

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE RIVETED SPECIMEN

Elżbieta Szymczyk, Grzegorz Sławiński

*Military University of Technology  
Faculty of Mechanical Engineering  
Department of Mechanics and Applied Computer Science  
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland  
tel.: +48 022 6839039; fax: +48 022 6839461  
e-mail: e.szymczyk@wme.wat.edu.pl, g.slawinski@wme.wat.edu.pl*

### **Abstract**

*The riveted joints are critical places in the aircraft structure with regard to secondary bending, stress concentrations and plastic strain. Analysis of aircraft structures, in it riveted joints requires a local-global approach to numerical modelling. The shell-beam model of the riveted lap joint consisting of two aluminium sheet with six rivets is presented. The rivet is described as a beam element. The contact with friction is defined between the collaborating parts of the joint. Numerical calculation is carried out in elastic-plastic range. The nonlinear stress-strain curve, describing material model of aluminium alloy, is taken into consideration. The influence of the specimen geometry and boundary conditions on strain and stress fields in the riveted joint is studied. Stress distribution in the crosswise sections of the specimen, plastic deformations around a rivet hole and evolution of plastic strain fields during tensile loading are analysed. The results of simulation of tensile loaded lap riveted joint are compared with the results for specimen with open hole. The finite element models are made with Patran. The calculations are preformed using NASTRAN and MARC codes.*

**Keywords:** riveted joint, FEM, global analysis, shell-beam model

## ANALIZA NUMERYCZNA PRÓBKII NITOWEJ

### **Streszczenie**

*Połączenia nitowe są krytycznymi obszarami w konstrukcji lotniczej, ze względu na występowanie wtórnego zginania, koncentracji naprężeń oraz odkształceń plastycznych. Analiza konstrukcji lotniczych, w tym połączeń nitowych wymaga zastosowania lokalno-globalnego podejścia do modelowania numerycznego. W artykule przedstawiono analizę powłokowo-belkowego modelu połączenia zakładkowego złożonego z dwóch blach aluminiowych połączonych sześcioma nitami. Do opisu nitów zastosowano elementy belkowe. Uwzględniono zjawisko kontaktu oraz tarcie pomiędzy współpracującymi częściami. Analizę numeryczną zrealizowano w zakresie sprężysto-plastycznym. W modelu materiału przyjęto nieliniową charakterystykę opisującą stop aluminium. Analizowano wpływ geometrii i warunków brzegowych na pola naprężeń i odkształceń w próbce nitowanej. Badano rozkład naprężeń w przekroju poprzecznym próbki, odkształcenia plastyczne wokół otworu oraz rozwój pola odkształceń plastycznych w trakcie próby statycznego rozciągania. Wyniki symulacji dla analizowanego złącza zakładkowego porównano z wynikami analizy rozciąganej próbki z otworem swobodnym. Model do obliczeń wygenerowano w programie PATRAN. Obliczenia wykonano przy pomocy programów MD NASTRAN oraz MSC.MARC.*

**Słowa kluczowe:** połączenia nitowe, MES, analiza globalna, model powłokowo-belkowy

### **1. Wstęp**

Połączenia nitowe znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach techniki. Jest to tradycyjna, ale nadal powszechnie stosowana metoda łączenia elementów struktury, szczególnie rozpowszechniona w przemyśle lotniczym. Struktury lotnicze, takie jak kadłuby samolotów i śmigłowców, skrzydła, usterzenia itp. budowane są jako konstrukcje cienkościenne łączone przeważnie nitami lub wkrętami.

Otwory nitowe są miejscem powstawania znaczących koncentracji naprężeń. Już w procesie nitowania generowane są odkształcenia plastyczne i naprężenia resztkowe, które lokalnie przekraczają granicę plastyczności [1, 2].

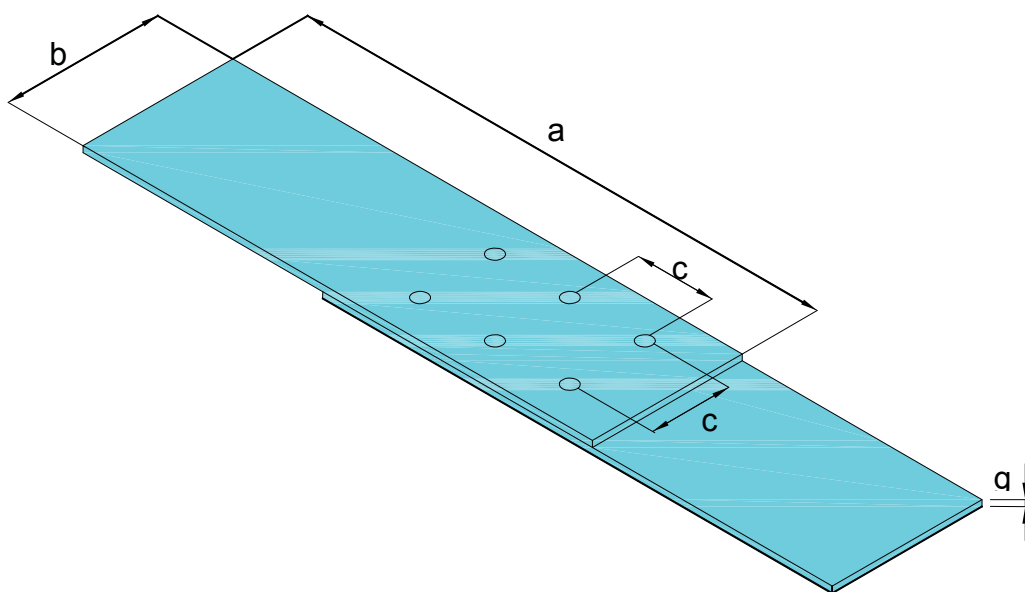
Celem pracy jest zaprojektowanie próbki do badań zmęzeniowych z tensometrycznym pomiarem naprężeń. Wykonanie pomiarów wymaga zapewnienia, że cała seria próbek będzie ulegać zniszczeniu w powtarzalny sposób.

Artykuł przedstawia analizę powłokowo - belkowego modelu połączenia zakładkowego złożonego z dwóch blach aluminiowych połączonych sześcioma nitami. Analizowano wpływ geometrii i warunków brzegowych na pola naprężeń i odkształceń w próbce nitowanej. Obserwowano rozkład naprężeń w przekroju poprzecznym próbki, odkształcenia plastyczne wokół otworu oraz rozwój pola odkształceń plastycznych w trakcie próby statycznego rozciągania. Wyznaczono współczynniki koncentracji naprężeń w przekrojach poprzecznych próbek osłabionych przez otwory nitowe.

## 2. Próbka nitowana - wariant I

### 2.1. Przedmiot badań

Do analizy przyjęto próbkę złożoną z dwóch blach o długości  $a = 170$  mm, szerokości  $b = 50$  mm, i grubości  $g = 2$  mm. Blachy połączono sześcioma nitami średnicy  $d = 5$  mm. Odległość pomiędzy nitami wynosi  $c = 25$  mm. Kształt i wymiary próbki przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Kształt i wymiary próbki  
Fig. 1. Specimen shape and dimensions

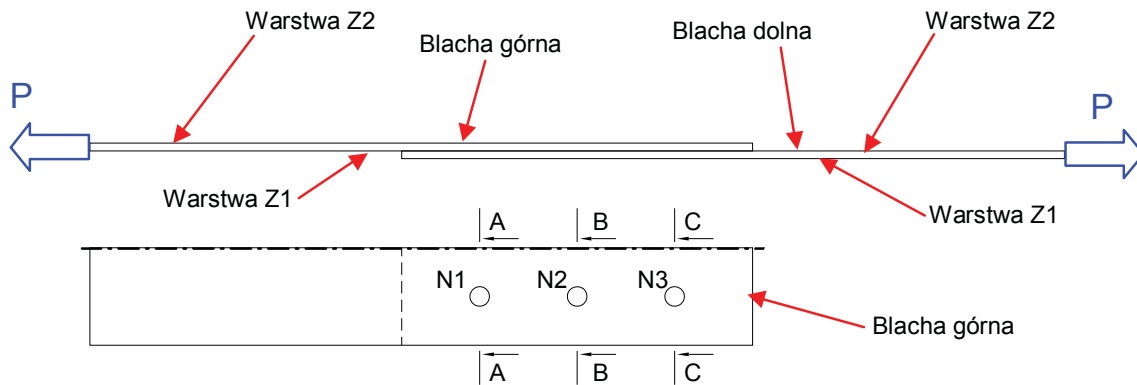
Próbkę wykonano z blachy aluminiowej D19 stosowanej na cienkie pokrycia kadłuba w konstrukcjach lotniczych. Parametry materiałowe stopu D19 uzyskane w próbie statycznego rozciągania podano w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry materiałowe stopu D19  
Tab. 1. Material property data

Moduł Younga $E$ [MPa]	Granica plastyczności $R_e$ [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]	Wydłużenie [%]
71000	374	483	14

## 2.2. Model numeryczny - wariant I

Analizę przeprowadzono w celu wyznaczenia obciążeń powodujących zerwanie rozciąganego statycznie połączenia oraz określenia sposobu niszczenia próbki. Zbadano wpływ nitów na rozkłady naprężeń w badanej próbce. Przeprowadzono również analizę rozkładów pól odkształceń i naprężeń wokół otworów w celu wyznaczenia obszarów inicjacji uplastycznienia oraz obciążeń powodujących powstawanie stanów plastycznych wokół otworów.

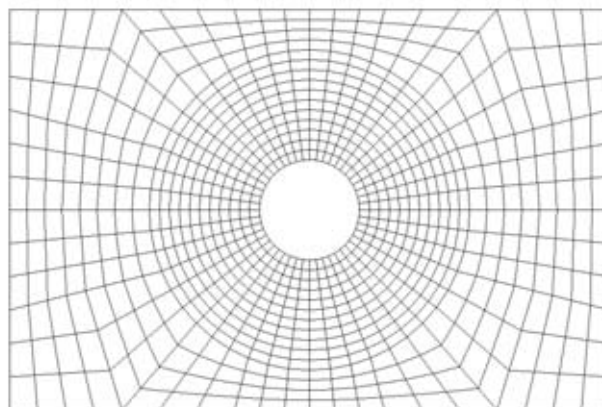


Rys. 2. Geometria próbki  
Fig. 2. Specimen geometry

Blachy zamodelowano elementami powłokowymi. Do opisu nitów i ich oddziaływania na blachy zastosowano elementy belkowe, elementy sztywne i elementy kontaktowe GAP [3]. Kontakt pomiędzy blachami zamodelowano również elementami typu GAP. Nit przedstawiono jako element belkowy o przekroju 5 mm. W modelu numerycznym opisano symetryczną połowę złącza. Łączna liczba elementów w modelu wynosi około 20000. Model numeryczny z oznaczeniem numeracji nitów, przekrojów i warstw blach przedstawiono na rys. 2.

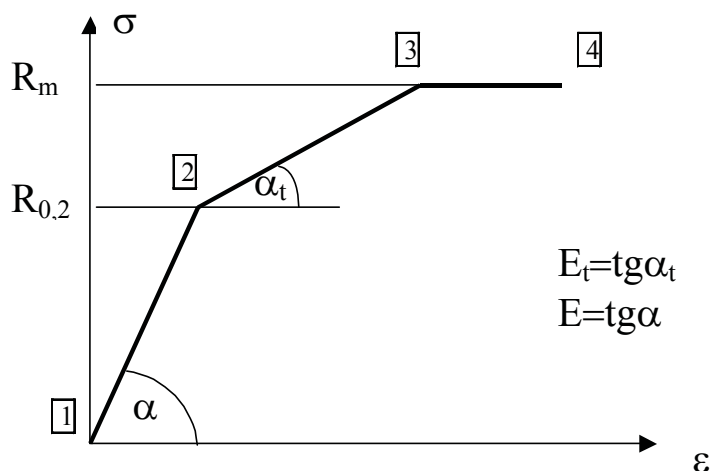
Obliczenia numeryczne odwzorowują rozciąganie próbki w maszynie wytrzymałościowej. Powierzchnie środkowe górnej i dolnej blachy są przesunięte względem siebie o 2 mm. Szczęki maszyny wytrzymałościowej są położone w jednej płaszczyźnie, dlatego zamocowanie próbki wymaga wstępnego przemieszczenia jednej z blach [4].

Do modelowania zastosowano program Patran. Dokonano podziału próbki na czterowęzłowe standardowe elementy skończone QUAD4 [3]. Uwzględniono zagęszczenie elementów w pobliżu otworu, zapewniające poprawne odwzorowanie zjawisk zachodzących w rozciąganej blasce. Podział na elementy skończone w otoczeniu otworu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Otoczenie pojedynczego otworu  
Fig. 3. Neighbourhood of a rivet hole

W obliczeniach wykorzystano sprężysto – plastyczny model materiału, w którym poza granicą wytrzymałości naprężenia pozostają na stałym poziomie (rys. 4).

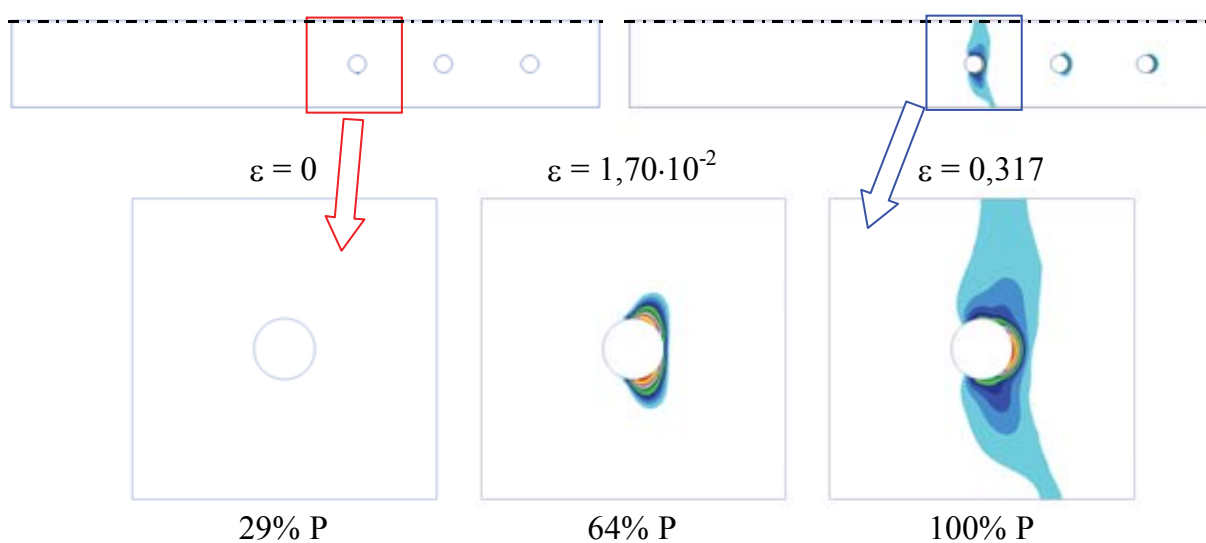


Rys. 4. Model materiału sprężysto – plastycznego  
Fig. 4. Stress – strain elasto – plastic curve

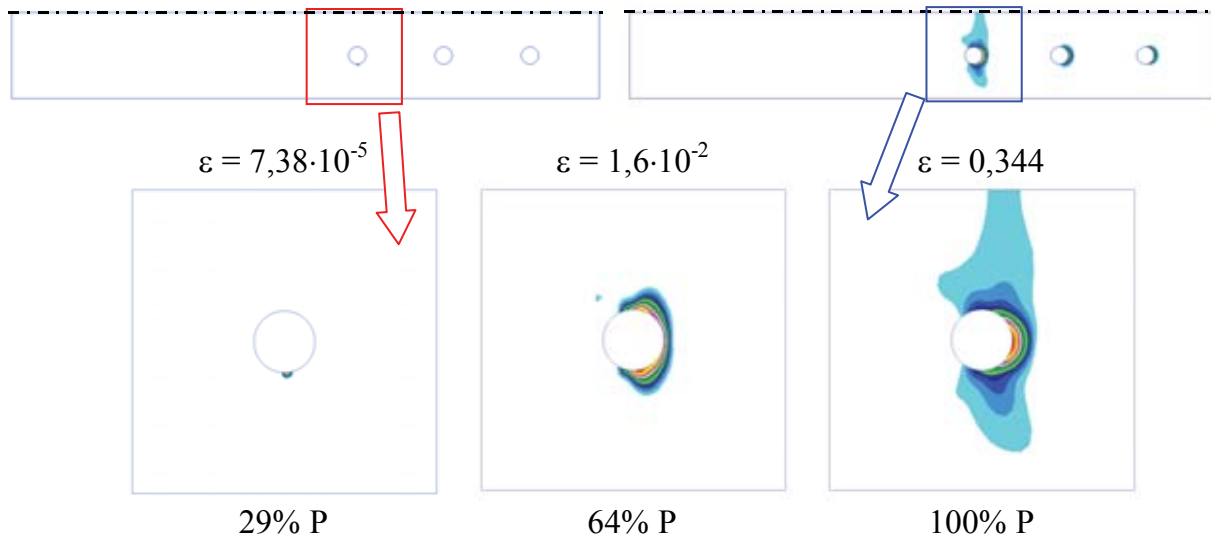
Badanie materiału D19 wykonano dla standardowych próbek płaskich [5]. W trakcie badania nie zaobserwowano przewężenia blachy dlatego przyjęto, że odkształcenia i naprężenia rzeczywiste przy zerwaniu równe są wartościom inżynierskim uzyskanym w próbie rozciągania (tab. 1).

Jako kryterium plastyczności przyjęto, że  $\sigma_{red} = R_e$ , gdzie  $\sigma_{red}$  – naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera [3]. Nieliniowe obliczenia statyczne wykonano programem MSC.Marc w zakresie dużych odkształceń, wykorzystując wyznaczone charakterystyki materiałowe.

### 2.3. Wyniki obliczeń - wariant I



Rys. 5. Odkształcenia plastyczne w trakcie rozciągania (zewnątrzna warstwa Z2)  
Fig. 5. Plastic strain fields during tensile loading –(layer Z2)

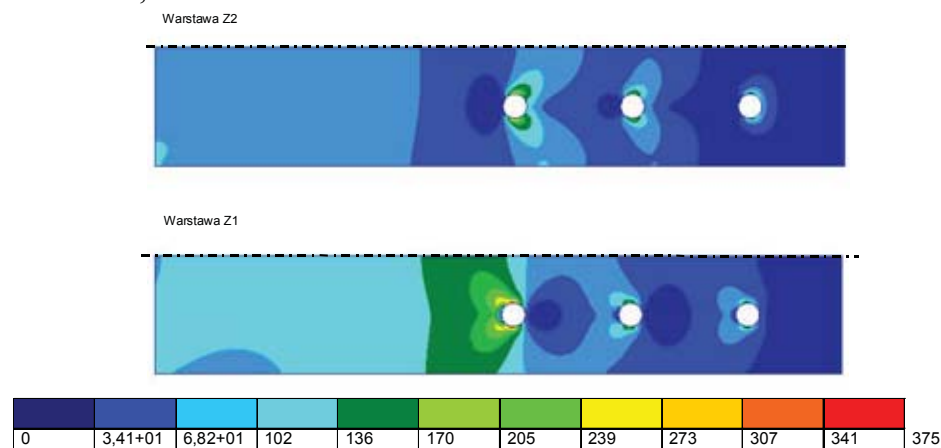


Rys. 6. Odkształcenia plastyczne w trakcie rozciągania (warstwa Z1)  
 Fig. 6. Plastic strain fields during tensile loading –(layer Z1)

Wyniki przedstawiono tylko dla jednej blachy (w tym przypadku blachy górnej), ponieważ zaobserwowano pełną analogię zjawisk zachodzących w obu blachach. Na rys. 5 i 6 pokazano przebieg uplastycznienia próbki (rozkłady odkształceń plastycznych) w warstwach Z1 i Z2 tej blachy, od momentu inicjacji uplastycznienia do uplastycznienia całego przekroju. Pełne uplastycznienie przekroju blachy występuje na linii skrajnych nitów (przekrój A-A, warstwa Z2).

Wyróżniono dwa charakterystyczne momenty w obliczeniach, tj. moment inicjacji odkształceń plastycznych oraz uplastycznienie całego przekroju osłabionego przez otwór. Odpowiednie rozkłady naprężeń minimalnych i maksymalnych głównych przedstawiono na rysunkach 7 ÷ 10.

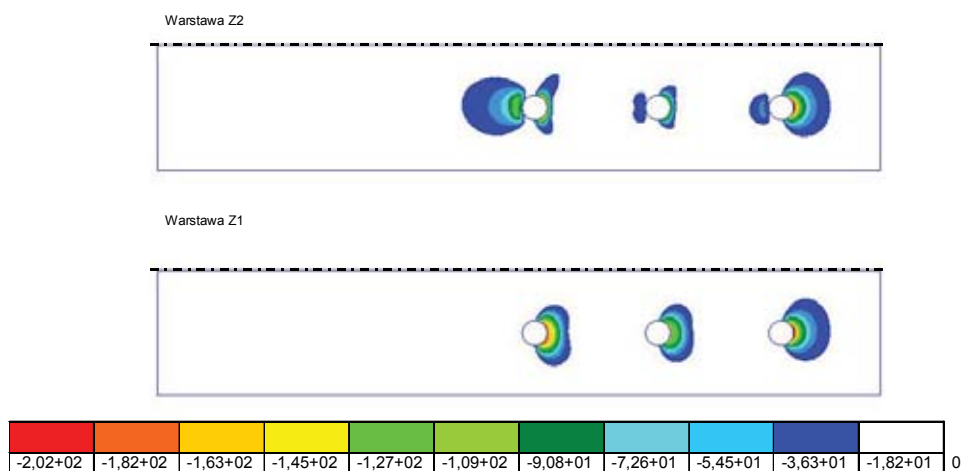
Otrzymana w wyniku obliczeń numerycznych siła, dla której zachodzi inicjacja odkształceń plastycznych w przekroju wynosi 10 kN. Natomiast siła powodująca uplastycznienie przekroju próbki wynosi  $P = 34,5$  kN.



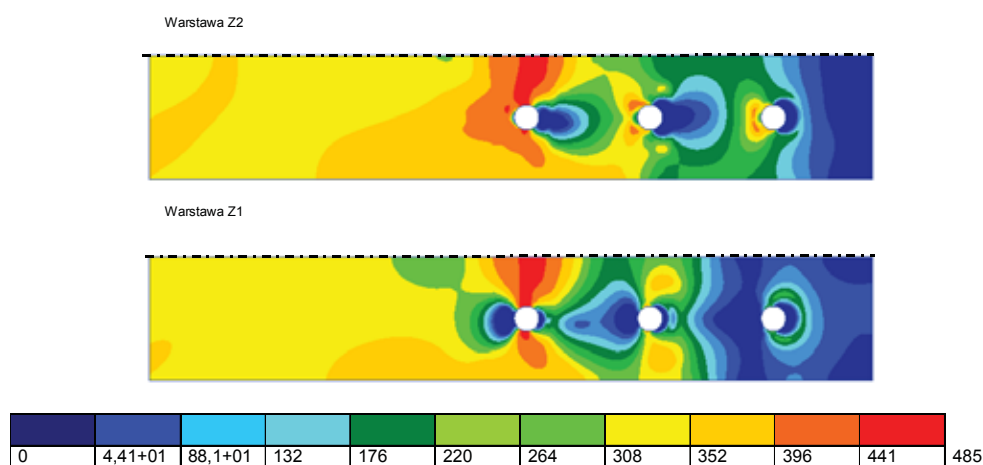
Rys. 7. Naprężenia maksymalne główne w chwili inicjacji odkształceń plastycznych (29%P)  
 Fig. 7. Maximum principal stress fields (yield initiation)

Koncentracja naprężeń występuje w otoczeniu otworów nitowych. Maksymalne naprężenia rozciągające w chwili inicjacji odkształceń plastycznych występują w warstwie Z1 wynoszą 375 MPa, natomiast naprężenia ściskające w warstwie Z2 i plasują się na poziomie 202 MPa.

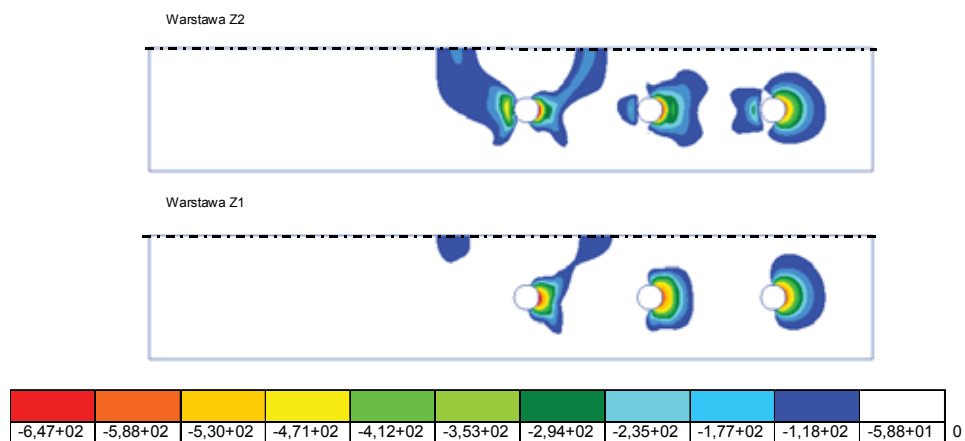
W chwili uplastycznienia maksymalne naprężenia rozciągające wynoszą 485 MPa. Z analizy wynika, że koncentracja naprężeń rozciągających występuje w warstwie Z2. Naprężenia ściskające, których udział również jest zdecydowanie większy w warstwie Z2 plasują się na poziomie 647 MPa.



Rys. 8. Naprężenia minimalne główne w chwili inicjacji odkształceń plastycznych (29%P)  
 Fig. 8. Minimum principal stress fields (yield initiation)



Rys. 9. Naprężenia maksymalne główne w chwili uplastycznienia całego przekroju (100%P)  
 Fig. 9. Maximum principal stress fields (yielding of the specimen crosswise section)



Rys. 10. Naprężenia minimalne główne w chwili uplastycznienia całego przekroju (100% P)  
 Fig. 10. Minimum principal stress fields (yielding of the specimen crosswise section)

Rzeczywisty rozkład naprężeń w przekroju rozciąganej próbki osłabionym przez otwór nie jest stały. Maksymalne naprężenia występują w otoczeniu otworu nitowego. Miarą spiętrzenia naprężeń jest współczynnik koncentracji naprężeń  $k_t$ , który opisuje zależność [6]:

$$k_t = \frac{\sigma_{\max.}}{\sigma_n}, \quad (1)$$

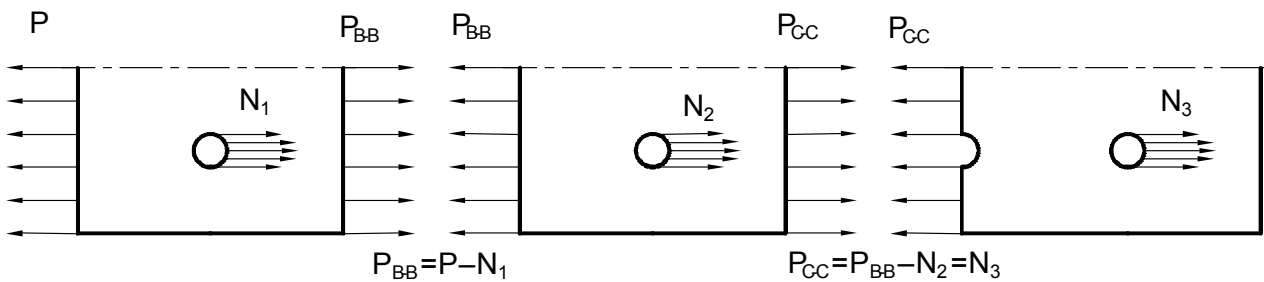
gdzie:

$\sigma_{\max}$  – maksymalne naprężenie w przekroju,  
rzeczywiste naprężenie w zakresie liniowo - sprężystym:

$$\sigma_n = \frac{P}{g(b-2d)} - \text{naprężenie nominalne.}$$

Dla próbki z otworem swobodnym (niewypełnionym nitem), współczynnik koncentracji naprężeń na krawędzi otworu wynosi 2,5 [6, 7].

Rozkład sił w próbce nitowanej można wyznaczyć stosując model „linii neutralnej” [8]. Największa siła w górnej blasze działa w skrajnym przekroju (A-A) i wynosi  $P_{A-A} = P$ . W kolejnych przekrojach siła maleje i wynosi odpowiednio  $P_{B-B} \approx 0,65P$  i  $P_{C-C} \approx 0,35P$  (rys 11).



Rys. 11. Siły w przekrojach próbki  
Fig. 11. Forces in the selected crosswise sections

Wartości siły zależą od wymiarów próbki oraz od zastosowanego materiału [8].

$$P_{B-B} = \left( \frac{\gamma + 2f}{2\gamma + 3f} \right) P$$

$$P_{C-C} = \left( \frac{\gamma + f}{2\gamma + 3f} \right) P, \quad (2)$$

gdzie:

$$f = \left( \frac{2g}{E_f d^3} \right)^2 + \frac{7.4}{Eg} - \text{podatność nitu (równanie Grummana) [8],}$$

$$\gamma = \frac{c}{gbE} - \text{podatność blachy,}$$

$E_f, E$  – moduły Younga nitu i blach,

$g, b$  – grubość i szerokość blach,

$d$  – średnica nitu.

Obliczone analitycznie i wyznaczone z analizy numerycznej wartości sił, naprężeń nominalnych i współczynnika koncentracji naprężeń w przekrojach blach podano w tabeli 2.

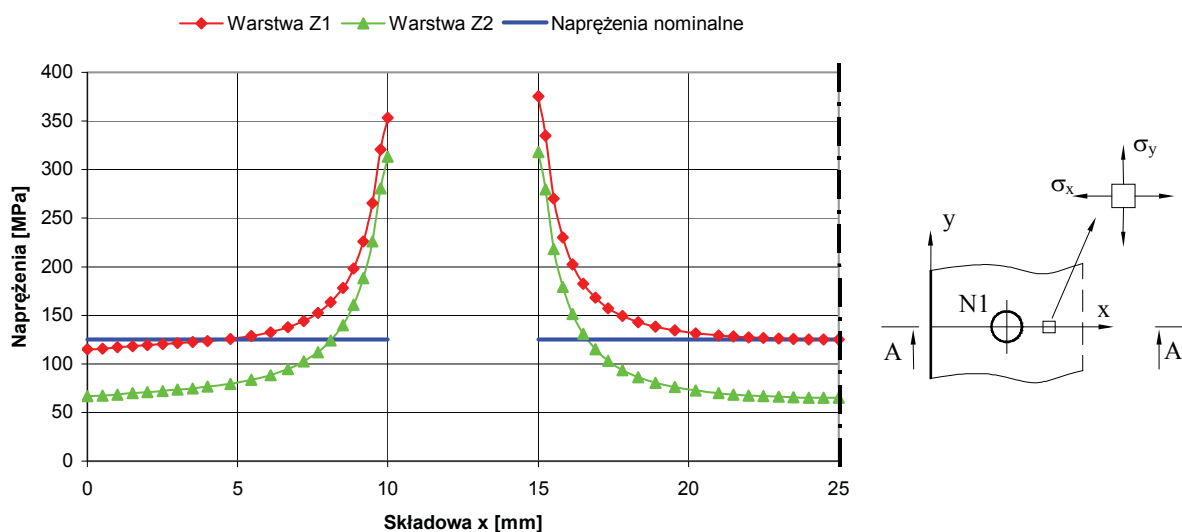


Współczynnik koncentracji naprężeń zmienia się dla analizowanego połączenia od 2,72 do 4,23.

Tab 2. Wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych  
Tab 2. Analytical and numerical results

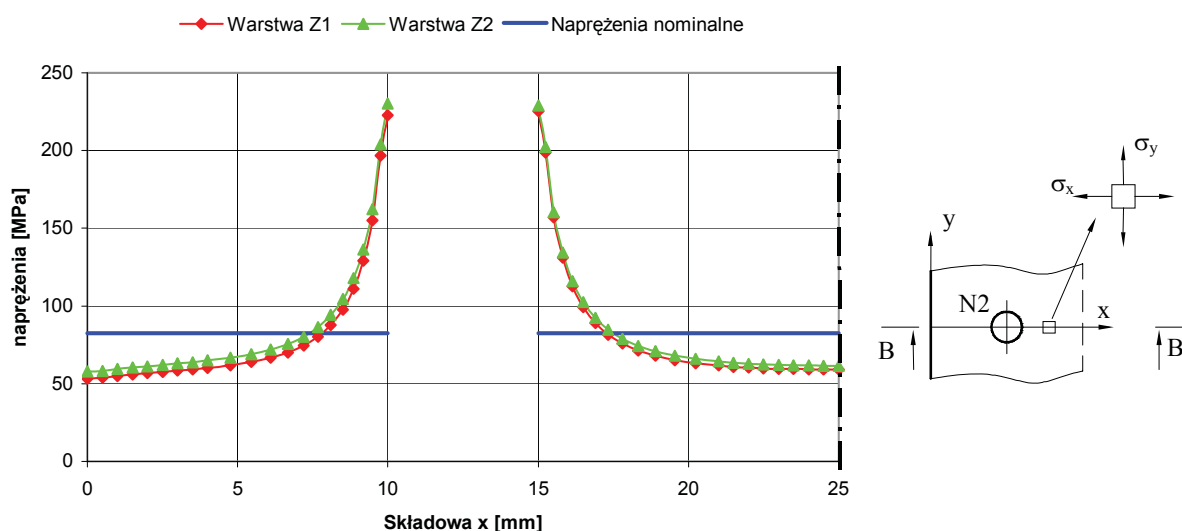
	analityczne			numeryczne		
	F [kN]	$\sigma_n$ [MPa]	$k_t$ [-]	F [kN]	$\sigma_n$ [MPa]	$k_t$ [-]
A-A	10	125	2,72	10	125	2,72
B-B	6,60	82,5	2,75	6,36	79,5	2,85
C-C	3,40	42,5	4,23	3,65	45,7	3,94

Rozkłady naprężeń w momencie inicjacji odkształceń plastycznych w osłabionych przez otwór przekrojach A-A, B-B, C-C blachy górnej przedstawiają wykresy (rys. 12 – 14). Na wszystkich wykresach pokazane są naprężenia w warstwach Z1 i Z2 blachy górnej. Największe naprężenia zarówno dla momentu inicjacji, jak i momentu uplastycznienia przekroju próbki występują w otworze nitu N1. Różnice w rozkładzie naprężeń w poszczególnych warstwach wynikają z wtórnego zginania próbki w trakcie próby rozciągania.



Rys. 12. Rozkład naprężeń  $\sigma_y$  w przekroju A-A próbki (nit N1)

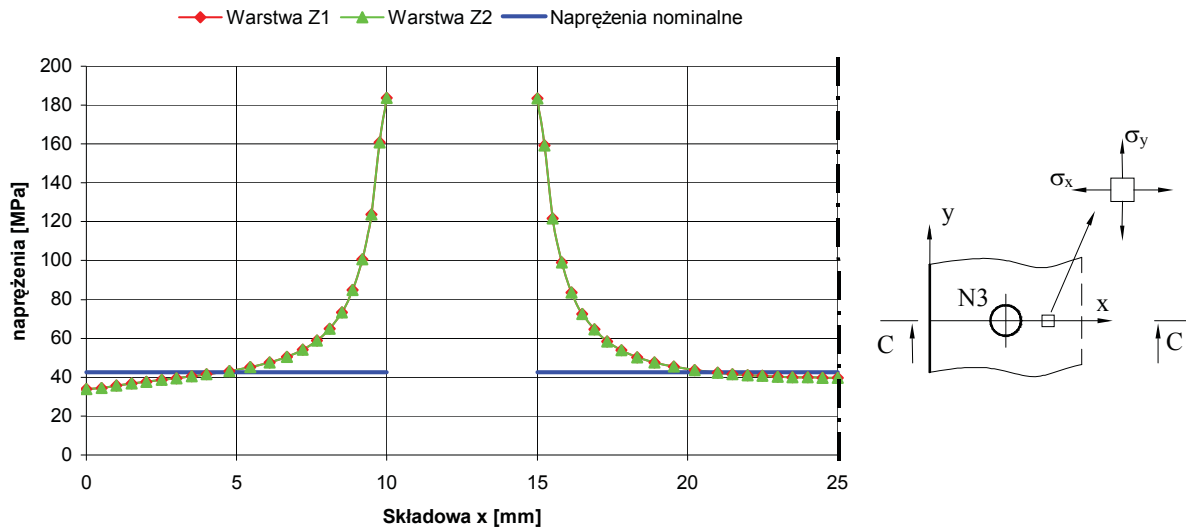
Fig. 12. Stress  $\sigma_y$  plot in the A-A crosswise section (rivet N1)



Rys. 13. Rozkład naprężeń  $\sigma_y$  w przekroju B-B próbki (nit N2)

Fig. 13. Stress  $\sigma_y$  plot in the B-B crosswise section (rivet N2)

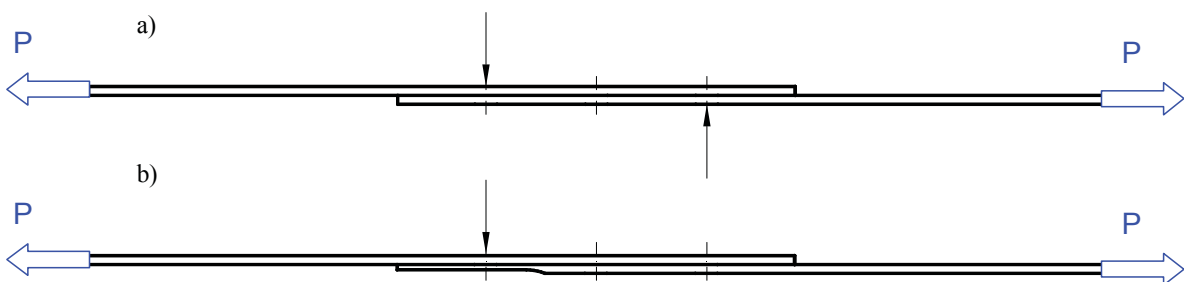




Rys. 15. Rozkład naprężeń  $\sigma_y$  w przekroju C-C próbki (nit N3)  
 Fig. 15. Stress  $\sigma_y$  plot in the C-C crosswise section (rivet N3)

W otoczeniu nitu N3 (przekrój C-C) wartości naprężeń w warstwach Z1 i Z2 pokrywają się – praktycznie w tym przekroju występuje czyste rozciąganie.

### 3 Modyfikacja modelu - wariant II



Rys. 16. Schematy próbek a) wariant I b) wariant II  
 Fig. 16. Specimen shape a) case I b) case II

W modelu opisanym w rozdziale 2 (wariant I) zaobserwowano analogiczne rozkłady naprężeń w blasze górnej i dolnej. Zerwanie próbki występuje wzdłuż linii skrajnych nitów od strony przyłożonego obciążenia (rys. 16a) z tym samym prawdopodobieństwem w górnej i dolnej blasze. Na rys 16 strzałkami wskazano najbardziej wyteżone przekroje blach.

Ze względu na cel pracy – jednoznaczne ustalenie miejsca wystąpienia pęknięcia próbki – dokonano modyfikacji modelu polegającej na lokalnej zmianie grubości blachy dolnej na wysokości skrajnych nitów (rys. 16b). Grubość blachy po sfrezowaniu wynosiła 1,2 mm. W wyniku modyfikacji zerwanie próbki występuje wzdłuż linii skrajnych nitów górnej blachy (rys. 16b) [4].

### 4 Podsumowanie

W pracy opisano analizę rozkładów naprężeń i odkształceń w rozciągającym połączeniu zakładkowym. Wyznaczono współczynniki koncentracji naprężeń w przekrojach blach

osłabionych przez otwór. Oceniono wpływ wtórnego zginania na wartości naprężeń i odkształceń plastycznych w ww. przekrojach.

Zaproponowano projekt próbki do badań zmęczeniowych z ciągłym pomiarem odkształceń metodą tensometrii elektrooporowej. W wyniku obliczeń numerycznych wyznaczono miejsca wystąpienia maksymalnych odkształceń w rozciągającym połączeniu, dzięki czemu wskazano miejsca wykonywania pomiarów tensometrycznych.

*Praca wykonana w ramach projektu badawczego finansowanego przez MNiSW.*

## **Literatura**

- [1] Szymczyk, E., Jachimowicz, J., Derewońko, A., *Analysis of residual stress fields in the riveted joint*, Kones 2007, Rynia 9-12.09.2007.
- [2] Derewońko, A., Szymczyk, E., Jachimowicz, J., *Numeryczne szacowanie poziomu naprężeń resztkowych w zakuwanym połączeniu nitowym*, monografia pt. Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki, rozdz. 17, 329–350, 2007.
- [3] Dokumentacja techniczna *MSC.MARC*, wyd. the MacNeal - Schwendler Corp, 2004.
- [4] Szymczyk, E., Derewońko, A., Kiczko, A., Jachimowicz, J., *Numerical simulation of tensile loaded lap riveted joint*, Journal of Kones 2006.
- [5] PN-91/H-04310.
- [6] Troszczenko, W. T., Sosnowskij, L. A., *Soprotivlenije ustalovki metaliov spravocznik i splajeoje*, Naukova Dumka, 1987.
- [7] Sławiński, G., *Analiza rozkładów naprężeń w próbce z otworem swobodnym*, XXVI Seminarium Koła Naukowego Mechaników, Warszawa 14-15.06.2007.
- [8] De Rijck, J. J. M., *Stress Analysis of Fatigue Crack in Mechanically Fastened Joints*, Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, 2005.