

STRESZCZENIE

Głównym celem rozprawy było opracowanie numerycznego modelu procesu mikroskrawania uwzględniającego konsekwentne skrawanie dwóch warstw materiału obrabianego. W zaproponowanym modelu zastosowano sprzężone sformułowanie Eulera-Lagrange'a (CEL), zaimplementowane w metodzie elementów skończonych (MES). Poprawność predykcji modelu numerycznego została potwierdzona na podstawie doświadczalnych prób mikrofrezowania obejmujących pomiary składowych siły całkowitej oraz oszacowanie minimalnej grubości warstwy skrawanej.

W pierwszej części rozprawy dokonano przeglądu literaturowego najważniejszych technik symulacji numerycznych stosowanych do modelowania procesu mikroskrawania, przedstawiając ich podstawowe założenia, zarys historyczny oraz przykłady zastosowania we współczesnych badaniach. Przedstawiono również przegląd metod analitycznych, doświadczalnych oraz symulacyjnych do identyfikacji parametru minimalnej grubości warstwy skrawanej.

W badaniach wstępnych opracowano model numeryczny MES ze sprzężonym sformułowaniem Eulera-Lagrange'a (CEL) uwzględniający warunki mikroskrawania pojedynczej warstwy materiału. Określono wpływ gęstości siatki w modelu CEL na zbieżność szacowanych wartości składowych siły całkowitej oraz czas obliczeniowy. Nowy model CEL porównano ze stosowanym w literaturze modelem z arbitralnym sformułowaniem Lagrange'a-Eulera (ALE) w warunkach bruzdowania i skrawania. Wykazano przewagę nowego rozwiązania CEL pod względem stabilności modelu, jakości predykcji kształtu formowanego wióra oraz czasu obliczeniowego.

W badaniach zasadniczych na podstawie opracowanego modelu MES/CEL uwzględniającego konsekwentne przejścia dwóch ostrzy dokonano predykcji składowych siły całkowitej w układzie narzędzia w funkcji grubości warstwy skrawanej. Na podstawie wyników predykcji wykazano, że stan warstwy wierzchniej powstały w wyniku nagniatania powierzchnią przyłożenia podczas pierwszego przejścia ostrza wywiera jakościowy i ilościowy wpływ na wartości składowych siły całkowitej oraz minimalnej grubości warstwy skrawanej w drugim przejściu ostrza. Analiza rozkładu zmiennych w strefie skrawania oraz kształtu formowanego wióra wykazała jakościowy wpływ odkształceń resztkowych w warstwie wierzchniej na mechanizm formowania wióra w drugim przejściu ostrza. Na podstawie wartości składowych siły całkowitej w układzie narzędzia oszacowanych modelem MES sformułowano hybrydowy analityczno-numeryczny model sił mikrofrezowania frezem walcowo-czołowym. Opracowany model umożliwił predykcję przebiegów czasowych, częstotliwościowych i miar statystycznych składowych siły całkowitej. Z porównania sił zamodelowanych z doświadczalnymi wynika, że wartości oszacowane za pomocą modelu uwzględniającego drugie przejście ostrza zapewniały mniejszy błąd oszacowania wartości doświadczalnych, w stosunku do wartości uzyskanych dla modelu pojedynczego przejścia ostrza. Potwierdza to zasadność stosowania w symulacjach numerycznych konsekwentnych przejść ostrzy w celu zamodelowania efektu ciągłości i cykliczności procesu mikroskrawania.

Rozprawę podsumowano przedstawiając wnioski poznawcze, wnioski utylitarne oraz wnioski do dalszych badań w zakresie numerycznego modelowania procesu mikroskrawania.

ABSTRACT

The main objective of this dissertation was the development of numerical model for microcutting process that involves consecutive cutting of two material layers. Proposed model utilizes coupled Eulerian-Lagrangian formulation (CEL) implemented in the finite element method (FEM). Subsequently, proposed model was validated with micromilling experiment that involved the measurements of cutting force components and minimum uncut chip thickness estimations.

In the first part of the dissertation, the literature survey of main numerical methods for modeling the microcutting process was presented. For each numerical method a brief description of their modeling assumption, historical background and examples of applications in contemporary research was presented. Additionally, the literature survey includes an outline of analytical, experimental and numerical methods for minimum uncut chip thickness estimations.

The preliminary research involved the development of benchmarking FEM/CEL model for microcutting of single material layer. With benchmarking model, the influence of mesh density on the force convergence and computational time was investigated. The capabilities of new CEL approach was evaluated against the microcutting model with an arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation. The comparison revealed the clear advantages of the new CEL approach in terms of model stability, accuracy of chip's free surface approximation and computational efficiency.

The main research involved the predictions of cutting force components in the tool coordinate system as a function of uncut chip thickness, using the proposed FEM/CEL microcutting model consisting of two consecutive tool passes. Predictions of force values revealed, that the subsurface layer formed through the ploughing phenomena during the first tool pass has a quantitative and qualitative influence on the force components and minimum uncut chip thickness occurring in the second tool pass. Furthermore, the analysis of the field variables' distribution and predicted chips' geometries revealed the qualitative influence of the residual strain in subsurface layer onto the chip formation mechanism. Force components predicted with the first and second tool pass CEL model were transformed into the machine tool coordinate system through proposed hybrid analytical-numerical model. Developed model allowed the direct comparison of force predictions with an experimental micromilling force signals in the time and frequency domain, and provided means for statistical analysis of estimation accuracy. Analysis revealed that the force model based on data from subsequent tool pass, which considers a longer cutting path and conditions of ongoing cutting process is characterized by a higher estimation accuracy comparing to single pass FEM model. This observation confirms the validity of the second tool pass consideration in the proposed numerical model.

In the final part of the dissertation, the cognitive and utilitarian conclusions were presented, together with conclusions for further research.