



Numeryczne modelowanie zagadnienia kontaktu w procesie spęczania nitu

AGNIESZKA DEREWOŃKO, ELŻBIETA SZYMCZYK,
JERZY JACHIMOWICZ*

Wojskowa Akademia Techniczna, Zakład Mechaniki Ogólnej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

*Instytut Lotnictwa, 02-256 Warszawa, Al. Krakowska 110/114

Streszczenie. Celem pracy jest dobór modelu numerycznego (właściwej siatki elementów skończonych) zapewniającego prawidłowe odwzorowanie współpracy kontaktujących się powierzchni nitu i blachy w procesie spęczania trzpienia nitu. Stanowi ona jeden z etapów badania lokalnych zjawisk fizycznych w połączeniach nitowych lotniczych konstrukcji cienkościennych [1-8]. Analizy z uwzględnieniem zagadnienia kontaktu i dużych odkształceń wykonano metodą elementów skończonych w programie MSC.Marc. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z wartościami sił i naprężeń oszacowanymi analitycznie dla spęczanego swobodnego walca. Uzyskane numerycznie rozkłady naprężeń i odkształceń są zgodne z prezentowanymi w literaturze [13], co wskazuje, że proces zakuwania trzpienia nitu został odwzorowany poprawnie. Deformacje powierzchni kontaktu na granicy nitu i blachy wykazują dużą wrażliwość na parametry siatki elementów skończonych. Właściwy sposób podziału współpracujących brył na elementy skończone pozwala uniknąć wzajemnego przenikania węzłów, a tym samym niefizycznych koncentracji naprężeń w obszarze kontaktu.

Słowa kluczowe: MES, proces nitowania, zagadnienie kontaktu, połączenia nitowe

Symbole UKD: 621.81

1. Wstęp

Nitowanie jest tradycyjną, ale nadal powszechnie stosowaną, szczególnie w przemyśle lotniczym, metodą łączenia elementów metalowych i kompozytowych. W skład typowej struktury lotniczej wchodzi dziesiątki, a nawet setki tysięcy nitów, które decydują o jej trwałości zmęczeniowej, dlatego połączenia nitowe od dziesięcioleci są przedmiotem intensywnych badań [1-10]. Złącza ni-

towe są miejscem powstawania znacznych koncentracji naprężeń. Już w procesie nitowania generowane są naprężenia resztkowe, które lokalnie przekraczają granice plastyczności [3, 5]. Połączenia nitowe należą do połączeń cierno-kształtowych, w których początkowy stan naprężenia ma istotny (korzystny) wpływ na pracę połączenia w warunkach obciążeń eksploatacyjnych [10]. Niestety, w przypadku wadliwego zakucia nitu (luzów, nieosiowości) [4, 8], nierównomierne naprężenia resztkowe prowadzą do obniżenia trwałości zmęczeniowej.

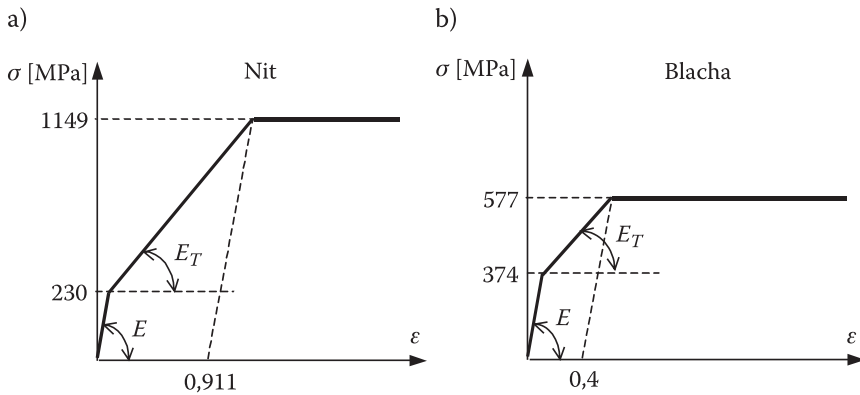
Zastosowanie metod numerycznych oraz coraz większe możliwości sprzętu komputerowego pozwalają na symulacje złożonych procesów technologicznych. Praktyczne wykorzystanie wyników obliczeń numerycznych wymaga opracowania poprawnych modeli. W niniejszej pracy zwrócono uwagę na dobór modelu numerycznego (właściwej siatki elementów skończonych) zapewniającego prawidłowe odwzorowanie współpracy kontaktujących się powierzchni nitu i blachy w procesie zamykania nitu.

Cienkościenne struktury lotnicze wykonywane są z blach metalowych (stopów aluminium lub tytanowych). W pracy przyjęto, że blachy wykonano ze stopu aluminium (D-16), natomiast nit — ze stali St3S. Różne właściwości stali i stopu aluminium wywołują wiele niekorzystnych zjawisk w obszarze kontaktu — przyspieszają proces niszczenia powierzchni blach, co skraca czasochłonność prób wytrzymałościowych [4, 8], które służą do weryfikacji modeli MES. Obserwacja i analiza lokalnych zjawisk fizycznych w połączeniu nitowym jest celem szerszego programu badań, którego wstępny etap stanowi niniejsza praca.

Wymiary oraz próby sprawdzające wytrzymałość mechaniczną nitu, elementu łączącego w połączeniu nitowym, określone są w polskich normach [12]. Jedną z nich jest próba spęczania trzpienia nitu, która jest prowadzona na walcowej próbce, ściśle umieszczonej w otworze blachy. Symulację numeryczną takiej próby wykonano przy użyciu programu MSC.Marc opartego na metodzie elementów skończonych. Oddziaływanie dwóch kontaktujących się powierzchni modelowane jest przez tworzenie fikcyjnych wiązań leżących na normalnych do stykających się powierzchni [14]. Wzdłuż ostrej krawędzi otworu występuje nieciągłość normalnej do powierzchni blachy (normalna zmienia kierunek o 90°), jednocześnie nit podczas spęczania deformuje się wokół tej krawędzi. Powoduje to duże trudności w uzyskaniu zbieżności (często nawet jej brak) iteracyjnej procedury rozwiązywania równań równowagi z uwzględnieniem kontaktu pomiędzy nitem i blachą. Niewłaściwe przygotowanie modelu dyskretnego prowadzi do niefizycznych zjawisk w obszarze kontaktu (np. przenikanie węzłów). W ramach pracy wykonano kilka trójwymiarowych modeli złącza różniących się sposobem podziału na elementy skończone w otoczeniu krawędzi otworu w blasze. Na podstawie danych literaturowych przeprowadzono jakościową (rozkłady naprężeń i odkształceń) oraz ilościową (wartości siły spęczającej i naprężeń osiowych) weryfikację wyników obliczeń numerycznych.

2. Modele materiałów

W pracy założono, że blachy wykonano ze stopu aluminium (D-16), natomiast nit ze stali St3S. Do obliczeń numerycznych przyjęto sprężysto-plastyczne modele materiałów z odcinkami liniowym wzmocnieniem. Wykresy charakteryzujące umocnienie materiałów walca (trzcienia nitu) i blachy przedstawia rysunek 1. Natomiast pozostałe parametry materiałów: moduł Younga E , granicę plastyczności R_e , granicę wytrzymałości R_m oraz moduł umocnienia E_T podano w tabeli 1. Wykresy przedstawiają krzywe rzeczywiste, natomiast w tabeli podano wartości normatywne (inżynierskie) [14].



Rys. 1. Wykresy charakteryzujące umocnienie materiałów: a) trzcienia nitu (walca); b) blachy

TABELA 1

Parametry materiałów

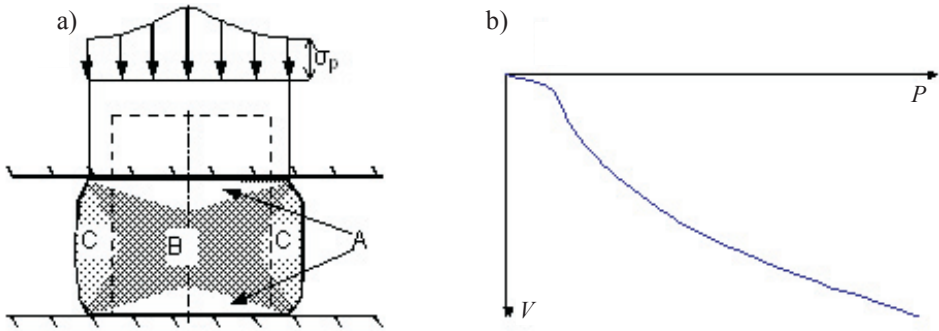
	E [MPa]	ν	R_e [MPa]	R_m [MPa]	E_T [MPa]
Nit	210 000	0,3	230	460	1004
Blacha	68 000	0,3	374	483	1069

3. Spęczanie walca

Analizy numeryczne spęczanego trzcienia nitu rozpoczęto od przeprowadzenia prostego testu, polegającego na spęczaniu stalowego swobodnego walca. Przygotowano model dyskretny próbki walcowej o wysokości 6 mm i średnicy 5 mm. Wymiary walca odpowiadają części swobodnej zakuwanego trzcienia nitu. Założono istnienie tarcia między kontaktującymi się powierzchniami nitu i prasy o współczynniku μ równym 0,1.

3.1. Obliczenia analityczne

Analityczne szacowanie siły spęczania oraz średnich naprężeń osiowych bazuje na teorii plastycznego płynięcia i zawiera szereg założeń upraszczających [11]. Rysunek 2a przedstawia spęczany swobodnie walec. Literą A oznaczono obszar przylegający do płaszczyzn czołowych zakuwnika, który odkształca się najmniej. W obszarze B występują największe odkształcenia osiowe i promieniowe. Natomiast w obszarze C występują znaczne odkształcenia obwodowe. Na rysunku 2b pokazano przykładową krzywą określającą siłę spęczania P w funkcji przemieszczenia prasy V [11].



Rys. 2. Spęczanie walca [11]: a) rozkład odkształceń i naprężeń osiowych; b) zależność siły spęczania od przemieszczenia stempla

Po przyjęciu założenia, że początkowa wysokość i średnica trzpienia nitu (wstępniaka) wynoszą odpowiednio $l_0 = 6$ mm i $d_0 = 5$ mm, a po spęczaniu jego wysokość jest równa $l_1 = 2$ mm, obliczono odkształcenie zastępcze [11]

$$\varepsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \frac{2}{6} = -1,098. \quad (1)$$

Z wykresu charakteryzującego umocnienie materiału nitu (rys. 1a) odczytano, dla obliczonego odkształcenia zastępczego ε , wartość naprężenia uplastyczniającego równą $\sigma_{pk} = 1149$ MPa. Przy upraszczającym założeniu, że w takim przypadku występuje jednoosiowe ściskanie, wartość ta odpowiada naprężeniu osiowemu (wzdłuż osi nitu) σ_z .

Pole przekroju trzpienia nitu po spęczaniu wyznaczone zostało z warunku stałej objętości materiału, przy założeniu braku tarcia między powierzchniami zakuwnika i nitu

$$A_1 = \frac{\pi d_0^2 l_0}{4 l_1} = \frac{\pi \times 5^2 \times 6}{4 \times 2} = 58,91 \text{ mm}^2. \quad (2)$$

Siła osiowa w końcowej fazie procesu, obliczona dla pola przekroju trzpienia po spęczeniu (2), wynosi:

$$P_1 = A_1 \sigma_{pk} = 58,91 \times 1149 = 67681,7 \text{ N.} \quad (3)$$

Po założeniu, że tarcie pomiędzy stemplem i nitem powoduje powstawanie stałego naprężenia stycznego (niezależnego od współrzędnych), można stwierdzić, że średnie naprężenie wzdłuż osi nitu, oszacowane z metody równowagi pracy [11], jest równe

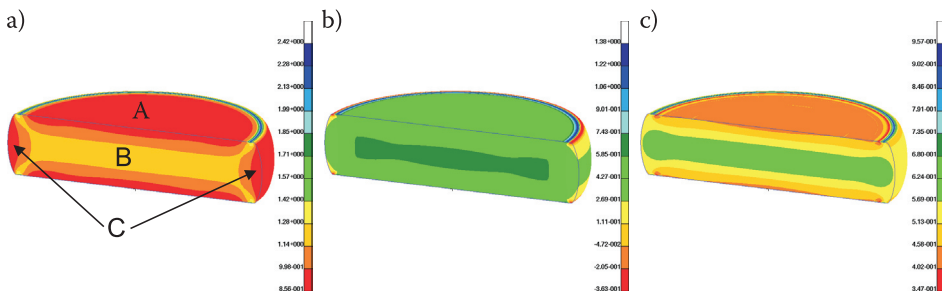
$$\sigma_z = \sigma_{pk} \left(1 + \frac{\mu d_0}{3 l_0} \right) = 1196,9 \text{ MPa.} \quad (4)$$

Jeśli uwzględnimy wzór (2) na pole powierzchni trzpienia po spęczeniu, to siła osiowa wyniesie

$$P_2 = A_1 \sigma_{pk} \left(1 + \frac{\mu d_0}{3 l_0} \right) = 70933,8 \text{ N.} \quad (5)$$

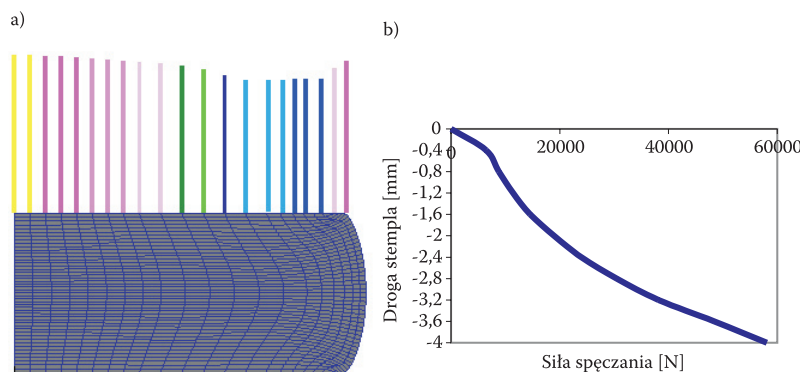
3.2. Analiza numeryczna spękanego walca

Uzyskane numerycznie mapy odkształceń zredukowanych, promieniowych i obwodowych widoczne na rysunku 3 pokrywają się z charakterystycznymi obszarami oznaczonymi na rysunku 2a. Wartość siły spękania otrzymana z obliczeń numerycznych wynosi 68 800 N i jest o 3% niższa od obliczonej teoretycznie (5). Natomiast średnie naprężenia wzdłuż osi trzpienia nitu równe 1246 MPa przewyższają wartości analityczne o 4% (4).



Rys. 3. Mapa odkształceń w spękanym walcu: a) zredukowanych; b) promieniowych; c) obwodowych

Rysunek 4a przedstawia zmianę nacisków jednostkowych σ_z wzdłuż promienia walca po zakuciu. Charakter tego rozkładu jest zgodny z rysunkiem 2a.



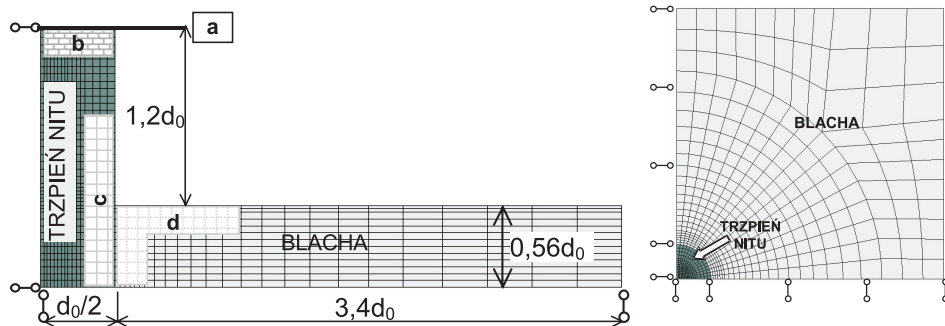
Rys. 4. a) Rozkład nacisków jednostkowych wzdłuż promienia walca; b) wykres siły śpęznania w funkcji drogi stempla z obliczeń numerycznych

Uzyskany numerycznie wykres siły śpęznania w funkcji przemieszczenia stempla pokazano na rysunku 4b. Wykresy na rysunkach 4b i 2b mają ten sam charakter.

4. Symulacja śpęznania trzpienia nitu

Przedmiotem analiz jest trzpień stalowego nitu o średnicy $d_0 = 5$ mm osadzony w pojedynczej aluminiowej blaszce z otworem. Połączenie umieszczono na nieodkształcalnej powierzchni wspornika. Wysokość trzpienia nitu jest równa sumie grubości blachy ($g = 2,8$ mm) i odpowiedniego, zgodnego z wymaganiami normy, nadatku na ukształtowanie zakuwki (rys. 5). Działanie prasy, w wyniku którego otrzymano zakuwkę, zostało odwzorowane pionowym przemieszczeniem sztywnego ciała.

W pracy przedstawiono wyniki analiz czterech przestrzennych modeli numerycznych $\frac{1}{4}$ połączenia nit-błacha. Przyjęto warunki brzegowe wynikające z warunków symetrii połączenia oraz oddziaływania powierzchni wspornika (rys. 5).

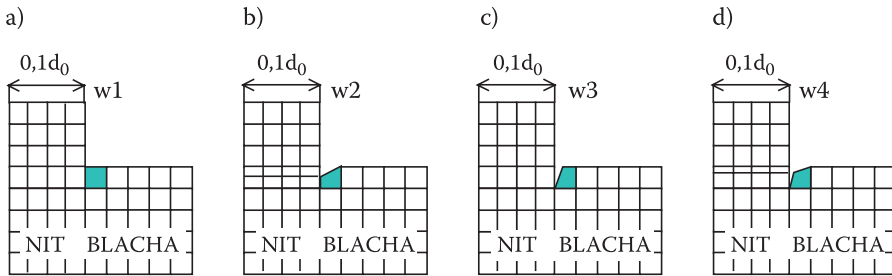


Rys. 5. Schemat połączenia

Określono trzy obszary kontaktu w bryłach odkształcalnych oznaczone **b**, **c** i **d**. Współczynnik tarcia pomiędzy obszarami **c** i **d** wynosi 0,15. Czwarty obszar, odwzorowujący zakuwnik, jest ciałem sztywnym o nazwie **a** (rys. 5). Pomiędzy tym ciałem a górną powierzchnią nitu (obszar **b**) wprowadzono tarcie o współczynniku równym 0,1.

Przy tworzeniu modeli dyskretnych połączenia trzpień nitu-błacha zastosowano ośmiowęzłowe, trójwymiarowe elementy skończone typu HEXA. W obszarach kontaktu przyjęto wymiary siatki elementów skończonych rzędu 0,05 średnicy nitu.

Modele różnią się kształtem elementów opisujących krawędź otworu w blasze. W modelu „w1” (rys. 6a) nie uwzględniono stopienia krawędzi otworu. W modelach oznaczonych „w2”, „w3” i „w4” nadano odpowiedni kształt elementom bryłowemu na krawędzi otworu (rys. 6b, 6c, 6d). Dodatkowo, w modelach „w2” i „w4”, zagęszczono siatkę podziału trzpienia nitu na wysokości tej krawędzi.



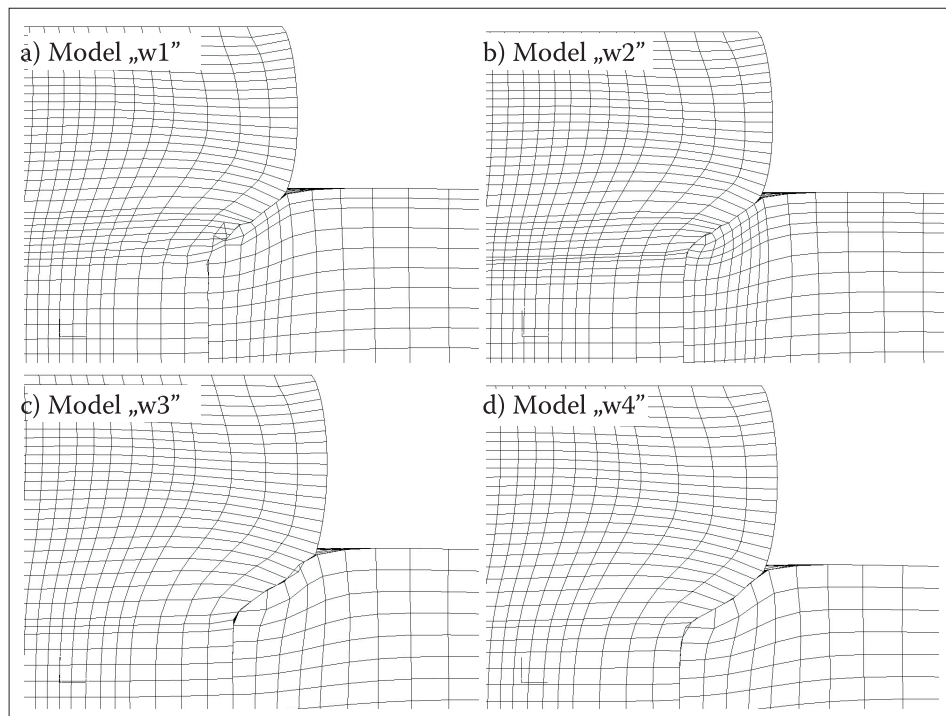
Rys. 6. Sposoby modelowania krawędzi otworu w blasze

4.1. Wyniki obliczeń

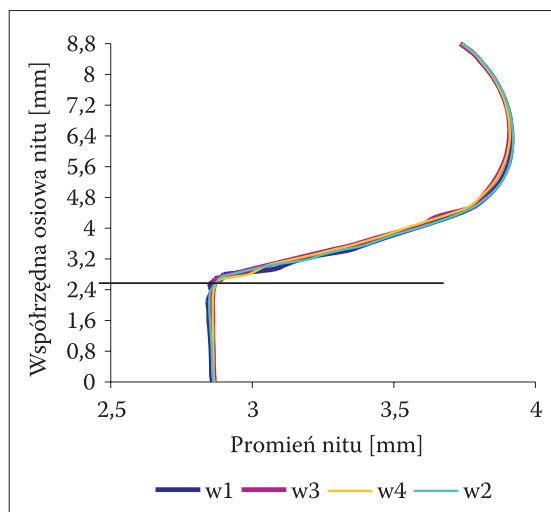
W pracy położono nacisk na taki dobór siatki elementów skończonych, dla którego nie wystąpi przenikanie węzłów na powierzchniach kontaktu. Deformacje zakuwki w otoczeniu krawędzi blachy dla wszystkich modeli pokazano na rysunku 7. Dla modelu „w1” następuje wyraźne przenikanie węzłów blachy w głąb nitu. W pozostałych modelach efekt ten został znacznie ograniczony.

Zmianę promienia trzpienia nitu po zakuciu w zależności od współrzędnej osiowej przedstawia rysunek 8. Zgodnie z normą, zmiana kształtu spęczanego trzpienia zachodzi praktycznie tylko na wystającej części próbki (powyżej 2,8 mm), niezależnie od analizowanego modelu. Czarną linią oznaczono położenie górnej powierzchni blachy. Stopień krawędzi otworu nie ma istotnego wpływu na kształt nitu po zakuciu.

W tabeli 2 przedstawiono otrzymane w wyniku analiz numerycznych wartości siły spęczania. Stanowią one od 82 do 84% oszacowanej analitycznie, zgodnie ze wzorem (4), osiowej siły spęczania walca.



Rys. 7. Deformacja zakuwki



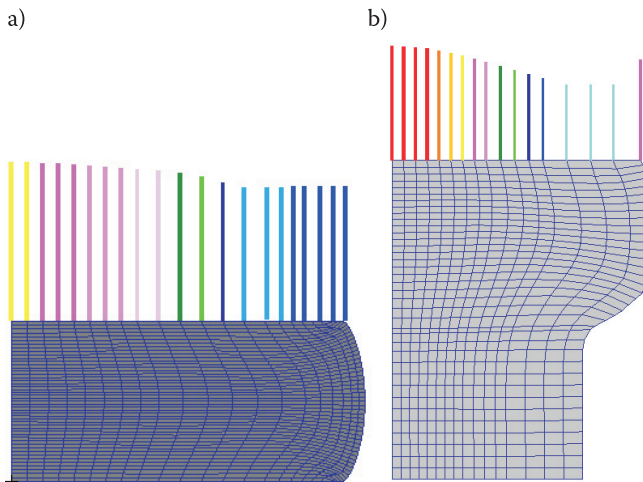
Rys. 8. Wartości promienia trzpienia nitu po zakuciu

W obliczeniach analitycznych z uwzględnieniem tarcia, wartość naprężenia osiowego σ_z , zgodnie ze wzorem (4), wynosi 1196,9 MPa. Natomiast wartości naprężeń osiowych obliczonych numerycznie i uśrednionych dla obszaru odkształcanego swobodnie są podane w tabeli 2. Wartości dla wszystkich czterech modeli są zbliżone i o około 7% wyższe od wartości obliczonej analitycznie (4).

TABELA 2
Osiowa siła spęczania i średnie naprężenie osiowe

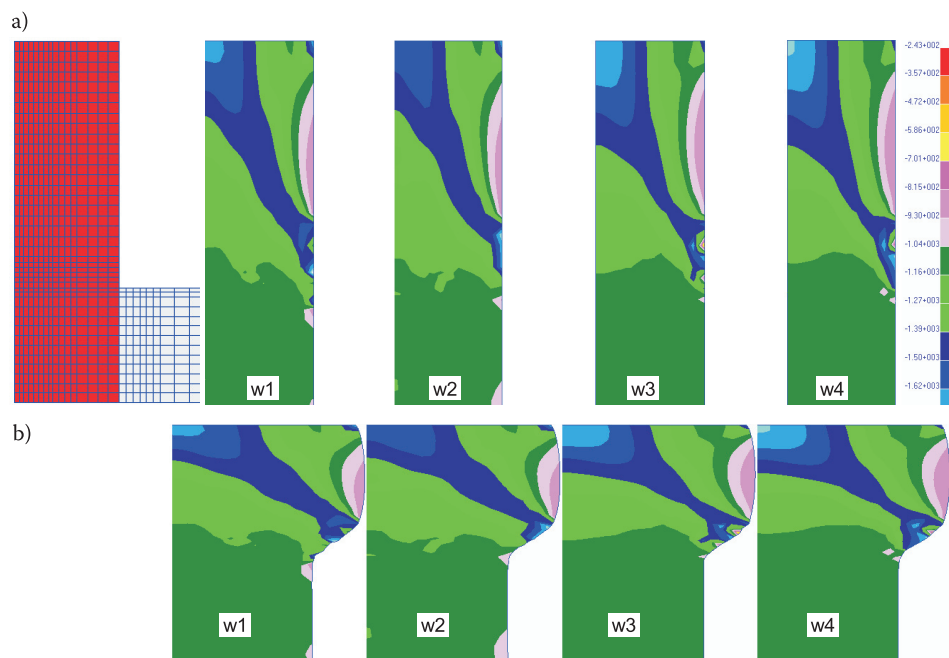
Nazwa modelu	P [N]	σ_z [MPa]
w1	59873	1288,3
w2	59863	1284,7
w3	57988	1289,5
w4	58064	1283,6

Rysunek 9 przedstawia zmianę nacisków jednostkowych σ_z wzdłuż promienia nitu. Charakter tego rozkładu jest zgodny z rysunkiem 1a. Porównano wyniki dla walca spęczanego swobodnego i spęczanego w otworze.



Rys. 9. Rozkład naprężenia σ_z wzdłuż promienia trzpienia nitu: a) walec spęczany swobodnie; b) nit spęczany w otworze

Na rysunku 10 przedstawiono warstwicę naprężeń osiowych σ_z . Na rysunku 10a widoczne są rozkłady naprężeń na niezdeformowanym trzpieniu nitu. Natomiast trzpień nitu po spęczaniu pokazano na rysunku 10b.

Rys. 10. Warstwice składowej naprężeń σ_z

5. Podsumowanie i wnioski

Symulacje numeryczne umożliwiają śledzenie stanu naprężeń i odkształceń w całym procesie obciążania. Pozwalają one na wyznaczenie naprężeń na powierzchniach blach oraz obserwację naprężeń w miejscach, które ze względów technicznych nie mogą być monitorowane w rzeczywistym samolocie, a nawet w trakcie badań eksperymentalnych (np. na powierzchniach nitów oraz na powierzchniach otworów, gdzie dochodzi do zmęczenia ciernego i inicjacji pęknięcia) [1, 2, 4].

Uzyskane numerycznie wartości oraz rozkłady sił, odkształceń i naprężeń odpowiadają wielkościom szacowanym analitycznie, zwłaszcza z uwzględnieniem tarcia, i wskazują na poprawne przygotowanie modelu, niezależnie od sposobu modelowania krawędzi otworu w blasze.

Deformacje nitu po spęczeniu w otworze przedstawione na rysunku 7 pokazują, że przy modelowaniu połączenia szczególną uwagę należy zwrócić na tworzenie siatki podziału na elementy skończone w obszarach kontaktu. Brak stępienia krawędzi otworu w blasze lub jej niewłaściwe zamodelowanie powoduje wzajemne przenikanie węzłów powierzchni kontaktu (model „w1”) oraz niefizyczne koncentracje naprężeń.

Zastosowanie metody elementów skończonych umożliwia wyznaczenie rozkładu naprężeń kontaktowych na całej powierzchni nitu i otworów. Uzyskanie wiarygodnych wyników zależy jednak od właściwego przygotowania modelu i zweryfikowania go na podstawie obliczeń analitycznych lub pomiarów doświadczalnych.

Przedstawiona symulacja spękania nitu stanowi wstępny etap numerycznej analizy lokalnych zjawisk fizycznych w połączeniach nitowych.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy nr EUREKA/62/2006.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.02.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w sierpniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] J. JACHIMOWICZ, J. KANIOWSKI, W. KARLIŃSKI, *Zmęczenie cierne w konstrukcjach lotniczych*, XVIII Sympozjum „Zmęczenie Materiałów i Konstrukcji”, Bydgoszcz-Pieczyska, maj 2000, 163-170.
- [2] J. JACHIMOWICZ, R. KAJKA, J. KANIOWSKI, W. KARLIŃSKI, *Fretting w konstrukcjach lotniczych*, Tribologia 3, SIMPRESS, Warszawa, 2005, 97-108.
- [3] J. JACHIMOWICZ, R. KAJKA, E. SZYMCZYK, *Analiza wytrzymałościowa MES zakładkowego połączenia nitowego z uwzględnieniem zjawisk kontaktowych i naprężeń własnych*, Systems Journal of Transdisciplinary Systems Science, Polanica, 16-19.06.2004.
- [4] M. CIESIELSKI, J. JACHIMOWICZ, R. KAJKA, J. KRYSZTOFIK, W. SZACHNOWSKI, *Analityczny i doświadczalny obraz pola naprężeń w złączu nitowym*, X Jubileuszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki, 6-9.IX.2005.
- [5] T. NIEZGODZIŃSKI, A. MŁOTKOWSKI, *Das numerische Modellieren der Nietung*, GESA Symposium, Saarbrücken, 2005.
- [6] E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, A. DEREWOŃKO, *Analysis of displacement and stress distributions in riveted joints*, III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, Portugal, 5-8 June 2006.
- [7] A. DEREWOŃKO, E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, *Numerical simulation of riveting process*, 6th European Solid Mechanics Conference ESMC, Budapest, Hungary, 28 August-1 September, 2006.
- [8] J. JACHIMOWICZ, R. KAJKA, W. SZACHNOWSKI, E. SZYMCZYK, *Problemy eksploatacji szwów nitowych w konstrukcjach lotniczych — analityczna i eksperymentalna ocena stanu naprężeń*, Polanica, 21-24.06.2006.
- [9] A. HARTMAN, J. SCHIJVE, *The effect of secondary bending on the fatigue straight of 2024-T3 Alclad riveted joints*, National Aero and Astronautical Research Institute, Amsterdam, NAL, TR 69116U, 1969.
- [10] R. P. G. MÜLLER, *An Experimental Investigation on the Fatigue Behavior of Fuselage Riveted Lap Joints; The Significance of the Rivet Squeeze Force, and a Comparison of 2924-T3 and Glare 3*. Doctor thesis, Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, October 1995.
- [11] S. ERBEL, K. KUCZYŃSKI, Z. MARCINIAK, *Obróbka plastyczna*, PWN, Warszawa, 1981.

- [12] PN-79/M-82903 Nity, Wymagania i badania.
[13] P. WASIUNYK, *Teoria procesów kucia i prasowania*, WNT, Warszawa, 1982.
[14] Dokumentacja techniczna MSC/MARC, wyd. the MacNeal-Schwender Corp., 2004.

A. DEREWÓŃKO, E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ

Numerical modelling of a contact problem in the rivet upsetting process

Abstract. The paper deals with numerical simulation of rivet upsetting in a hole. The work is aimed at a choice of numerical model (proper finite element mesh) that ensures suitable behaviour of the rivet and sheet hole surfaces during rivet's upsetting process. This is preliminary stage of an analysis of the local physical phenomena in the riveted joints of an aircraft structure. A contact problem and large strains are taken into consideration in FEM analysis performed with MARC code. Numerical results are compared with analytical estimations for upsetting a cylindrical specimen. Numerical stress and strain fields show that squeezing the rivet shank is correctly described. The deformations of contact surface between the rivet and the hole are sensitive on finite element mesh parameters. Due to appropriate meshing of the mating components, mutual node penetration and consequently, non-physical stress concentration on the contact surfaces can be avoided.

Keywords: FEM, riveting process, contact problem, riveted joint

Universal Decimal Classification: 621.81