

Henryk KOPECKI, Jan ZACHARZEWSKI
Politechnika Rzeszowska

NUMERYCZNO-EKSPERYMENTALNA ANALIZA SPRĘŻYSTO-PLASTYCZNYCH DEFORMACJI ELEMENTÓW STRUKTURY CIENKOŚCIENNEJ Z WYKROJAMI

Praca zawiera wyniki analizy porównawczej stanu naprężenia w płaskich strukturach cienkościennych z wykrojami o kształcie koła oraz prostokąta, poddanych rozciąganiu. Badania eksperymentalne przeprowadzono na elementach konstrukcji wykonanych z materiału optycznie czynnego. Obliczenia wykonano, wykorzystując programy: MSC.MARC – jako solver, oraz MSC.PATRAN 2005 – jako pre- i postprocesor. Problem sformułowany jako zagadnienie fizycznie nieliniowe (przyjęto model idealnie sprężysto-plastyczny materiału) oraz geometrycznie liniowe.

Słowa kluczowe: stan naprężenia, struktura cienkościenna, nieliniowość fizyczna

Wprowadzenie

Cienkościennie ustroje nośne charakteryzują się złożonością geometryczną, przejawiającą się w formie nieciągłości wynikających z funkcji użytkowych. Nieciągłości te stanowią różnego rodzaju wykroje, które jako raptowne zmiany sztywności stanowią karby wywołujące spiętrzenia naprężeń. Sytuacje takie sprzyjają przedwczesnym uszkodzeniom konstrukcji, co nierzadko jest równoznaczne ze zniszczeniem. Dotyczy to ustrojów wykonywanych zarówno z materiałów niedoznajających uplastycznienia, jak również tych, które w stanach zaawansowanych deformacji wykazują obecność fazy plastycznej. Pojawienie się strefy lokalnego uplastycznienia w sąsiedztwie wykroju nie oznacza utraty nośności konstrukcji. Jednakże dalsze zwiększanie obciążenia, poszerzające strefę newralgicznego przekroju, może prowadzić do jego całkowitego uplastycznienia. W procesie projektowania cienkościennych ustrojów nośnych niezbędna staje się znajomość pola naprężeń wywołanych dopuszczalnym w eksploatacji obciążeniem konstrukcji [1÷6].

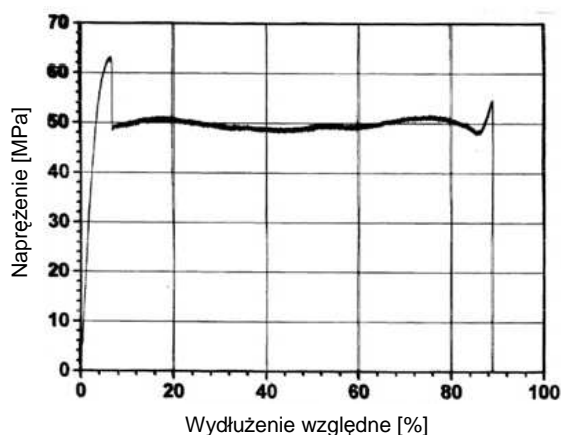
Cel niniejszej pracy stanowi analiza porównawcza stanu naprężenia w płaskich strukturach cienkościennych z wykrojami o kształcie prostokąta, poddanych rozciąganiu. Rozważa się dwa rodzaje wykrojów: kołowy i prostokątny,

o narożach obróconych o kąt 90° w stosunku do wymiarów gabarytowych konstrukcji. Problem jest analizowany na gruncie metod numerycznych oraz badań doświadczalnych metodami polaryzacyjno-optycznymi. Jako materiał konstrukcji przyjęto optycznie czynny poliwęglan, wykazujący cechy sprężyste oraz niesprężyste. Nieliniową analizę numeryczną przeprowadzano, wykorzystując program MSC.MARC-7 oraz pre- i postprocesor MSC.PATRAN.

Doświadczenia wykazują, że rozwiązywanie zagadnienia nieliniowego na drodze numerycznej prowadzi na ogół do wyników alternatywnych, poprawnych z punktu widzenia formalizmu matematycznego, z których tylko jeden jest fizycznie poprawny. Jego identyfikacja nie należy do przedsięwzięć łatwych. W podobnych sytuacjach, gdy wyniki obliczeń numerycznych sugerują szereg formalnie poprawnych rezultatów, eksperyment staje się jedyną formą weryfikacji.

Badania doświadczalne

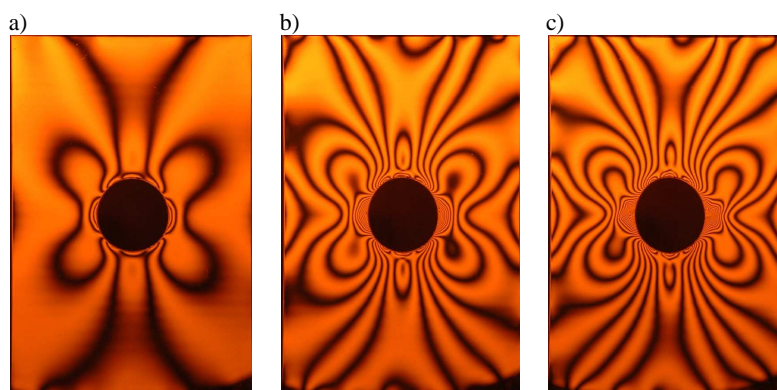
Badania eksperymentalne przeprowadzono na elementach konstrukcji wykonanych z materiału optycznie czynnego. Umożliwiło to zastosowanie metody polaryzacyjno-optycznej. Badania przeprowadzono na polaryskopie transmisyjnym przy zastosowaniu światła białego oraz monochromatycznego (sodowego). Badaniom poddawano dwa elementy, tj. płyty z wykojem kołowym i kwadratowym (rys. 1.), o wymiarach 100×190 mm, grubości 1 mm. Siły obciążające modele wynosiły kolejno: 960, 2560 oraz 3200 N. Materiał konstrukcji charakteryzował się następującymi stałymi materiałowymi: $E = 280$ GPa, $R_e = 50$ MPa. Wykres rozciągania zastosowanego poliwęglanu (rys. 1.) uwidacznia istnienie rozległej strefy deformacji trwałej.



Rys. 1. Wykres rozciągania poliwęglanu

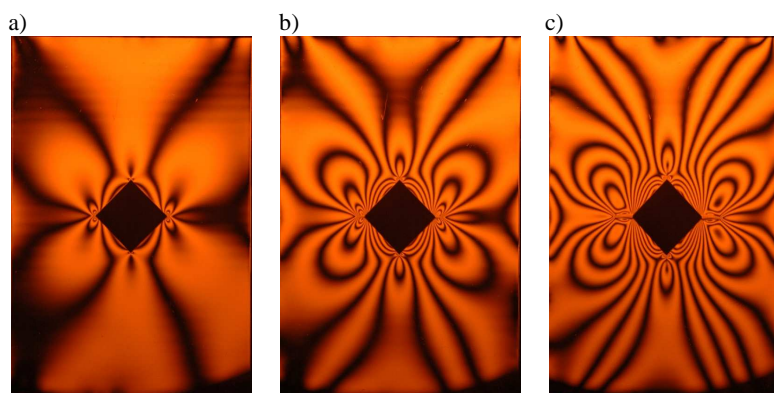
Fig. 1. Tensile diagram of polycarbonate

Wyniki badań przedstawiono w formie fotografii obrazujących pola izochrom w obu wariantach wykoju w konstrukcji. W opisie pod rysunkami podano wartości siły obciążającej. Rysunek 2. prezentuje obserwowane w świetle monochromatycznym pola izochrom w konstrukcji z otworem kołowym, przy stopniowo rosnącym obciążeniu. Rysunek 3. przedstawia rozkłady izochrom w konstrukcji z wykojem kwadratowym, przy kolejno wzrastającym obciążeniu, natomiast rysunek 4. – rozkład izochrom odpowiadający deformacji trwałej, po całkowitym odciążeniu struktury.



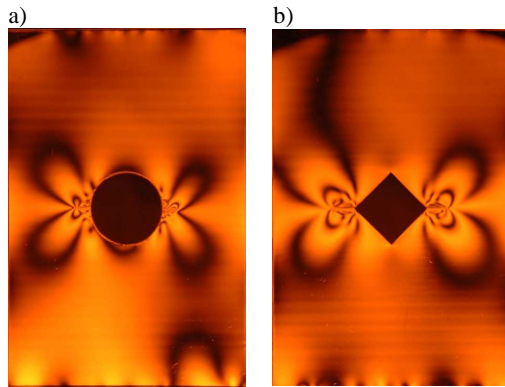
Rys. 2. Rozkład izochrom w konstrukcji z otworem kołowym – siła obciążająca: 960 N (a), 2560 N (b), 3200 N (c)

Fig. 2. The field of the isochromatics for structures with axisymmetric holes – the loading force: 960 N (a), 2560 N (b), 3200 N (c)



Rys. 3. Rozkład izochrom w konstrukcji z wykojem kwadratowym – siła obciążająca: 960 N (a), 2560 N (b), 3200 N (c)

Fig. 3. The field of the isochromatics for structures with rectangular holes – the loading force: 960 N (a), 2560 N (b), 3200 N (c)

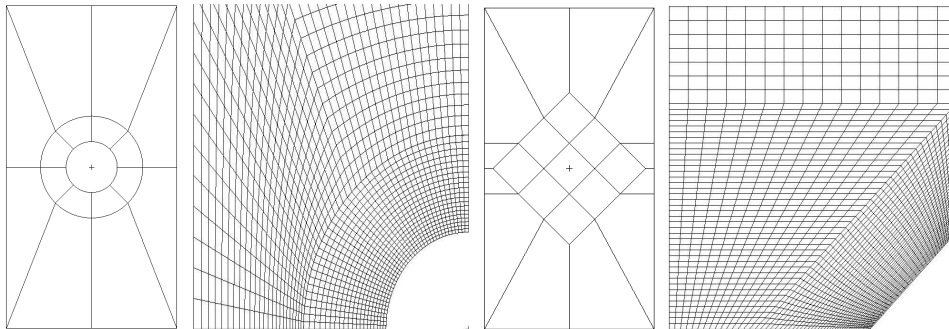


Rys. 4. Rozkład izochrom po odciążeniu odpowiadający deformacji trwałej – dla otworu kołowego (a) oraz kwadratowego (b)

Fig. 4. Field of the isochromatics after load corresponding to plastic strain – for axisymmetric holes (a) and rectangular holes (b)

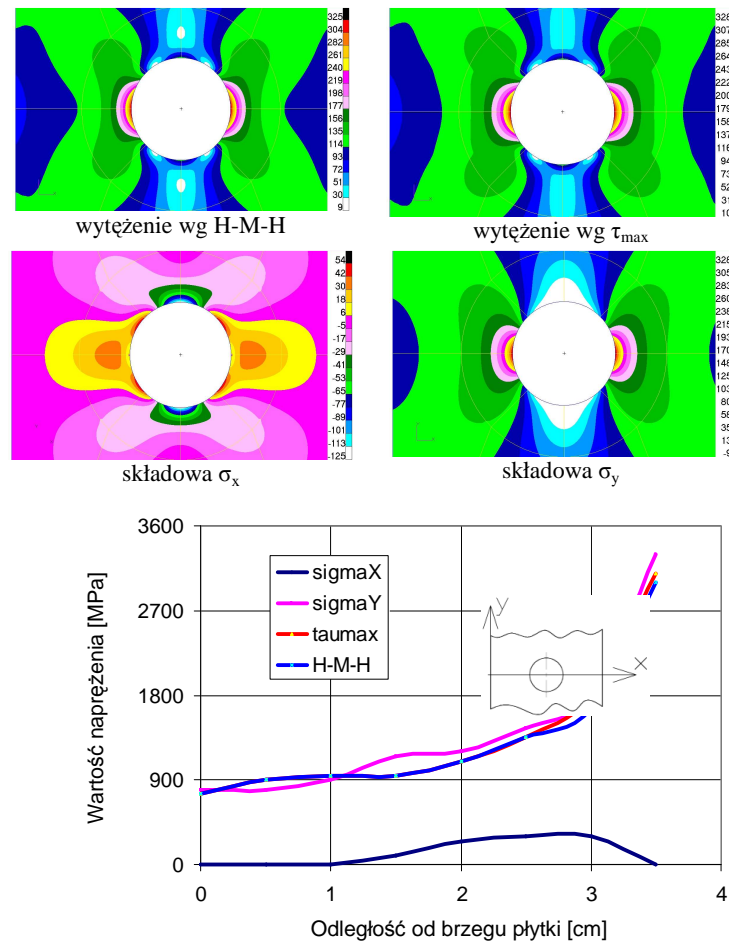
Obliczenia numeryczne

Obliczenia wykonano, wykorzystując programy: MSC.MARC – jako solver, oraz MSC.PATRAN 2005 – jako pre- i postprocesor. Problem formułowano jako zagadnienie fizycznie nieliniowe (przyjęto model idealnie sprężysto-plastyczny materiału) oraz geometrycznie liniowe [7, 8]. W celu zapewnienia dokładności wyników obliczeń rozważano szereg wariantów podziału geometrycznego konstrukcji. Ostatecznie do obliczeń przyjęto wariant (rys. 5.), który zapewniał wymagany stopień zagęszczenia siatki. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie kolorowych warstw, obrazujących poziomy wyężenia wg hipotezy H-M-H, hipotezy τ_{\max} oraz składowych σ_x , σ_y . Na podstawie wspomnianych warstw, dla wybranych poziomów obciążenia oraz obu wariantów wykroju sporządzono wykresy rozkładów wyężenia i składowych stanu napężenia w przekroju newralgicznym (wzdłuż osi symetrii w kierunku x – poprzecznym do kierunku obciążania), na odcinku: od brzegu zewnętrznego do brzegu wykroju (rys. 6.÷8.).



Rys. 5. Podział geometryczny modelu z wykresem kołowym (7200 elementów) i kwadratowym (6240 elementów) oraz przyjęte siatki

Fig. 5. Partition of geometrical model with circular hole (7200 elements) and square hole (6240 elements) and accepted mesh

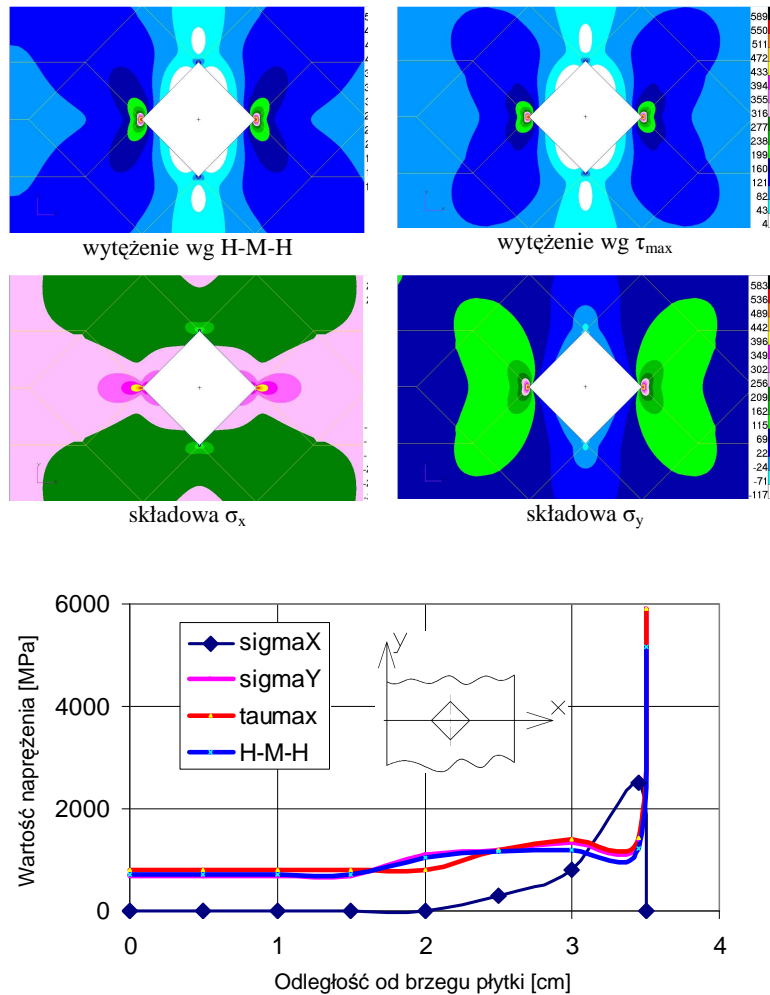


Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych oraz składowych stanu naprężenia dla wykroju kołowego – siła obciążająca 960 N

Fig. 6. Distribution of effective stresses and stress state components for axisymmetric wholes – the loading force 960 N

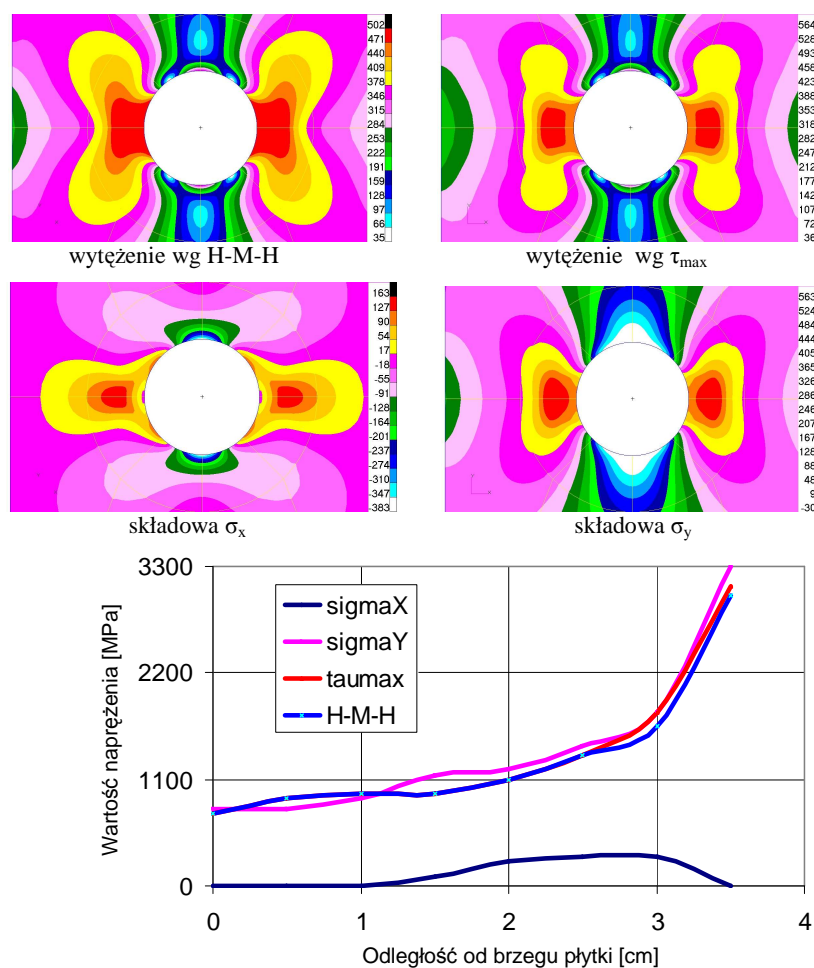
W sformułowaniu problemu numerycznego nie wzięto pod uwagę zjawiska lokalnego wyboczenia, tzw. *wrinklingu*. Pojawienie się lokalnego wyboczenia w strefie wykroju wprowadza dodatkowo stan giętny, który w superpozycji ze stanem błonowym zmienia charakter sztywności konstrukcji, co wiąże się z redystrybucją naprężeń. Jako okoliczność upoważniającą do zaniedbania w pierwszym przybliżeniu zjawiska *wrinklingu* wzięto pod uwagę fakt, że zjawisko to jest szczególnie niekorzystne, gdy w obszarze analizowanej konstrukcji pojawiają się szczeliny, co w rozważanym przypadku nie zachodziło. Należy podkreślić, że stwierdzone wysokie poziomy gradientów naprężenia w obu rodza-

jach wykrojów sprzyjają powstawaniu szczelin zmęczeniowych w trakcie eksploatacji. Można zatem wnioskować, że lokalne wykroje (w szczególności różne od kołowego), w których pojawiają się ostre naroża, winny być w miarę możliwości eliminowane lub ograniczane.



Rys. 7. Rozkład naprężeń zredukowanych oraz składowych stanu naprężenia dla wykroju kwadratowego – siła obciążająca 960 N

Fig. 7. Distribution of effective stresses and stress state components for rectangular wholes – the loading force 960 N



Rys. 8. Rozkład naprężeń zredukowanych oraz składowych stanu naprężenia dla wykroju kołowego – siła obciążająca 3200 N

Fig. 8. Distribution of effective stresses and stress state components for axisymmetric wholes – the loading force 3200 N

Wnioski

Z przeprowadzonych obliczeń numerycznych oraz badań doświadczalnych wynika szereg wniosków, zarówno o charakterze poznawczym, jak i użytkowym:

- Wykonywanie obliczeń numerycznych z jednocześnie prowadzonymi badaniami eksperymentalnymi stwarza możliwość oceny poprawności przyjętego modelu numerycznego.

- Przeprowadzone badania i obliczenia (w rozważanym przypadku ograniczone wprowadzie do prostych modeli geometrycznych) w sensie metodyki stanowią alternatywną propozycję wytrzymałościowego projektowania cienkościennych ustrojów nośnych z osłabieniami w postaci wykrojów, w zasadzie o dowolnym kształcie, w przypadku formułowania problemu jako zagadnienia nieliniowego.
- Jak wynika z obliczeń numerycznych, zwiększenie liczby elementów ponad pewną wartość graniczną doprowadza jedynie do kosmetycznej korekty wyników, o pomijalnym znaczeniu praktycznym.
- Ekstremalne wartości wyężenia oraz charakter ich rozkładu w strefach newralgicznych są zadowalająco zgodne z oczekiwaniami. Zastosowane modele numeryczne należy zatem uznać za opracowane prawidłowo, zarówno w odniesieniu do zakresu deformacji sprężystych, jak i niesprężystych.

Literatura

- [1] Biezuchow N. I.: Teoria sprężystości i plastyczności, PWN, Warszawa 1957.
- [2] Bijak-Żochowski M., Jaworski A., Zagrajek T.: Podstawy mechaniki ciała stałego, OW PW, Warszawa 1999.
- [3] Orłoś Z.: Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń, PWN, Warszawa 1977.
- [4] Kopkowicz M.: Wytrzymałość materiałów, OW PRz, Rzeszów 2006.
- [5] Brzoska Z.: Wytrzymałość materiałów, PWN, Warszawa 1983.
- [6] Hosdorf H.: Statyka modelowa, Arkady, Warszawa 1975.
- [7] Rakowski G., Kacprzyk Z.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, OW PW, Warszawa 1993.
- [8] MSC Marc Documentation Library 2006.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ELASTO-PLASTIC DEFORMATION OF THIN-WALLED STRUCTURE ELEMENTS WITH HOLES

The paper presents results of comparative analysis of state of stress in flat thin-walled structures with axisymmetric and rectangular holes put to the tensile test. Experimental researches on the structure elements made of optical material have been performed. The calculations have been carried out using programs: MSC.MARC – as the solver and MSC.PATRAN 2005 – as the pre- and postprocessor. The problem has been formulated as a physically nonlinear (the ideally elasto-plastic material model has been assumed) and geometrically nonlinear.

Keywords: stress state, thin-walled structures, physical nonlinearity

Złożono w Redakcji w listopadzie 2009 r.