

	<b>Organizatorzy:</b>  Politechnika Łódzka  Wydział Mechaniczny	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA          OBRÓBKİ ŚCIERNEJ</b> Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

## Analiza wpływu cech stereometrycznych ziaren ściernych na naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia materiału w strefie mikroskrawania

**Influence of analysis of features geometrical abrasive grains stress, strain and displacement of material in zone microgrinding**

**WOJCIECH KACALAK  
 ŁUKASZ RYPINA  
 TOMASZ KRÓLIKOWSKI \***

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.359

W pracy zaprezentowano wyniki analizy wpływu cech stereometrycznych ziaren na boczne przepływy materiału oraz naprężenia i odkształcenia w strefie mikroskrawania. Do analizy wykorzystano modele ziaren rzeczywistych tworzone na podstawie danych z pomiarów z wykorzystaniem triangulacyjnego skanera ATOS III SO. Ziarna zostaną poddane transformacji chmury punktów do modelu CAD. Modele te zostały zaimplementowane do systemu Ansys. Wyznaczono wpływ orientacji ziarna ściernego na intensywność niekorzystnych bocznych przepływów materiału.

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

*The paper presents the results of analysis of the impact geometrical features of grains on the side of the material flows and the stresses and strains in the zone microgrinding. Models used for the analysis of real grains formed based on data from measurements using triangulation scanner ATOS III SO. Grains will be the transformation of point cloud to CAD model. These models were implemented into the system Ansys. The effect of orientation of the abrasive grains to the intensity of the negative side of the material flow.*

**KEYWORDS:** Ansys, microgrinding, grinding, modeling, FEM

### Wstęp

Dobór cech stereometrycznych ziaren ściernych wykorzystanych do modelowania ma wpływ na ocenę procesu mikroskrawania, gdyż od nich zależą trajektorie przepływu obrabianego materiału. Definiowanie kształtu charakterystycznego ziarna jest trudne ze względu na duże zróżnicowanie form geometrycznych ziaren powstających w procesie wytwarzania [5].

Najmniejsze wartości kąta ścinania, dla których następuje jeszcze oddzielanie materiału, zależą od właściwości samego materiału, zagłębienia ostrza  $h$ , parametrów geometrycznych wierzchołka ziarna  $\rho$  i  $2\epsilon$  oraz położenia i kształtu powierzchni natarcia. W niektórych pracach [9] podkreśla się, że istotny jest również wpływ mikrogeometrii ziarna na opory przemieszczania się materiału przed ziarnem. Cechy stereometryczne poszczególnych fragmentów wierzchołka ziarna są zazwyczaj zróżnicowane, co powoduje, że proces mikroskrawania wzdłuż toru ziarna, od początkowego kontaktu do stref o większych zagłębieniach jest zmienny ze względu na odmienne warunki kontaktu.

Wcześniejsze wyniki analiz teoretycznych i badań doświadczalnych przeprowadzonych przez autorów, wykazują (rys.1), że w zakresie wartości stosunku  $s_1 = h:\rho = 0,05...0,5$  kąty ścinania są większe od minimalnych tylko dla ziaren o mało rozwiniętej powierzchni podczas mikroskrawania materiałów o dużej twardości i małej wytrzymałości na ścinanie.

W literaturze najczęściej jako najważniejszy warunek oddzielania materiału podaje się graniczne wartości stosunku zagłębienia ziarna w materiał obrabiany  $h$  do promienia zaokrąglenia wierzchołka  $\rho$ . Analiza danych z wielu prac

\*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.eu)

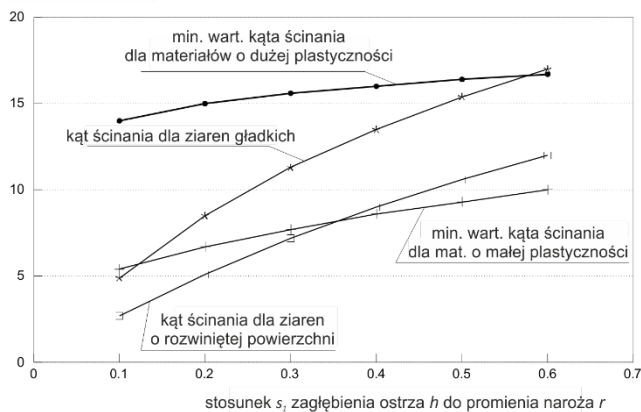
różnych autorów wykazuje, że są one bardzo rozbieżne, czego powodem jest mikro- i makrogeometria wierzchołków ziaren. Dla bardzo małych zagłębień istotne znaczenie może mieć topografia mikrowierzchołków naroża ziarna, a dla większych zagłębień cechy, ścian tworzących naroże. Jako kryterium geometryczne skuteczności mikroskrawania przyjmuje się zwykle współczynnik  $k$ , zależny od pól przekrojów wypływek bocznych  $F_{W1}$  i  $F_{W2}$  oraz pola przekroju rowka [9]:

$$k = [F_r - (F_{W1} + F_{W2})] : F_r = 1 - (F_{W1} + F_{W2}) : F_r \quad (1)$$

$$0 \leq k \leq 1$$

który jest stosunkiem przekroju materiału oddzielonego do nominalnego przekroju rysy.

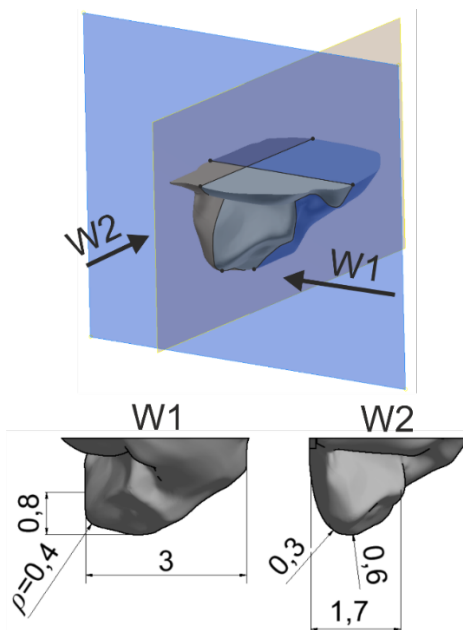
kąt ścinania w stopniach



Rys. 1. Kąty ścinania dla różnych warunków mikroskrawania [9]

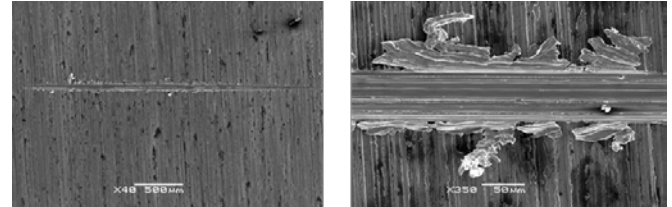
### Opis analizy numerycznej

Modelowanie przeprowadzono w systemie Ansys dla ziaren ściernych (rys. 2) i obrabianego materiału - stal łożyskowa 50HF ulepszona cieplnie. Prędkość mikroskrawania wynosiła  $v_s=25$  m/s. W celu uzyskania danych o procesie dla różnych zagłębień próbki zostały pochylone. Badania modelowe przeprowadzono dla ziaren o znacznych wymiarach (rys. 2) [8].



Rys. 2. Cechy geometryczne ziarna ściernego wykorzystanego w procesie mikroskrawania (wymiarzy w milimetrach)

Celem badań było określenie wpływu cech geometrycznych naroża ziarna ściernego na boczne przepływy materiału oraz powstawanie wióra i oddzielanie materiału. Należy zauważyć, iż w mikroobróbce dominują boczne (względem toru mikroskrawania) przepływy materiału (rys. 3), podczas gdy zwykle analizuje się tylko geometryczne warunki tworzenia wióra w przekroju prostokątnym do powierzchni przedmiotu i równoległym do kierunku ruchu ostrza  $s_r$ .



Rys. 3. Przykład ukształtowania wypływek bocznych z widocznymi efektami nieciągłości procesu ich formowania

W analizie komputerowej użyto modelu materiałowego Johnsona-Cook'a, który odnosi się do rozkładu naprężeń, odkształceń, prędkości odkształceń oraz temperatury w badanym obiekcie. Równania Johnsona-Cook'a są powszechnie stosowane do modelowania materiałów narażonych na odkształcenia w szerokim zakresie prędkości odkształceń i temperatury. Ogólna postać równania Johnsona-Cook'a jest następująca [1, 2, 3]:

$$\sigma = (A + B(\bar{\epsilon}_p)^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - (T^*)^m) \quad (2)$$

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.

Rozwiązując postawiony problem określenia wpływu cech geometrycznych ziarna na kierunki przemieszczeń obrabianego materiału posłużono się metodą całkowania jawnego zwaną również metodą różnic centralnych bądź metodą explicit. W metodzie tej równanie opisujące ruch obiektu można zapisać w postaci:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}}(\tau) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{r}}(\tau) + \mathbf{K}\mathbf{r}(\tau) = \mathbf{R}(\tau) \quad (3)$$

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

gdzie,  $M$ ,  $C$  i  $K$  są odpowiednio stałymi w czasie macierzami: masy, tłumienia i sztywności układu. Przez  $R$  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  $\tau$ , metodą krok po kroku i nie jest przed tą operacją przekształcane [11, 12, 13, 14].

### Cechy naroża ściernego

Do analizy cech geometrycznych zastosowano szereg narzędzi mających zastosowanie w inżynierii rekonstrukcji tj. triangulacyjny skaner ATOS III SO, pakiet narzędzi Geometric Studio, Inventor oraz system Ansys (rys. 4) [10]. Zastosowanie wszystkich wymienionych systemów pozwoliło skupić się na pomiarach geometrycznych zeskanowanych ziaren oraz opisać ich charakterystyczne cechy stereometryczne  $r_1$ ,  $2\epsilon_1$ .

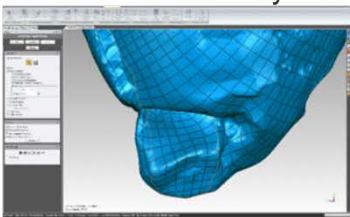
Selekcja ziaren ściernych



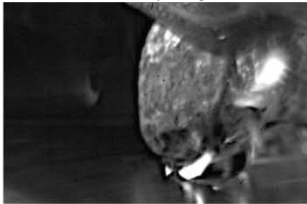
Skanowanie ziaren ściernych



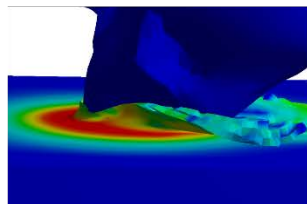
Przetwarzanie modelu do systemu CAD



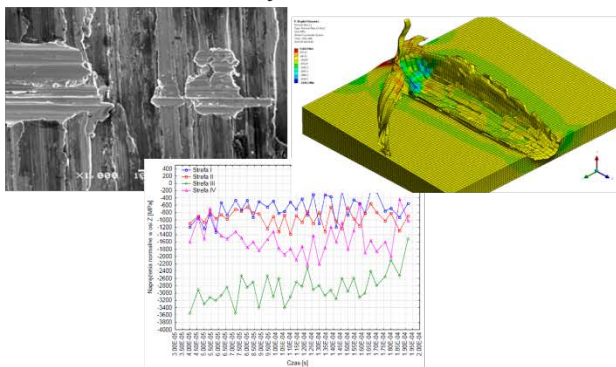
Badania eksperymentalne



Badania modelowe



Analiza wyników badań

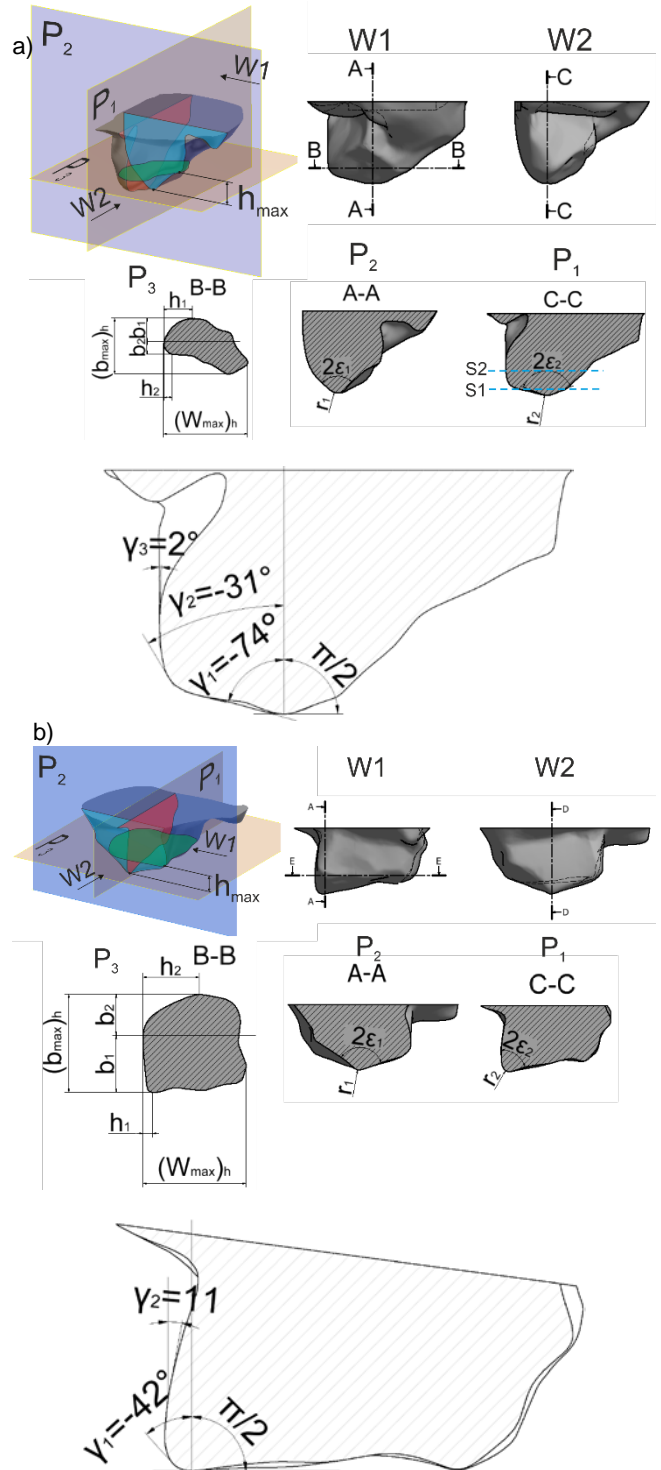


Rys. 4. System oceny cech geometrycznych ziarna ściernego

W określaniu cech geometrycznych ważne jest ustalenie położenia i kształtu powierzchni aktywnych naroża ostrza, a także parametrów wierzchołka ziarna  $\rho$  i  $2\epsilon$ , które mają wpływ na przemieszczanie się obrabianego materiału [6].

Geometria ziaren została przeanalizowana w trzech płaszczyznach (rys. 5), w których należy poszukiwać szczególnych cech stereometrycznych. W płaszczyźnie  $B-B$ , która jest prostopadłą do kierunku pracy ziarna, znajdują się dwa parametry określające geometrię wierzchołka ziarna  $r_1$  oraz  $2\epsilon_1$ . W płaszczyźnie  $C-C$  znajdują się kolejne dwa parametry  $r_2$  oraz  $2\epsilon_2$ , które razem z poprzednimi mają wpływ na oddzielanie materiału oraz tworzenie się strefy zastoju, a także

na proces formowania wióra oraz tworzenia bocznych przepływów materiału. Płaszczyzny  $D-D$  oraz  $E-E$  uzależnione są od zagłębienia ostrza  $h$ . Badania wykazały, że uzasadnione jest dokładne definiowanie cech geometrycznych strefy obróbki. Parametry geometryczne  $(b_{max})_h$  oraz  $(W_{max})_h$  opisują szerokość warstwy skrawanej oraz kształt mikroślada. Cechy geometryczne  $h_1$ ,  $b_1$  oraz  $h_2$ ,  $b_2$  opisane w przekroju  $E-E$  wpływają na długość drogi oraz opory bocznych przepływów odkształcanego materiału.



Rys.5. Cechy naroża ziarna ściernego, a) ziarno nr 1, b) ziarno nr 2; S1, S2 strefy wierzchołka ziarna o odmiennej geometrii, wpływającej na warunki procesu w strefie mikroskrawania

Przyjęto poniższy model współczynnika  $k$  od powyższych parametrów geometrycznych:



$$k(h) = 1 - \exp(-w)$$

$$w = Ch^{n_1} \left(\frac{b_1}{h_1}\right)^{n_2} \left(\frac{b_2}{h_2}\right)^{n_3} \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)^{n_4} r_1^{-n_5} r_2^{-n_6} \quad (4)$$

gdzie:  $n_1, \dots, n_6 > 0$

### Analiza kierunków przemieszczeń materiału

Analiza komputerowa procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem (rys. 6, 7) umożliwia na bardzo dokładną obserwację procesu formowania wypływek oraz formowania się wiórów. Wyselekcjonowane do analizy ziarno ścierne nr 1 posiada dwie klinowe płaszczyzny natarcia, które powodują powstawanie dwóch oddzielnych wiórów (rys. 6). Duże promienie zaokrąglenia ziarna ściernego oraz duże kąty natarcia, powodują powstawanie wypływek bocznych. Wypływki boczne oraz wielkości dna rysy zostały przeanalizowane bardzo szczegółowo (rys. 6), a ich wyniki umieszczono w tabelicy 1. Cechy geometryczne wybranego do analizy ziarna nr 1 (rys. 5a) znacznie odbiegają od ziarna nr 2 (rys. 5b). Posiada dużo większy kąt  $2\epsilon_1$ , który ma decydujący wpływ na formowanie bocznych wypływek poprzez zwiększenie długości drogi bocznych przepływów co ogranicza tworzenie wypływek, widoczne na rysunku 7, które są zdecydowanie mniejsze niż przy mikroskrawaniu ziarnem nr 1.

Wyznaczona zależność (4) dla mikroskrawania ziarnem nr 1 jest następująca:

$$k(h) = 1 - \exp(-w), \text{ gdzie}$$

$$w = Ch^{1,32} \left(\frac{b_1}{h_1}\right)^{n_2} \left(\frac{b_2}{h_2}\right)^{n_3} \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)^{n_4} r_1^{-n_5} r_2^{-n_6}$$

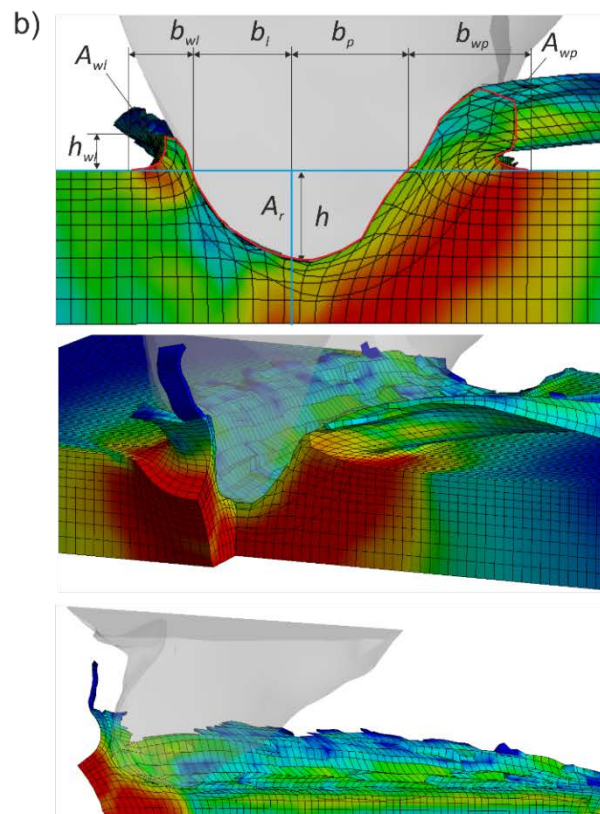
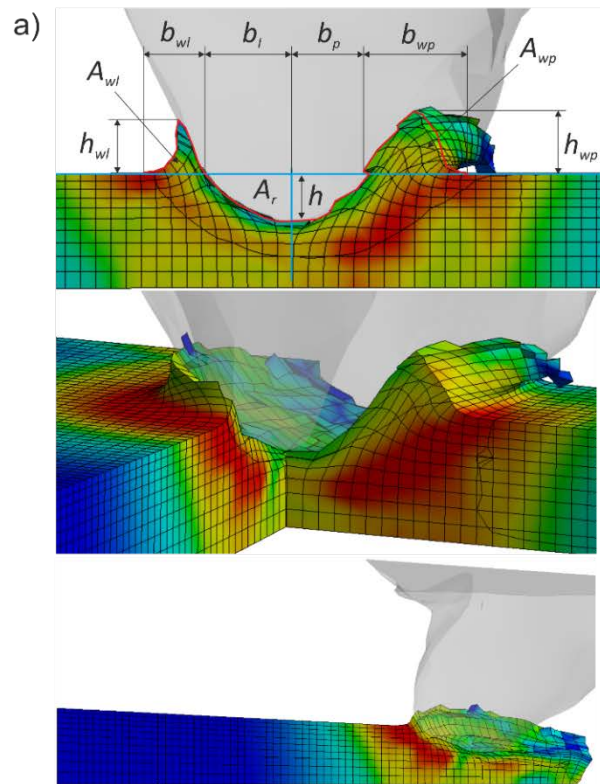
przy czym określono wartości  $n_2=n_3=0,5$ ,  $n_4=0,6$ ,  $n_5=0,4$ ,  $n_6=0,3$  odpowiadające opisanym cechom procesu.

W tabelicy 1 oraz 2 zawarte są wyniki bocznych przepływów materiału po mikroskrawaniu, gdzie numer kolejnych analiz oznacza, że: 1 – droga ziarna 1mm, 2 – droga ziarna 2mm, 3 – droga ziarna 3mm, 4 – droga ziarna 4mm, 5 – droga ziarna 4,5mm.

Analizując wyniki przedstawione w tabelicy 1 zaobserwano, że znaczna część obrobionego materiału podczas przemieszczania się ziarna na odcinku 3 mm została przekształcona do postaci bocznych wiórów wstęgowych. W położeniu, gdy zagłębienie ziarna  $h \geq 0,4$  mm zaobserwowano duże spęczanie materiału oraz formowanie wióra przed ziarnem, co oznacza zmianę warunków mikroskrawania, wynikającą z cech geometrycznych ziarna w fragmentach od jego wierzchołka powyżej 0,4 mm.

Tab. 1. Wyniki analiz bocznych przepływów materiału po mikroskrawaniu ziarnem nr 1

Nr	$h_{wl}$ [mm]	$b_{wl}$ [mm]	$b_l$ [mm]	$b_p$ [mm]	$b_{wp}$ [mm]	$h_{wp}$ [mm]	$A_{wl}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{wp}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_r$ [mm <sup>2</sup> ]	$h$ [mm]
1	0,253	0,282	0,431	0,331	0,464	0,292	0,022	0,072	0,113	0,212
2	0,236	0,254	0,400	0,412	0,552	0,312	0,031	0,091	0,141	0,273
3	0,184	0,323	0,422	0,484	0,561	0,344	0,034	0,124	0,165	0,342
4	0,287	0,371	0,462	0,501	0,632	0,411	0,043	0,142	0,253	0,391
5	0,183	0,296	0,465	0,553	0,571	0,424	0,021	0,144	0,292	0,425

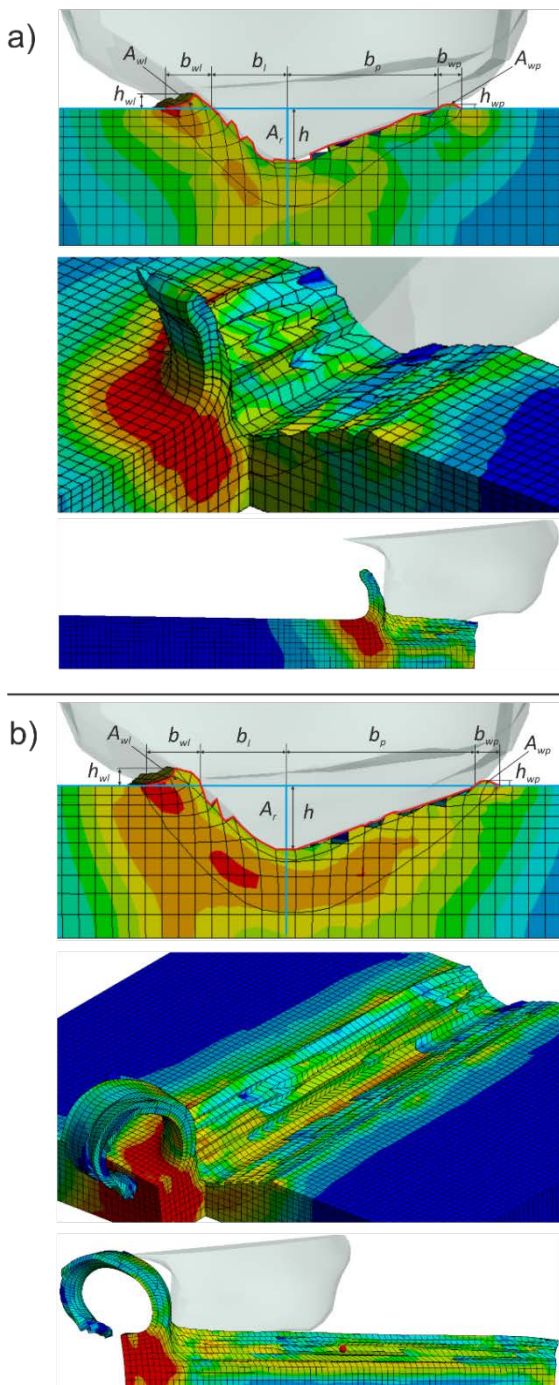


Rys. 6. Wyniki analizy przepływów materiału po mikroskrawaniu ziarnem nr 1; a) po pokonaniu przez ziarno drogi 1mm, b) po pokonaniu przez ziarno drogi 4,5mm

Z wyników przedstawionych w tabeli 2 (dla ziarna nr 2) o płaskiej powierzchni natarcia – przekrój E-E (rys. 5b) oraz z obrazów przedstawionych na rys. 7, można zaobserwować, że usuwanie materiału następuje w postaci odprowadzania wióra przed ostrzem.

Tab. 2. Wyniki analiz bocznych przepływów materiału po mikro-skrawaniu ziarnem nr 2

Nr	$h_{wl}$ [mm]	$b_{wl}$ [mm]	$b_l$ [mm]	$b_p$ [mm]	$b_{wp}$ [mm]	$h_{wp}$ [mm]	$A_{wl}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{wp}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_r$ [mm <sup>2</sup> ]	$h$ [mm]
1	0,056	0,182	0,322	0,630	0,098	0,014	0,005	0,001	0,111	0,217
2	0,060	0,175	0,347	0,700	0,119	0,014	0,004	0,001	0,146	0,256
3	0,056	0,207	0,357	0,756	0,070	0,018	0,006	0,001	0,166	0,277
4	0,084	0,224	0,350	0,777	0,130	0,021	0,002	0,001	0,168	0,252
5	0,070	0,217	0,357	0,784	0,105	0,015	0,009	0,001	0,174	0,273

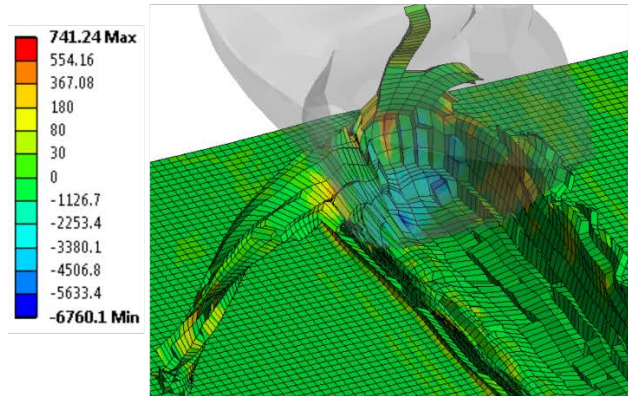


Rys. 7. Wyniki analizy bocznych przepływów materiału po mikro-skrawaniu ziarnem nr 2; a) po pokonaniu przez ziarno drogi 1 mm, b) po pokonaniu przez ziarno drogi 4,5 mm,

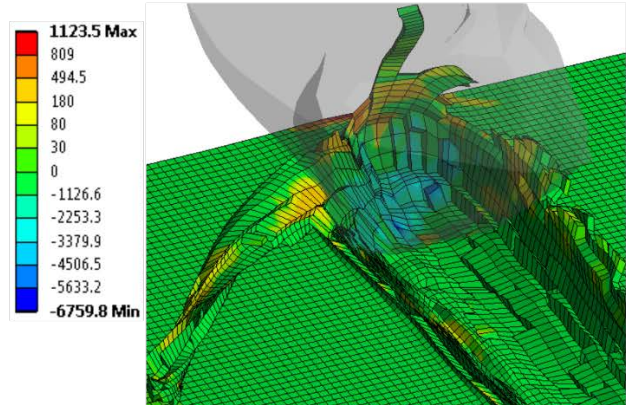
### Analiza naprężeń w strefie mikroskrawania

W celu dokładnego scharakteryzowania procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym, przeprowadzono analizę naprężeń oraz odkształceń [4, 7] w strefie naroży ściernych wyselekcjonowanych ziaren oznaczonych jako nr 1 oraz nr 2.

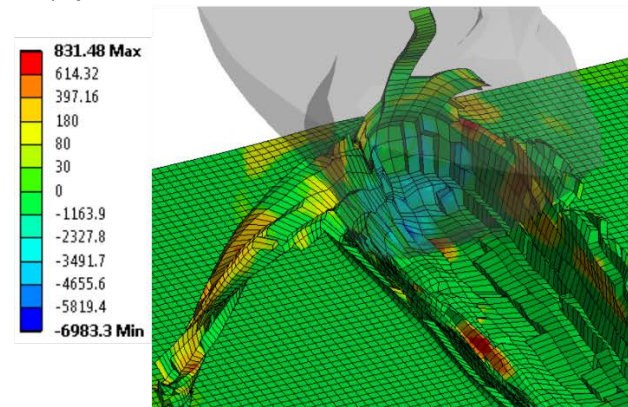
Naprężenia normalne w osi X



Naprężenia normalne w osi Y



Naprężenia normalne w osi Z



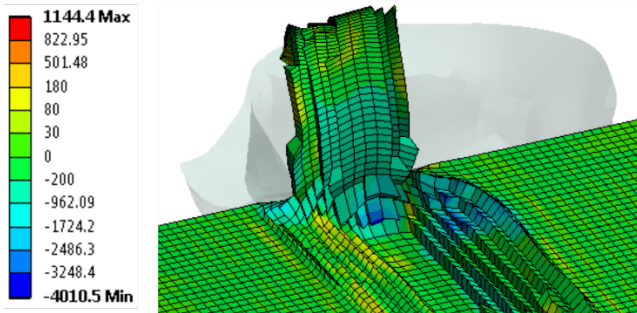
Rys. 8. Wyniki analizy naprężeń normalnych w osi X, Y, Z po pokonaniu przez ziarno nr 1 drogi 4,5 mm

Analizując wyniki naprężeń normalnych w osi X, Y, Z dla symulacji procesu mikroskrawania ziarnem nr 1 i 2, zaobserwowano, że ich zmienność charakteryzuje się pewną częstotliwością (rys. 10, 11, 12). Obserwuje się różnicę pomiędzy wynikami naprężeń normalnych w osi X występujących w śladzie po mikroskrawaniu ziarnem nr 1, w którym widoczne jest formowanie się wióra bocznego wstęgowego, a ziarnem nr 2 którego cechy geometryczne naroża powodują przepływy materiału do postaci wióra przedniego. Róż-

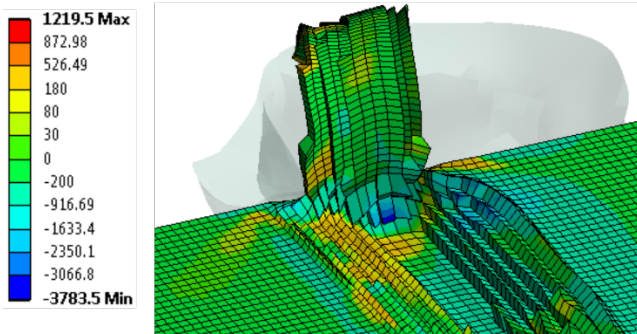


nica w formowaniu przepływów materiału ma znaczący wpływ na wyniki naprężeń normalnych także dla osi Y oraz Z. Cechy steometryczne naroża ziarna ściernego nr 1 użytego w symulacji, mają wpływ na powstawanie dużych naprężeń ściskających już od początku zagłębienia się w materiał. Największe naprężenia ściskające sięgające lokalnie nawet 8000 MPa występują w strefie intensywnych odkształceń plastycznych oraz zastoju materiału. W widocznym na rysunku 8 śladzie po mikroskrawaniu ziarnem nr 1 oraz na wykresie (rys. 9) widoczne są strefy, w których występują naprężenia rozciągające, w którym boczna składowa kierunku przemieszczenia materiału staje się coraz większa, co oznacza iż w tych fragmentach stref tworzą się boczne wypłytki materiału.

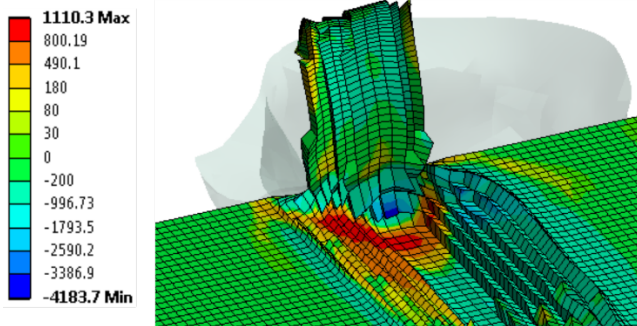
#### Naprężenia normalne w osi X



#### Naprężenia normalne w osi Y



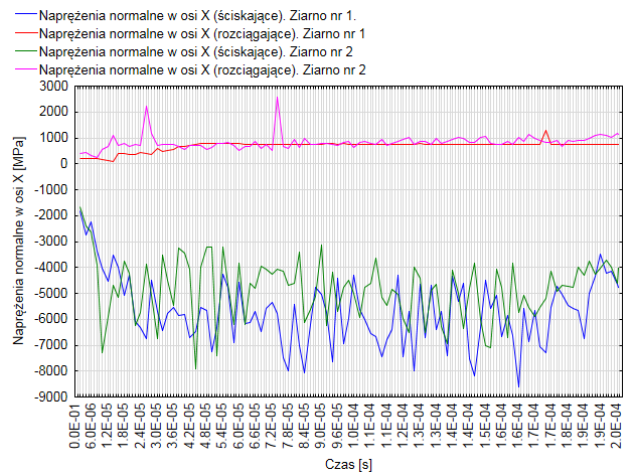
#### Naprężenia normalne w osi Z



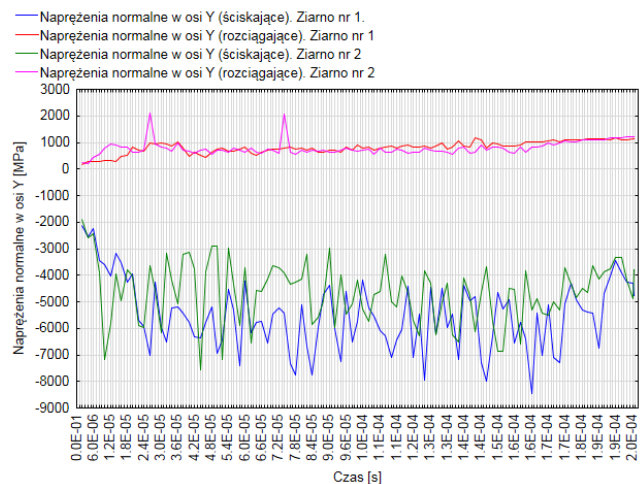
Rys. 9. Wyniki analizy naprężeń normalnych w osi X, Y, Z po pokonaniu przez ziarno nr 2 drogi 4,5 mm

Wyniki naprężeń normalnych procesu mikroskrawania ziarnem nr 2 pokazują, że największa kumulacja trójosiowego stanu ściskania występuje w strefie intensywnych odkształceń plastycznych, które występują przed ostrzem. Geometria mikronaroży biorących aktywny udział w procesie oddzielania materiału ziarna nr 2 oddziałuje na powstawanie naprężeń rozciągających, których największa kumulacja widoczna jest pod ziarnem ściernym oraz po lewej stronie wypłytki bocznej. Można więc zaobserwować, wpływ kąta ścinania  $\epsilon_1$  (rys. 5), który jest większy po lewej stronie, na wyniki naprężeń normalnych.

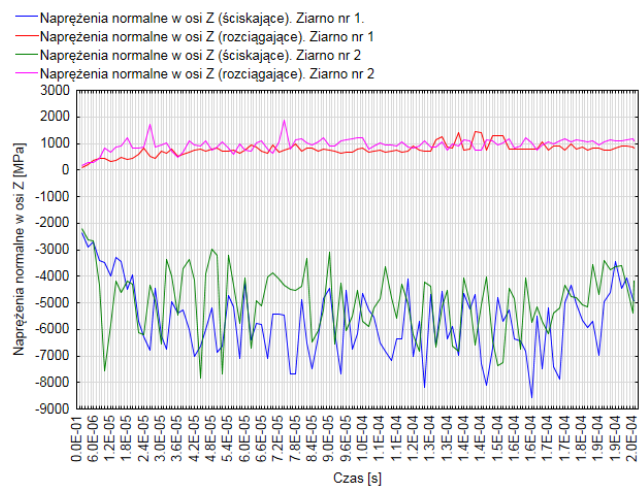
Widoczne na rysunkach 8 i 9 wyniki naprężeń normalnych, które występują za ziarnem należy traktować jako naprężenia resztkowe. Wyniki naprężeń dla całego przebiegu procesu mikroskrawania przedstawione są w formie wykresów na rysunkach 10, 11, 12.



Rys. 10. Wyniki analizy naprężeń normalnych w osi X w czasie procesu mikroskrawania ziarnem nr 1 i 2



Rys. 11. Wyniki analizy naprężeń normalnych w osi Y w czasie procesu mikroskrawania ziarnem nr 1 i 2



Rys. 12. Wyniki analizy naprężeń normalnych w osi Z w czasie procesu mikroskrawania ziarnem nr 1 i 2

Analiza naprężeń normalnych (rys. 10, 11 i 12) dla osi X, Y oraz Z pozwala określić częstotliwość cyklicznych zmian wartości naprężeń. Zmianom naprężeń towarzyszy zmienność zagłębienia ostrza. Zaobserwować można, że w chwili zgłębiania się ziarna w materiał naprężenia rosły, a w momencie, gdy zmniejszała się lokalna wartość zagłębienia naprężenia w znacznym stopniu zaczynały maleć. 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.

### Podsumowanie

W procesie mikroskrawania, o niekorzystnym zjawisku występowania wypływek na bokach rowka, tworzonego narożem ziarna ściernego, decyduje relacja między oporem bocznym przepływu materiału, a oporem przemieszczania materiału wzdłuż powierzchni natarcia ostrza. Decydujący wpływ na to zjawisko ma kształt ziarna ściernego oraz własności obrabianego materiału. Należy zauważyć, iż w mikroskrawaniu dominują boczne (względem toru ziarna) przepływy materiału, podczas gdy zwykle analizuje się tylko geometryczne warunki tworzenia wióra, w przekroju prostopadłym do powierzchni przedmiotu i równoległym do kierunku ruchu ostrza. Przeprowadzone przez autorów badania symulacyjne dają podstawy do prowadzenia dalszych badań nad zjawiskami zachodzącymi w obszarze naroża ściernego.

### LITERATURA

- 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.
- 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.
- 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
- Kacalak W., Królikowski T., Rypina Ł., Modelowanie naprężeń i przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym z wykorzystaniem środowiska Ansys – cz. II, *Mechanik NR8-9/2014* str. 171-175/724.
- 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.
- Kacalak W., Królikowski T., Rypina Ł., Badanie procesu mikroskrawania z wykorzystaniem zintegrowanego systemu rejestracji obrazów szybkozmiennych, *Mechanik NR 8-9/2013* str. 203-211.
- 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.
- Kacalak W., Tandecka K., Sempruch R., Badania modelowe procesu mikroskrawania, *Mechanik NR 8-9/2013* str. 189-202.
- Kacalak W., Teoretyczne podstawy minimalizacji energii właściwej w procesach obróbki ścierniej, *XX Naukowa Szkoła Obróbki Ścierniej*, Poznań 1997, str. 77-81.
- 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.
- 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.
- 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.
- Outeiro J.C., Umbrello D., M<sup>o</sup>Saoubi 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.
- Sima M., Özel 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.