

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

## Modelowanie konstrukcji przecinaków ściernych diamentowych ze spoiwem żywicznym

### Modeling the structure of cut-off diamond grinding wheels resinoid bonded

MIROSLAW URBANIAK \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.394

W artykule podjęto problematykę modelowania konstrukcji ściernic ze ścierniwem diamentowym i spoiwem żywicznym, będącą kontynuacją opracowanego systemu eksperckiego projektowania i oceny technologicznej tych ściernic. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń w modelowaniu 2D przedstawiono wersję modelowania bryłowego 3D z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Inventor Professional 2014/15.

**SŁOWA KLUCZOWE:** modelowanie, diamentowe ściernice do przecinania, spoiwo żywiczne, metoda elementów skończonych

*Article discusses structural modeling diamond grinding wheels and binder resin, which is a continuation of the developed expert system design and evaluation of technology these wheels. Based on past experience in modeling 2D shows the version of 3D solid modeling using Autodesk Inventor software 2014/15.*

**KEYWORDS:** modeling, cut-off diamond grinding wheels, resinoid bond, finite element method

#### Wprowadzenie

W procesach wytwarzania operacje szlifowania odnotowują wzrost udziału narzędzi z supertwardymi materiałami ściernymi: diamentem i regularnym azotkiem boru (cBN). Na szczególną uwagę zasługują ściernice ze spoiwem żywicznym jako narzędzia stosunkowo tanie z uwagi na technologię ich wykonania, a posiadające szeroki zakres zastosowań. W zależności od rodzaju materiału ściernego można nimi szlifować różne materiały funkcjonalne. Ściernice diamentowe wykorzystuje się głównie do obróbki ceramiki, szkła, grafitu, węglików spiekanych, włókna szklanego

wzmacnianego zbrojeniem szklanym lub węglowym, półprzewodników, azotków krzemu oraz supertwardych materiałów polikrystalicznych. Ściernice cBN, posiadające wyższą odporność termiczną i chemiczną, mają zastosowanie przede wszystkim do obróbki stali hartowanych stopowych (stałe szybko tnące, chromowe, łożyskowe strukturalne i proskowe), ale również do materiałów magnetycznych i stopów metali nieżelaznych, np. Ni-Cr-Al-Ce.

Ściernice z supertwardym materiałem ściernym i spoiwem żywicznym cechuje duża wydajność obróbki przy jednoczesnym zachowaniu niskich temperatur procesu szlifowania. Z tych względów znajdują one często zastosowanie do przecinania ściernicowego przecinakami niewzmacnianymi [1, 2] oraz zgrubnego i dokładnego szlifowania wałków, również bezkłowo. W zakresie szlifowania dokładnego ściernice ze ścierniwem supertwardym i spoiwem żywicznym skutecznie konkurują ze ściernicami posiadającymi spoiwo ceramiczne w operacjach szlifowania stali stopowych (chromowych) oraz do szlifowania części wykonywanych z węglików krzemu, węglików wolframu [3, 4] i z materiałów ceramicznych (tlenek glinu, tlenek glinu z domieszką tytanu, dwutlenek cyrkonu, azotek krzemu) [5].

Elastyczne utwardzenie ziaren ściernych w spoiwie żywicznym w porównaniu do ściernic o takiej samej wielkości ziaren ze spoiwem ceramicznym i metalowym umożliwia łatwiejsze uzyskiwanie mniejszych chropowatości powierzchni szlifowanej. Sprzyja temu również polegujące działanie niektórych spoiw żywicznych domieszkowanych napełniaczami między innymi w postaci konwencjonalnych mikroziaren ściernych elektrokorundu [6].

Zdecydowana większość omawianych ściernic posiada spoiwa żywiczne wykonywane z wykorzystaniem żywicy fenolowo-formaldehidowych. Z powodu dużej sztywności tych żywicy spoiwa modyfikuje się kauczukiem wykorzystując reaktywność chemiczną w stosunku do żywicy, prowadzącą do otrzymania układów jednofazowych, poprawiających

\* prof. dr hab. inż. Mirosław Urbaniak (miroslaw.urbaniak@p.lodz.pl) – Katedra Technologii Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka

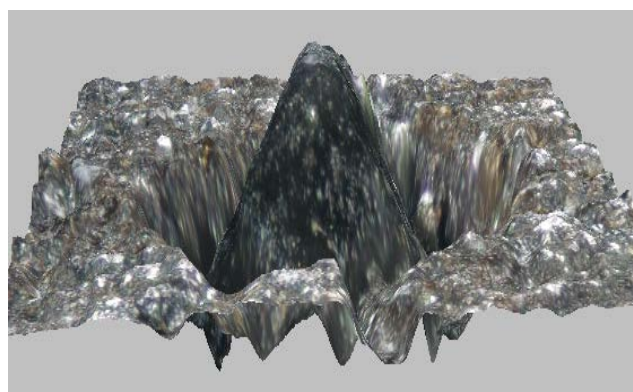
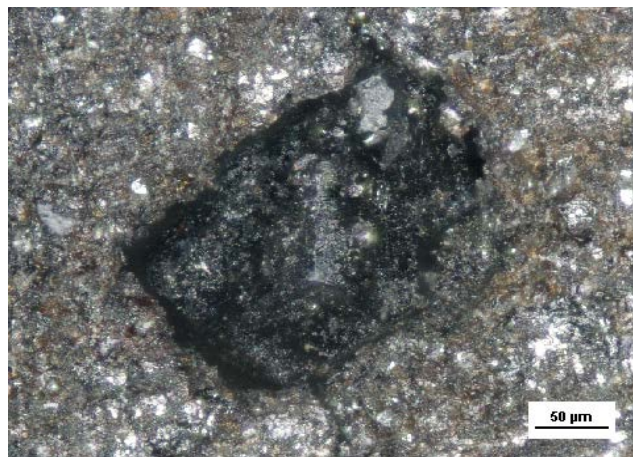
jednorodność spoiw. Zauważalny w ostatnich latach postęp w zakresie inżynierii polimerów przekłada się również na wzrost możliwości ściernic ze ścierniwem supertwardym i spoiwem żywicznym. Przykładem może być tu zastosowanie nowych żywic poliimidowych na kompozycje spoiw. Żywice te umożliwiają pracę ściernic z temperaturą powyżej trzystu stopni, a nawet powyżej czterystu. Nie natrafiono jednak dotąd na szersze potwierdzenie literaturowe.

Mając na uwadze przytoczone wyżej spektrum zastosowań ściernic ze ścierniwem supertwardym i spoiwem żywicznym oraz zasygnalizowane trendy w rozwoju inżynierii polimerów można przyjąć, że istnieją duże możliwości w kształtowaniu właściwości spoiw żywicznych [7], a więc i nowych możliwości takich ściernic.

Rozszerzający się zakres zastosowań ściernic ze ścierniwem supertwardym i spoiwem żywicznym i możliwość specjalizacji ich konstrukcji do szczególnych zadań technologicznych skutkuje większą ilością wariantów spoiw, różniących się składem i technologią wykonania. Taką wiedzę korzystnie jest gromadzić w bazach danych i bazach wiedzy oraz modelach neuronowych systemów eksperckich, ogólnie określanych sztuczną inteligencją. Zastosowanie technik informatycznych sprawia, że łatwo dostępne wyniki wcześniejszych doświadczeń umożliwiają szybsze i efektywniejsze ich wykorzystanie w planowaniu kolejnych nowych zastosowań. Zagadnienie to zostało rozwiązane w eksperckim systemie projektowania kompozytu ściernic ze ścierniwem supertwardym i spoiwem żywicznym oraz oceny ich właściwości eksploatacyjnych [8]. Zawarto w nim możliwość projektowania składu chemicznego i fizycznego ściernic wraz z optymalizacją zawartości komponentów. Stąd można było optymalizować zestaw dodatków proponowanych i oceniać ich wpływ na jakość spoiw i wykonanych z nimi ściernic. Opracowany system ekspercki w części dotyczącej właściwości skrawnych jest uogólnionym modelem przebiegu operacji szlifowania uwzględniającym współpracującą parę ściernica – przedmiot szlifowany z ich cechami indywidualnymi jak charakterystyka ściernicy i gatunek materiału obrabianego z uwzględnioną obróbką cieplną oraz rzeczywisty stan maszyny.

Wykonane prace i analizy materiałowe umożliwiły następnie przystąpienie do rozwiązywania problemu konstrukcji ściernic. Merytorycznym wzbogaceniem i przyspieszeniem rozwoju procesów szlifowania ściernicami ze ścierniwem supertwardym i spoiwem żywicznym, z racji specyfiki ich konstrukcji, w której spoiwo wypełnia przestrzeń między ziarnami, może być modelowanie strefy kontaktu i symulowanie przebiegu tych procesów z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Techniki te umożliwiają wniknięcie w obszary trudno mierzalne i pozwalają sprawdzać niekonwencjonalne rozwiązania konstrukcyjne ściernic przed ich próbami aplikacyjnymi. Ten kierunek prac jest istotnym, następnym etapem działań uzupełniającym opracowany system i stał się celem niniejszego opracowania.

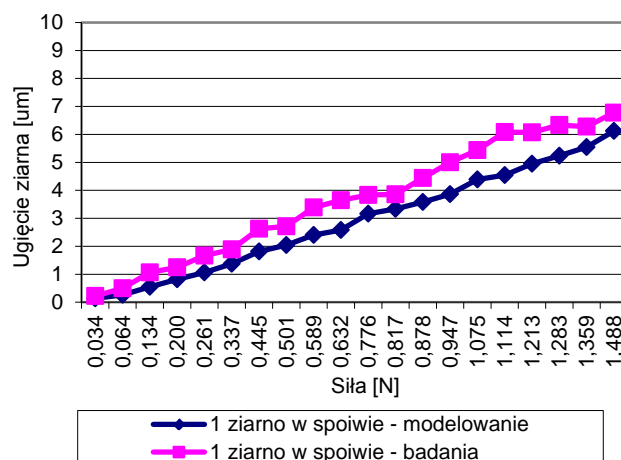
W tym zakresie dokonywane były już analizy rozkładu naprężeń w spoiwie i przemieszczeń ziaren ściernych w publikacjach referowanych również na obradach Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej [9]. Modelowanie takie realizowano z zastosowaniem programu Ansys w płaskim układzie współrzędnych, prostopadłym do czynnej powierzchni ściernic. Weryfikację takiego modelowania przeprowadzono wykorzystując specjalnie wykonaną tarczę spoiwa ściernicy z kilkoma pojedynczymi kryształami diamentu, rozmieszczonymi w znacznych odległościach od siebie. Widok ziarna ściernego w takiej tarczy pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Obraz płaski i przestrzenny pojedynczego ziarna ściernego

Istotnym wynikiem obserwacji obrazów były ubytki spoiwa wokół ziarna. Ubytki te mogły powstać przez słabe przyleganie spoiwa do ziarna diamentowego wspomaganie wytarciem spoiwa przez produkty współpracy tarczy z próbką odstawiającą ziarno (mikrościerniwo i mikrowióry).

W eksperymencie weryfikującym modelowanie MES ziarno o wielkości 126  $\mu\text{m}$  (wg FEPA) było obciążane prostopadle do powierzchni tarczy igłą korundową z płaskim wierzchołkiem. Wyniki modelowania oraz jego weryfikacji podczas obciążania siłą normalną do powierzchni spoiwa z diamentem przedstawia rysunek 2.



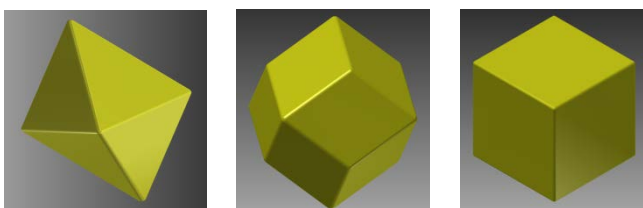
Rys.2. Wpływ normalnej siły obciążającej na ugięcie ziarna i spoiwa o module Younga 8840 MPa względem korpusu ściernicy w analizach komputerowych i badaniach weryfikujących [9]

Wartości sił i przemieszczenia ziarna w badaniach doświadczalnych były wartościami średnimi z kilku pomiarów. Porównując przebiegi przemieszczeń ziarna i spoiwa w analizach komputerowych i badaniach weryfikujących można uznać, że wykazały one dość dobrą zbieżność w wynikach. Różnice między wartościami z pomiarów i wartościami uzyskanymi z modelowania wynosiły 15 – 25 %, a ich maksymalna wartość wynosiła około  $1 \mu\text{m}$ , co było porównywalne z dokładnością stosowanych czujników pomiarowych.

### Modelowanie 3D

Przytoczone wyżej wyniki badań i analiz skłoniły do podjęcia próby modelowania przestrzennego konstrukcji ściernic. Ze względu na dużą pracochłonność prowadzonych wcześniej prac w programie Ansys zastosowano tu program Autodesku – Inventor Professional w wersji 2014 i następnie 2015. Mając doświadczenie w konstrukcjach części maszyn uznano, że warto sprawdzić ten popularny program w projektowaniu kompozytu, jakim jest ściernica diamentowa ze spoiwem żywicznym, wykorzystując następnie moduł analizy naprężeń.

Przebieg modelowania obejmował w pierwszej kolejności projekty kryształów diamentu. Przyjęto podstawowe postaci krystalograficzne: ośmiościan (60% spotykanych diamentów naturalnych), dwunastościan rombowy (30%) i sześciąt (10%). Przedstawiono je na rysunku 3.

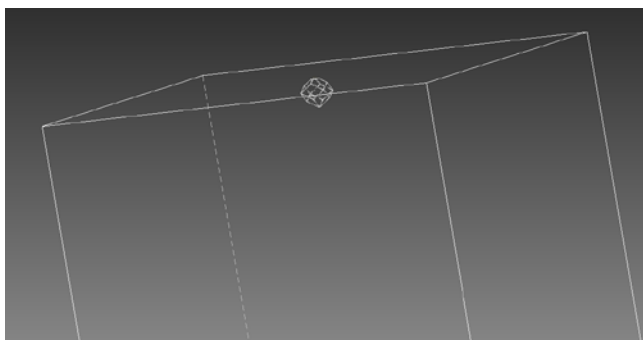


Rys. 3. Modele kryształów diamentu: ośmiościan, dwunastościan, sześciąt

Zbudowano modele dla ziaren o wielkości wg FEPA 63, 91, 126. Promienie na krawędziach i wierzchołkach przyjęto, po obserwacjach mikroskopowych, równe  $3 \mu\text{m}$ .

#### ■ Pojedyncze ziarno w spoiwie

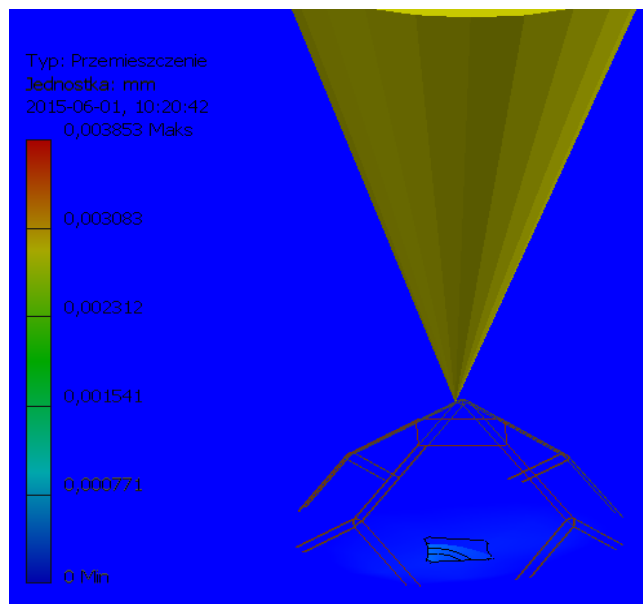
Pierwszym etapem modelowania było powtórzenie w nowej wersji 3D weryfikowanego poprzednio modelowania 2D. Założenia materiałowe do modelowania przyjęto takie same, jak wcześniej, odpowiednio dla spoiwa moduł Younga  $E=8840 \text{ MPa}$  i liczbę Poissona  $\nu=0,289$ , a dla ziarna diamentowego, moduł Younga  $E=2 \times 10^6 \text{ MPa}$  i liczbę Poissona  $\nu=0,300$ .



Rys. 4. Model diamentu  $126 \mu\text{m}$  w kostce spoiwa

W kostkę spoiwa o wymiarach  $1,5 \times 1,5 \text{ mm}$  i wysokości  $3 \text{ mm}$  wstawiono diament dwunastościenny o rozmiarze  $126 \mu\text{m}$ , co pokazano na rysunku 4.

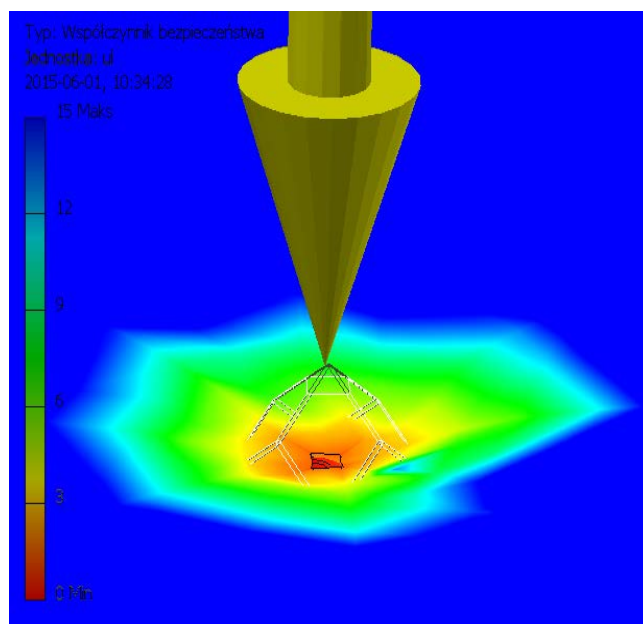
Diament obciążono siłą prostopadłą do powierzchni spoiwa o wartości  $1 \text{ N}$ . Graficzny wynik symulacji obciążenia pod względem przemieszczeń ilustruje rysunek 5.



Rys. 5. Graficzny wynik symulacji przemieszczenia ziarna diamentowego pod obciążeniem  $1 \text{ N}$  (powiększenie strefy otoczenia diamentu)

Osiągnięta wartość przemieszczenia ziarna wynosi  $3,9 \mu\text{m}$ . Porównując ten wynik z danymi przedstawionymi na rysunku 1 dla takiego samego obciążenia (ugięcie  $4,4 \mu\text{m}$ ) można przyjąć przyzwoitą zgodność z modelowaniem 2D.

O wytężeniu spoiwa można sądzić na podstawie wartości współczynnika bezpieczeństwa względem granicy plastyczności tego materiału. Na rysunku 6 przedstawiono graficzną mapę obciążeń i obszar krytyczny o czerwonej barwie.

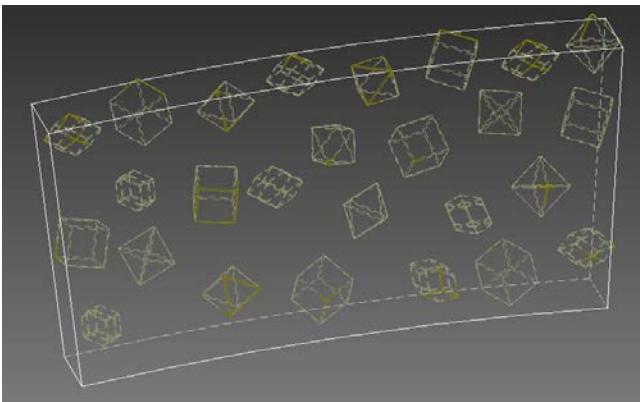


Rys. 6. Mapa współczynnika bezpieczeństwa obciążeń w spoiwie pod obciążeniem ziarna diamentowego o wartości  $1 \text{ N}$  (powiększenie strefy otoczenia diamentu)

W tym przypadku promień oddziaływania obciążenia wynosi około 200  $\mu\text{m}$ . Wokół ziarna są to małe obciążenia ze współczynnikiem bezpieczeństwa cztery i większym. W bezpośrednim kontakcie spoiwa z ziarnem wynoszą przeważnie dwa. Natomiast w małym obszarze naprzeciw kierunku siły obciążającej wartości współczynnika bezpieczeństwa sięgają wartości poniżej jedności świadcząc o niedopuszczalnym przekroczeniu plastycznego obciążenia spoiwa.

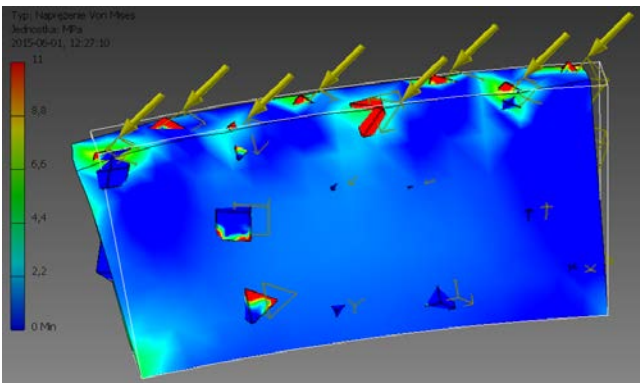
### ■ Segment ściernicy

Drugim etapem modelowania było zbudowanie dziesięciostopniowego segmentu ściernicy do przecinania o średnicy 100mm i wysokości 0,3 mm. Grubość warstwy ścierniej wynosiła 3 mm. W spoiwie umieszczono ziarna diamentowe wszystkich trzech rodzajów (ośmiościany, dwunastościany i sześciściany) o ziarnistości 91 z koncentracją 50 – stosowaną w przecinakach ściernych. Krawędziowy model tego segmentu pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Model segmentu ściernicy do przecinania

Założono symulację statyczną. Przygotowując symulację obciążenia założono, że ściernica pracuje włącznie przecinając materiał. Warstwa ścierna była unieruchomiona wiazaniem do korpusu aluminiowego na średnicy wewnętrznej. Każde ziarno skrawające, którego wierzchołek znajduje się nad zewnętrzną powierzchnią spoiwa, obciążono siłą skrawania 0,14 N. Współczynnik proporcjonalności pomiędzy składowymi styczną i normalną siły szlifowania podczas przecinania, jak wynika z wcześniejszych badań [10], wynosi około jeden. Wyniki symulacji pokazano na kolejnych rysunkach. Na rysunku 8 widoczna jest mapa naprężeń zredukowanych Hubera.

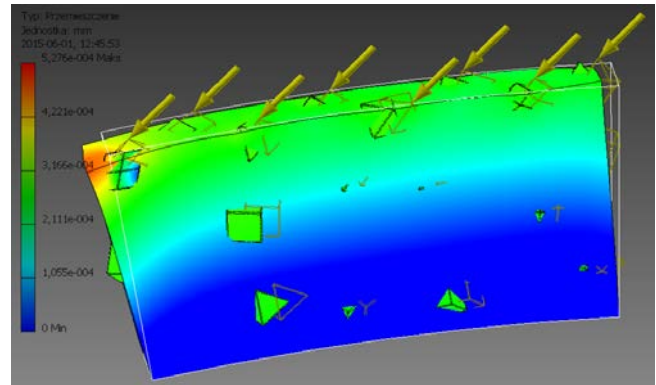


Rys. 8. Mapa rozkładu naprężeń w segmentie ściernicy pod obciążeniem siłami 0,14 N

Obciążenia w diamentach w skali na pasku kolorów dobrano dla analizy stanu spoiwa. W diamentach takie warto-

ści nie są groźne. Spoiwo natomiast jest obciążone w obszarze do 2,2 MPa.

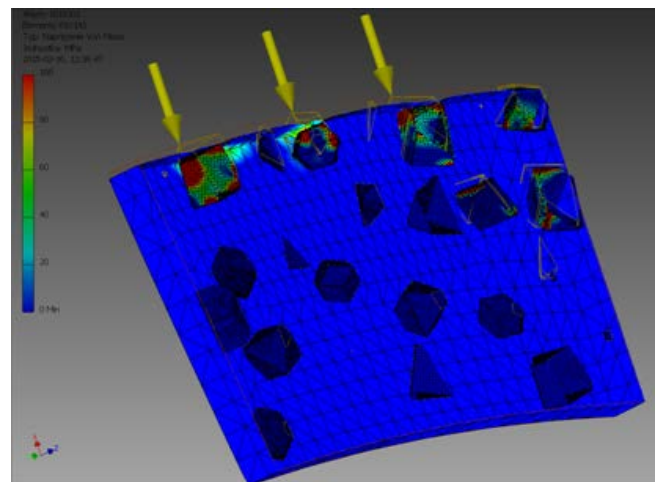
Odształcenia warstwy ścierniej pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Mapa przemieszczeń w segmencie ściernicy pod obciążeniem siłami 0,14 N

Z analizy tego rysunku wynika, że odkształcała się cała warstwa zewnętrzna ściernicy o grubości około 0,8 mm w kierunku działających sił o 0,25  $\mu\text{m}$ . Następnie występowała warstwa przejściowa o podobnej grubości z malejącymi odkształceniami. Natomiast współczynnik bezpieczeństwa dla symulowanego przypadku był w całej objętości powyżej dziewięciu dla całego segmentu.

Interesujące byłoby jeszcze poznanie stanu naprężeń wewnątrz ściernicy. Utworzenia takiego przekroju jednak pokazało, że wykorzystywany program prezentuje graficznie tylko mapy powłokowe. Wnętrze bryły spoiwa było puste. Przekrój rozpatrywanego segmentu ściernego pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Przekrój segmentu ściernego

Aby uzyskać potrzebną wiedzę o wewnętrznych obciążeniach w ściernicy należy przenieść opracowany model do innych programów. Można plik modelu zapisać w formacie dostępnym dla programu Ansys lub otworzyć w programie Autodesku Simulation Mechanical i tam rozpocząć dalsze analizy.

### Podsumowanie

Zaprezentowany sposób modelowania ściernic do przecinania wydaje się realistyczny. Wskazało na to odniesienie do podstawowej weryfikacji doświadczalnej. Może to więc być racjonalny, uproszczony sposób projektowania i analizy

konstrukcji ściernic. Samo modelowanie jest znacznie łatwiejsze, szczególnie dla ściernic o małej wysokości, na której zależy użytkownikom i producentom ściernic do przecinania.

W procedurze modelowania najbardziej uciążliwe jest tworzenie złożonych brył ziaren i spoiwa. Przed ich złożeniem trzeba przygotować przestrzeń gniazda dopasowaną do ziarna, aby można było je następnie umieścić w spoiwie. Większą trudność stanowią takie ziarna, które są umieszczone w całości w spoiwie. Wiązanie wzajemne kolejnych płaszczyzn wymaga dobrej wyobraźni przestrzennej.

#### LITERATURA

1. Pollak M., Tota J., Wilk W.: „Ściernice diamentowe ze spoiwem żywicznym do przecinania”. Materiały XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Rzeszów -Myczkowce 2000r., str.: 156-162.
2. Pollak M., Tota J.: „Bezkorpusowe ściernice diamentowe ze spoiwem żywicznym do przecinania”. Materiały XXV Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Wrocław - Duszniki Zdrój 2002r., str.: 293-300.
3. Abdullah A., Pak A., Farahi M., Barzegari M.: „Profile wear of resin-bonded nickel-coated diamond wheel and roughness in creep-feed grinding of cemented tungsten carbide”. Journal of Materials Processing Technology 183 (2007), str.: 165-168.
4. Agarwal S., Yenkaeswara Rao P.: „Grinding characteristics, material removal and damage formation mechanisms in high removal rate grinding of silicon carbide”. International Journal of Machine Tools.
5. Huang H., Yin L.: „Grinding characteristics of engineering ceramics in high speed regime”. International Journal of Abrasive Technology 1/2007, str.: 78-93.
6. Marzec S., Pytko S.: Trybologia procesów skrawanie metali, nowe ciecze chłodząco-smarujące, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Kraków 1999.
7. Praca zbiorowa pod redakcją Urbaniaka M. Sprawozdanie pt. „Spoiwo polimerowe nowej generacji w zastosowaniu do narzędzi ściernych i okładzin hamulcowych. Część III – Narzędzia ściernic”. Projekt badawczo-rozwojowy nr R05 044 02. Politechnika Łódzka. Łódź 2010.
8. Urbaniak M.: „System projektowania i oceny ściernic supertwardych ze spoiwem żywicznym”, Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź 2013.
9. Skowron M. Urbaniak M.: "Weryfikacja doświadczalna ugięcia spoiwa, utwardzenia ziarna ściernego oraz ugięcia ściernic supertwardych ze spoiwem żywicznym". Obróbka ścierna. Współczesne problemy. Praca pod redakcją Adama Barylskiego. Gdańsk 2011, str. 91-102.
10. Bojanowska J., Urbaniak M.: "Porównanie wybranych właściwości użytkowych diamentowych ściernic ze spoiwem żywicznym do przecinania węglików spiekanych", Materiały XXXVII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Koszalin 2014r., str. 58-61.