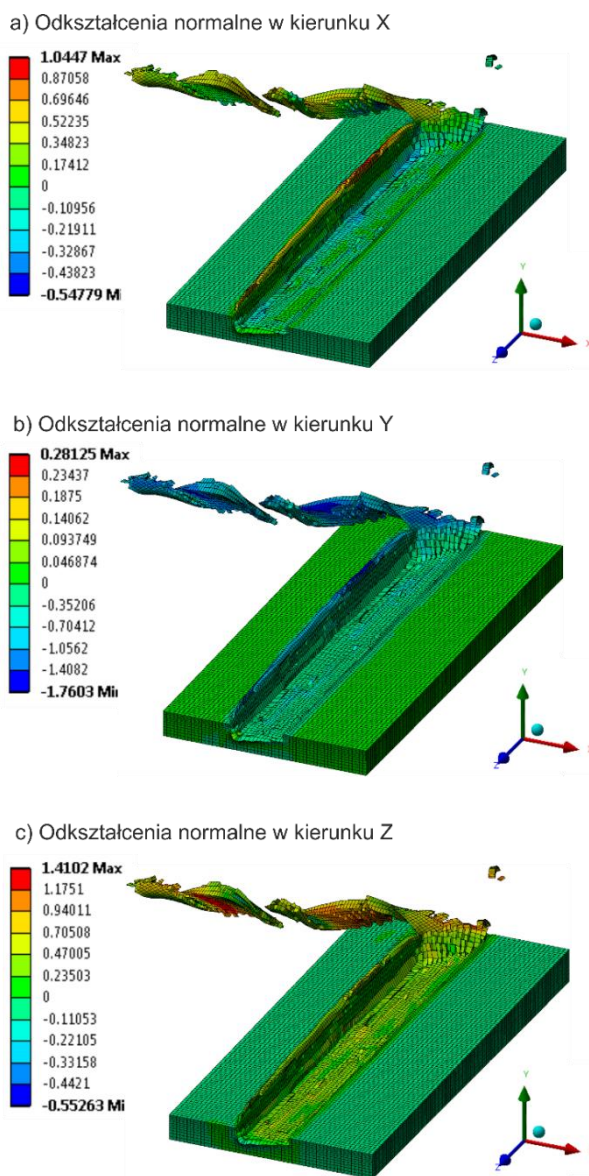
Zaprezentowane na rysunku 9 wartości siły normalnej charakteryzują się znaczną zmiennością, co jest potwierdzeniem wielu badań eksperymentalnych, z których wynika, że proces usuwania materiału jest procesem nieciągłym.



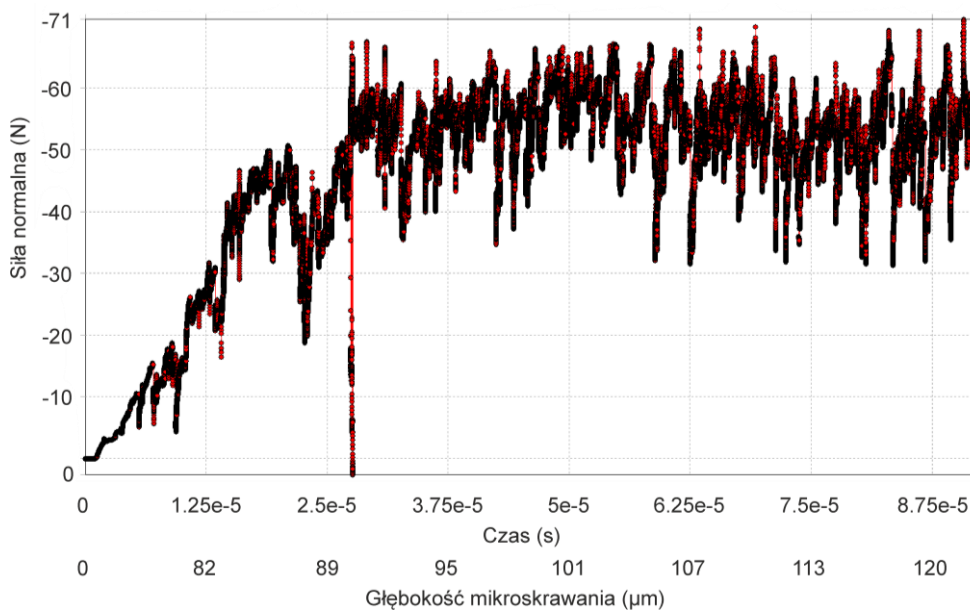
Rys. 6. Wyniki naprężeń normalnych dla rozpatrywanych 4 stref w czasie mikroszlifowania: a) wyniki naprężeń normalnych w kierunku X, b) wyniki naprężeń normalnych w kierunku Y, c) wyniki naprężeń normalnych w kierunku Z



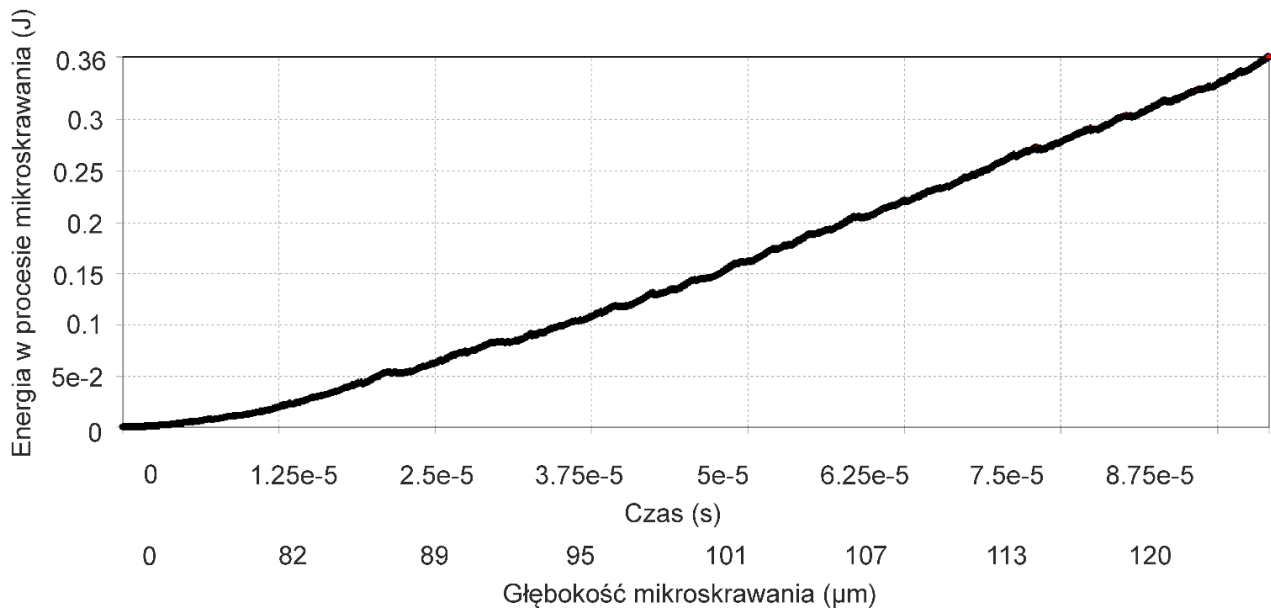
Rys. 7. Wyniki analizy naprężeń normalnych w kierunku X, Y, Z po pokonaniu przez ziarno drogi 4,5 mm



Rys. 8. Wyniki analizy odkształceń plastycznych normalnych w kierunku X, Y, Z po pokonaniu przez ziarno drogi 4,5 mm



Rys. 9. Zmiany wartości siły normalnej F_n podczas mikroskrawania w czasie od $0 + 9 \cdot 10^{-5}$ s (długość śladu 2 mm)



Rys. 10. Zmiany wartości energii w procesie mikrokrwania w czasie od $0 + 9 \cdot 10^{-5}$ s (długość śladu 2 mm)

Walidacja modelu komputerowego

W celu walidacji modelu komputerowego, przeprowadzono rejestrację procesu mikrokrwania pojedynczym ziarnem ściernym za pomocą zintegrowanego systemu akwizycji obrazu składającego się z kamery szybkościowej typu Phantom v210 oraz aplikacji TEMA (rys. 11).



Rys. 11. Stanowisko badań procesów mikrokrwania pojedynczym ziarnem ściernym

Stanowisko badawcze umożliwia rozpędzenie próbki do prędkości 10 m/s. Badanym materiałem był stop tytanu Grade 5. Próbkę została pochylona pod kątem 1° w celu zachowania zgodności z warunkami brzegowymi symulacji. W eksperymencie zastosowano ziarno ściernie ZRA 25%, które wcześniej zostało poddane skanowaniu, a następnie transformacji do systemu CAD (rys.1, rys. 2).

Badania eksperymentalne procesu mikrokrwania pojedynczym ziarnem ściernym zostały zarejestrowana z prędkością 40000 kl/s.

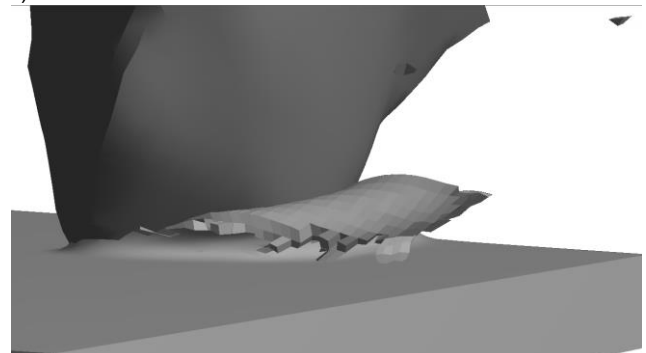
Walidacja modelu komputerowego przedstawiona w niniejszym artykule sprowadza się do oceny wizualnej formowania wióra. Na rysunku 12 zestawiono fotografie z eksperymentu oraz symulacji wykonane w tym samym kroku czasowym. Widoczne formowanie wióra w obu przypadkach jest zbliżone do siebie. Można więc stwierdzić, że dobrane warunki brzegowe symulacji procesu mikrokrwa-

nia oraz zastosowane równania konstytutywne modelu, są dobrane prawidłowo.

a)



b)



Rys. 12. Wyniki badań walidacyjnych procesu mikrokrwania stopu tytanu typu Grade 5, a) obraz z badań eksperymentalnych, b) obraz z badań symulacyjnych

Podsumowanie

Zastosowanie narzędzi wykorzystujących metodę elementów skończonych do badań nad procesami mikrokrwania, w połączeniu z badaniami eksperymentalnymi, daje

szerokie spektrum nowych możliwości spojrzenia na procesy szlifowania oraz wygładzania. Znajomość wartości naprężeń, odkształceń, sił oraz energii daje podstawy do prowadzenia nowych badań nad zjawiskami zachodzącymi w obszarze naroża ściernego. Przeprowadzona analiza pokazuje, jak duży wpływ na wyniki procesu ma sama geometria ziarna ściernego w warunkach zmiennego zagłębienia ostrza.

LITERATURA

1. Anderson D., Warkentin A., Bauer R., Experimental and numerical investigations of single abrasive grain cutting, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51 (2011), 898-910.
2. Anderson D., Warkentin A., Bauer R., Comparison of spherical and truncated cone geometries for single abrasive grain cutting, *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012), 1946-1953.
3. Buchkremer S., Wu B., Lung D., Münstermann, Klocke F., Bleck W., FE-simulation of machining processes with a new material model, *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 599-611
4. Kacalak W., Królikowski T., Rypina Ł., Modelowanie naprężeń i przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściennym z wykorzystaniem środowiska Ansys – cz. II, *Mechanik NR8-9/2014* str. 171-175/724.
5. Kacalak W., Bałasz B., Tomkowski R., Lipiński D., Królikowski T., Tandecka K., Rypina Ł. Problemy naukowe i kierunki rozwoju procesów mikroobróbki ścierniej, *Mechanik NR8-9/2014* str. 157-170/724.
6. Kacalak W., Królikowski T., Rypina Ł., Badanie procesu mikroskrawania z wykorzystaniem zintegrowanego systemu rejestracji obrazów szybkozmiennych, *Mechanik NR 8-9/2013* str. 203-211.
7. Kacalak W., Królikowski T., Rypina Ł., Modelowanie naprężeń i przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania z wykorzystaniem środowiska LS-DYNA, *Mechanik NR 8-9/2013* str. 226-240.
8. Kacalak W., Tandecka K., Sempruch R., Badania modelowe procesu mikroskrawania, *MECHANIK NR 8-9/2013*.
9. Kacalak W., Teoretyczne podstawy minimalizacji energii właściwej w procesach obróbki ścierniej, *XX Naukowa Szkoła Obróbki Ścierniej*, Poznań 1997, str. 77-81.
10. Lipiński D., Kacalak W., Tandecka K., Zastosowanie systemu skanowania przestrzennego do oceny zużycia narzędzi ściernych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 59, nr 11, 2013, 1227-1231.
11. Niesłony P., Grzesik W., Chudy R., Habrat W., Meshing strategies in FEM simulation of the machining process, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15 (2015) 62-70.
12. Niesłony P., Grzesik W., Laskowski P., Żak K., Numerical 3D FEM simulation and experimental analysis of tribological aspects in turning Inconel 718 Alloy, *Journal of Machine Engineering*, Vol. 15, No.1, 2015.
13. Outeiro J.C., Umbrello D., M^oSaoubi R. 206, Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006), 1786-1794.
14. Sima M., Ōzel T., Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 50 (2010) 943-960.