



**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

---

Mgr inż. Monika Forysiewicz

Rozprawa doktorska

**ANALIZA STANÓW DEFORMACJI I NAPRĘŻEŃ  
W STREFIE OBRÓBKI MATERIAŁÓW  
SPRĘŻYSTO-LEPKO-PLASTYCZNYCH  
PODCZAS SZYBKOŚCIOWEGO SKRAWANIA POJEDYNCZYM  
OSTRZEM**

PROMOTOR

Prof. zw. dr hab. inż. Leon Kukielka

---

KOSZALIN 2015

# **Analiza stanów deformacji i naprężeń w strefie obróbki materiałów sprężysto-lepko-plastycznych podczas szybkościowego skrawania pojedynczym ostrzem**

## **Streszczenie**

Niniejsza rozprawa składa się z sześciu rozdziałów. W pierwszym z nich przedstawiono wprowadzenie do rozpatrywanej tematyki, genezę pracy oraz jej zakres.

W drugim rozdziale przedstawiono charakterystykę procesu skrawania oraz narzędzi i materiałów wykorzystywanych w procesie skrawania. Ponadto naświetlono aktualny stan wiedzy z tematyki modelowania i symulacji procesu skrawania, wnioski z aktualnego stanu wiedzy, hipotezę oraz cel rozprawy.

W części trzeciej przedstawiono proces skrawania jako obiekt rzeczywisty oraz jego modelowanie fizyczne i matematyczne. Do opisu zjawisk na typowym kroku przyrostowym wykorzystano uaktualniony opis Lagrange'a, przyjmując skokowo-współbrotowy układ współrzędnych. Stany odkształcenia i prędkości odkształcenia opisano zależnościami nieliniowymi bez linearyzacji. Zastosowano adekwatne miary przyrostu odkształceń i przyrostu naprężeń w tym opisie, tj. przyrost tensora odkształceń Greena-Lagrange'a i przyrost drugiego symetrycznego tensora naprężeń Pioli-Kirchhoffa. Podano zasady akumulacji wielkości przyrostowych. Opisu nieliniowości materiału dokonano modelem przyrostowym uwzględniając wpływ historii odkształceń i prędkości odkształceń. Przedmiot skrawany traktuje się, jako ciało, w którym mogą wystąpić odkształcenia sprężyste (w zakresie odkształceń odwracalnych) oraz lepkie i plastyczne (w zakresie odkształceń nieodwracalnych), z nieliniowym umocnieniem. Ciało to oznaczono skrótowo E/VP. Do budowy modelu materiałowego zastosowano nieliniowy warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego, stowarzyszone prawo płynięcia oraz wzmocnienie mieszane (izotropowo-kinematyczne). Uwzględniono również stan materiału po obróbkach poprzedzających przez wprowadzenie początkowych stanów: przemieszczeń, naprężeń, odkształceń i ich prędkości. Opracowany przyrostowy model kontaktowy obejmuje siły kontaktowe, sztywność kontaktową, kontaktowe warunki brzegowe oraz warunki tarcia w tym obszarze. Model matematyczny uzupełniono przyrostowymi równaniami ruchu obiektu oraz warunkami jednoznaczności. Następnie, wprowadzono funkcjonal przyrostowy całkowitej energii układu. Z warunku stacjonarności tego funkcjonału wyprowadzono wariacyjne, nieliniowe równania ruchu i deformacji obiektu dla typowego kroku przyrostowego. Równanie to rozwikłano stosując przestrzenną dyskretyzację metodą elementów skończonych otrzymując dyskretne układy równań ruchu i deformacji obiektu w procesie skrawania pojedynczym ziarnem ściernym, które rozwiązano metodą różnic centralnych (explicit). Następnie przedstawiono modele matematyczne dynamicznych naprężeń uplastyczniających materiały metalowe, metodę wyznaczania nieliniowych charakterystyk materiałowych oraz sposób określania parametrów materiałowych dla wybranych modeli materiałowych. Zastosowano model Cowper'a-Symonds'a uwzględniający

wpływ prędkości odkształceń na wartość naprężeń. Przeprowadzono analizę wrażliwości wybranych parametrów modelu na stany naprężeń i odkształceń w skrawanym materiale.

W rozdziale czwartym opisano aplikacje w programie ANSYS/LS-DYNA do modelowania i symulacji procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym. Opisano metodę generowania trójwymiarowego ziarna ściernego o geometrii zbliżonej do rzeczywistej. Opracowane aplikacje umożliwiają kompleksową analizę czasową stanów przemieszczeń, odkształceń i naprężeń występujących w obiekcie, składającym się z przedmiotu obrabianego i narzędzia skrawającego (ziarno ścierne) dla stanów przestrzennych. Dokonano obliczeń numerycznych procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym i zbadano odkształcania i naprężenia występujące w materiale obrabianym.

W rozdziale piątym opisano stanowisko do badań eksperymentalnych procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym, plan badań i wyniki weryfikujące symulacje numeryczne. Wyniki opracowano statystycznie otrzymując modele w postaci funkcji regresji.

W rozdziale szóstym przedstawiono wnioski stwierdzające prawdziwość postawionych hipotez, wnioski poznawcze, utylitarne i dotyczące kierunków dalszych prac naukowo-badawczych.

Wykorzystując opracowane w niniejszej rozprawie modele matematyczne procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym, algorytmy rozwiązań dyskretnych równań ruchu oraz aplikacje w systemie ANSYS można istotnie rozszerzyć i ulepszyć proces projektowania technologii skrawania, co istotnie przyczyni się do polepszenia jakości wyrobów oraz zmniejszenia kosztów wykonania operacji (mniejsze zużycie energii, większa trwałość narzędzi itp.).

# **Analysis of the deformation and stress condition in the visco-elastic-plastic materials processing area during a high-speed single-blade cutting**

## **Summary**

This dissertation consists of six chapters. The first one covers the introduction to the examined subject matter, genesis of disquisition and its scope.

In the second chapter presents the characteristics of the cutting process and the tools and materials used in the cutting process. Moreover shows the current state of knowledge on the subject of modeling and simulation of the cutting process, the conclusions of the current state of knowledge, the hypothesis and the purpose of the dissertation.

The third part the process of cutting was presented as the actual subject as well as its physical and mathematical modeling. For the description of the non-linear phenomena, at the typical increment ratio, the updated Lagrange's description was used, taking the discrete – corotational coordinate system. States of deformation and deformation rate were described with non-linear dependencies without linearization. Adequate deformation and stress increments measurements were used, e.g. Green-Lagrange's deformation tensor increment and the increment of the Piola – Kirchhoff's second symmetrical tensor. Principles of increment value accumulation were provided. Nonlinearity of the material was described by means of the increment model taking into consideration the deformation and deformation rate records. The possibility of plastic cold-shaping was considered, treating the product as the solid in which elastic deformations may occur (within the range of reversible deformations) as well as adhesive and plastic (within the range of irreversible deformations). This solid (elastic/visco – plastic) have been abbreviatorily marked E/VP. For the construction of the material model Huber – Mises – Hencky's non-linear plasticity condition was used, associated principle of flow as well as mixed hardening (isotropic – cinematic). The condition of the material after pre-machining processes was also taken into account by means of implementation of initial conditions of: dislocation, tension, deformations and their rate. The devised incremental contact model covers the contact forces, contact rigidity, contact boundary conditions as well as friction conditions in this area. The mathematical model was complemented by incremental movement equations as well as uniqueness conditions. In the fifth part, the nonlinear material characteristics for different steels, and the methodology of defining model parameters were presented. A Cowper-Symonds' elastic/visco-plastic material model was used. Huber-Misesa-Hencky's yield criterion and the associated law of material flow was utilised in this model. A Cowper-Symonds' model allows for linear-isotropic, kinematic or mixed plastic strain hardening and the effect of the intensity of plastic strain velocity.

In the fourth part, the applications in ANSYS program and results of numerical calculations were presented. A method of generating a three-dimensional abrasive grain with a geometry close to actual were describes. The influence of the process parameters on the states of strains and stresses and on the quality of the product was presented. Numerical calculations of cutting process with single abrasive grain were made and investigated the

---

deformation and stress occurring in the workpiece.

In the fifth chapter the experimental test stand of single abrasive grain cutting process, the test plan and the verifications of results of numerical simulations were describes. The results were statistically developed and that's give the models in the regression function form.

In the last chapter stating the truth of hypothesis conclusions, cognitive, utilitarian and concerning directions for further research conclusions were presents.

Using developed in this dissertation, mathematical models of a single abrasive grain grinding process, algorithms of discrete solutions of equations of motion and ANSYS applications, can extend significantly and improve the cutting technology design process. That significantly contribute to improving the quality of products and reduce costs of operation (less energy consumption , increased tool life, etc.).