



## Numeryczna analiza deformacji nitu grzybkowego i otworu nitowego w procesie zakuwania

ELŻBIETA SZYMCZYK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,  
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W trakcie nitowania wokół otworu nitowego dochodzi do odkształceń plastycznych, które korzystnie wpływają na trwałość zmęczeniową połączenia.

W pracy przedstawiono analizę przemieszczeń nitu oraz otworu nitowego w zależności od wysokości zakuwki (siły zakucia). Symulację procesu zakuwania przeprowadzono dla nitu grzybkowego o średnicy trzpienia 3,5 mm łączącego blachy o grubości 1,2 mm każda. Wykonano trójwymiarowy model otoczenia pojedynczego nitu o boku 10,5 mm. Wielkość łba fabrycznego przyjęto na podstawie normy [OST 1 34040-79]. Nit oraz blachy opisano ośmiowęzłowymi, izoparametrycznymi elementami 3D. Obliczenia w zakresie dużych przemieszczeń i odkształceń wykonano dla sprężysto-plastycznego modelu materiału. Podtrzymkę oraz zagłownik opisano jako elementy sztywne. Pomiędzy współpracującymi elementami złącza zdefiniowano kontakt dwustronny z tarcieniem.

Obliczenia numeryczne wykonano dla czterech wariantów zakucia, opisanych przez średnicę zakuwki zmieniającą się od minimalnej do maksymalnej wartości dopuszczalnej w instrukcji nitowania. Maksymalne przemieszczenia otworu nitowego (odpowiadające maksymalnemu spęczeniu nitu) zaobserwowano od strony zakuwki. Średnie przemieszczenie otworu w blasze od strony zakuwki jest prawie dwa razy większe od przemieszczenia otworu blachy od strony łba fabrycznego. Ograniczenie średnicy zakuwki w trakcie nitowania powoduje większe spęczenie nitu w otworze oraz bardziej równomierny rozkład przemieszczeń.

**Słowa kluczowe:** połączenia nitowe, spęczenie nitu, MES, kontakt

**Symbol UKD:** 621.88

### 1. Wstęp

Nitowanie to tradycyjny, ale nadal stosowany sposób łączenia elementów struktury m.in. w przemyśle lotniczym. Potwierdzają to prace prowadzone w ośrodkach naukowych związanych z przemysłem lotniczym [1-4]. Rozważana w pracy metoda

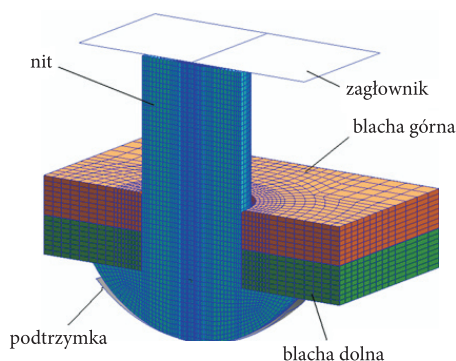
nitowania polega na łączeniu blach pokrycia nitami pełnymi (grzybkowymi) ze stopu aluminium, zamykanymi na zimno przy pomocy prasy [5, 6].

W przypadku konstrukcji lotniczych istotną rolę odgrywa trwałość zmęczeniowa połączeń. Jednym z czynników powodujących zmniejszenie prawdopodobieństwa pęknięcia zmęczeniowego są odkształcenia plastyczne, które w trakcie nitowania powstają wokół otworu nitowego [1, 3, 5], oraz w miarę równomierny rozkład tych odkształceń.

Praca dotyczy analizy przemieszczeń nitu oraz otworu nitowego w zależności od siły zakucia. Szczególną uwagę zwrócono na czynniki, które mogą poprawić jakość połączenia. Prezentowane wyniki stanowią kontynuację analizy prezentowanej w pracach [5, 6] i dotyczącej naprężeń resztkowych.

## 2. Model numeryczny

Analizę przeprowadzono dla nitu grzybkowego o średnicy trzpienia 3,5 mm łączącego blachy o grubości 1,2 mm każda. Wykonano trójwymiarowy model otoczenia pojedynczego nitu o boku 10,5 mm (rys. 1). Zgodnie z normą [OST 1 34040-79] przyjęto otwór nitowy o promieniu 3,55 mm oraz grzybkowy łeb fabryczny o następujących wymiarach: promień krzywizny  $R = 4,2$  mm, średnica  $D = 7$  mm, wysokość  $h = 1,88$  mm. Zestaw do nitowania składa się z podtrzymki o promieniu krzywizny  $R_p = 4,8$  mm oraz płaskiego zagłownika.

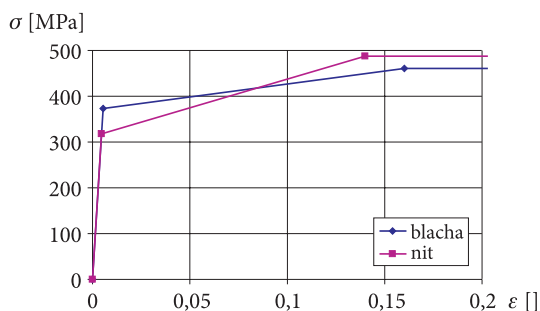


Rys. 1. Model otoczenia nitu grzybkowego

Nit oraz blachy opisano ośmiowęzłowymi, izoparametrycznymi elementami 3D (typu Hex8) z funkcją kształtu liniowo zmienną wzdłuż każdej osi [7].

Przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału. Uzyskane w wyniku jednoosiowego ściskania i rozciągania, uproszczone zależności naprężeń od odkształceń dla materiału nitu PA25 i blach D16TN pokazano na rysunku 2. Do opisu powyższych

krzywych wykorzystano rzeczywiste wartości odkształceń i naprężeń odpowiadające granicy plastyczności i wytrzymałości materiału. W przypadku nitu granicę plastyczności wyznaczono z próby ściskania. Analizę w zakresie sprężysto-plastycznym przestrzennego stanu naprężenia, występującego w prezentowanym modelu, przeprowadzono, bazując na kryterium uplastycznienia Hubera-Misesa.



Rys. 2. Krzywe materiałowe

Ze względu na duże nieliniowości fizyczne i geometryczne obliczenia przeprowadzono w uaktualnionym opisie Lagrange'a w zakresie dużych przemieszczeń i dużych odkształceń plastycznych.

Podtrzymkę oraz zagłownik opisano jako elementy sztywne Rigid. Pomiedzy współpracującymi elementami złącza zdefiniowano kontakt dwustronny symetryczny typu master-slave. Na powierzchniach kontaktu uwzględniono tarcie według modelu Amontonsa-Coulomba o współczynniku  $\mu = 0,2$ .

Wzajemną penetrację kontaktujących się powierzchni ograniczono, stosując metodę kary. Sztywność kontaktu jest proporcjonalna do sztywności kontaktujących się elementów i ich wielkości. Iteracyjny proces rozwiązywania i kontroli penetracji oparty na metodzie Newtona-Raphsona zapewnia, że spełnione są zarówno równania równowagi, jak i warunki kontaktu (ograniczenie penetracji), ale wymagane są dodatkowe iteracje, co wydłuża czas obliczeń.

Na brzegach blach odebrano stopnie swobody w kierunku prostopadłym do ich bocznych powierzchni, traktując model jak wycinek szwu nitowego. Podtrzymkę utwierdzono, a zagłownik przemieszczono statycznie w kierunku pionowym, powodując uformowanie zakuwki o zadanej wysokości.

### 3. Analiza numeryczna

Obliczenia wykonano w programie MSC.Marc dla czterech wariantów zakucia ( $w_1, w_2, w_3, w_4$ ) opisanych przez wymiary zakuwki zgodnie z tabelą 1. Dla wariantu  $w_1$  uzyskano minimalną dopuszczalną (zgodnie z normą) średnicę zakuwki, dla

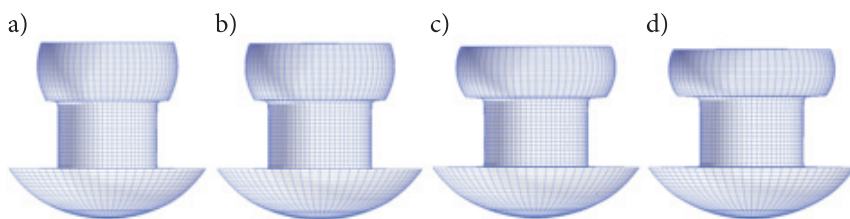
w2 — nominalną, a dla wariantu w3 — maksymalną. W wariantcie w4 średnica przekracza wartość maksymalną, ale wysokość zakuwki osiąga minimalną dopuszczalną wartość dla nitu o średnicy 3,5 mm.

Na rysunku 3 pokazano deformacje nitu dla czterech analizowanych wariantów obciążenia.

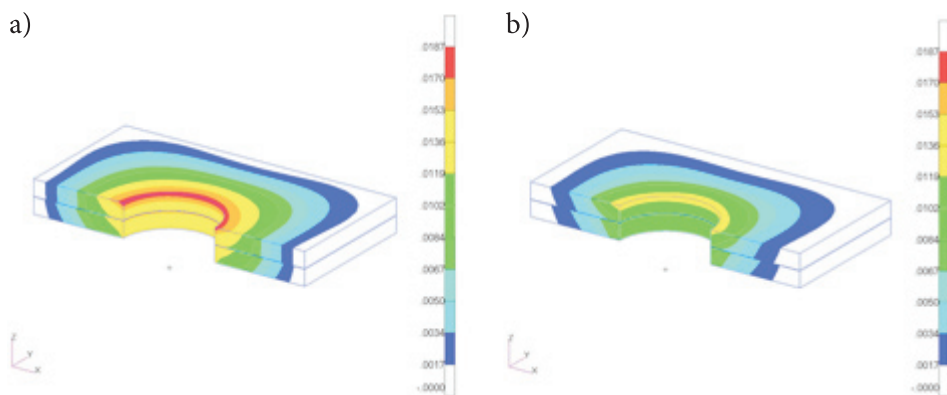
Charakterystyczne wymiary zakuwki

TABELA 1

	w1 [mm]	w2 [mm]	w3 [mm]	w4 [mm]
Wysokość zakuwki $h$	2,15	1,91	1,66	1,49
Średnica zakuwki $D$	4,9	5,18	5,5	5,74



Rys. 3. Deformacje nitu — porównanie wariantów: a) w1; b) w2; c) w3; d) w4



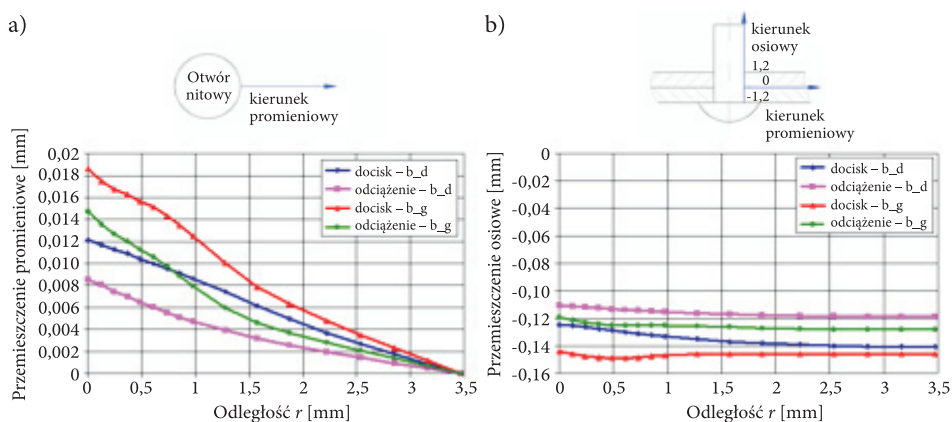
Rys. 4. Mapy przemieszczeń promieniowych dla wariantu w4: a) faza docisku prasy; b) po odciążeniu

Mapy przemieszczeń promieniowych dla wariantu w4 w fazie maksymalnego docisku prasy oraz po odciążeniu pokazano na rysunku 4.

Na rysunku 5a przedstawiono przemieszczenia promieniowe w połowie grubości blachy w funkcji odległości od otworu nitowego. Analizowano fazę docisku prasy i odciążenie (usunięcie narzędzia). Porównano wyniki dla blachy górnej (od strony zakuwki) i dolnej (od strony łba fabrycznego). Przemieszczenia promieniowe

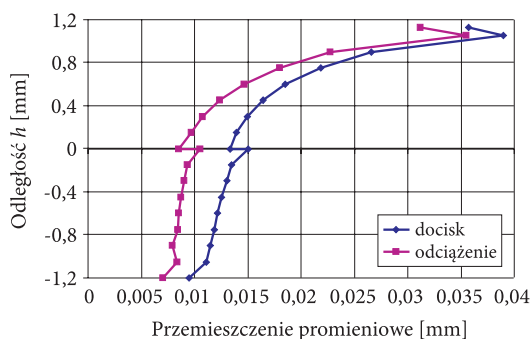
w fazie docisku dla blachy górnej są ponad 50% większe niż dla blachy dolnej. Po odciążeniu różnica jest jeszcze większa i wynosi około 70%. Po usunięciu prasy przemieszczenia radialne wokół otworu nitowego maleją ponad 20% dla blachy górnej, a ponad 30% w przypadku blachy dolnej.

Rysunek 5b przedstawia wykresy przemieszczeń osiowych odpowiadające ściśnięciu (zgnieceniu) blachy po grubości. W otoczeniu otworu (pod zakuwką) zmiana grubości blachy w fazie odciążania jest prawie dwukrotnie większa dla blachy górnej (od strony zakuwki) niż dla blachy dolnej. W miarę oddalania się od otworu, poza obszarem zakuwki, obie blachy przemieszczają się podobnie.



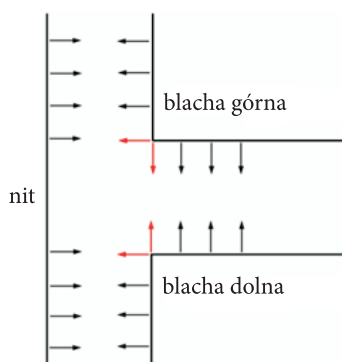
Rys. 5. Przemieszczenia dla wariantu w4: a) promieniowe; b) osiowe

Zmiana przemieszczeń promieniowych otworu nitowego w kierunku osiowym (po grubości blach) została przedstawiona na rysunku 6. Największe przemieszczenia występują dla blachy górnej bezpośrednio pod zakuwką, maleją ponad trzykrotnie na poziomie styku obu blach. Przemieszczenia blachy dolnej na całej grubości pozostają na tym samym poziomie. Niciągłość wykresu przemieszczeń



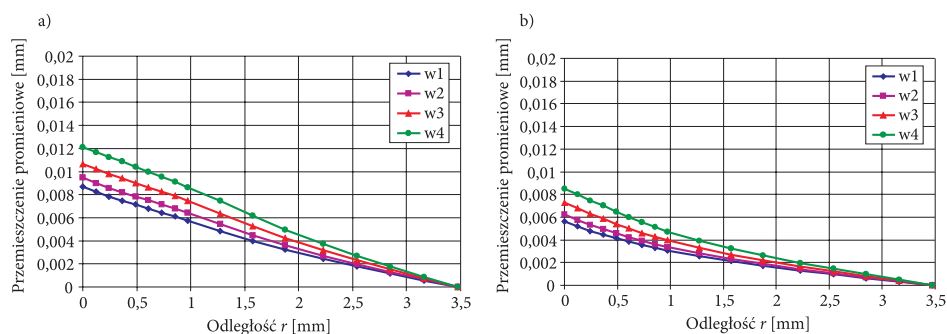
Rys. 6. Przemieszczenia promieniowe dla wariantu w4

na granicy blach jest spowodowana błędami numerycznymi w realizacji algorytmu kontaktu. Ostra krawędź blachy (brak stępienia) powoduje, że kierunek normalny do powierzchni kontaktu zmienia się w sposób skokowy (nieciągły), a na samej krawędzi jest nieokreślony (rys. 7).



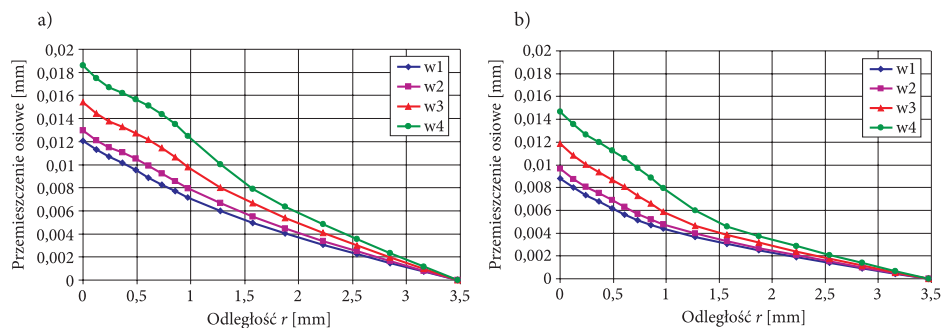
Rys. 7. Wektory normalne do powierzchni kontaktu

Dla pozostałych warunków zakucia charakter wykresów pozostaje bez zmian. Porównanie wyników dla różnych wysokości zakuwki pokazano na kolejnych rysunkach. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przemieszczenia promieniowe odpowiednio dla blachy dolnej i górnej. W celu ułatwienia porównania na obu rysunkach (dla czterech wykresów) zachowano tę samą skalę. Zgodnie z oczekiwaniami przemieszczenia promieniowe zwiększają się wraz ze wzrostem średnicy zakuwki (siły zakucia).

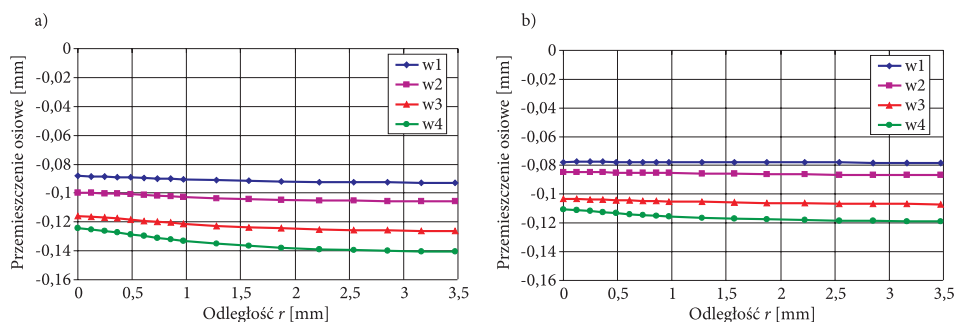


Rys. 8. Przemieszczenia promieniowe dla blachy dolnej: a) faza docisku; b) po odciążeniu

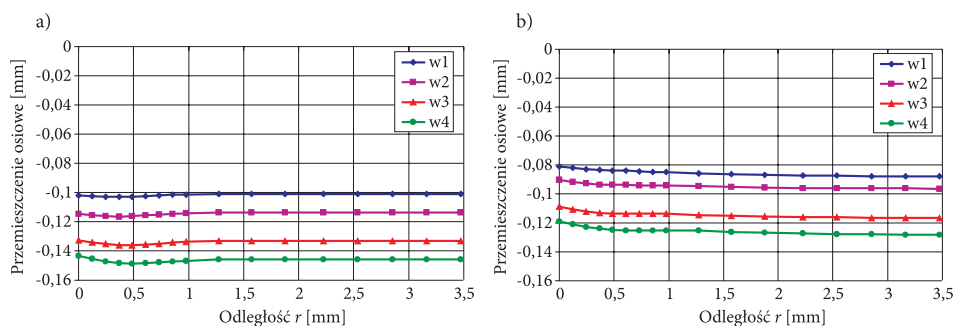
Na rysunkach 10 i 11 pokazano przemieszczenia osiowe dla blachy dolnej i górnej, również zachowując wspólną skalę. Podobnie przemieszczenia osiowe rosną ze wzrostem siły zakucia. Są one spowodowane głównie zagnieciem łoża fabrycznego w trakcie zakuwania (rys. 15).



Rys. 9. Przemieszczenia promieniowe dla blachy górnej: a) faza docisku; b) po odciążeniu



Rys. 10. Przemieszczenia osiowe dla blachy dolnej: a) faza docisku; b) po odciążeniu

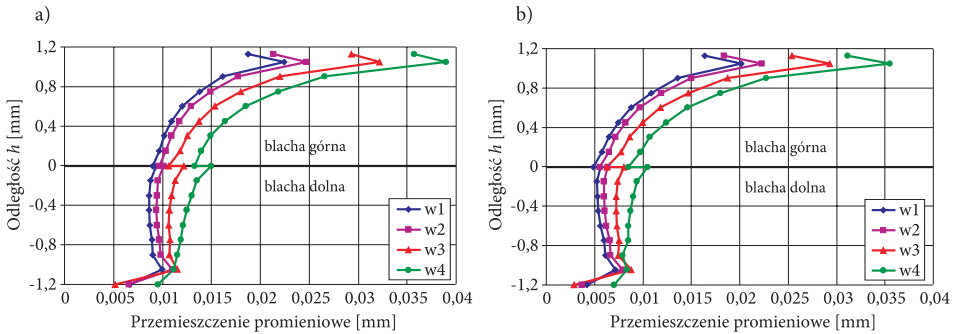


Rys. 11. Przemieszczenia osiowe dla blachy górnej: a) faza docisku; b) po odciążeniu

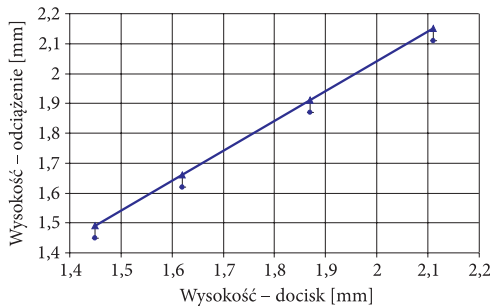
Porównanie przemieszczeń promieniowych otworu nitowego w kierunku osiowym (po grubości blach) dla 4 wariantów zakucia pokazano na rysunku 12. Wzrost siły zakucia powoduje największe zmiany przemieszczeń promieniowych bezpośrednio pod zakuwką.

Po odciążeniu wysokość zakuwki nieznacznie wzrasta (rys. 13), ponieważ sprężysta część deformacji jest odwracalna. Zmienia się również (nieznacznie

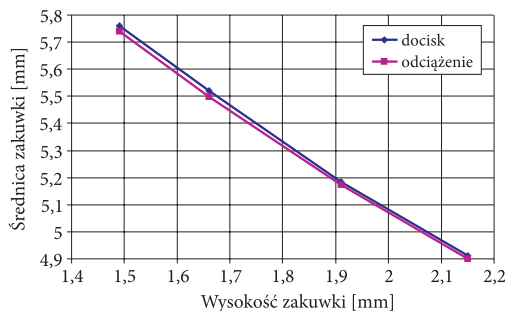
małej) średnica zakuwki (rys. 14). Zmiana jest bardziej widoczna dla mniejszych wysokości zakuwki (przy mniejszej sile zakucia) — w tych przypadkach udział odkształceń sprężystych jest większy.



Rys. 12. Przemieszczenia promieniowe otworu nitowego: a) faza docisku; b) po odciążeniu



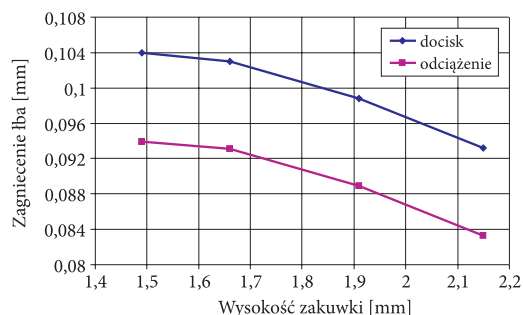
Rys. 13. Zmiana wysokości zakuwki po odciążeniu



Rys. 14. Zmiana średnicy zakuwki po odciążeniu

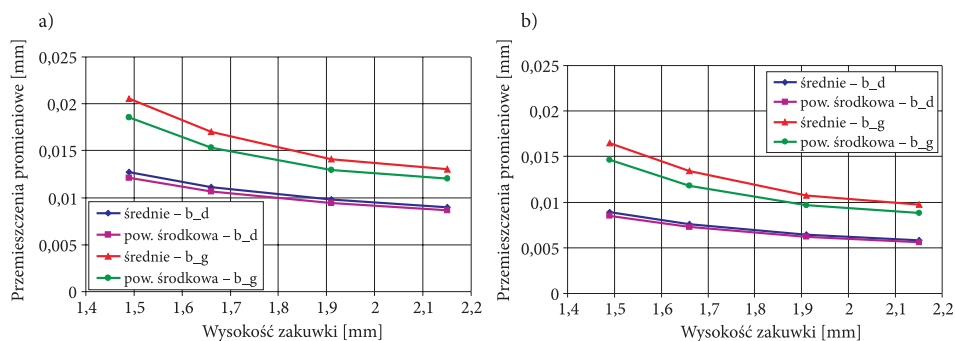
Wpływ siły zakucia (wysokości zakuwki) na zagniecenia łba fabrycznego pokazano na rysunku 15. Jest on na tym samym poziomie co udział deformacji sprężystych.





Rys. 15. Zagniecenie łba fabrycznego podczas nitowania

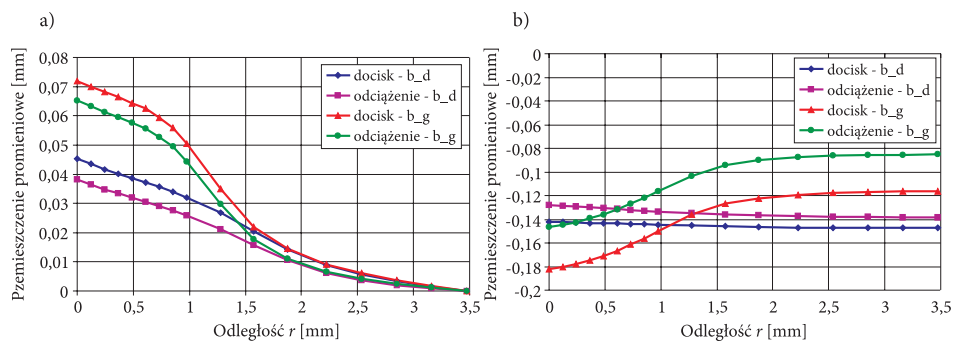
Porównanie przemieszczeń promieniowych otworu nitowego dla różnych sił zakucia (wysokości zakuwki) przedstawiono na rysunku 16. Na wspólnej skali pokazano fazę docisku i odciążenia dla blachy górnej i dolnej. Porównano także przemieszczenia średnie otworu oraz przemieszczenia na wysokości powierzchni środkowej każdej blachy. Dla blachy dolnej przemieszczenia średnie odpowiadają przemieszczeniom powierzchni środkowej, natomiast dla blachy górnej wartości średnie są od 5% do 10% wyższe.



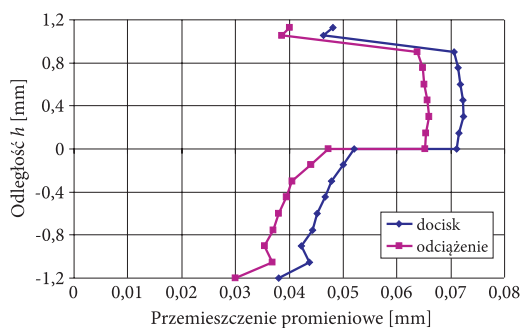
Rys. 16. Przemieszczenia promieniowe otworu: a) faza docisku; b) po odciążeniu

## 4. Modyfikacja modelu

Zwiększenie transferu materiału nitu do otworu w blachach poprawia jakość połączenia. Cenny jest wzrost przemieszczeń oraz bardziej równomierny ich rozkład. Efekt ten można uzyskać przez zastosowanie kompensatora [8, 9]. W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ ograniczenia średnicy zakuwki [5] na przemieszczenia otworu (wariant w5). Nit zakuto do wysokości 1,66 mm (jak w wariantcie w3), jednocześnie ograniczając średnicę zakuwki przy pomocy pierścienia o średnicy 5,2 mm (jak w wariantcie w2).



Rys. 17. Przemieszczenia dla wariantu w5: a) promieniowe; b) osiowe



Rys. 18. Przemieszczenia promieniowe otworu nitowego dla wariantu w5

W rezultacie uzyskano 4-5-krotny wzrost przemieszczeń otworu nitowego szczególnie w blasze od strony zakuwki oraz bardziej równomierny ich rozkład (rys. 17 i 18). Wzrost przemieszczeń jest efektem pozytywnym, jednak wzrost dysproporcji pomiędzy przemieszczeniami blachy górnej i dolnej (rys. 18) nie jest korzystny. Pożądanym efektem są przemieszczenia obu blach na tym samym poziomie.

## 5. Podsumowanie

Z punktu widzenia analizy wytrzymałości zmęczeniowej ważna jest informacja o poziomie naprężeń resztkowych i eksploatacyjnych. Również wartości przemieszczeń resztkowych okazują się istotne np. w modelowaniu połączeń nitowych elementami powłokowymi, w sytuacji gdy nie można przeprowadzić symulacji procesu nitowania. Wówczas naprężenia resztkowe można generować poprzez zadanie wstępnych przemieszczeń krawędzi otworu [10]. Wartości przemieszczeń są również przydatne do weryfikacji wyników obliczeń numerycznych na podstawie pomiarów doświadczalnych [3].

Średnica zakuwki oraz stopień wypełnienia otworu nitowego zależą od wysokości zakuwki (siły zakucia). Trwałe odkształcenia plastyczne materiału blach wokół otworu pozostają, w wyniku procesu zakuwania i spęczenia nitu, w otworze. Średnie przemieszczenia promieniowe otworu blachy górnej (od strony zakuwki) są około 30% większe od przemieszczeń blachy dolnej (od strony łba fabrycznego). Po odciążeniu względne różnice w wartościach przemieszczeń wzrastają do 40%.

Największe przemieszczenia promieniowe występują dla blachy górnej bezpośrednio pod zakuwką. Maleją one ponad trzykrotnie na poziomie styku obu blach. Przemieszczenia blachy dolnej na całej grubości pozostają na tym samym poziomie.

Dodatkowo przeanalizowano modyfikację procesu nitowania polegającą na zmniejszaniu wysokości zakuwki, z jednoczesnym ograniczeniem jej średnicy do wartości nominalnej. W rezultacie uzyskano wzrost przemieszczeń promieniowych oraz równomierne przemieszczenie na całej grubości blachy górnej. Niestety dysproporcja pomiędzy przemieszczeniami blachy górnej i dolnej również wzrosła, podczas gdy najbardziej pożądanym efektem byłyby przemieszczenia promieniowe otworów w obu blachach na tym samym poziomie.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego EUREKA finansowanego przez MNiSW.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2010 r.

#### LITERATURA

- [1] J. DE RIJCK, *Stress Analysis of Fatigue Cracks in Mechanically Fastened Joints, Doctoral Dissertation*, Delft University of Technology, 2005.
- [2] A. ATRE, *A finite element and experimental investigation on the fatigue of riveted lap joints in aircraft applications*, Georgia Institute of Technology, 2006.
- [3] C. D. RANS, *The Role of Rivet Installation on the Fatigue Performance of Riveted Lap Joints*, Doctoral Dissertation, Department of Mechanical and Aerospace Engineering Carleton University, 2007.
- [4] J. DE RIJCK, J. J. HOMAN, J. SCHIJVE, R. BENEDICTUS, *The driven rivet head dimensions as an indication of the fatigue performance of aircraft lap joints*, International Journal of Fatigue, 29, 2007, 2208-2218.
- [5] E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, A. DEREWOŃKO, *Riveting process simulation — upsetting of the mushroom rivet*, Journal of KONES, 15, 2, Warszawa, 2008, 493-502.
- [6] E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, G. SŁAWIŃSKI, A. DEREWOŃKO, *Numeryczna analiza wpływu siły zakucia na deformacje nitu grzybkowego i otworu nitowego*, XI Konferencja: Programy MES we Wspomaganiu Analizy, Projektowania i Wytwarzania, Pisz, 2009.
- [7] MSC Marc Theoretical Manual, MSC Corp., 2007.
- [8] PI 249-78, Instrukcja nitowania stosowana w PZL Mielec.

- [9] E. SZYMCZYK, G. SŁAWIŃSKI, J. JACHIMOWICZ, A. DEREWONKO, *Comparison of the dynamic riveting process of a rivet with and without a compensator*, Journal of KONES, 16, 3, Warszawa, 2009, 415-422.
- [10] E. SZYMCZYK, J. JACHIMOWICZ, G. SŁAWIŃSKI, *Global approach in modelling of riveted joints*, 9th International Conference: Shell Structures, Theory and Applications, Jurata, 2009.

E. SZYMCZYK

### Numerical investigation of mushroom rivet and rivet hole deformations in a squeezing process

**Abstract.** The plastic strain field remains in the joint around the rivet hole as a result of the riveting process. Residual strain field is beneficial because it has a significant influence on fatigue life of the joint.

The paper deals with an analysis of the squeezing force influence on the rivet and rivet hole deformations. The simulation of the riveting process is carried out for a mushroom rivet (shank diameter 3.5 mm) joining two aluminium sheets (thickness 1.2 mm). The three-dimensional numerical model of the sheet square part 10.5-mm-wide surrounding a single rivet is considered (Fig. 3). Dimensions of the mushroom rivet are taken according to Russian standard [OST 1 34040-79].

The models of the rivet and sheets consist of eight-noded, isoparametric, three-dimensional brick elements. The classical updated Lagrange procedure for elastic-plastic materials and large strain plasticity option is used due to large geometrical and material non-linearities. The rounded and the flat rivet tools are described as rigid surfaces. The contact with Coulomb friction model is defined between the mating parts of the joint.

Four cases of squeezing conditions (driven head dimensions) are taken into account. The driven rivet head diameter changes from its minimum to maximum value according to a manufacturing instruction. Large displacements of the rivet hole are observed in the sheet by the side of the driven rivet head. The average displacements value of the rivet hole in the sheet under the driven rivet head is twice as much greater than in the later one (the sheet by the side of the manufactured head). Squeezing the rivet with restriction of the driven head diameter causes a better rivet hole filling capability and a more uniform displacement distribution.

**Keywords:** riveted joint, rivet squeezing, FEM, contact

**Universal Decimal Classification:** 621.88