

Lublin 01.12.2018

dr hab. inż. Jarosław Bartnicki, prof. PL
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Bernadetty Niedziałek

**pt.: „Dobór równań konstytutywnych elastomeru
stosowanego na narzędzia do tłoczenia”**

**wykonana na zlecenie Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechniki Rzeszowskiej**

Ogólna charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Bernadetty Niedziałek pt.: „Dobór równań konstytutywnych elastomeru stosowanego na narzędzia do tłoczenia” dotyczy interesującego i ciągle zyskującego na aktualności problemu doskonalenia technologii kształtowania plastycznego wyrobów wytwarzanych z blach za pomocą narzędzi elastycznych. Dzięki wprowadzaniu nowych rozwiązań w dziedzinie tłocznictwa możliwe jest wytwarzanie wyrobów o kształtach niedostępnych do niedawna za pomocą tradycyjnych rozwiązań. W konsekwencji elementy tłoczone m.in. na półgorąco, czy też za pomocą stempli elastomerowych znajdują coraz szersze zastosowanie w motoryzacji, lotnictwie i kosmonautyce. Obok możliwości technicznych bardzo ważnym aspektem jest w tym przypadku także ekonomika produkcji oraz problematyka niezawodności wytwarzanych części. Odpowiednie modelowanie tego typu zagadnień wciąż stanowi problem natury numerycznej dotyczący zarówno algorytmu obliczeniowego jak i stosowanych modeli materiałowych.

Podany w temacie pracy obszar badawczy analizowanego rozwiązania wskazuje na gruntowne przeanalizowanie zagadnienia doboru równań konstytutywnych dla elastomerów będących materiałami hipersprężystymi. Obszarem aplikacyjnym stosowania podawanych w pracy rozwiązań są obliczenia numeryczne procesów kształtowania blach za pomocą narzędzi elastycznych, co wykorzystywane jest często w produkcji krótko i średnioseryjnej. Kryteria dotyczące spełnienia wymagań wymiarowych wytwarzanych wyłoczek są bardzo restrykcyjne i tym bardziej wskazuje to na podjęcie przez Doktorantkę znaczącego wyzwania, jakim jest analiza i dobór równań konstytutywnych do modelowania numerycznego podanej problematyki. Poruszane w pracy zagadnienia opisu matematycznego modeli materiałowych stosowanych w obliczeniach numerycznych pojawiają się w bardzo dużej ilości projektów badawczych, realizowanych w kraju i za granicą. Jednakże, stosunkowo niewielka ilość dostępnej literatury poruszającej problematykę

doboru równań konstytutywnych do modelowania materiałów hiperelastycznych wskazuje na celowość podjęcia poruszanej tematyki.

Cele (naukowy i użyteczny) pracy zostały sformułowane w sposób poprawny i jednoznaczny. Istotą rozprawy jest analiza oraz ocena skuteczności modelowania obciążenia elastomeru w procesach tłoczenia w pierwszym oraz osiemnastym cyklu dla różnych wariantów obciążenia oraz wartości odkształcenia. Przedstawione rozwiązania posiadają bezpośrednie przełożenie na możliwość implementacji modeli matematycznych materiałów hiperelastycznych w modelowaniu numerycznym MES, wykorzystywanym szeroko w analizach procesów kształtowania plastycznego w tym tłocznictwa. Uzyskanie możliwie dokładnych wyników obliczeń symulacyjnych przyczyni się do znaczącego ułatwienia w projektowaniu procesów tłoczenia z wykorzystaniem narzędzi elastycznych. W chwili obecnej ich projektowanie opiera się często wyłącznie na wiedzy empirycznej konstruktorów i technologów.

Praca nie posiada jasno sformułowanej tezy, natomiast w rozdziale 5 zatytułowanym „cel i zakres pracy” można doszukać się hipotezy w postaci „osiągnięcia sformułowanego celu pracy”. W moim odczuciu jest to dopuszczalne i nie budzi wątpliwości dotyczących powiązania pomiędzy zakresem pracy, celem i założoną do udowodnienia hipotezą badawczą.

Dla weryfikacji postawionego celu pracy wykonano szeroko zakrojone badania eksperymentalne dotyczące różnych stanów obciążenia (jedno, dwu oraz wielokierunkowe rozciąganie) skutkujących wyznaczeniem charakterystyk naprężenie – odkształcenie. Dla tak wyznaczonych zależności obliczono następnie stałe do 10 wybranych równań konstytutywnych oraz 1 i 18 cykli obciążenia. Dodatkowo przeanalizowano schematy obciążenia w procesach zginania i ściskania. Wykonane następnie obliczenia numeryczne MES posłużyły do weryfikacji oraz oceny zgodności przyjętych założeń teoretycznych z wynikami badań doświadczalnych. Opracowanie oraz ocena tak szerokiego materiału badawczego pozwoliła na ustalenie wytycznych dotyczących doboru modeli materiałów elastomerowych w zależności od wariantów prowadzonych procesów.

Wyniki przedstawione w pracy są oryginalne i nie znajdują podobieństwa do znanych mi rozwiązań przedstawionych w literaturze specjalistycznej. Uzyskane rezultaty są użyteczne i mogą posłużyć do praktycznego poszerzenia zakresu realizowanych symulacji numerycznych o obliczenia dotyczące stosowania narzędzi elastycznych. Ważne jest przy tym, że Doktorantka wraz z promotorem zadbała o kompleksowe przebadanie próbek w szerokim zakresie parametrów, co pozwoliło na sformułowanie nie tylko wniosków naukowych, ale i wytycznych o charakterze technologicznym.

Rozprawa doktorska została zredagowana na 189 stronach. Jest ona bardzo bogato ilustrowana rysunkami oraz tabelami. Praca została podzielona na trzynaście części, oprócz których wyróżniono streszczenia w językach polskim i angielskim.

Praca zawiera analizę literaturową stanu zagadnienia poruszanego w pracy doktorskiej. Omówiono w niej obszary zastosowań przemysłowych wyrobów tłoczonych oraz podano metody ich wytwarzania z zastosowaniem elastomerów. Ponadto, szczegółowo scharakteryzowano analizowane materiały w zakresie ich własności, zastosowań oraz stosowanych obecnie metod kształtowania plastycznego.

W dalszej części pracy skupiono się na zachowaniu elastomerów pod obciążeniem, pojawieniu się odkształceń trwałych oraz na opisie modelowania w/w materiałów za pomocą równań konstytutywnych i stałych materiałowych.

Po tak przygotowanym wprowadzeniu do analizowanego zagadnienia przedstawiono cel i zakres pracy wynikający bezpośrednio z podanych wcześniej informacji.

Dalej przedstawiono metodykę badawczą oraz wyniki realizowanych prac w zakresie badań doświadczalnych w różnych stanach obciążenia oraz warunkach prowadzonych procesów. Wyliczone na ich podstawie stałe materiałowe wykorzystano następnie w modelowaniu numerycznych, w którym weryfikowano praktycznie zbieżność uzyskanych rezultatów.

Oceny skuteczności modelowania w 1 oraz 18 cyklu obciążenia elastomeru przedstawione w rozdziałach 10 oraz 11 pracy uważam za bardzo wartościowe. Zestawienie tak dużej liczby danych oraz graficzne zobrazowanie różnic w uzyskanych wynikach daje odpowiedzi, co do obiektywnych trudności w modelowaniu tych materiałów. Dodatkowe uzależnienie dokładności wyników od ilości oraz charakteru prób materiałowych wskazuje na złożoność prezentowanego zagadnienia.

Przedstawione na końcu wnioski płynące z pracy wyczerpująco podsumowują prowadzone badania oraz obejmują swoim zakresem interdyscyplinarność możliwości aplikacyjnych podanego rozwiązania.

Bibliografia rozprawy zawiera 108 pozycji. Literatura cytowana w pracy jest bardzo aktualna, tylko 16 pozycji było opublikowane przed rokiem 2000. Na uwagę zasługuje także fakt, iż współautorem 16 publikacji cytowanych w rozprawie jest Doktorant.

Uwagi do pracy

Rozprawa doktorska napisana jest językiem komunikatywnym oraz pozbawiona jest często występujących w pracach tego typu błędów o charakterze gramatycznym i interpunkcyjnym. Jednakże Autorka nie ustrzegła się szeregu nieścisłości. Uwagi i zapytania, które nasunęły mi się w trakcie lektury rozprawy wyspecyfikowano poniżej.

- Pomimo doskonale przygotowanej strony edycyjnej rozprawy do niektórych jej elementów można zgłosić zastrzeżenia. Są to np.:
 - brak osi symetrii na rys. 7.11 – str. 57 oraz rys. 7.21 – str. 66;
 - zamienne stosowanie „ramienia” i „gałęzi” uchwytu – str. 58 i 59;
- Na etapie modelowania numerycznego przedstawionego w rozdziale 10 pokazano model geometryczny procesu. Zdecydowano się na obliczenia w

płaskim stanie naprężenia z wielkością elementów 4 węzłowych ok. 0,25 mm. W płaskim stanie naprężenia można było stosować znacznie większe zagęszczenie elementów lub przejść na obliczenia w przestrzeni także stosując płaszczyzny symetrii. Dlaczego zdecydowano się na takie uproszczenie? Z drugiej strony podana wielkość siatki 0,25 mm była zagęszczana do 0,16 mm, co opisano i przedstawiono na rys. 10.2. Analizując wymiary elementów po remeshing w obszarze o przyjętym kryterium „adapt1” można zauważyć czterokrotne zagęszczenie siatki, co prowadzi do uzyskania rozmiarów elementów około 0,06 mm.

Wniosek końcowy

Pomimo wyszególnionych uprzednio, zresztą bardzo nielicznych uwag, biorąc pod uwagę prawidłowość wykonanych rozważań teoretycznych oraz badań eksperymentalnych uważam, że przedstawiona do recenzji praca stanowi wartościowy wkład do teorii i technologii procesów obróbki plastycznej metali.

Doktorantka wykazała się dobrą orientacją w tematyce będącej przedmiotem dysertacji, przeanalizowała problematykę doboru równań konstytutywnych do analizy materiałów elastycznych, potrafiła wyodrębnić istotne problemy naukowe oraz zastosować nowoczesne metody badawcze do ich rozwiązania. Stwierdzam zatem, że przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Bernadetty Niedziałek pt.: „Dobór równań konstytutywnych elastomeru stosowanego na narzędzia do tłoczenia” spełnia wymogi określone w **Ustawie o stopniach i tytule naukowym** oraz wnioskuje o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

Jawostaw Bartnicki