

WIKŁO Marcin¹
KRÓL Kazimierz²
KOŁODZIEJCZYK Krzysztof³
OLEJARCZYK Krzysztof⁴
SIEMIĄTKOWSKI Zbigniew⁵

WPLYW NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH NA GEOMETRYCZNE INPERFEKCJE WAŁU KORBOWEGO W TRAKCIE PROCESU OBRÓBKI MECHANICZNEJ CZĘŚĆ I

Artykuł zatytułowany "Wpływ naprężeń własnych na geometryczne inperfekcje wału korbowego w trakcie procesu obróbki mechanicznej" podzielony został na dwie części: część pierwsza (teoretyczna) przedstawia podstawy numerycznej symulacji procesu obróbki mechanicznej druga natomiast przedstawia wyniki numerycznej symulacji. Proces toczenia został zasymulowany w programie MSC MARC z wykorzystaniem modułu Machining. Przedstawiono w nim między innymi wpływ niesymetrycznego usuwania wierzchniej warstwy materiału. Dane wejściowe dla procesu numerycznej symulacji zostały otrzymane z pomiarów dokonanych na gotowym elemencie.

THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESS ON THE GEOMETRIC IMPERFECTIONS OF THE CRANKSHAFT DURING THE PROCESS OF MACHINING PART I

The paper titled "The influence of residual stress on the geometric imperfections of the crankshaft during the process of machining" is divided into two parts: the first part (theoretical) presents the background of the machining process numerical simulations and the other one presents the results of the numerical simulations. Turning modeling is performed with use the MSC. MARC FEM software with the machining module. The influence of the unsymmetrical material removing to the deflection of the element is presented. The input data have been collected from experimental measurements taken on the finished element.

Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54

Tel: + 48 48 361-71-16

¹ E-mail: m.wiklo@pr.radom.pl

² E-mail: k.krol@pr.radom.pl

³ E-mail: k.kolodziejczyk @pr.radom.pl

⁴ E-mail: k.olejarczyk@pr.radom.pl

⁵ Tel: 48/48 361-76-05, E-mail: z.siemiatkowski@pr.radom.pl

1. WSTĘP

Obróbka mechaniczna materiału (ang. *machining* lub *metal cutting*) jest rodzajem procesu mechanicznego usuwania warstwy materiału w celu uzyskania pożądanej geometrii. Usunięcie materiału prowadzi do osiągnięcia nowego wewnętrznego stanu równowagi, któremu towarzyszy odkształcenie oraz uwolnienie części naprężeń własnych (NW). Poziom naprężeń własnych w konstrukcji przed obróbką mechaniczną zależny jest głównie od poprzedzających ją etapów produkcji takich jak: odlewanie, hartowanie, odpuszczenie itp. Jednak mimo poprawnego wykonania wszystkich operacji nie udaje się całkowicie usunąć naprężeń własnych.

Zależnie od wielkości naprężeń własnych geometria obrabianej części doświadcza różnego poziomu odkształceń, które mogą być duże zwłaszcza w konstrukcjach, w których usuwamy znaczną część materiału. W przypadku dużych konstrukcji jak np.: monolityczne wały korbowe, również mamy do czynienia z przedstawionym zjawiskiem, mimo stosunkowo niewielkiej powierzchni zdejmowanego materiału w porównaniu z jego całkowitą objętością. Nawet nieznaczne odkształcenia odgrywają w tym przypadku ważną rolę ze względu na wysokie wymagania dotyczące dokładności wykonania finalnego produktu.

Literatura dostarcza bogatej bazy przykładów oraz opisu prowadzonych badań z uwzględnieniem symulacji procesów obróbki mechanicznej. Procesy obróbki mechanicznej obejmują szerokie spektrum operacji takich jak: toczenie, frezowanie, wiercenie, cięcie i wiele innych. Badania bezpośrednie są bardzo drogie i często niemożliwe do przeprowadzenia. Symulacja procesów obróbki mechanicznej jest często jedynym możliwym wyjściem dającym szansę poznania zjawisk zachodzących podczas badanych operacji obróbki mechanicznej. Dokładne i wierne odwzorowanie procesów zachodzących w trakcie obróbki nie jest jednak prostym zadaniem i wymaga olbrzymiej wiedzy z wielu dziedzin oraz uwzględnienia wielu parametrów, począwszy od geometrii narzędzia przez parametry materiałowe oraz warunki prowadzenia obróbki.

Obszerny zbiór publikacji zawierający 372 pozycji z lat (1976-1996) można znaleźć w [1], oraz równie obszerny dodatek tego samego autora [2] ze zbiorem bardziej aktualnych publikacji z lat (1996-2002).

Ogólnie proces symulacji obróbki mechanicznej można podzielić zgodnie z [1] na:

- usuwanie materiału i proces obróbki mechanicznej ogólnie,
- modele obliczeniowe dla poszczególnych procesów obróbki,
- geometryczne efekty oraz parametry procesu,
- termiczne aspekty obróbki mechanicznej,
- naprężenia wewnętrzne w procesie obróbki,
- analiza dynamiczna oraz kontrola procesu,
- narzędzia, uchwyty i uszkodzenia,
- formowanie wiórów,
- optymalizacja procesu i inne tematy.

2. GŁÓWNE ZAŁOŻENIA PROCESU SYMULACJI

2.1 Metoda

Dla procesu symulacji usuwania materiału wykorzystano oprogramowanie MARC firmy MSC z modułem NC/Machining.

Procedurę symulacji wykorzystującą kształt narzędzia oraz ścieżkę narzędzia zdefiniowano w danych NC machining. Informacje dotyczące ruchu ostrza narzędzia wykorzystywane są do predykcji materiału, który ma być usuwany poprzez automatycznie usuwanie elementów skończonych zlokalizowanych na ścieżce narzędzia. Dystorsja pozostajej części jest określana przez przeliczenie zadania dla otrzymania nowego stanu równowagi. Ścieżka narzędzia określana jest w pliku APT (ang. *Automatically Programed Tool*) lub pliku CL (ang. *Cutter Location*).

Ponieważ wspierane w programie MARC komendy z plików APT są ograniczone do trzech poleceń (GOTO/, GODLTA/ DRILL/) dlatego ruch obrotowy lub inne stosowane w APT komendy muszą być interpolowane na stosowane polecenia. W związku z tym zamiast korzystać z programów generujących kod APT za pomocą prostego skryptu wygenerowano plik ze ścieżką narzędzia.

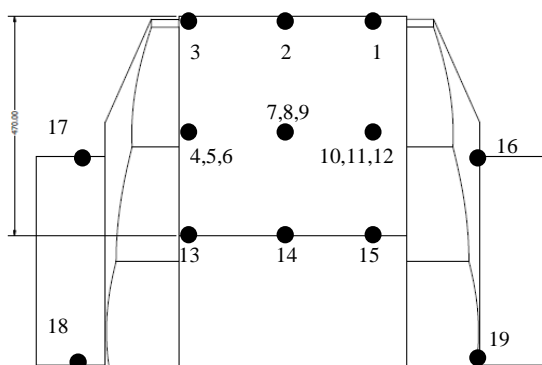
W procesie usuwania elementów skończonych siatka powinna być tak wygenerowana, aby usunięcie elementów zgodnie ze zdefiniowaną ścieżką pozostawiało pożądaną geometrię. Nie jest to jednak proste zadanie, zwłaszcza przy bardziej złożonych kształtach, dlatego można wykorzystać dodatkową opcję dostępną w programie dla procesu symulacji skrawania: *adaptive meshing*, połączoną ze zdefiniowaniem dodatkowego kryterium: *within cutter path criterion*. Uruchomienie tej opcji pozwala programowi na tworzenie nowej siatki w miejscu usuniętej dla jak najdokładniejszego odwzorowania docelowej geometrii. Tworzona siatka jest dodatkowo zagęszczana w zależności od podanego współczynnika. W zadaniu zastosowano współczynnik remeshingu równy 3. Wartość ta jest całkowicie wystarczająca dla modelowanego elementu, zwiększenie go powoduje znaczne spowolnienie procesu symulacji oraz zwiększenie zużycia pamięci.

W trakcie analizy jako warunki początkowe zadawane są naprężenia w całej konstrukcji jako punkty losowo rozmieszczone na geometrii. Program zadane naprężenia początkowe (wyznaczone naprężenia własne) interpoluje na siatkę elementów skończonych z uwzględnieniem geometrii konstrukcji.

Im dokładniejsza i im większa jest rozdzielczość pomiarów (punktów wejściowych z NW) tym dokładniejszy stworzymy model numeryczny oraz mamy większą możliwość otrzymania samo równoważącego się pola naprężeń. Otrzymanie samorównoważącego się pola naprężeń jest bardzo ważne z punktu widzenia otrzymania rzeczywistych danych w trakcie symulacji. Jeżeli danych jest mało, wprowadzone do układu naprężenia powodują powstanie nierównoważonego układu sił w konstrukcji. Program w pierwszym kroku symulacji dąży do osiągnięcia samorównoważonego pola naprężeń. Dlatego po pierwszym kroku dane będą się różniły od wprowadzonych wartości początkowych, a różnica będzie tym większa, im bardziej nierównoważone dane zostaną wprowadzone. W skrajnych przypadkach wprowadzenie niewłaściwych NW może spowodować deformację elementu.

2.2 Założenia

Dla wykonania analizy przyjęto że punkty umiejscowione są na powierzchni wykorbienia, zgodnie z wynikami otrzymanymi w trakcie pomiarów naprężeń wewnętrznych metodą wiercenia otworu prowadzonych w trakcie badań doświadczalnych, jak również na podstawie pracy [3]. Dodatkowo wykorzystano wyniki symulacji numerycznych otrzymane w innym zadaniu projektu, w którym symulowano proces obróbki cieplnej oraz kucia.



Rys. 1. Miejsca wprowadzania danych wejściowych w postaci tensora naprężeń

Składowe tensora naprężenia wprowadzane jako warunki początkowe podane zostały w tabeli poniżej.

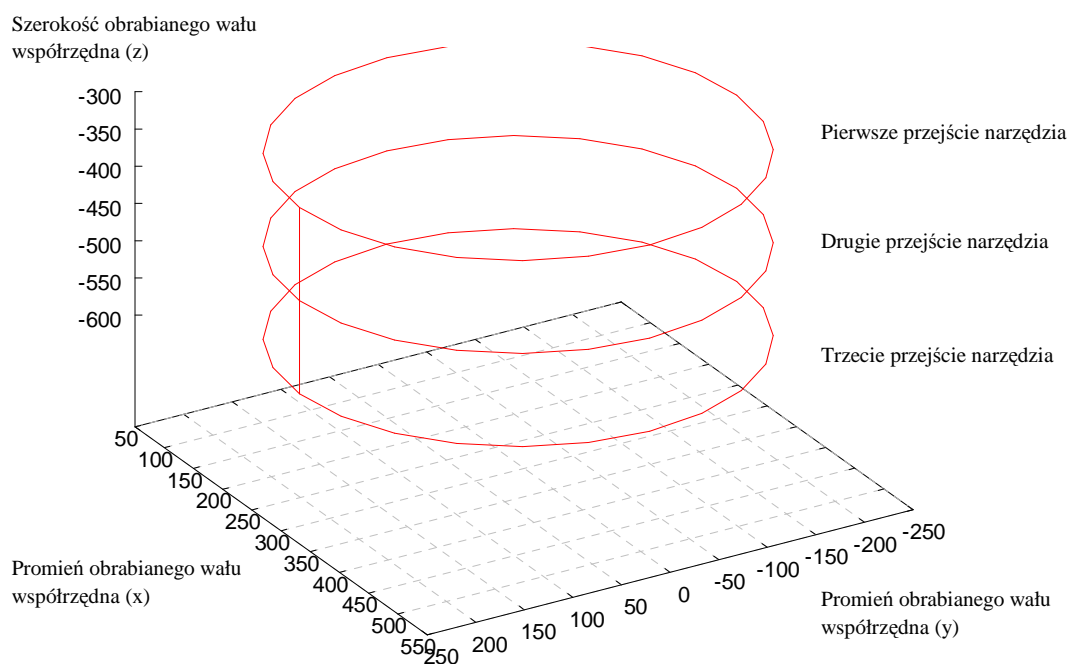
Tab. 1. Składowe tensora naprężeń

$Lp.$	$1=\sigma_{xx}$ MPa	$3=\sigma_{zz}$ MPa	$Lp.$	$1=\sigma_{xx}$ MPa	$3=\sigma_{zz}$ MPa
1	135	400	11	100	200
2	100	200	12	135	400
3	135	400	13	135	400
4	135	400	14	100	200
5	100	200	15	135	400
6	135	400	16	200	180
7	135	400	17	200	180
8	100	200	18	-39	-175
9	135	400	19	-39	-175
10	135	400			

Analizę przeprowadzono na jednym czopie wykorbienia wału o średnicy nominalnej 450 [mm]. Dla potrzeby symulacji procesu jako średnicę przed obróbką mechaniczną przyjęto 470 [mm], warstwa usuwana to 10 [mm].

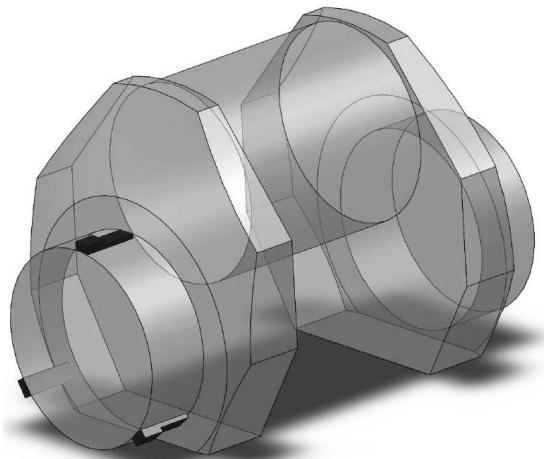
Cała warstwa usunięta jest w jednym przebiegu analizy. Kąt obrotu narzędzia ustalono na $15[^\circ]$, w trakcie każdego obrotu zbierana jest warstwa materiału o szerokości 200 [mm] co

przy założonej szerokości obrabianego czopa daje 3 obroty narzędzia. Przyjęcie takiej szerokości zdejmowanej warstwy wynika z kompromisu między czasem obliczeń, możliwościami sprzętowymi a dokładnością analizy.



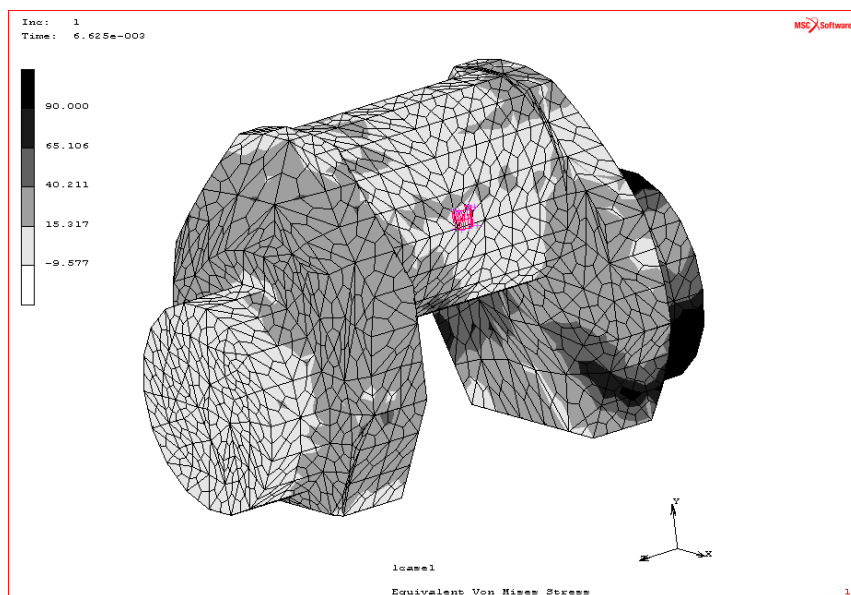
Rys. 2. Zaprogramowana ścieżka narzędzia we współrzędnych globalnych

Dla jak najwierniejszego odwzorowania procesu obróbki mechanicznej założono podparcie przedstawione na rys. 3. Na trzech liniach tworzących czopa rozstawionych co $120 [^\circ]$ zamrożone są przemieszczenia na kierunku osi x , y i z . Symbolami graficznymi podparcia są na czarno zaznaczone bryły. W symulacji nie uwzględnia się siły ciężkości, która wprowadziłaby dodatkowe pole naprężeń.

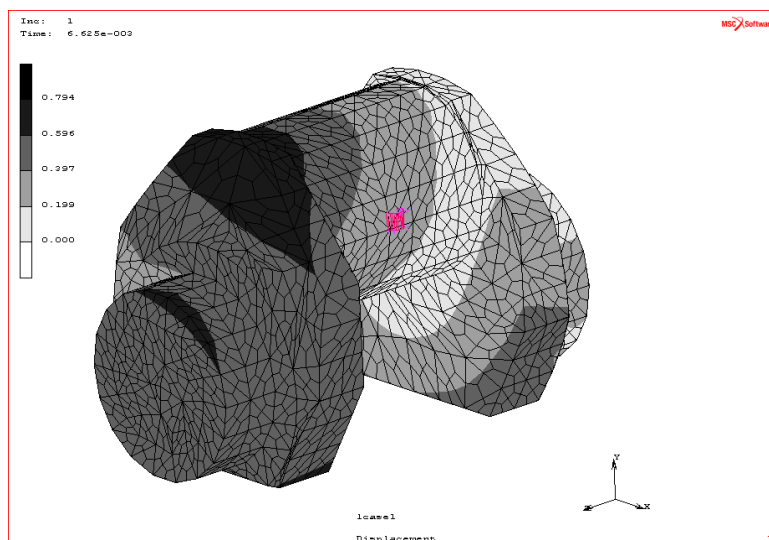


Rys.3. Model bryłowy czopa wału, z zaznaczonymi punktami podparcia

Wyniki w postaci warstwicy naprężeń zredukowanych w pierwszym kroku analizy po ustaleniu stanu równowagi przedstawiono na rys.4. Maksymalne naprężenia są znacznie mniejsze od naprężeń wprowadzonych jako dane początkowe Tab.1. Ich zmiana pociągnęła za sobą również zmianę geometrii (rys.5), gdzie oś czopa wału przesunęła się o 0.455 mm. Otrzymane wartości w kroku pierwszym traktowane są w dalszej analizie jako wartości referencyjne.



Rys.4. Rozkład naprężeń własnych w pierwszym kroku analizy po ustaleniu stanu równowagi



Rys.5. Odształcenia elementu w pierwszym kroku analizy po ustaleniu stanu równowagi

3. WNIOSKI

Przedstawiona powyżej pierwsza część artykułu prezentuje podstawy oraz założenia poczynione dla przeprowadzenia symulacji obróbki mechanicznej wielkogabarytowych elementów jakimi są wały korbowe. W artykule przedstawiono ideę modelowania obróbki mechanicznej metodą elementów skończonych. Wykorzystano komercyjny pakiet MSC.MARC. Przedstawiono również wpływ wprowadzonych naprężeń własnych jako dane początkowe zadania na odształcenie wału w pierwszym kroku analizy po ustaleniu stanu równowagi.

4. PODZIĘKOWANIE

Artykuł został przygotowany dzięki realizacji projektu celowego nr 6 ZR8 2009 C/07162 pt.: „Opracowanie i wdrożenie technologii finalnej obróbki mechanicznej monolitycznych wałów korbowych kutyh w przyrządach TR do czterosuwowych silników okrętowych i agregatów prądotwórczych” przez Politechnikę Radomską finansowanego przez MNiSW.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Finite-element analysis and simulation of machining: a bibliography (1976–1996), Jaroslav Mackerle, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 86, Issues 1-3, 15 February 1998, Pages 17-44.
- [2] Finite-element analysis and simulation of machining: an addendum a bibliography (1996-2002), Jaroslav Mackerle, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 2003, 103-114
- [3] Praca Badawcza nr BO-1234-02 pt.: „Badanie poziomu naprężeń własnych wałów turbin i korbowych w procesie wytwarzania.” Wykonana przez Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Akademii Górniczo Hutniczej