

# Krzysztof Tubielewicz, Andrzej Zaborski

---

## Modelowanie i symulacja procesów obróbek wykańczających przy wykorzystaniu MES

---

Dydaktyka Informatyki 5, 171-179

---

2010

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej [bazhum.muzhp.pl](http://bazhum.muzhp.pl), gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

**Krzysztof Tubielewicz, Andrzej Zaborski**

## **MODELOWANIE I SYMULACJA PROCESÓW OBRÓBEK WYKAŃCZAJĄCYCH PRZY WYKORZYSTANIU MES**

### **1. Wprowadzenie**

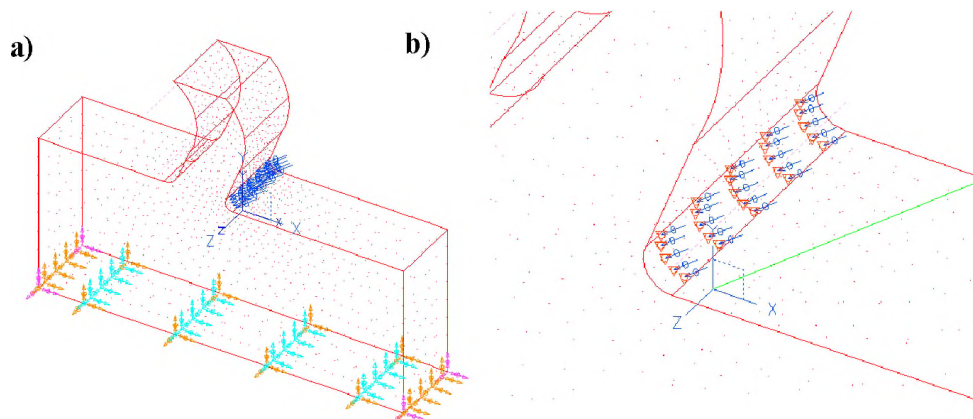
Współczesna technika symulacji komputerowych umożliwia wprowadzenie rewolucyjnych zmian w sposobach prowadzenia badań eksperymentalnych. Wirtualne modele symulacyjne opracowane przy zastosowaniu metody elementów skończonych umożliwiają przeprowadzenie symulacji zespołu zjawisk zachodzących w obrębie warstwy wierzchniej w trakcie jej formowania. Umożliwia to przesłedzenie wpływu poszczególnych parametrów procesu na efekty obróbki. Możliwe jest świadome modyfikowanie właściwości użytkowych uzyskanych warstw wierzchnich na drodze sterowania rodzajem i parametrami zastosowanych technologii. Prowadzone badania mają na celu wyjaśnienie zjawisk towarzyszących w warstwach powierzchniowych podczas ich konstytuowania wybranymi metodami obróbek wykańczających oraz opisanie związków pomiędzy parametrami technologicznymi metod obróbki i parametrami stanu uzyskanych warstw wierzchnich. Jedną z metod badawczych jest praktyczne wykorzystanie badań symulacyjnych, w tym i symulacji wirtualnych prowadzonych przy zastosowaniu MES, do analizowania zjawisk zachodzących w warstwach wierzchnich [Tubielewicz, Zaborski 2004 : 93 – 102; Tubielewicz, Zaborski 2005 : 86 – 91; Zaborski, Tubielewicz 2001 : 468 – 471]. Za punkt wyjścia do tych analiz przyjmuje się założenie, że w wyniku obróbki w wyrobie formowana jest warstwa wierzchnia, której właściwości są rezultatem parametrów technologicznych przyjętych procesów.

### **2. Modele symulacyjne warstwy wierzchniej**

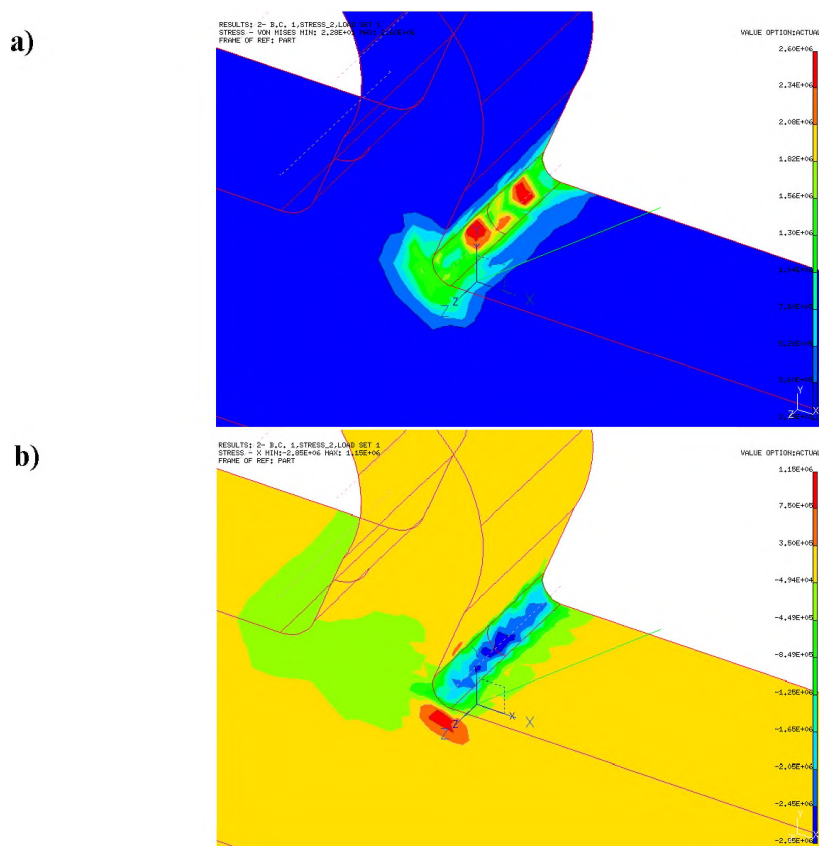
Jedną z metod analizy zjawisk zachodzących w trakcie konstytuowania warstw wierzchnich na drodze wybranych procesów obróbek powierzchniowych jest praktyczne wykorzystanie badań symulacyjnych, w tym symulacji wirtualnych prowadzonych przy zastosowaniu MES. Za punkt wyjścia do tych analiz przyjmuje się założenie, że w wyniku obróbki w wyrobie formowana jest warstwa wierzchnia, której właściwości są rezultatem parametrów technologicznych

przyjętych procesów. W analizach symulacyjnych wykonywanych w ITMiAP Politechniki Częstochowskiej istnieje możliwość wykorzystania zintegrowanego systemu komputerowego I-deas. System ten może być bardzo pomocny w modelowaniu z wykorzystaniem metody elementów skończonych [Tubielewicz., Zaborski 2001 : 279–287; Tubielewicz., Zaborski 2004 : 93–102]. Jedną z istotniejszych cech programu, znacznie zwiększającą możliwości przeprowadzenia badań symulacyjnych, jest możliwość automatycznego generowania sieci elementów skończonych w oparciu o narzucone parametry. Pozwala to na generowanie modeli symulacyjnych składających się ze znacznie większej liczby elementów skończonych w znacznie krótszym czasie w stosunku do starszych programów, w których generację siatki należało wykonać ręcznie. Program ten umożliwia stosunkowo proste definiowanie warunków brzegowych, takich jak: utwierdzenia, siły, momenty itp. w takich miejscach jak powierzchnie, krawędzie i wierzchołki. Można zadawać różne przypadki obciążeń (siły skupione w węzłach, wymuszone przemieszczenia wybranych węzłów itp.). Oprócz modeli siłowych system pozwala na zadawanie obciążeń temperaturowych w wybranych obszarach modelu. Możliwe stało się również przeprowadzenie analiz zjawisk zachodzących w strefie kontaktu dwóch przemieszczających się względem siebie elementów. Wspomniane właściwości programu znacznie zwiększyły możliwości badań symulacyjnych metodą elementów skończonych w porównaniu z wcześniej prowadzonymi analizami opartymi o starsze oprogramowanie [Tubielewicz, Zaborski 1997 : 603–609; Tubielewicz, Zaborski 1999 : 99–110; Tubielewicz, Zaborski 2000 : PI118 – PI123].

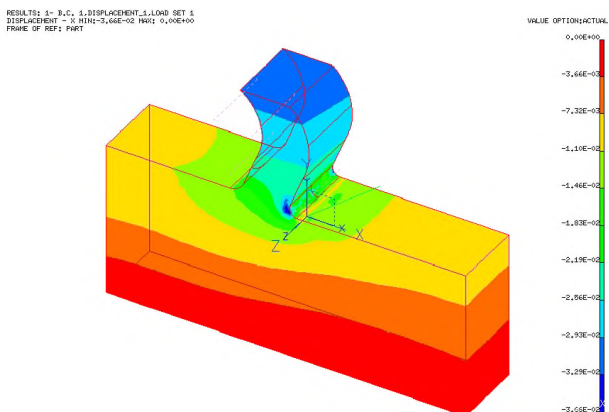
Analizując występujące w praktyce sposoby formowania warstwy wierzchniej wyrobów przy zastosowaniu wybranych obróbek wykańczających można zauważyć, że w ich trakcie dochodzi do obciążenia materiału wymuszeniami o różnym charakterze. Mogą one mieć charakter typowo mechaniczny (zimny), w którym za dominujące uważać należy siły działające na obrabianą powierzchnię, lub model cieplny, w którym główną przyczyną formowania się nowego stanu warstwy wierzchniej są odkształcenia i naprężenia wywołane znaczną temperaturą występującą w trakcie procesu. Oczywiście jest, że w przypadku analizy wielu rzeczywistych procesów obróbki wykańczającej oba te modele formowania stanu warstwy wierzchniej występują jednocześnie, a ich wpływ należy rozpatrywać łącznie. W trakcie realizacji badań symulacyjnych procesu toczenia w analizach przyjęto zarówno model zimny, w którym obciążenia pochodziły od sił działających na materiał w obszarze styku z narzędziem obrabiającym, jak i model, w którym źródłem obciążeń były temperatury występujące w obrębie obszaru skrawania. Przeanalizowano również modele symulacyjne uwzględniające jednoczesny wpływ obu tych czynników. Jeden z przyjętych do symulacji modeli procesu skrawania wraz z narzuconymi obciążeniami siłowo-temperaturowymi przedstawiono na rys. 1.



**Rys. 1. Model symulacyjny procesu toczenia (a) z narzuconymi obciążeniami siłowo-temperaturowymi (b)**



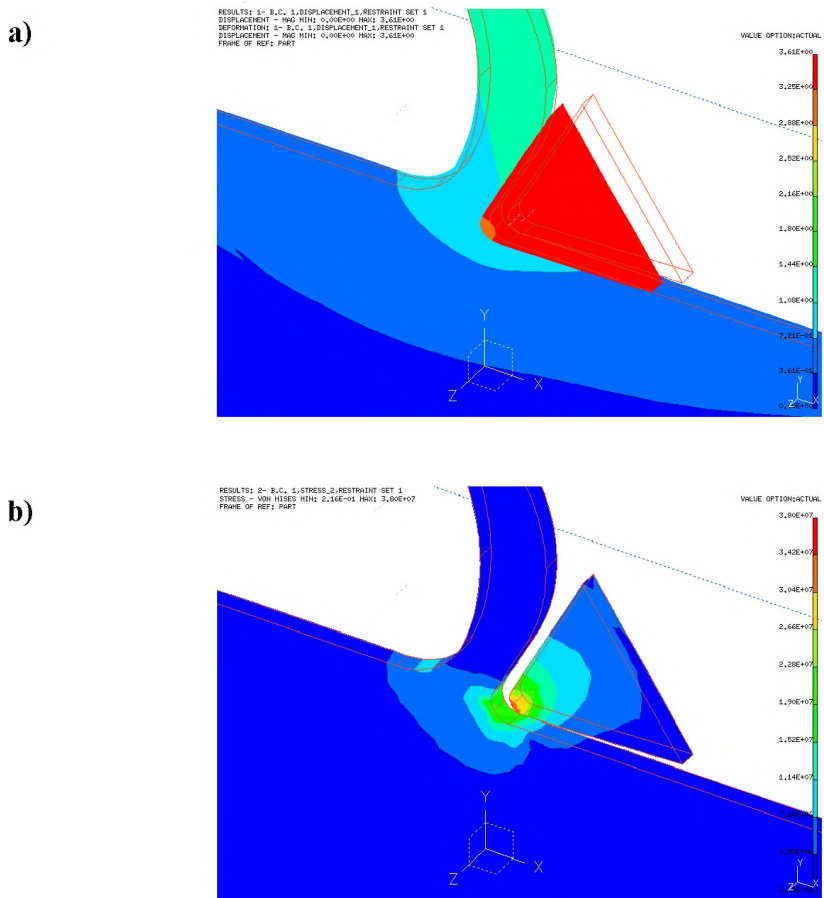
c)



**Rys. 2. Przykładowe rezultaty analiz modelu siłowo-temperaturowego: naprężenia zredukowane (a) i obwodowe (b) w strefie obróbki, przemieszczenia osiowe materiału (c) (siła  $F=612$  N, temperatura  $t=1000^{\circ}\text{C}$ )**

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe wyniki analiz strefy obróbki uzyskane dla modelu siłowo-temperaturowego. Analiza rezultatów przeprowadzonych symulacji pozwala na stwierdzenie, że we wszystkich wykonanych modelach proces obróbki wprowadzał w warstwę wierzchnią znaczne naprężenia rozciągające. Ich wartość i rozkład w objętości analizowanych modeli był uzależniony od przyjętych parametrów technologicznych symulowanego procesu. Porównując wpływ działania czynnika siłowego i temperaturowego na formowanie stanu odkształceń i naprężeń w analizowanych modelach można stwierdzić, że zasadnicze znaczenie w procesie powstawania naprężeń odgrywa temperatura. Wpływ zmiany wielkości i parametrów przyłożenia siły towarzyszącej procesowi obróbki był mniej istotny.

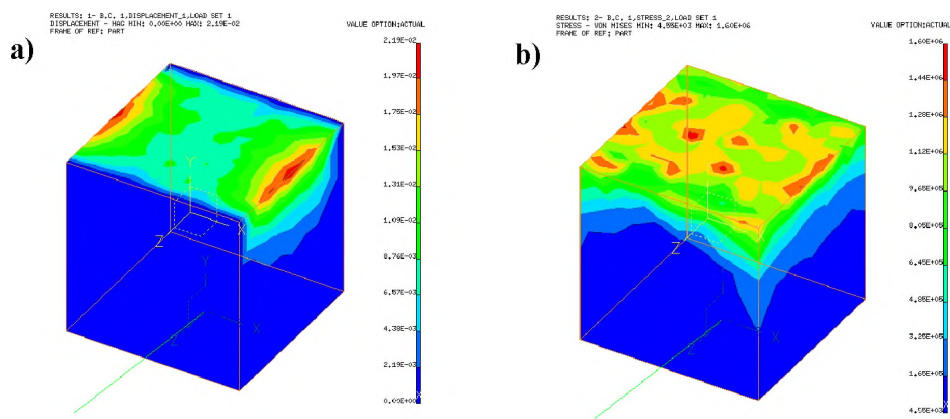
Zjawiska zachodzące w trakcie obróbki skrawaniem w strefie styku narzędzia skrawającego z materiałem poddanym obróbce mogą być modelowane również w inny sposób. Jednym z nich może być przyjęcie modelu zjawiska jako przebiegu kontaktu dwóch elementów. Jednemu z tych elementów (modelowi wierzchołka noża tokarskiego) nadać można ruch w założonym kierunku, tak by nastąpił kontakt z elementem modelującym materiał. W strefie kontaktu można zadać ponadto temperaturę właściwą dla rzeczywistego procesu obróbki. Tak przygotowany model symulacyjny i przykładowe rezultaty analiz przedstawiono na rys. 3. Dla modeli opartych o symulację zjawisk kontaktu narzędzia z obrabianym materiałem uzyskano rezultaty zbliżone do wyników otrzymanych dla modeli z obciążeniem siłowym i (lub) temperaturowym. I w tym przypadku decydująca o wartości uzyskanych parametrów była temperatura założona w obszarze strefy kontaktu.



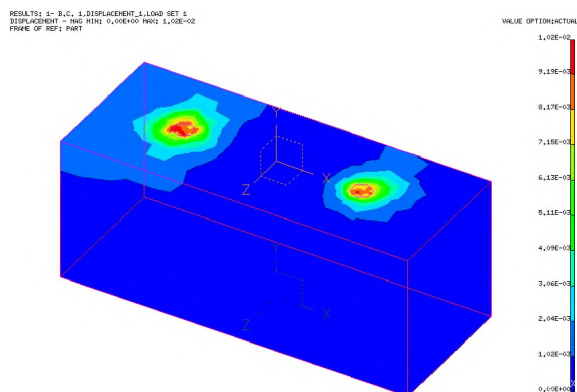
Rys. 3. Rozkład przemieszczeń (a) i naprężeń (b) w trakcie symulacji kontaktu noża tokarskiego z materiałem obrabianym (przesunięcie narzędzia  $x = -3$  mm,  $y = -2$  mm, temperatura  $t = 1000^{\circ}\text{C}$ )

W trakcie przygotowania prostych modeli symulacyjnych zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej w trakcie procesu szlifowania za punkt wyjścia przyjęto założenie o decydującym wpływie temperatury występującej w strefie obróbki na formowanie się stanu warstwy wierzchniej. Uwzględniono w modelach symulacyjnych również siły (naciski jednostkowe) działające na powierzchnię obrabianą potraktowaną w sposób makroskopowy (założono równomierny rozkład sił na całej powierzchni). Wyniki analiz tak zdefiniowanego modelu przedstawiono na rys. 4. W rzeczywistych przypadkach obróbki szlifowaniem naciski nie rozkładają się jednak równomiernie. W obszarach styku narzędzia z materiałem do kontaktu dochodzi nie na całej powierzchni obrabianej, a jedy-

nie w obszarze najwyżej położonych punktów szlifowanego materiału z wystającymi z tarczy ścierniej ziarnami ściernicy. Zasadne byłoby więc stworzenie modeli symulacyjnych procesu uwzględniających zachodzenie kontaktu jedynie w wydzielonych obszarach zbliżonych do najwyżej położonych punktów powierzchni. Jedynie w tych obszarach dochodzi bowiem do bezpośredniego oddziaływania sił i temperatur skrawania pochodzących od obrabiającego ziarna ściernego na materiał obrabiany. Model symulacyjny uwzględniający te obszary styku przedstawiono na rys. 5. Symulowana obróbka wprowadziła w warstwę wierzchnią naprężenia rozciągające. Wyniki przeprowadzonych symulacji jednoznacznie potwierdzają założenie, że o stanie odkształceń i naprężeń wynikowych powstałych w warstwie wierzchniej decyduje założona temperatura procesu.

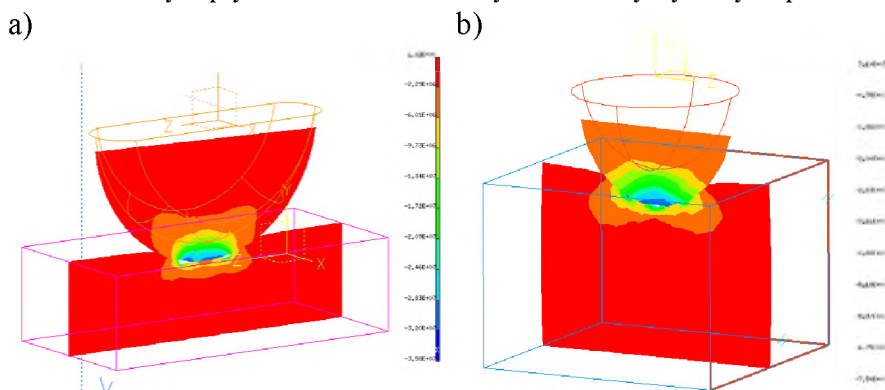


Rys. 4. Przykładowy rozkład przemieszczeń (a) i naprężeń (b) w trakcie symulacji kontaktu ziarn ściernych z elementem szlifowanym (siła  $F = 133$  N przyłożona pod kątem  $10^\circ$  do powierzchni obrabianej, temperatura  $600^\circ\text{C}$ )



Rys. 5. Przykładowy rozkład przemieszczeń w trakcie symulacji kontaktu ziarn ściernych z elementem szlifowanym (siła  $F = 26$  N przyłożona pod kątem  $10^\circ$  do powierzchni obrabianej, temperatura  $600^\circ\text{C}$ )

W trakcie badań symulacyjnych rozważano również zjawiska zachodzące w trakcie formowania warstwy wierzchniej nagniataniem naporowym tocznym. Nagniatanie jest jedną z metod obróbki wykańczającej pozwalającą na stosunkowo łatwe sterowanie parametrami stanu, a co za tym idzie właściwościami użytkowymi uzyskiwanych warstw wierzchnich. W wyniku tej obróbki można na drodze sterowania parametrami technologicznymi procesu zmieniać tak istotne parametry stanu warstwy wierzchniej jak wielkość i rozkład zalegania umocnienia na głębokości, czy też wielkość i rozkład uzyskiwanych naprężeń własnych. Wykorzystanie współczesnej techniki obliczeniowej do modelowania i symulacji zjawisk zachodzących w trakcie formowania warstw wierzchnich nagniataniem umożliwiłoby przybliżone prześledzenie zjawisk zachodzących w strefie obróbki na styku narzędzia z materiałem obrabianym i na dobór parametrów obróbki prowadzący do uzyskiwania warstw wierzchnich cechujących się oczekiwanymi właściwościami. Badania symulacyjne obróbki nagniataniem poparte ich weryfikacją doświadczalną są prowadzone w Zespole Obróbki Powierzchniowej od wielu lat [Tubielewicz 1993; Tubielewicz, Zaborski 1997 : 603–609; Tubielewicz., Zaborski 1999 : 99–110]. Badania te wykazały, że przeprowadzenie obróbki przy pozornie zbliżonych parametrach (siła nacisku narzędzia, promień jego krzywizny, wielkość posuwu, liniowa szybkość obróbki) może prowadzić do zmiany schematu zachodzącej deformacji, a przez to do znacznej zmiany właściwości użytkowych otrzymywanych powierzchni [Tubielewicz, Zaborski 1999 : 99–110; Tubielewicz, Zaborski 2000 : P1118–P1123]. Możliwe jest na przykład przesunięcie obszaru największych deformacji plastycznych, a co za tym idzie obszarów maksymalnych naprężeń stycznych i maksymalnego umocnienia z głębi materiału ku jego powierzchni na drodze zmiany układu kinematycznego oddziaływania narzędzia na przedmiot obrabiany. Ma to istotny wpływ na właściwości użytkowe otrzymywanych powierzchni



Rys. 6. Rozkład naprężeń obwodowych w płaszczyźnie obwodowej podczas nagniatania: a – krążkiem (siła  $F = 4$  kN, promień krążka  $R = 10$  mm, promień krzywizny  $R_k = 4$  mm), b – kulką (siła  $F = 5$  kN, promień kulki  $R = 10$  mm)



nagniatanych. Przykładowe modele symulacyjne procesów nagniatania naporowego kulką i krążkiem przedstawiono na rys. 6. W modelach tych założono jedynie czysto mechaniczny (zimny) schemat formowania obciążeń ze względu na brak wyraźnego wzrostu temperatury w trakcie procesu nagniatania. W rezultacie symulowanej obróbki wprowadzano w warstwę wierzchnią znaczne naprężenia ściskające. Ich wartość i rozkład zależały od założonych parametrów technologicznych procesu.

## Podsumowanie

Opisane analizy symulacyjne mają na celu umożliwienie optymalnego doboru parametrów technologicznych procesów konstituowania warstwy wierzchniej. Stanowią one niewielki fragment badań dotyczących wpływu wybranych technologii obróbek powierzchniowych na uzyskiwany stan warstwy wierzchniej realizowanych w Zespole Obróbki Powierzchniowej. Wykorzystanie współczesnych systemów CAD/CAM/CAE i opracowanych do ich przeprowadzenia modeli symulacyjnych umożliwia przeprowadzenie szeregu analiz w możliwym do zaakceptowania czasie. Umożliwia wniknięcie do zjawisk zachodzących w obrębie formowanej warstwy wierzchniej, dotychczas niedostępnych do bezpośredniej obserwacji. Przeprowadzone dotychczas badania symulacyjne na modelach wirtualnych i ich doświadczalna weryfikacja potwierdzają przydatność zastosowanych metod symulacyjnych metodą elementów skończonych do prognozowania cech użytkowych obrabianych powierzchni. Realizowane analizy modelowe mają na celu umożliwienie optymalnego doboru parametrów technologicznych procesów konstituowania warstwy wierzchniej prowadzące do poprawy właściwości użytkowych wykonywanych powierzchni.

## Bibliografia

- Tubielewicz K.: *Analiza naprężeń powstających w warstwie wierzchniej podczas procesu nagniatania*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1993.
- Tubielewicz K., Zaborski A.: *The Computer Simulation of Treatment by Burnishing*. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Technology 97”, Słowacja, Bratysława, 9–10 września 1997, s. 603–609.
- Tubielewicz K., Zaborski A.: *A new approach to the computer simulation of the burnishing process*. Postępy technologii maszyn i urządzeń. Kwartalnik PAN KBM Sekcja Podstaw Technologii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej Vol. 23 nr 2/1999, s. 99–110.
- Tubielewicz K., Zaborski A.: *Stan technologicznej warstwy wierzchniej jako rezultat procesu deformacji*. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Development of Metal Cutting”, Słowacja, Koszyce, 3 – 4 lipca 2000, s. P1118–P1123.
- Tubielewicz K., Zaborski A.: *Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania procesów obróbek wykańczających*. Materiały V Szkoły komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji, Szczyrk 14–18 maja 2001, s. 279–287.

- Tubielewicz K., Zaborski A.: *Symulacyjna analiza wybranych właściwości warstw wierzchnich po typowych obróbkach wykańczających*. Wydawnictwo „Budowa i eksploatacja maszyn. Prace Zespołu obróbki powierzchniowej” pod red. K. Tubielewicza. Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004, s. 93–102.
- Tubielewicz K., Zaborski A.: *Wykorzystanie technik symulacji komputerowej w nauczaniu zagadnień inżynierii powierzchni*. Wydawnictwo „Teoretyczne i praktyczne problemy edukacji informatycznej. Technika – Informatyka – Edukacja”, pod red. W. Furmanka, A. Piecucha i W. Walata. Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, Rzeszów 2005, Tom I, s. 86–91.
- Zaborski A., Tubielewicz K.: *Application of the finite-elements method for modeling finishing treatment processes*. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Technology 2001”, Słowacja, Bratysława, 11–12 września 2001, s. 468–471.