

Prof. dr hab. inż. Jacek Chróścielewski
Katedra Mechaniki Budowli i Mostów
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk

tel.: (0-58) 347-21-47
e-mail: jchrost@pg.gda.pl
fax.: (0-58) 347-16-70

Gdańsk, dnia 05.09.2008r.

Opinia

o pracy doktorskiej mgr inż. **PRZEMYSŁAWA PANASZA** pt. **Nieliniowe modele powłok z 6 stopniami swobody bazujące na dwustopniowych aproksymacjach**

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania opinii jest pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie doc. dra hab. KAZIMIERZA PIECHÓRA z dnia 12 czerwca 2008 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. PRZEMYSŁAWA PANASZA pt. „*Nieliniowe modele powłok z 6 stopniami swobody bazujące na dwustopniowych aproksymacjach*” wykonana pod kierunkiem doc. dra hab. KRZYSZTOFA WIŚNIEWSKIEGO.

2. Dane o pracy

Praca zawiera 139 stron, 87 rysunków/wykresów, 219 numerowanych wzorów, 27 tabel oraz 101 pozycji bibliografii. Rozprawa obejmuje: spis treści, 7 numerowanych rozdziałów (w tym wstęp, podsumowanie i zestawienie literatury) oraz jeden dodatek. Dysertacja dotyczy sformułowania teoretycznego, opracowania i implementacji komputerowej oraz testujących badań numerycznych 9-węzłowego powłokowego elementu skończonego o sześciu stopniach swobody w każdym węźle. Element bazuje na dwustopniowej aproksymacji odkształceń lub gradientu deformacji i przeznaczony jest do obliczeń geometrycznie nieliniowych konstrukcji powłokowych. Dysertacja napisana jest w języku polskim.

3. Omówienie zakresu rozdziałów i uwagi

Rozdział 1 (8 stron), „*Wstęp*”, na tle odwołań do literatury przedstawiono problematykę podjętego w pracy zagadnienia, tj. sformułowania wolnego od blokady (zakleszczenia) elementu powłokowego. Przedstawiono główne trudności związane z efektem blokady występującym w elementach skończonych niskiego rzędu oraz część z technik usuwających ten dalece niepożądany efekt. Określono cel pracy i zakres poszczególnych rozdziałów. Rozdział pierwszy poprzedza streszczenie w języku polskim i angielskim oraz zestawienie oznaczeń i skrótów.

Uwagi

Tytuł dysertacji budzi wątpliwości. Jak należy odczytać „*Nieliniowe modele...*”, raczej zamiast „*modele*” powinno być „*elementy skończone*”, jednak wówczas nie wiadomo czy chodzi o nieliniowe elementy skończone (w sensie bikwadratowe), czy o nieliniowy problem teorii powłok. Także opracowany przez Autora bardzo efektywny element skończony 9-SRI (*Selective Reduced Integration*) nie należy do podejścia o dwustopniowej aproksymacji. Prawdopodobnie 9-SRI jest efektem ubocznym głównego nurtu badań.

W oznaczeniach (str. 1), tej samej etykiety *ext* użyto w różnych kontekstach, tj. do rozszerzonej przestrzeni konfiguracyjnej i do funkcjonału sił zewnętrznych.

Omawiając problem blokady (zakleszczenia), należałoby wyraźnie rozróżnić zagadnienia ogólne dotyczące wszystkich elementów skończonych niskiego rzędu, od tych, które są charakterystyczne dla 9-węzłowego powłokowego elementu skończonego omawianego w pracy. Z dyskusji Autora dotyczącej metod zapobiegania blokadzie (str. 5) nie wynika, że poza trzema wymienionymi i rozważonymi w pracy, istnieją także inne techniki, a cały problem najlepszego obejścia efektu zakleszczenia pozostaje nadal otwarty.

Szczegółowe uwagi typu redakcyjnego, odszukane błędy językowe, stylistyczne, powtórzenia itp. zaznaczono w tekście rozprawy i przekazano Autorowi poprzez Promotora.

Rozdział 2 (25 stron), „Podstawowe równania powłok”, tytułowe równania powłok wyprowadzono nakładając kinematyczne więzy typu Reissnera na przestrzenny ośrodek ciągły z rotacjami reprezentowanymi tensorem obrotu. Tensor obrotu sprzężono z gradientem deformacji poprzez dodatkowy warunek, który ostatecznie włączono do funkcjonału energetycznego poprzez funkcję kary z pojedynczym parametrem skalarnym. Parametry teorii, przesunięcia i obroty (w reprezentacji kanonicznej), opisane są na powierzchni środkowej ciała typu powłoka. Wykorzystując hipotezę Reissnera w kolejnych podrozdziałach określono powłokowy gradient przemieszczeń i tensor odkształcenia, równania konstytutywne materiału typu Saint Venanta–Kirchhoffa dla uogólnionych wielkości przekrojowych oraz odpowiednie funkcjonały energetyczne stanowiące podstawę aproksymacji MES.

Uwagi

Operacja \times (krzyżyk – iloczyn wektorowy, str. 3) w równaniu (2.8)₁ i dalej, nie została zdefiniowana dla tensorów, podobnie dla wektora i tensora np. po wzorze (2.23).

Wypisanie funkcjonału (2.14) wymaga założenia o potencjalności obciążeń. Formułując słabą postać równania więzów na obroty (2.15) i dalej, nie podano interpretacji skońsiesymetrycznego tensora mnożników Lagrange’a T_a .

Czy przyjęcie powierzchni środkowej jako powierzchni podstawowej powłoki (str. 15) jest ograniczeniem wymaganym przez dalsze sformułowanie?

Niezrozumiały jest na tym etapie rozważań (bez wprowadzenia pojęcia elementu skończonego) sposób parametryzowania powierzchni środkowej powłoki poprzez, tzw. współrzędne naturalne $\xi, \eta \in [-1, +1]$. Autor na etapie formułowania teorii nie powinien używać pojęć charakterystycznych dla przyjętej dalej aproksymacji skończenie wymiarowej MES, bowiem MES jest tylko jedną z możliwych aproksymacji. Ponadto wprowadzony sposób parametryzacji i użycia baz lokalnych (str. 16), mimo iż koncepcja ta pochodzi od sławnych uczonych, budzi moje zastrzeżenia, które podam w dalszej części opinii.

Parametryzacja kanoniczna tensora obrotu (2.23), jest jedną z możliwych, nie jest jednak wolna od osobliwości. Jak rozwiązano problem osobliwości w analizie nieograniczonych (jak pisze autor) obrotów?

Autor zbyt lakonicznie (nawet w kontekście obliczeń symbolicznych) prześlizgnął się przez kluczowe i nietrywialne dla tego sformułowania rozpisanie i wrażenie poprzez parametry obrotowe (2.23): gradientów przemieszczeń (2.26) i deformacji (2.31) oraz tensorów odkształceń (2.37), czy przeniesienia (translatora), np. w (2.52), i ostatecznie funkcjonałów energetycznych.

Wzór (2.54) jest powtórzeniem wzoru (2.48), a po wyprowadzeniu składowych odkształceń (2.58) z warunków zerowania się naprężeń normalnych nie pokazano celu tego wyprowadzenia, tj. sposobu modyfikacji energii odkształcenia powłoki.

Mimo powyższych uwag rozdz. 2 wskazuje na świetne opanowanie przez Autora podstaw MOC poparte swobodą wykorzystania aparatu rachunku tensorowego w zwartym zapisie absolutnym.

Rozdział 3 (9 stron), „Metoda elementów skończonych dla powłok”, tutaj dokonano modyfikacji dwupolowego funkcyjonału energetycznego z rozdz. 2 do potrzeb opisu powłok redukując więzy na obrót do jednego skalarnego równania na składową normalną wektora kierunkowego \mathbf{t}_3 (direktora). Następnie, wprowadzając operację całkowania po grubości z wykorzystaniem translatora, pokazano w wersji powłokowej (całkowej) symboliczne: postaci poszczególnych składników wchodzących do funkcyjonału, równania równowagi i operator styczny. Także zasygnalizowano podstawy obliczeń symbolicznych oraz omówiono stosowane w pracy metody rozwiązywania nieliniowych układów, tj. standardową metodę Newtona-Raphsona oraz technikę sterowania parametrem długością łuku na ścieżce równowagi.

Uwagi

Tytuł rozdziału budzi zastrzeżenia, bowiem problematyka w nim zawarta jest na tyle ogólna, że niekoniecznie trzeba ją wiązać z MES, zaś odniesienia, które można ostatecznie uznać, że dotyczą bezpośrednio MES są szczątkowe w tym rozdziale.

Symboliczny zapis operacji (3.4) nie jest funkcyjonałem, jak to wynika z tekstu.

W punkcie (i), str. 28 nie ma potrzeby wprowadzać pojęcie pracy wirtualnej.

Pojawienie się wektora niewiadomych dyskretnych (stopni swobody) \mathbf{q} w opisie operatorów stycznych \mathbf{B} i \mathbf{b}_d oraz jego wariacji $\delta\mathbf{q}$ nie są niczym poprzedzone. Brakuje tu choćby symbolicznych definicji i pojęć z zakresu metod aproksymacji skończenie wymiarowej (niekoniecznie MES). Podobnie jak w rozdz. 2 tu także Autor zbyt lakonicznie prześlizgnął się przez nietrywialne w kontekście obrotowych stopni swobody obliczenia operatorów stycznych oraz wektorów i macierzy elementowych.

Rozdz. 3.3, obiecujący w tytule obliczenia symboliczne niestety nie wykracza poza standardowy opis różniczkowania obiektowego. Szkoda, bo właśnie tu byłoby miejsce na rozwinięcie i algorytmiczny opis (choćby w postaci schematów blokowych) sygnalizowanych wcześniej operacji obliczania wektorowych i macierzowych zależności elementowych, które przecie Autor wykonać musiał. Pod tym względem recenzent czuje niedosyt, a czytelnik pragnący rozwinąć koncepcję i powtórzyć główne wyniki pracy nie znajdzie istotnych podpowiedzi i nie będzie mógł wykorzystać zapewne bardzo interesujących przemyśleń oraz sprawdzonych doświadczeń Autora.

Rozdz. 3.4, omawiający stosowane w pracy metody rozwiązywania nieliniowych układów równań, jest standardowym, poprawnie podanym tekstem, wskazującym na dobre i twórcze opanowanie tej tematyki przez Autora. Jednak Autor nie ustrzegł się, zdaniem recenzenta nieścisłości typowej dla młodszego pokolenia badaczy, tj. zrównania ważności metody Newtona z techniką sterowania rozwiązaniem poprzez parametr długości łuku. Ta technika dała pewien przełom w obliczeniach nieliniowych i jest bardzo ważna, tym nie mniej stanowi ona tylko jedną z koncepcji sterowania rozwiązaniem w ramach metod typu Newtona.

Nie jest jasna uwaga dot. przypadków o niesymetrycznych operatorach stycznych (str. 32, d. 10). Proszę o jej rozwinięcie.

Komentarza wymaga proces akumulacji przyrostów uogólnionych przemieszczeń (3.24), (3.31)_{1,2} oraz sposobów obliczania długości łuku (3.30) dla parametrów obrotowych, które przecie w wersji (2.23) wektora obrotu skończonego nie są addytywne i zależą od jego reprezentacji (materialnej lub przestrzennej).

Wyjaśnienia wymaga pojęcie „*norma energetyczna*” (str. 32, d. 2) i w jej kontekście warunek (3.25).

Ponadto uwagi dotyczące trudności z obliczeniem długości łuku (str. 35, d. 10) chyba dotyczą konkretnej implementacji, a nie samej techniki ponieważ wielkość ta jest deklarowana (3.31)₁ i może być zmieniana na każdym kroku przyrostowym.

Rozdział 4 (15 stron), „*Charakterystyka podstawowego 9-węzłowego elementu powłokowego*”, dotyczy w pewnym sensie standardowej technologii MES w odniesieniu do 9-węzłowego elementu powłokowego oraz badań jego własności, głównie w zakresie analizy liniowej. Omówiono tu zasady doboru funkcji kształtu, całkowania analitycznego po grubości przekrojowych zależności konstytutywnych i numerycznego całkowania w powierzchni związków macierzowych elementu. Niestandardową część rozdziału stanowią badania dotyczące doboru wartości parametru kary realizującego więzy nałożone na rotacje. Ostatni bardzo ciekawy etap obejmuje badania własności elementu związane z jego odpornością na dystorsje siatki podziału uzupełnione testem na wartości własne w PSN.

Uwagi

Rozdz. 4.1 i 4.2, omawiające 9-węzłowy izoparametryczny element powłokowy oraz całkowanie analityczne po grubości powłoki i numeryczne w płaszczyźnie elementu, są w większości standardowym tekstem i poza drobnymi potknięciami językowymi nie budzą zastrzeżeń. Świadczą one o dobrym opanowaniu tego materiału przez Autora. Jednak, zdaniem recenzenta, za mało uwagi poświęcono tu istotnemu dla powłok problemowi interpolacji obrotów, choć na tym etapie rozważań wobec liniowości problemu zapis (4.4)₃ można uznać za dostateczny. Tym niemniej nietrywialny problem interpolacji obrotów w nieograniczonym zakresie deformacji, jako zadanie docelowe dla elementów, nie został w pracy dostatecznie rozwinięty.

Nie jest jasne czy badania (rozd. 4.3), dotyczące doboru wartości parametru kary γ realizującego więzy nałożone na rotacje, były prowadzone dla elementu „*podstawowego*” z tego rozdziału, czy dla elementów docelowych po wprowadzeniu technik dwustopniowej interpolacji omawianych w rozdziale następnym?

W drugim przypadku punkt ten powinien znaleźć się w następnym rozdziale.

Określenie „*wartość optymalna*” (np. str. 41, d. 16) jest często spotykanym w literaturze naukowej i ekonomicznej nadużyciem terminologii w przypadkach kiedy w ogóle nie był sformułowany problem optymalizacji z określoną funkcją celu.

W przypadku badań dotyczących półsfery z otworem (rys. 4.5), niepokojący jest stosunkowo wąski obszar wypłaszczenia krzywej w okolicy ustalonej wartości $\gamma = 2G \times 10^{-3}$. Może to wskazywać na pewną wrażliwość sformułowania ze względu na zmianę γ w zależności od typu przykładu. Czy podobne zjawiska obserwowano w innych testach, szczególnie w kontekście tzw. testów asymptotycznych dla powłok (dominacji stanu membranowego lub zgięciowego, zob. *Chapelle D, Bathe K.J. Fundamental considerations for the finite element analysis of shell structures. Computers and Structures 1998;66:19-36*).

Rys. 4.6 w wersji czarnobiałej jest nieczytelny.

Z uwagi na przyjęte w pracy 6-parametrowe sformułowanie teorii powłok, brak tu testu dotyczącego bezpośrednio 6-stopnia swobody, typowo – zwijania belki-tarczy skupionym momentem normalnym do jej powierzchni (zob. np. [Chroscielewski, Makowski, Pietraszkiewicz, 2004], pkt. 6.5.2, str. 476).

Bardzo ciekawe jest, przedstawione w rozdz. 4.4, studium wpływu mimośrodów w położeniu węzła wewnętrznego w jednowymiarowej 3-węzłowej bazie interpolacji Lagrange'a (patrzac ogólniej niekoniecznie musi to być przecie element skończony). Nasuwają się tu, i w stosunku do rozdz. 2.2.1, następujące spostrzeżenia i pytania.

- 1) Przyjęty sposób wprowadzenia bazy lokalnej (2.19) poprzez współrzędne naturalne jest bardzo wygodnym podejściem, ale tylko jednym z możliwych.
- 2) Tak wprowadzona baza $\{t_i, i=1,2,3\}$ zależy od definicji (węzłów) i dystorsji elementu skończonego, a stąd może zmieniać się z elementu na element.
- 3) Baza ta ma charakter przybliżony w stosunku do ścisłej geometrii powierzchni (powłoki) bo jest obarczona błędem interpolacji geometrii.
- 4) Baza ta nie jest powiązana z opisem fizycznym geometrii powłoki (np. śledzenie wyróżnionego kierunku) stąd nie może być bezpośrednio wykorzystana do opisu kierunkowych cech materiału (np. ortotropii, układu zbrojenia, włókien).
- 5) Jakakolwiek zmiana orientacji najeżenia (rozdz. 4.4) powłoki o charakterze niefizycznym, niezależnie do źródła numerycznego, nie może być dopuszczona, bowiem to dyskwalifikuje taką koncepcję!
- 6) Czy w definiowaniu bazy $\{g_\alpha\}$ zastąpienie współrzędnej naturalnej $\xi, \eta \in [-1, +1]$ współrzędną łukową nie rozwiąże problemu zmiany orientacji bazy $\{g_\alpha\}$?

Bardzo interesująca jest uwaga z końca str. 43 dotycząca dystorsji węzłów wewnętrznych w zagadnieniach dużych odkształceń. Proszę o jej rozwinięcie. Czy problemy te mają miejsce niezależnie od typu opisu (materialny, przestrzenny), a w konsekwencji typu sformułowania Lagrange'a (stacjonarne (TL), uaktualnione (UL))?

W macierzy (wektorze) funkcji kształtu N (str. 44, g. 11) jest niezgodny porządek węzłów z rys. 4.7 i dalej przyjętą konwencją numeracji węzłów elementu.

Podrozdział 4.5 nie wymaga komentarza.

Rozdział 5 (26 stron), „Metody eliminujące zakleszczanie 9-węzłowego elementu powłokowego”, można uznać za podstawową część pracy. Autor wykorzystując, prostszy od powłokowego analog jednowymiarowy, w postaci izoparametrycznego 3-węzłowego elementu Lagrange'owskiego wg teorii belki Timoszenki, bardzo jasno i poglądowo omówiono mechanizm powstawania blokady oraz sposób jej eliminacji w ramach koncepcji całkowania zredukowanego i dwustopniowej aproksymacji odkształceń. Następnie Autor, z odniesieniem do literatury popartym krytyką niektórych podejść, uogólnił rozważania jednowymiarowe na powierzchniowe elementy powłokowe. Rozważył elementy 4- i docelowy 9-węzłowy proponując i dyskutując różne warianty aproksymacji odpowiednich składowych odkształceń (9-ANS *Assumed Natural Strain method*, 9-AS *Assumed Strain method*) lub gradientu deformacji (9-ADG *Assumed Displacement Gradient method*). Rozdział kończy studium koncepcji całkowania selektywnie zredukowanego (9-SRI) z pokazaniem pewnych analogii między obydwoma podejściami (tam gdzie występują).

Uwagi

W rozważaniach ogólnych dotyczących zakleszczenia poza wymienionymi dwoma (str. 51), warto byłoby odnieść się także do blokady objętościowej. Na rys. 5.1, brak komentarza co do symbolu h .

W funkcjonale (5.2) brak konsekwencji w oznaczeniach, np. w stosunku do (5.71)–(5.75) argumenty powinny być z kwadratem. Ponadto powinno się skomentować warunki dla których składniki mieszane w (5.2) nie występują i czemu można je pominąć bez szkody dla opisu omawianego problem.

Wzory (5.5) są powtórzeniem macierzy funkcji kształtu N ze str. 44, g. 11.

Wynik (5.6) jest prawdziwy tylko dla węzłów równoodległych, tj. zależności liniowej x od ξ , gdy mimośród $s = 0$ z rys. 4.7! Bowiem dla $s \neq 0$, $dx/d\xi \neq \text{const.}$ nie jest stałe, może zmieniać znak zależnie od wartości s (rys. 4.8). W kontekście dyskusji z pkt. 4.4, warto w tym miejscu to podkreślić, a w świetle tej własności zastanowić się nad badaniami, wnioskami oraz uwagą 6 recenzenta.

W kontekście technik eliminacji zakleszczenia elementów belkowych (rozd. 5.1.3), warto podkreślić, że całkowanie zredukowane (rys. 5.11 c), które świetnie sprawdza się w przypadku belek (choć też nie zawsze) w ogólnym przypadku nie sprawdza się w problemach 2- i 3-wymiarowych (powierzchniowych i bryłowych) ze względu na możliwość powstawania form pasożytniczych (zeroenergetycznych).

Na rys. 5.12a i rys. 5.13a nie jest widoczna oś ξ . Mało czytelne, a nawet mylące, jest zestawianie punktów próbkowania (pomiarowych) dla obu kierunków aproksymacji składowych $\xi\eta$ i $\eta\xi$ na jednym rys. 5.12a (porównaj przejrzystość rys. 5.13).

Czy wykres bazowej funkcji aproksymacyjnej R_A na rys. 5.13b jest poprawny? Bowiem zgodnie z własnościami bazy interpolacyjnej (kształtu) i przepisem (5.53a) funkcja $R_A(\xi, \eta)$ powinna zniknąć we wszystkich punktach próbkowania z wyjątkiem punktu A , a w samym punkcie A przyjąć wartość równą jeden.

Uwaga ze str. 66, d. 1 i kontynuowana na str. 67, g.1 nie jest zupełna, bowiem forma analogiczna wymaga nie tylko zamiany współrzędnych $\xi \leftrightarrow \eta$, ale także zmiany położenia punktów próbkowania (zob. rys. 5.14 a i b).

Nie jest jasna uwaga dotycząca zastosowania czteropunktowego schematu próbkowania dla „odkształceń nieliniowych” (str. 69, g.10). Co Autor w tym kontekście rozumie pod pojęciem „odkształceń nieliniowych”? Czy analizę geometrycznie nieliniową (co wówczas z formami pasożytniczymi?), czy tylko składniki nieliniowe odkształceń (co wówczas ze spójnością organizacyjną algorytmu?).

Niezbyt czytelna jest przewaga zalet algorytmu opartego na koncepcji linii próbkowania w stosunku do użycia, klasycznego dla ANS, układu punktów pomiarowych. Przecie odkształcenia na tych liniach nie są zależnością liniową.

Brakuje choćby drobnej uwagi o sposobie przeprowadzenia dwustopniowej interpolacji macierzy B , tj. relacji odkształcenia–przemieszczenia (3.8a). Jak Autor rozwiązał ten problem? Może udało się go uniknąć?

Czy w tabeli 5.1, rzeczywiście chodzi o dwustopniową interpolację skręcenia κ_{12} (2.39c)? Jeśli tak to jakimi przesłankami kierowano się przy tym wyborze? Analogiczne pytanie dotyczy wyrazu $(\kappa_{12})^2$ z tabeli 5.4 oraz składników 12 i 21 gradientu przemieszczeń G_1 z tabeli 5.2.

Ostatni wiersz tabeli 5.3 wskazuje, że Autorowi udało się wyseparować składniki, które należy całkować selektywnie z odpowiednią regułą taką, że nie pojawiają się formy pasożytnicze, a jednocześnie został wyeliminowany efekt blokady na poziomie

równoważnym elementom o dwustopniowej aproksymacji. Jeśli jest to oryginalny wynik Autora (niestety recenzent nie potrafi na to pytanie odpowiedzieć z całą pewnością) to jest to poważne osiągnięcie na miarę trwałego dorobku w MES. Bowiem, w odróżnieniu od technik dwustopniowej aproksymacji, całkowanie selektywnie zredukowane jest bardzo proste w realizacji i stąd popularne oraz często stosowane.

Rozdział 6 (51 stron), „*Testy numeryczne*”, zawiera przykłady weryfikujące w sposób wszechstronny własności opracowanych w dysertacji elementów skończonych. Zadania pogrupowane są w trzech kategoriach: testy na wartości własne, testy bazowe (tzw. *patch tests*) oraz bardzo rozbudowane rozwiązania uznanych w literaturze przykładów nieliniowych. Badania są przeprowadzone bardzo solidnie. Rozdział kończy podsumowanie uzyskanych wyników z syntetyczną oceną opracowanych elementów.

Uwagi

Na ile zgodne są wartości własne między poszczególnymi elementami (rozd. 6.1)? Czy obserwowano jakieś rażące różnice lub odchylenia tylko niektórych wartości?

Czy mimo dramatycznej sytuacji w zgięciowych testach bazowych z dystorsją węzła wewnętrznego z rozdz. 6.2.2 można uznać zachowanie elementu 9-SRI za najlepsze?

Nie podano od kogo pochodzi oryginalnie test smukłego wspornika z rozdz. 6.6. Tutaj i dalej przy porównywaniu rotacji w zakresie nieliniowym (rys. 6.18a) należy zawsze zachować ostrożność, bo różnice w wartościach mogą także wynikać być może z rozpatrywania przez różnych autorów różnych parametryzacji grupy obrotów.

W teście 6.7 „*membrana Cooka*” (str. 98) niezrozumiała jest uwaga dotycząca elementu MITC9 (*Mixed Interpolation of Tensorial Components*) „*możliwe było uzyskanie tylko liniowej zależności przemieszczenia od obciążenia*”. Z czego to ograniczenie wynika, jak należy rozumieć rezultat z rys. 6.20? W podpisie pod tym rysunkiem (i innymi dalej) nie wiadomo o jaką siatkę chodzi, węzłów czy elementów?

Znany jest inny wariant zadania z rozdz. 6.8 „*hak Raasha*” (str. 100), tzw. „*znak zapytania (Balcha)*” (zob. np. [Chroscielewski, Makowski, Pietraszkiewicz, 2004]) z niegładkim połączeniem płatów, który wydaje się bardziej właściwy w ocenie sformułowania 6-parametrowego teorii powłok. Mówienie o błędzie bezpośrednio: duży, mały itp. (np. str. 100, d. 5), nie jest właściwe w przypadkach kiedy rozwiązanie ściśle nie jest znane, a rozwiązanie traktowane jako referencyjne jest tylko jednym z możliwych wyników przybliżonych (nawet nie poprzedzonych badaniem zbieżności), lepiej wówczas mówić o różnicach w rozwiązaniach w odniesieniu do ... itd.

Określenie podparcia prostej krawędzi na rys. 6.24 jako „*podwieszenie*” nie jest chyba właściwe, z tekstu wynika, że jest to krawędź swobodnie podparta nieprzesuwnie.

Podobnie w przykładzie 6.11 „*cylinder z przeponami*” użycie określenia „*sztynna przepona*” (str. 107, g. 2) w stosunku do precyzowania warunków brzegowych nie jest jednoznaczne. Lepiej wypisać te warunki w sposób analityczny. Ponadto stwierdzenie (str. 107, d. 6) „*opinia, że elementy typu SRI charakteryzują się słabą zbieżnością nie została potwierdzona*” nie do końca jest właściwe, bowiem samo określenie SRI nie jest jednoznaczne i może dotyczyć różnych składników. Najczęściej w literaturze pod określeniem SRI kryje się wersja obejmująca tylko całkowanie zredukowane związków ze składnikami od ścinania (poprzecznego), a nie takie kompleksowe podejście jakie opracowano w dysertacji. Podobnie użycie określenia „*wpływ wyższych postaci deformacji*” nie jest właściwe i poprawne. Raczej chodzi tu o możliwość odtworzenia przez zgrubne siatki podziału złożonej postaci deformacyjnej

powiązanej ze skracaniem się długości fali deformacyjnej w silnie nieliniowym zakresie.

Czy na podstawie analizy liczby iteracji w rozdz. 6.12 (rys. 6.39 i 6.40, których jest stosunkowo dużo bo od 6 do 16) oraz ewentualnego porównania z innymi sformułowaniami (np. Promotora) można wyciągnąć jakieś ogólniejsze wnioski dotyczące oceny prędkości zbieżności sformułowań o dwustopniowej aproksymacji.

Przykład 6.14 (str. 120), „*wspornik o przekroju ceowym*” jest zadaniem o niegładkim połączeniu płatów. Zadanie to, ze wszystkich rozważonych w pracy, jest jednym w którym 6 stopień swobody jest istotny ze względu na dyskretyzację. Dlatego w przykładzie tym należałoby przeprowadzić badanie wpływu parametru kary γ , który wprowadza rotację normalną do sformułowania. Szkoda, że Autor nie odniósł się do pracy [Chroszcielewski, Makowski, Pietraszkiewicz, 2004] współautorstwa recenzenta wydanej w IPPT, bowiem tam zawarto reprezentatywne rozwiązania nawet w formie stabelaryzowanej w celu łatwiejszego porównywania. W tym konkretnym zadaniu należałoby również podać jak w rozwiązaniach sformułowań 5-parametrowych (referencyjnych) jest modelowane niegładkie, ortogonalne połączenie płatów.

„*Skęcany pierścień*” (rozdz. 6.15) to drugi z rozważanych w dysertacji przykładów w którym 6 stopień swobody jest ważny. Zadanie to, ze względu na obciążenie skupionym momentem normalnym do powierzchni powłoki, jest poza zasięgiem teorii powłok 3- i 5-parametrowej jeśli tam nie stosuje się specjalnych zabiegów. Z polskich Autorów przykład ten analizował w swoim doktoracie SMOLEŃSKI w 1996 roku (*Smoleński W.M.: Finite deformations of rods. Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 1996; Smoleński W.M.: Statically and kinematically exact nonlinear theory of rods and its numerical verification. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 178 (1999) 89–113*). Co Autor rozumie pod pojęciem „*przemieszczenia styczne*” (str. 124, d. 4)? Tutaj jak we wszystkich układach swobodnych stan przemieszczeń określony jest z dokładnością do stałej. Czy w zadaniu tym badano wpływ zagęszczenia siatki podziału na rozwiązania?

Bardzo przydatny jest rozdz. 6.16 sumujący uzyskane wyniki z syntetyczną oceną opracowanych elementów. Szkoda, że w tabeli 6.21 nie zawarto rozwiązań liniowych z dwóch ostatnich przykładów w który 6 stopień odgrywa istotną rolę.

Rozdział 7 (2 strony) „*Podsumowanie*” to pięć punktów w których Doktorant zawarł jego zdaniem własne oryginalne osiągnięcia. Recenzent zgada się z tym zestawieniem, przy czy jak podano w uwagach do rozdz. 4 tej recenzji, pkt. 4 wymaga pewnej rewizji. Ponadto brakuje określenia perspektyw i kierunków dalszych badań własnych Autora.

Literatura (8 stron) zawiera 101 pozycji, które dobrano sposób wyważony i właściwie do zakresu problemu ujętego w pracy.

Dodatek (2 stron) „*Parametryzacja kanoniczna tensora rotacji*”, jest standardowym tekstem podręcznikowym dotyczącym omawianego tematu. W tytule dodatku litera A jest zbędna sugeruje większą liczbę dodatków. Należałoby podać źródło na podstawie którego tekst ten został opracowany.

4. Ocena rozprawy

Rozprawa mgr inż. **PRZEMYSŁAWA PANASZA** wpisuje się tematykę badań numerycznych nieprzerwanie prowadzonych od szeregu lat w wielu ośrodkach naukowych na świecie związanych z opracowaniem tzw. efektywnego powłokowego elementu skończonego. Element taki powinien bazować na dobrym, a jednocześnie w miarę prostym sformułowaniu teoretycznym z minimalną liczbą ograniczeń i założeń oraz być ekonomiczny w obliczeniach dając w jak najszerszej klasie problemów wiarygodne rozwiązania w których rząd błędu numerycznego jest niski i znany. Tak postawiony problem wymaga połączenia znacznej wiedzy teoretycznej z dziedziny matematyki stosowanej w tym geometrii różniczkowej i mechaniki ośrodka ciągłego z teorią powłok włącznie, z dużą biegłością w obszarze metod numerycznych. W tej ostatniej dziedzinie wymagana jest umiejętność tworzenia i realizacji własnych algorytmów i procedur oraz ich aplikacji w ramach programów własnych lub systemów komercyjnych, czyli solidne rzemiosło w zakresie programowania i obliczeń.

W mojej ocenie Autor mgr inż. **PRZEMYSŁAW PANASZ** spełnia wspomniane warunki, a jego praca wpisuje się w cel wymienionych powyższej badań osiągając następujące, oryginalne wyniki badawcze:

- propozycja 6-parametrowej nieliniowej teorii powłok (z rotacją normalną) w zakresie nieograniczonych obrotów jako bazy teoretycznej do tworzonych elementów,
- opracowanie trzech wariantów dwustopniowej aproksymacji odkształceń lub gradientu deformacji w celu eliminacji efektu blokady membranowej i od ścinania poprzecznego,
- opracowanie kompleksowej, nie powodującej form pasożytniczych, techniki całkowania selektywnego w celu eliminacji ww. efektów blokady,
- implementacja ww. technik w postaci czterech własnych elementów 9-węzłowych,
- przeprowadzenie szeregu rygorystycznych testów w zakresie liniowym i nieliniowym weryfikujących własności opracowanych elementów skończonych.

Pomimo kilku potknięć (zaznaczonych w tekście i przekazanych autorowi) oraz sporej liczby uwag, które w pewnym sensie można traktować jak partnerską dyskusję recenzenta z Doktorantem, należy uznać, że cel pracy został osiągnięty, a Autora jak i osiągnięte wyniki merytorycznie oceniam bardzo wysoko.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Przedstawiona do recenzji rozprawa realizuje przyjęte w niej cele naukowe i świadczy o umiejętności formułowania i rozwiązywania, przez jej Autora mgr inż. **PRZEMYSŁAWA PANASZA**, problemów dotyczących formułowania podstaw teoretycznych, tworzenia i implementacji komputerowej powłokowych elementu skończonego bazujących na koncepcji dwustopniowej aproksymacji odkształceń lub gradientu deformacji, a przeznaczonych do obliczeń nieliniowych konstrukcji w zakresie nieograniczonych translacji i rotacji. Autor wykazał się zawansowaną wiedzą teoretyczną oraz znajomością metod komputerowych rozwiązywania geometrycznie nieliniowych zagadnień z zakresu mechaniki powłok.

Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z 14 marca 2003r.) i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. **PRZEMYSŁAWA PANASZA** do publicznej obrony pracy.

Jacek Chróścielewski