

Mariola CHOROMAŃSKA, Krzysztof KUKIELKA, Rafał KURCEK,
Monika FORYSIEWICZ

NOWOCZESNE METODY SYMULACYJNE WSPOMAGAJĄCE PROCES DOBORU NARZĘDZI ŚCIERNYCH DO OBRÓBKI CZĘŚCI SAMOCHODOWYCH

Streszczenie

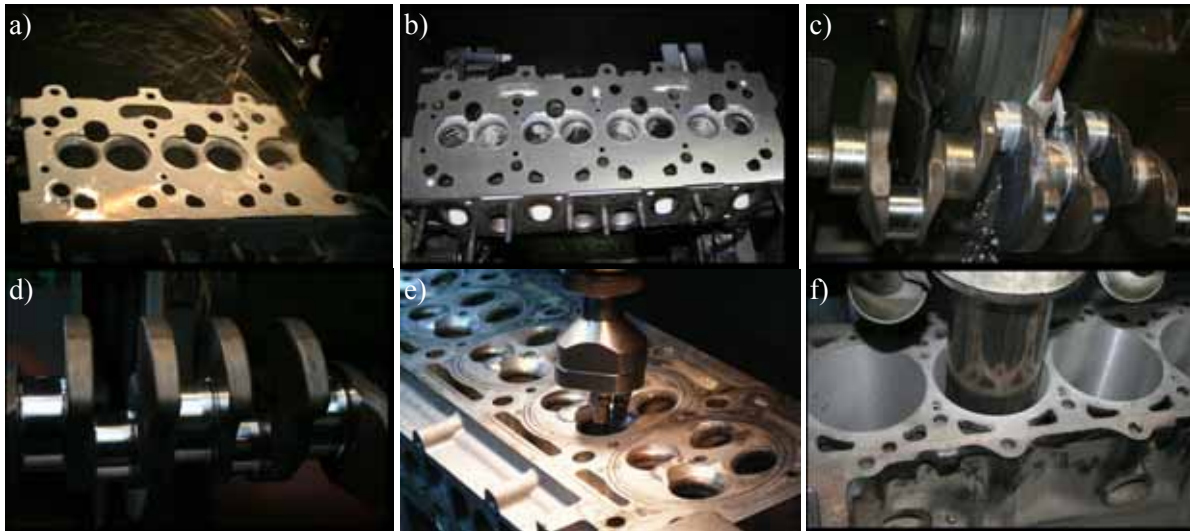
Artykuł dotyczy nowoczesnych systemów symulacyjnych wspomagających proces doboru narzędzi ściernych. Opisano aplikację SKRAWANIE POJEDYNCZYM ZIARNEM ŚCIERNYM w systemie AN-SYS/LS-DYNA, służącej do kompleksowej analizy stanów odkształceń i naprężeń w przedmiocie obrabianym. Przedstawiono wyniki analizy wrażliwości wpływu stopnia zagęszczenia siatki elementów skończonych na efekty skrawania. Zamieszczono przykładowe mapy odkształceń zastępczych i naprężeń zastępczych dla różnych wariantów zagęszczenia siatki elementów skończonych. Wyniki symulacji mogą być podstawą doboru narzędzi ściernych do obróbki części samochodowych.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, metoda elementów skończonych, skrawanie pojedynczym ziarnem ściernym.

WSTĘP

Jakość użytkowa wyrobu zależy m.in. od nowoczesności konstrukcji, rodzaju zastosowanych materiałów i technologii wykonania poszczególnych części samochodowych (rys. 1). Wymusza to ciągle doskonalenie metod projektowania, rozwój inżynierii materiałowej i technologii wytwarzania. Jedną z ważnych cech jakości użytkowej wyrobu jest odporność na zużywanie się. Odporność ta charakteryzowana jest najczęściej właściwościami warstwy wierzchniej poszczególnych części wyrobu. Dzięki poznaniu wpływu stanu warstwy wierzchniej na poszczególne właściwości eksploatacyjne części samochodowych, możemy w sposób świadomy nimi sterować i uzyskiwać wymagany jej stan. Głównymi przyczynami powstawania wad powierzchni oraz odchyłek wymiarowo-kształtowych są odkształcenia sprężyste wywołane siłami skrawania, odkształcenia cieplne oraz zużycie ściernicy i jej odkształcenie sprężyste, co powoduje zmiany długości styku średnicy z przedmiotem.

Do tradycyjnych metod obróbki wykończeniowej zalicza się proces szlifowania, docierania, gładzenia oraz polerowania [1]. Obróbka ścierna jest odmianą obróbki skrawaniem, w której usuwanie zbędnego materiału odbywa się za pomocą narzędzi ściernych lub luźnych ziaren. Liczne ziarna o nieokreślonej geometrii mają nieregularne kształty, wiele krawędzi i wierzchołków. Orientacja ziaren względem głównych kierunków kinematycznych w chwili zetknięcia z materiałem ma charakter losowy. Podczas obróbki ścierniej poza wiórowym usuwaniem nadmiaru występują także sprężyste, plastyczne i lepkie odkształcenia materiału.



Rys. 1. Szlifowanie: głowicy (a, b); wału korbowego (c, d); gniazd zaworów (e); cylindrów (f)

Źródło: <http://www.auto-szlif.info/galeria.html>.

O efektach procesu szlifowania decydują zjawiska zachodzące w strefach kontaktu ziarna ściernego z materiałem przedmiotu obrabianego. Badanie tych zjawisk w rzeczywistych warunkach skrawania jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Dlatego też nowoczesnymi metodami do analizy tych zjawisk są komputerowe symulacje numeryczne [4, 5]. Głównymi zaletami symulacji komputerowej w porównaniu z innymi metodami analizy procesu są [5]:

- elastyczność modelu – polega na łatwości wprowadzania zmian w modelu symulowanego procesu oraz łatwość uzupełniania modelu o nowe zjawiska,
- łatwość wprowadzania różnego rodzaju wymuszeń i zakłóceń (losowych) oraz zakłóceń i wymuszeń ekstremalnych bez zniszczenia zazwyczaj kosztownego modelu materialnego,
- stosunkowo niewielki koszt i czas przygotowania symulacji,
- wiarygodność wyników symulacji – w szczególności gdy można porównać wyniki symulacji z wynikami otrzymanymi z pomiarów na obiekcie rzeczywistym.

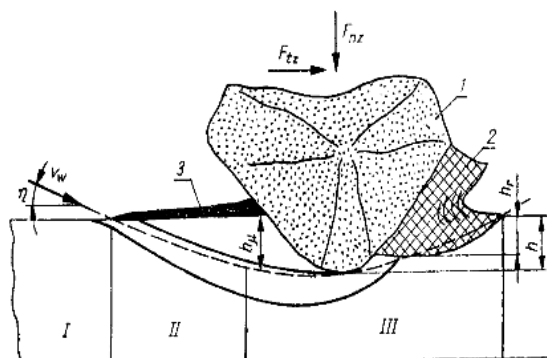
Na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej prowadzone są badania nad opracowaniem aplikacji do symulacji procesu SKRAWANIA POJEDYNCZYM ZIARNEM ŚCIERNYM. Aplikacja umożliwi kompleksową analizę czasową stanów deformacji (przemieszczeń, odkształceń) i naprężeń, występujących w obiekcie składającego się z przedmiotu i narzędzia, dla przestrzennych stanów naprężeń i płaskich stanów przemieszczenia i odkształcenia [4, 5]. Możliwa jest pełna analiza dla następujących danych [5]:

- dowolna geometria przedmiotu (np. wałek, tuleja) i narzędzia,
- dowolnego materiału przedmiotu (dowolny moduł Younga, nieliniowa zależność właściwości plastycznych materiału od: odkształceń i prędkości odkształceń, różne modele umocnienia itp.) oraz materiału narzędzia,
- różnych warunków tarcia w obszarze kontaktu,
- dowolnego przemieszczenia poziomego i pionowego narzędzia w czasie.

Schemat procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym przedstawiono na rysunku 2.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy wrażliwości układu, która jest definiowana jako miara zmiany odpowiedzi tego układu, spowodowana zmianą wybranego parametru nazywanego zmienną decyzyjną. W przypadku obliczeń MES procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym ważnym problemem jest określenie jaka jest wrażliwość maksymalnych odkształceń i naprężeń w punktach dyskretnych przedmiotu na: zmianę wymiarów elementu skończonego, liczbę elementów skończonych i funkcję kształtu elementu [5]. W celu określenia istotności wpływu liczby elementów skończonych przeprowadzono analizę wrażliwości. Uzyskane w ten sposób model efektywny procesu może posłużyć do konstrukcji no-

wych narzędzi ściernych jak i doboru warunków realizacji procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym.



Rys. 2. Oddziaływanie narzędzia ściernego na materiał: a) schemat ogólny, b) geometria ostrzy pojedynczego ziarna; 1 – przedmiot obrabiany, 2 – ziarna ścierna, 3 – spoiwo, 4 – wiór, 5 – pory [3]

1. MODEL KOMPUTEROWY SKRAWANIA POJEDYNCZYM ZIARNEM ŚCIERNYM

Do symulacji wykorzystano środowisko Ansys/LS DYNA, obiekt zamodelowano jako płaski (2D), dla płaskiego stanu odkształcenia i przestrzennego stanu naprężenia. Narzędzie traktowano jako ciało idealnie sztywne ($E \rightarrow \infty$), natomiast materiał obrabiany, jako ciało sprężysto/lepko-plastyczne ze wzmocnieniem nieliniowym (rys. 3) [4].

W symulacjach komputerowych przyjęto model materiałowy sprężysto/lepko – plastyczny Cowpera-Symondsza. W modelu wykorzystuje się warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky’ego oraz stowarzyszone prawo płynięcia. Model Cowpera-Symondsza uwzględnia liniowo-izotropowe ($\beta=1$) (przyjęte w symulacjach), kinematyczne ($\beta=0$) lub mieszane ($0 < \beta < 1$) wzmocnienie plastyczne oraz wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego, według zależności potęgowej [2]:

$$\sigma_p = [1 + (\dot{\varphi}_i^{(p)} / C)]^m (R_e + \beta E_p \varphi_i^{(p)}), \quad (1)$$

gdzie:

β – jest parametrem umocnienia,

R_e [MPa] – początkowa, statyczna granica plastyczności,

$\dot{\varphi}_i^{(p)}$ [s^{-1}] – intensywność prędkości odkształceń plastycznych,

C [s^{-1}] – parametr materiałowy określający wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego,

$m = 1/P$ – stała materiałowa określająca wrażliwość materiału na prędkość odkształcenia plastycznego,

$\varphi_i^{(p)}$ [–] – intensywność odkształcenia plastycznego,

$E_p = \frac{E_T E}{E - E_T}$ – parametr materiałowy zależny od modułu umocnienia plastycznego

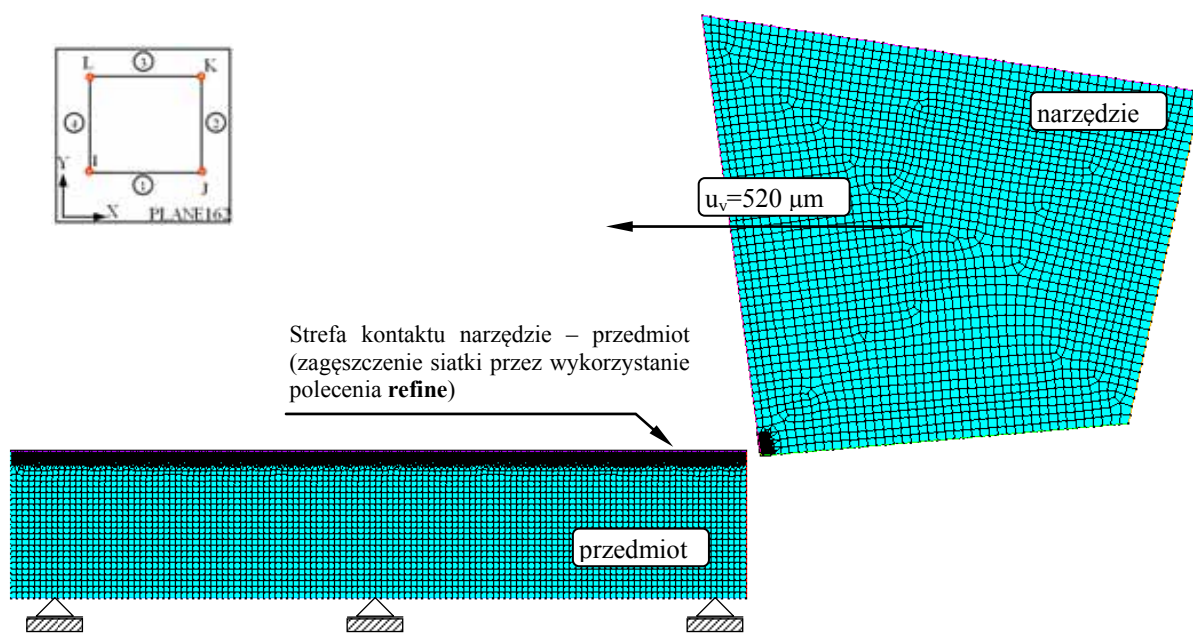
$E_T = \partial \sigma_p / \partial \varphi_i^{(p)}$ i modułu sprężystości Younga E .

Symulacje komputerowe zostały przeprowadzone dla następujących wartości parametrów materiałowych dla stali S235JR: współczynnik Poissona $\nu = 0,27$, moduł Younga $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa, początkowa granica plastyczności $R_e = 310 \cdot 10^6$ Pa, moduł umocnienia li-

niowego $E_T = 763 \cdot 10^6$ Pa, gęstość $\rho = 7865$ kg/m³, umocnienie izotropowe $\beta = 1$, parametry materiałowe $C = 40$ s⁻¹ i $m = 0,2$, odkształcenie graniczne $\epsilon_{gr} = 0,75$.

Stałe materiałowe dla narzędzia, gdzie przyjęto typ materiału Rigid (nieodkształcalny), moduł Younga $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa, gęstość $\rho = 7865$ kg/m³, współczynnik Poissona $\nu = 0,27$.

Przedmiot jak i narzędzie dyskretyzowano elementami cztero węzłowymi typu PLANE 162, z liniową funkcją kształtu. W obszarze kontaktu warunki brzegowe dla przemieszczeń są nieznanne. Odebrano translacyjne oraz rotacyjne stopnie swobody dla węzłów na spodzie przedmiotu. Na narzędzie nałożono przemieszczenie w kierunku $u_x = 520$ μm (rys. 3) oraz głębokość skrawania $u_y = 30$ μm .



Rys. 3. Dyskretny model komputerowy w aplikacji SKRAWANIE POJEDYNCZYM ZIARNEM ŚCIERNYM w systemie ANSYS do symulacji procesu szlifowania z widocznymi warunkami brzegowymi dla przemieszczeń

Źródło: Opracowanie własne.

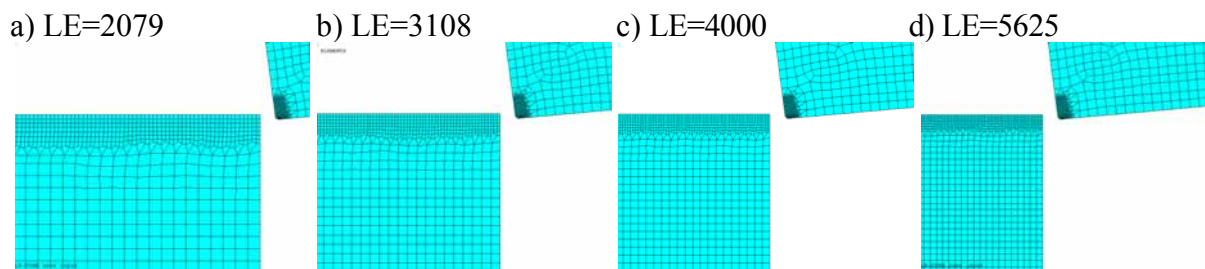
Odporodni podział obszaru na elementy skończone jest bardzo istotny. Pozwala na uzyskanie dokładniejszych wyników symulacji przy możliwie najmniejszej liczbie elementów skończonych. Korzystna liczba elementów skończonych, zapewnia optymalną liczbę stopni swobody, co bezpośrednio wpływa na czas prowadzonych obliczeń komputerowych. Warianty zagęszczenia siatki elementów skończonych pokazano na rysunku 4. W miejscach, gdzie występują nieliniowości geometryczne i/lub fizyczne, tj. strefa kontaktu dwóch ciał, połączenie różnych elementów konstrukcyjnych, karby, strefy narażone na duże deformacje itp. używa się między innymi opcji Refine. Opcja ta zwiększa liczbę elementów skończonych w tych miejscach. W ten sposób ograniczamy znacznie liczbę elementów skończonych.

Liczbę elementów skończonych i liczbę węzłów dla poszczególnych wariantów zagęszczenia siatki dla elementu skończonego przedstawia tabela 1.

Tab. 1. Warianty zagęszczenia siatki elementów skończonych

LE - liczba elementów	2079	3108	4000	5625	11904
LW - liczba węzłów	4905	5980	6907	8587	14932

Źródło: Opracowanie własne

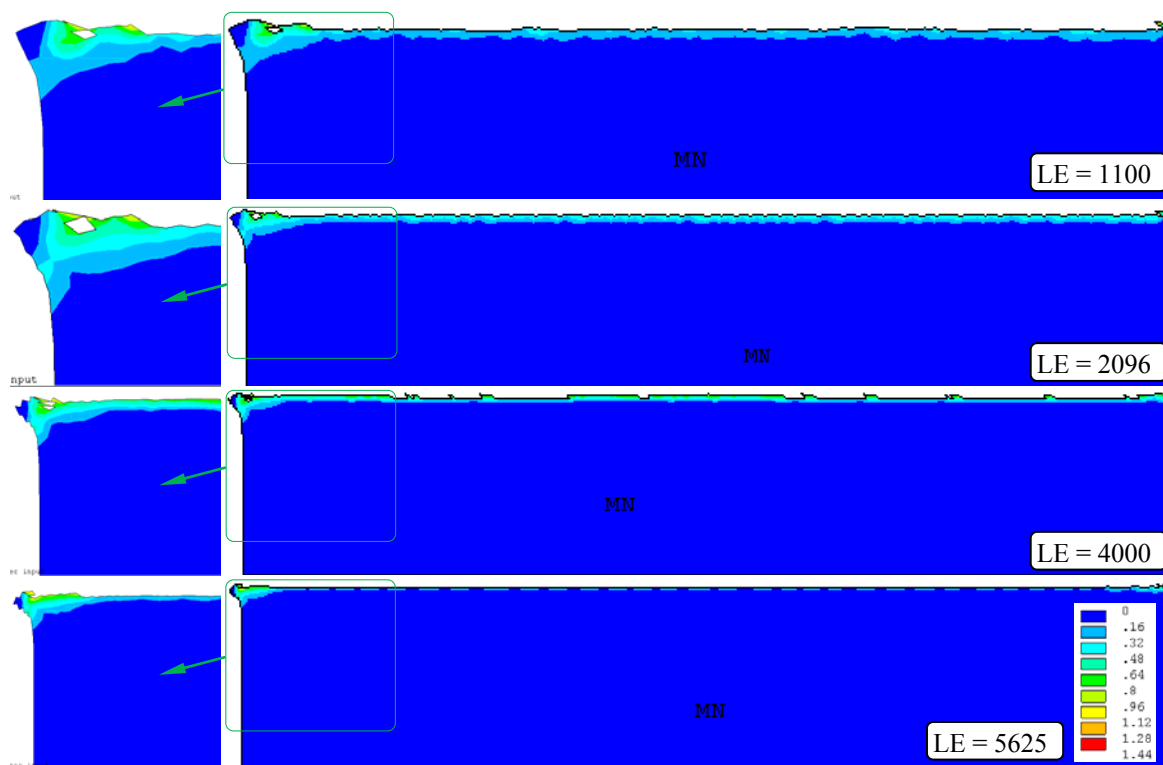


Rys. 4. Warianty zagęszczenia siatki dla różnych liczb elementów skończonych

Źródło: Opracowanie własne.

2. WYNIKI SYMULACJI

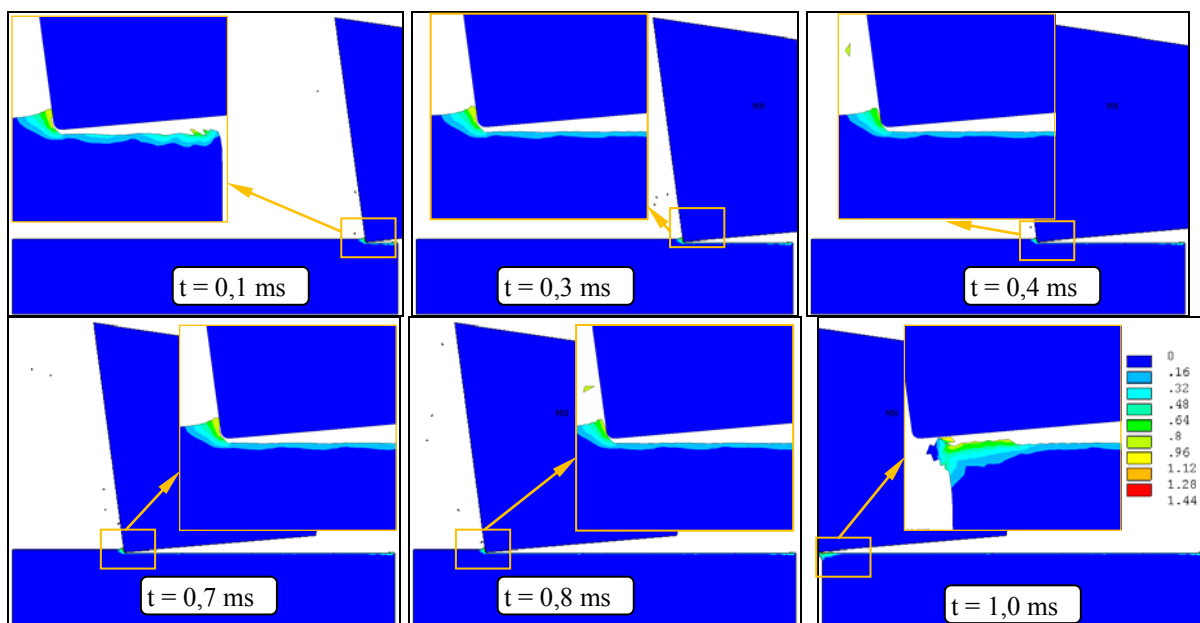
Z przeprowadzonych symulacji wynika, iż wpływ zagęszczenia siatki elementów skończonych na wartość odkształceń zastępczych zwłaszcza w strefie kontaktu narzędzie-przedmiot i bezpośrednim otoczeniu jest dość istotny. Zwiększenie liczby elementów skończonych powoduje, iż elementy, które ulegają skasowaniu w trakcie trwania analizy są coraz mniejsze. Efekt ten bezpośrednio wpływa na dokładność odwzorowania powierzchni po procesie skrawania pojedynczym ziarnem ściernym. Wzrost ten, wpływa również na kształt zadziora, co można zaobserwować w powiększonych obszarach na rysunku 5.



Rys. 5. Mapy odkształceń zastępczych dla różnych wariantów zagęszczenia siatki elementów skończonych po procesie skrawania pojedynczym ziarnem ściernym

Źródło: Opracowanie własne.

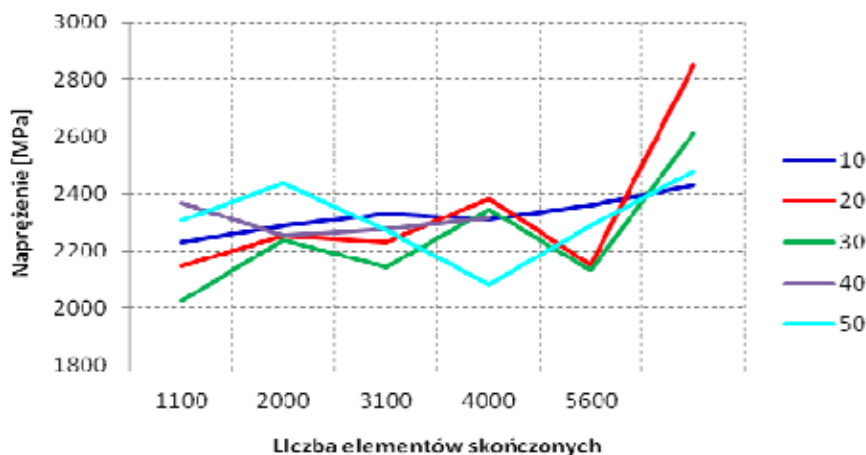
Widok mapy odkształceń zastępczych w różnych fazach przemieszczania się pojedynczego ziarna ściernego wzdłuż powierzchni przedmiotu dla liczby elementów skończonych 5625 pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Mapy odkształceń zastępczych dla siatki posiadającej 5625 elementów skończonych w różnych chwilach trwania procesu

Źródło: Opracowanie własne.

Wpływ zagęszczenia siatki elementów skończonych na wartości naprężeń dla różnych kroków obliczeniowych (różnej fazy trwania procesu) przedstawia rysunek 7. Można stwierdzić, że w początkowej fazie procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym, wartość naprężeń zastępczych jest dość stabilna dla wszystkich wariantów liczby elementów skończonych. W końcowej fazie przesuwania się ziarna ściernego wartość naprężeń zastępczych zaczyna wzrastać, co może być spowodowane powstawaniem zadzióra (rys. 5 i 8) lub zamocowania przedmiotu obrabianego w układzie obróbkowym.

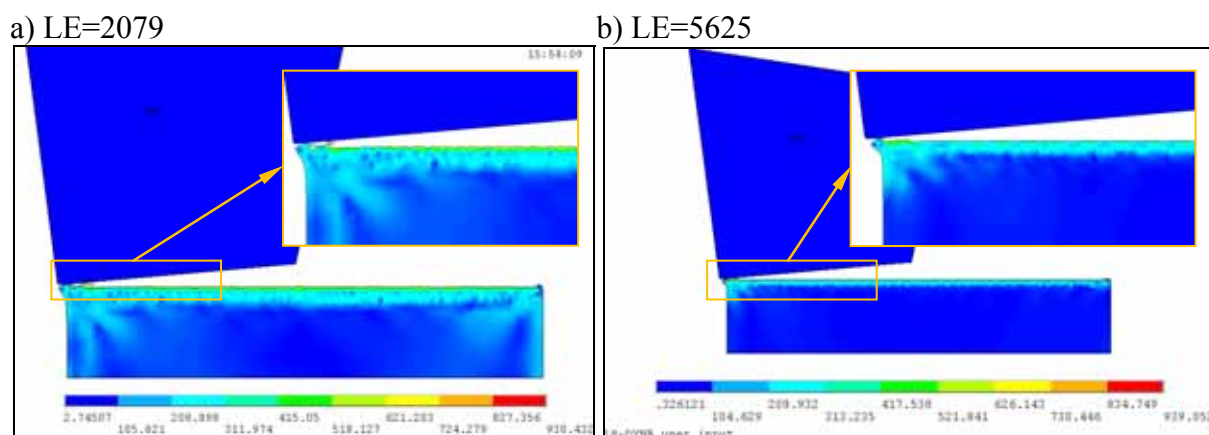


Rys. 7. Wykres przedstawiający zależność naprężeń zastępczych od liczby elementów skończonych w różnych etapach trwania procesu

Źródło: Opracowanie własne.

Liczba elementów skończonych ma istotny wpływ na dokładność obliczeń numerycznych, ponieważ grubość usuwanej warstwy wierzchniej się zmniejsza wraz ze wzrostem liczby elementów skończonych. Większa liczba elementów skończonych, powoduje znaczne przybliżenie wyników symulacji do procesu realizowanego w warunkach rzeczywistych. Decyduje ona również o spadku obliczonej chropowatości powierzchni po procesie skrawania i mniejszej

głębokości zalegania naprężeń w WW. Również naprężenia powstające przy wejściu i wyjściu narzędzia skrawającego przyjmują bardziej regularny kulisty kształt. Rysunek 8 przedstawia przykładowe wyniki naprężeń zastępczych dla dwóch wybranych wariantów liczby elementów skończonych.



Rys. 8. Mapy naprężeń zredukowanych (MPa) dla różnych wariantów siatki elementów skończonych
Źródło: Opracowanie własne.

Skrawanie jako obróbka jakościowa ma na celu uzyskanie odpowiedniej chropowatości powierzchni. Analizując model komputerowy po przejściu ostrza, wraz ze wzrostem liczby elementów skończonych, powierzchnia elementu obrabianego coraz bardziej przypomina powierzchnie uzyskiwaną podczas rzeczywistej obróbki. Spowodowane jest to mniejszą wielkością pojedynczego elementu skończonego, który jest usuwany przez ostrze ziarna. Obiekt podzielony na 2079 elementy posiada powierzchnię bardzo nierówną, z wgłębieniami poniżej linii ostrza. W końcowym odcinku obiektu skrawanego, grad powstaje ze zbyt dużej ilości materiału nieusuniętego podczas skrawania, pomimo przejścia w tym miejscu ziarna skrawającego. Sytuacja zmienia się wraz ze wzrostem zagęszczenia elementów skończonych. Grad zaczyna odpowiadać uzyskiwanemu w rzeczywistej obróbce.

WNIOSKI

Proces szlifowania jest nieliniowym zagadnieniem brzegowo-początkowym. W procesie występują nieliniowości: geometryczna i fizyczna oraz nieliniowe warunki brzegowe w obszarze kontaktu. Analityczne rozwiązanie tego problemu jest niemożliwe. Możliwe jest natomiast rozwiązanie numeryczne z wykorzystaniem opracowanej aplikacji, która pozwala na analizę procesu w dowolnej chwili czasowej w zależności od zadanych parametrów przyjętego modelu materiałowego.

W złożonych procesach obróbki ścierniej, w których materiał kształtowany ma więcej niż jeden stopień swobody, intuicja lub doświadczenie mogą okazać się niewystarczające w przewidywaniu mechaniki procesu. Wizualizacja procesu jest w tym przypadku bardzo przydatnym i efektywnym narzędziem. Modelowanie jakościowe może być wykorzystane do uzyskania szybkiej odpowiedzi na pytanie: jak i gdzie popłynie odkształcony materiał w procesie skrawania ziarnem ściernym.

Przeprowadzona symulacja procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym pozwala stwierdzić, że w pewnych przedziałach liczb elementów skończonych użytych do podziału geometrii próbki badanej, nie wpływa na dokładność uzyskanych wyników naprężeń zastępczych. Może to być spowodowane niewystarczającą liczbą elementów skończonych. Natomiast symulacja zachowania się materiału obiektu skrawanego, była tym bardziej bliska rzeczywistości, im bardziej zwiększało się zagęszczenie elementów skończonych. Dlatego też

w dalszych badaniach należałoby zająć się nie tylko analizowaniem naprężeń zastępczych i odkształceń zastępczych, ale także innymi zjawiskami fizycznymi występującymi podczas procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym.

BIBLIOGRAFIA

1. Kurcek R., *Modelowanie komputerowe i analiza numeryczna procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym*. Praca inżynierska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2012.
2. ANSYS LS – DYNA User's Guide.
3. Oczóś K., *Szlifowanie. Podstawy i technika*. WNT, Warszawa, 1986.
4. Kukielka L., Szczepańska M., Chodór J., *Modelowanie dyskretne i analiza numeryczna procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym metodą elementów skończonych*. Obrabiarki Sterowane Numerycznie i Programowanie Operacji w Technikach Wytwarzania, Radom 2009.
5. Kukielka K., *Modelowanie i analiza numeryczna stanów deformacji i naprężeń w warstwie wierzchniej gwintów o zarysach trapezowym i łukowym walcowanych na zimno*. Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2009.

MODERN SIMULATION METHODS SUPPORT OF SELECTION ABRASIVE TOOLS FOR CAR PARTS PROCESSING

Abstract

This article concern to modern simulation systems which can support the process of grinding tools selection. The application of SINGLE GRINDING GRAIN in ANSYS/LS-DYNA system, let for complex time analysis of the state of strain and stress in work-pieces. Exemplary results of sensitivity analysis where influence density on finite element grid of grinding effect is observed. Exemplary maps of strain equivalent and stress equivalent for various variant of the finite element grid density were shown. Results of simulation can be used to selection of the grinding tool for machining on car parts.

Key words: finite element method, numerical analysis, machining with single abrasive grain.

Autorzy:

mgr inż. **Mariola Choromańska** – Politechnika Koszalińska

dr inż. **Krzysztof Kukielka** – Politechnika Koszalińska

inż. **Rafał Kurcek** – Politechnika Koszalińska

mgr inż. **Monika Forsiewicz** – Politechnika Koszalińska