



Numeryczna symulacja dynamicznego procesu spękania nitu grzybkowego z kompensatorem

GRZEGORZ SŁAWIŃSKI, AGNIESZKA DEREWOŃKO,
JERZY JACHIMOWICZ, TADEUSZ NIEZGODA,
ELŻBIETA SZYMCZYK

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

Streszczenie. W trakcie spękania nitu do łączonych blach wprowadzane są naprężenia wstępne, których wartość przekracza granicę plastyczności i które zależą od sposobu formowania zakuwek. Zjawisko to wpływa na wzrost trwałości zmęczeniowej połączenia. W artykule przedstawiono numeryczną analizę dynamicznego procesu zakuwania nitu przy zastosowaniu tzw. prostej metody nitowania. Analizy przeprowadzono przy zastosowaniu metody elementów skończonych za pomocą systemu LS-Dyna. Obejmowały one nieliniowości materiałowe oraz zjawiska kontaktowe z tarciem w trakcie procesu spękania nitu.

Słowa kluczowe: połączenia nitowe, naprężenia wstępne, MES

Symbole UKD: 621.884

1. Wstęp

Nitowanie to do dzisiaj podstawowy typ nierozłącznych połączeń stosowanych przy wykonywaniu konstrukcji ze stopów lekkich. Szeroko wykorzystywane jest przy budowie samolotów i śmigłowców. Wzrastająca ciągle prędkość i zwiększający się rezsurs samolotów, częstsze stosowanie szczelnych szwów i pokryć nośnych, jak również konieczność otrzymania gładkiej powierzchni zewnętrznej statków powietrznych podwyższyły wymagania stawiane połączeniom nitowym [1].

W fazie projektowania samolotów należy brać pod uwagę wiele czynników. Podstawowe wymagania stawiane przy konstruowaniu struktur lotniczych zawarte są

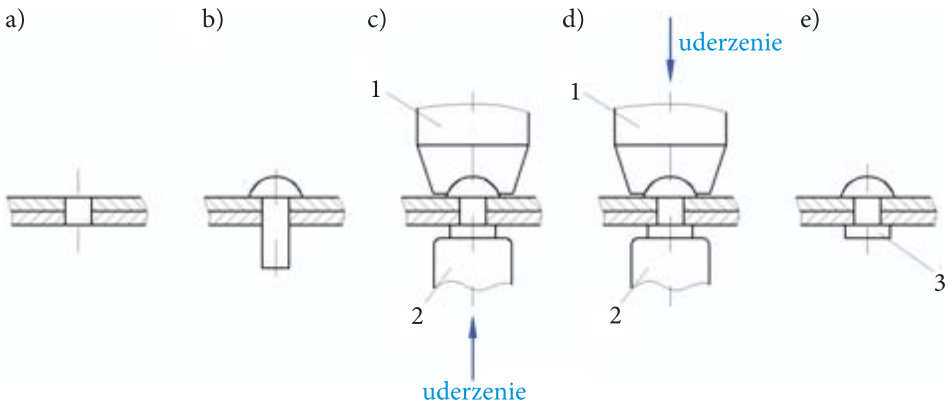
w warunkach technicznych (tzw. WT). Można je osiągnąć poprzez spełnienie określonych kryteriów konstrukcyjnych, technologicznych bądź materiałowych [1].

Jednym z ważniejszych czynników konstrukcyjnych jest rodzaj zastosowanego w połączeniu nitu. Jego typ jest ściśle związany z miejscem występowania w konstrukcji. Przykładowo nity grzybkowe mogą być stosowane na zewnętrznych powierzchniach samolotów wolnych lub śmigłowców, gdyż ze względu na małe prędkości ich wpływ na opór aerodynamiczny można pominąć. Jednak wraz ze wzrostem oporów (związanych ze wzrostem prędkości) na zewnętrzne pokrycia statków powietrznych powinno się stosować wyłącznie nity z łbami wpuszczanymi.

Czynnikiem technologicznym bezpośrednio wpływającym na jakość połączenia jest sposób formowania zakuwek. Może się ono odbywać na dwa sposoby, tj. statycznie lub dynamicznie. Zakuwanie statyczne odbywa się na prasach i jest uważane za bardziej dokładne. Główne zalety nitowania na prasach to równomierne ściskanie trzonu nitu podczas kształtowania zakuwki oraz zwiększenie wydajności pracy (możliwość zakuwania większej ilości nitów w jednej chwili). Zakuwanie za pomocą młotków pneumatycznych jest przykładem zakuwania dynamicznego. Wyróżnić tutaj można zakuwanie proste i odwrotne [1].

Przebieg procesu zakuwania dynamicznego na przykładzie nitu grzybkowego przedstawiono na rysunku 1. Prosty sposób nitowania polega na tym, że zagłownik uderza od strony końca trzonu nitu, podczas gdy podtrzymka dociskana jest do łba nitu (rys. 1c). W sposobie odwrotnym podtrzymka uderza w łeb nitu, a zakuwka powstaje w wyniku uderzeń trzonu nitu w zagłownik (rys. 1d).

Bezpośredni wpływ na stan naprężenia w blachach pokrycia samolotu ma zastosowana technologia nitowania, w tym dążenie do równomiernego wypeł-



Rys. 1. Przebieg nitowania dynamicznego nitów z łbami półkulistymi: a) wiercenie otworu nitowego; b) wstawienie nitu w otwór nitowy; c) nitowanie proste; d) nitowanie odwrotne; e) zakuty nit (1 — podtrzymka, 2 — zagłownik, 3 — wykonana zakuwka)

nienia otworu przez trzpień. Zastosowanie nitu z kompensatorem [2] jest jednym ze sposobów lepszego transferu materiału zakuwki w trzpień wypełniający otwór nitowy. Przekłada się to bezpośrednio na zwiększenie ekspansji otworu nitowego w blasze od strony fabrycznego łba nitu, a tym samym wywołanie korzystniejszego z punktu widzenia wytrzymałości zmęczeniowej rozkładu naprężeń resztkowych, niż to ma miejsce w przypadku zastosowania nitu z łbem wypukłym.

Podejście numeryczne pozwala wstępnie ocenić stan odkształceń i naprężeń w obszarze współpracy nitu i blach. Wyniki otrzymane w MES mogą być wytycznymi dla eksperymentatorów w celu ich dalszego wykorzystania w badaniach na stanowisku.

Złożony charakter powstawania naprężeń resztkowych w blachach wokół otworu nitowego wskazuje na celowość zastosowania metody elementów skończonych w analizie procesu nitowania.

Celem pracy jest określenie i analiza rozkładów naprężeń w blachach oraz deformacji po dynamicznym zakuciu nitu grzybkowego z kompensatorem [2] w oparciu o technologię nitowania prostego (rys. 1c).

2. Duże odkształcenia i przemieszczenia

Problemem poruszonym w pracy jest zakuwanie trzonu nitu w pakiecie złożonym z dwóch blach. W zadaniu tym dużym deformacjom ulegają elementy skończone siatki w obrębie zakuwki.

Sformułowania zagadnień dużych przemieszczeń można podzielić na zagadnienia dużych deformacji (ugięcia i obroty) oraz dużych odkształceń. Znanych jest wiele opracowań określających metody określania wpływu dużych odkształceń i ich zastosowania w algorytmach MES, które można znaleźć m.in. w pracach [3, 4, 5].

W przypadku analizy dynamicznej MES, z jaką mamy do czynienia w pracy, równanie równowagi modelu dyskretnego pomijające efekt tłumienia układu ma postać [3]:

$$[M]\ddot{u} + [K]u = f, \quad (1)$$

gdzie: $[M]$ — macierz bezwładności;

$[K]$ — macierz sztywności;

u — wektor przemieszczeń;

\ddot{u} — wektor przyspieszeń;

f — wektor sił zewnętrznych.

Poszukiwanie rozwiązania wiąże się z uwzględnieniem nieliniowych elementów tensora odkształcenia Lagrange'a-Greena [5]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right). \quad (2)$$

W zagadnieniach liniowych brane pod uwagę są tylko dwa pierwsze wyrazy wyrażenia (2). Uwzględnienie ostatniego składnika sumy wprowadza nieliniowość wymuszającą modyfikację sposobu określania macierzy sztywności w równaniu (1). Nowa macierz sztywności ma postać:

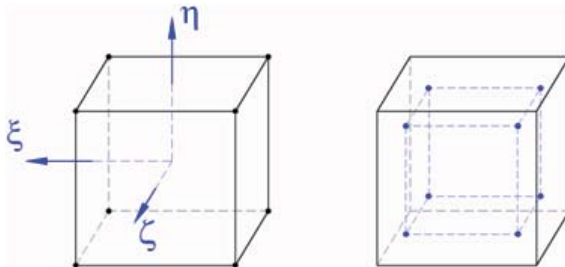
$$[K] = [K]^0 + [K]^1, \quad (3)$$

gdzie: $[K]^0$ — liniowy i niezależny od obciążenia składnik macierzy sztywności;
 $[K]^1$ — składnik zależny od historii obciążenia.

W przypadku kiedy ciało ulega dużym odkształceniom, małe wyrazy pozostałych składowych przemieszczenia zaczynają odgrywać istotną rolę i ich zaniedbywanie nie jest możliwe. Wówczas stała macierz pochodnych funkcji kształtu, niezależna dotychczas od wielkości przemieszczeń węzłów (a więc wyniku rozwiązania zadania), staje się macierzą, w której występują wyrazy zależne od wartości przemieszczeń. Sytuacja taka skutkuje koniecznością iteracyjnego poszukiwania rozwiązania i faktem, że odpowiedź układu na obciążenie jest nieliniowa, zależna od wielkości deformacji (przemieszczenia lub odkształcenia). Ponieważ określenie możliwych źródeł nieliniowości zależy od analizowanego obiektu, a przede wszystkim od stosowanego rodzaju elementów skończonych, implementacja dużych odkształceń jest związana z definicją elementu.

3. Elementy skończone

Przy tworzeniu modelu dyskretnego nitu i blach wykorzystano ośmiowęzłowe, bryłowe elementy skończone z ośmioma punktami całkowania o trzyliniowej funkcji kształtu. Przeprowadzenie analizy numerycznej z wykorzystaniem takiego elementu równoznaczne jest z tym, że naprężenia obliczane będą w ośmiu punktach położonych wewnątrz każdego z elementów [6]. Element bryłowy z ośmioma punktami całkowania przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. 8-węzłowy element bryłowy z ośmioma punktami całkowania

Korzystając z zasady d'Alemberta, zasada prac przygotowanych dla modelu podzielonego na n elementów skończonych, w uaktualnionym opisie Lagrange'a zapisywana jest w postaci:

$$\sum_{i=1}^n \left(\int_{V_m} \rho N^T N a dV + \int_{V_m} B^T \sigma dV - \int_{V_m} \rho N^T b dV - \int_{S_i} N^T p dS \right)^m = 0, \quad (4)$$

gdzie: N — macierz funkcji kształtu;
 B — macierz pochodnych funkcji kształtu;
 σ — wektor naprężeń;
 a — wektor przyspieszeń;
 b — wektor sił masowych;
 p — wektor obciążenia;
 ρ — gęstość.

Do obliczania całki wielokrotnej (dowolnej funkcji g) stosowana jest kwadratura Gaussa:

$$\int_V g dV = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n g_{jkl} |J_{jkl}| w_j w_k w_l, \quad (5)$$

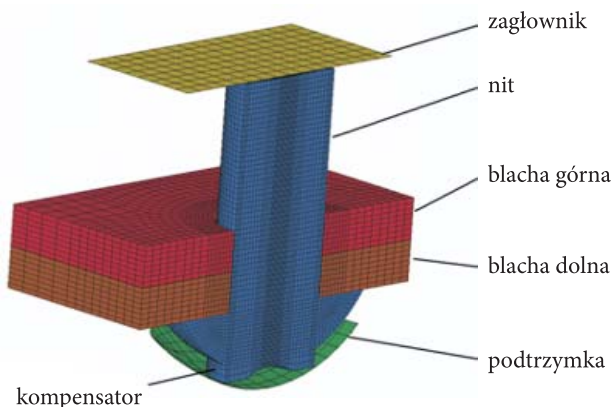
gdzie: n^3 — liczba punktów całkowania;
 J — Jacobian przekształcenia do układu parametrycznego $0\xi\eta\zeta$;
 w_j, w_k, w_l — współczynniki wagowe;
 $g_{jkl} = g(\xi_j, \eta_k, \zeta_l)$ — wartość funkcji w punkcie Gaussa.

Dla ośmiu punktów całkowania $n = 2$, $w_1 = w_2 = 1$, $\xi_2 = -\xi_1 = 0,573502692$, $\eta_2 = -\eta_1 = 0,573502692$, $\zeta_2 = -\zeta_1 = 0,573502692$.

4. Model numeryczny

Przedmiotem analizy numerycznej był aluminiowy nit z kompensatorem o średnicy 3,5 mm, który został osadzony w pakiecie dwóch blach o grubości 1,2 mm każda.

Za pomocą elementów trójwymiarowych Solid (typ 2 [6]) utworzono dyskretny model otoczenia pojedynczego nitu, złożony z nitu z łbem z kompensatorem, fragmentów dwóch blach (górnej od strony formowanej zakuwki oraz dolnej od strony łba fabrycznego nitu) oraz zagłownika i podtrzymki o kształcie grzybka. Zagłownik i podtrzymka zostały zamodelowane za pomocą czterowęzłowych elementów płaskich Shell (typ 2 [6]) jako ciała sztywne typu *rigid surface* o sześciu stopniach swobody. Średnica otworu nitowego była większa od średnicy nitu o 0,05 mm. Model numeryczny otoczenia pojedynczego nitu przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Model numeryczny otoczenia pojedynczego nitu

W modelu określono obszary kontaktu między ciałem odkształcalnym (nit) oraz dwiema powierzchniami ciał sztywnych (opisującymi powierzchnie podtrzymki i zagłownika). Odwzorowano również współpracę powierzchni nitu (zarówno trzpienia jak powierzchni płaskiej łba) z blachami oraz blach między sobą. Uwzględniono tarcie wg modelu Amontonsa-Coulomba. Wartości współczynników tarcia dynamicznego μ_d i statycznego μ_s pomiędzy kontaktującymi się obszarami przyjęto wstępnie na podstawie danych literaturowych na poziomie 0,2. W dalszych badaniach przewiduje się określenie wartości współczynników w sposób eksperymentalny.

Otoczenie nitu jest fragmentem większej konstrukcji. Jej oddziaływanie z pozostałą częścią konstrukcji odwzorowano przez odebranie odpowiednich stopni

swobody, na zewnętrznych ścianach blach. Podtrzymce odebrano wszystkie stopnie swobody uniemożliwiając jej ruch.

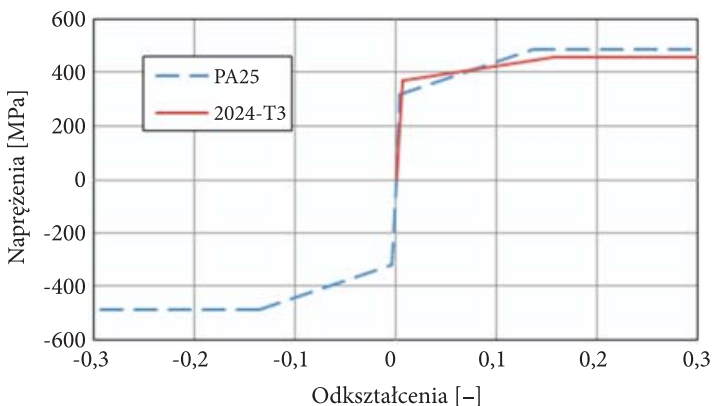
Proces spęczania nitu zrealizowano przez nadanie płycie opisującej zagłownik masy równej 1 kg oraz początkowej energii kinetycznej E_k równej 15 J określonej w normie [7]. Zakuwanie odbywało się w wyniku jednego uderzenia.

W obliczeniach wykorzystano sprężysto-plastyczne modele materiału nitu PA25 i blachy 2024-T3. Do określenia właściwości materiału w zakresie plastycznym posłużono się zależnością [6]:

$$\epsilon_p = \epsilon - \epsilon_{spr}, \tag{6}$$

gdzie: ϵ_p — odkształcenie plastyczne;
 ϵ — odkształcenie całkowite;
 ϵ_{spr} — odkształcenie sprężyste ($\epsilon_{spr} \cdot E = R_e$);
 E — moduł Younga;
 R_e — naprężenie odpowiadające granicy plastyczności.

Krzywe materiałowe dla materiału nitu i blach przedstawiono na rysunku 4, natomiast ich podstawowe parametry zestawiono w tabeli 1.



Rys. 4. Krzywe materiałowe σ - ϵ dla ciał odkształcalnych

TABELA 1

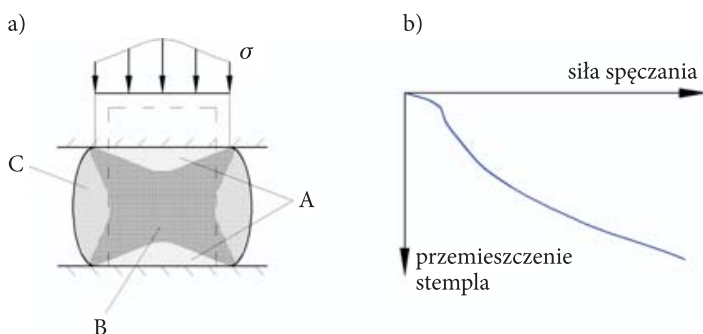
Podstawowe parametry stopów aluminium PA25 i 2024-T3

Stop aluminium	Moduł Younga [MPa]	Współcz. Poissona ν	Granica plastyczności [MPa]	Wytrzymałość [MPa]	Wydłużenie [-]
PA25	71 000	0,33	318	488	0,14
2024-T3	68 000	0,3	374	460	0,16

Nieliniowe obliczenia dynamiczne w zakresie dużych odkształceń wykonano w programie LS-DYNA, wykorzystując przedstawione charakterystyki materiałowe.

5. Obliczenia analityczne

Metody analityczne służące do oszacowania siły spęczania oparte są na teorii plastycznego płynięcia i obarczone są wieloma uproszczeniami. W pracy do jej teoretycznego oszacowania wykorzystano teorię spęczania swobodnego walca. Schemat przebiegu spęczania walca z zaznaczonymi charakterystycznymi strefami odkształceń przedstawiono na rysunku 5a. Literą A oznaczono obszar przylegający do płaszczyzn czołowych zagłownika, który odkształca się najmniej. W obszarze B występują największe odkształcenia promieniowe i wzdłuż osi walca. W pośrednim między A i B obszarze C występują największe odkształcenia obwodowe [8]. Na rysunku 5b przedstawiono krzywą z doświadczeń przemysłowych określającą siłę spęczania w funkcji drogi stempla.



Rys. 5. Spęczanie z tarciem między powierzchnią walca i narzędzia

Wykorzystując teorię plastyczności [9], oszacowano wartość siły osiowej potrzebnej do spęczenia swobodnej części trzpienia nitu do wysokości zakuwki uzyskanej w symulacji numerycznej. Przyjmując za początkową wysokość i średnicę trzpienia nitu wynoszącą $l_0 = 4,2$ mm i $d_0 = 3,5$ mm oraz wysokość zakuwki równą $l_1 = 2,17$ mm, obliczono odkształcenie zastępcze

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \frac{2,17}{4,2} = -0,66. \quad (7)$$

Z krzywej materiałowej dla materiału nitu (rys. 3) odczytano dla wyznaczonego odkształcenia zastępczego ε wartość naprężenia uplastyczniającego równą

$\sigma_{pk} = 488$ MPa. Przy założeniu, że w takim przypadku występuje tylko jednoosiowe ściskanie, wartość ta odpowiada naprężeniu σ_z wzdłuż osi nitu.

Pole powierzchni czołowej trzpienia po spęczeniu zostało wyznaczone z warunku stałej objętości materiału

$$A_1 = \frac{\pi d_0^2 l_0}{4 l_1} = \frac{\pi \cdot 3,5^2 \cdot 4,2}{4 \cdot 2,17} = 18,61 \text{ mm}^2. \quad (8)$$

Obliczoną wartość można uznać za poprawną tylko w przypadku braku tarcia między powierzchniami zakuwnika i trzpienia nitu. Dla pola powierzchni czołowej trzpienia po spęczeniu uzyskanej z zależności (8) siła osiowa w końcowej fazie procesu wynosi:

$$P_1 = A_1 \sigma_{pk} = 18,61 \cdot 488 = 9081,7 \text{ N}. \quad (9)$$

Zakładając, że istniejące tarcie ($\mu = 0,2$) powoduje powstawanie stałego naprężenia stycznego oszacowano, z metody równowagi pracy [9], siłę osiową

$$P_2 = A_1 \sigma_{pk} \left(1 + \frac{\mu}{3} \frac{2r_0}{l_0} \right) = 9586,2 \text{ N}, \quad (10)$$

natomiast średnie naprężenie wzdłuż osi nitu, przy uwzględnieniu współczynnika tarcia, wynosi

$$\sigma_z = \sigma_{pk} \left(1 + \frac{\mu}{3} \frac{2r_0}{l_0} \right) = 515 \text{ MPa}. \quad (11)$$

Przy danych wymiarach początkowych wstępniaka promień zakuwki jest 1,46 razy większy od promienia początkowego r_0 .

6. Analiza numeryczna

W obliczeniach numerycznych przeanalizowano etap zakuwania nitu. Otrzymałno charakterystyczne wymiary zakuwki, które zestawiono w tabeli 2. Otrzymane wielkości zakuwki były zgodne z wymaganiami normy [7] odnośnie kształtu zakuwki.

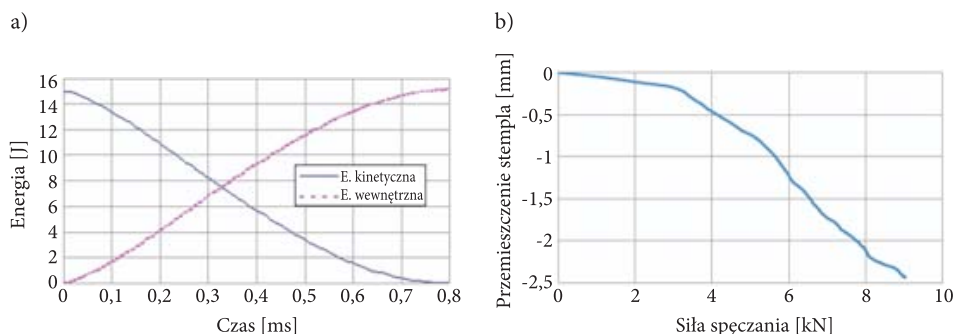
Energia kinetyczna zagłownika jest zamieniana na energię wewnętrzną w nicie i blachach. Bilans energetyczny w procesie zakuwania jest zachowany. Wykresy energii przedstawiono na rysunku 6a.

TABELA 2

Wymiary uformowanej zakuwki

Średnica zakuwki D [mm]	5,12
Wysokość zakuwki H [mm]	2,17

W celu uzyskania prawidłowej zakuwki należy przyłożyć odpowiednią siłę spęczania. W przypadku zakuwania prostego nitu z kompensatorem uzyskano maksymalną siłę równą 9 kN. Charakterystyczny przebieg zmiany siły spęczania przedstawiono na rysunku 6b. Jak widać przebieg sił jest zgodny z przykładami literaturowymi [9].



Rys. 6. a) Zmiana energii kinetycznej zagłownika na energię wewnętrzną spęczanego nitu; b) zależność siły spęczania od przemieszczenia zagłownika

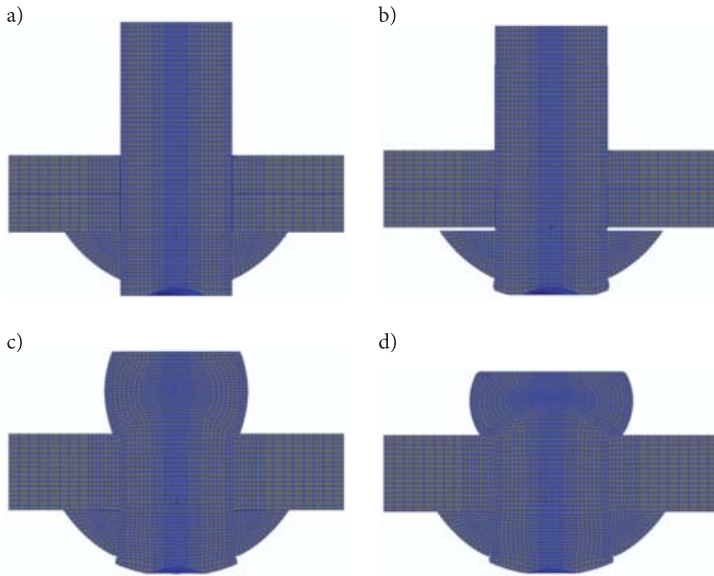
Uzyskane numeryczne wartości sił odpowiadają wartościom szacowanym analitycznie i wskazują na poprawne przygotowanie modelu.

Na rysunku 7 zestawiono przebieg deformacji nitu w różnych momentach. W początkowej fazie zakuwania wskutek silnego uderzenia zagłownika w trzpień powstaje szczelina pomiędzy fabrycznym łbem nitu a blachą dolną pakietu (rys. 7b). Jest to następstwo deformowania się kompensatora na nieruchomej podtrzymańce. W kolejnych fazach w wyniku deformowania się nitu szczelina zanika. Całkowity czas formowania zakuwki wyniósł około 0,8 ms.

Rozkłady naprężeń promieniowych i obwodowych w blachach na powierzchniach środkowych przedstawiono na rysunkach 8-11.

W obu blachach maksymalne wartości bezwzględne naprężeń promieniowych (ujemnych) występują na krawędziach otworów i wynoszą odpowiednio 190 MPa dla górnej i 250 MPa dla dolnej blachy. Wraz z oddalaniem się od krawędzi wartości bezwzględne naprężeń spadają do 90 MPa.

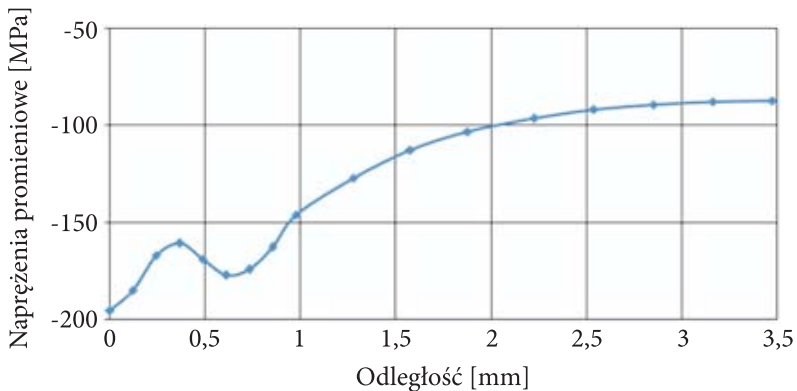
Podobnie jak w przypadku naprężeń promieniowych, na krawędziach otworów i w niewielkiej odległości od nich naprężenia obwodowe mają wartości ujemne.



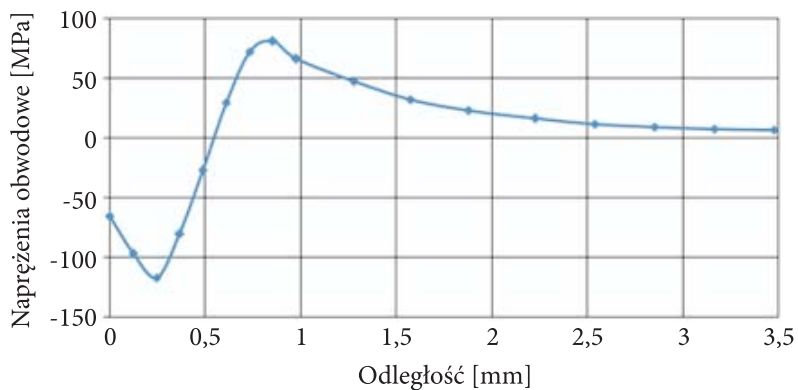
Rys. 7. Przebieg deformacji nitu w trakcie zakuwania dynamicznego w chwili: a) 0 ms (początek zakuwania); b) 0,05 ms; c) 0,4 ms; d) 0,8 ms (koniec zakuwania)

W obszarze tym występują również maksymalne ich wartości bezwzględne i wynoszą odpowiednio 120 MPa w górnej i 75 MPa w dolnej blasze.

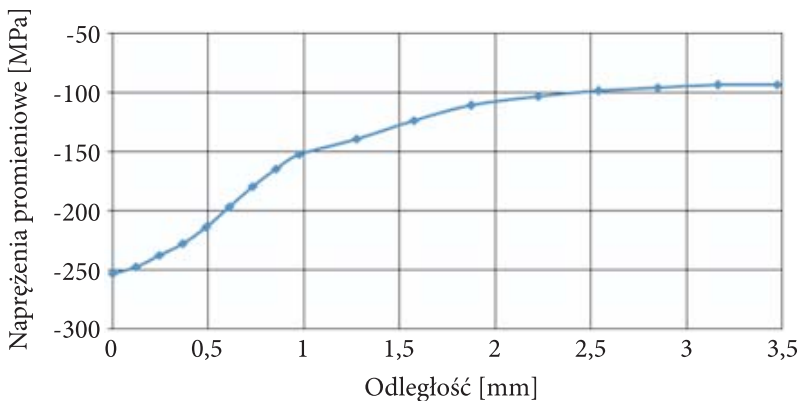
Wraz ze wzrostem odległości od nitu naprężenia obwodowe zmieniają się na wartości dodatnie. Ich maksymalne wartości wynoszą 80 MPa dla górnej i 55 MPa dla dolnej blachy.



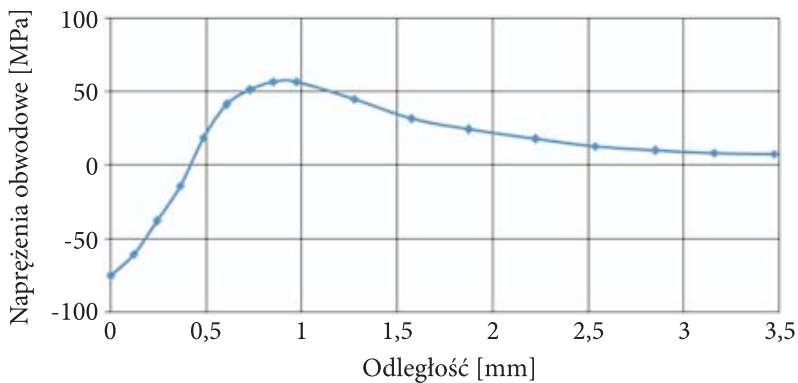
Rys. 8. Rozkład naprężeń promieniowych w połowie grubości blachy górnej



Rys. 9. Rozkład naprężeń obwodowych w połowie grubości blachy górnej



Rys. 10. Rozkład naprężeń promieniowych w połowie grubości blachy dolnej



Rys. 11. Rozkład naprężeń obwodowych w połowie grubości blachy dolnej

7. Wnioski

Czynniki konstrukcyjne i technologiczne mają istotny wpływ na jakość wykonania połączenia w procesie nitowania. Odpowiedni ich dobór bezpośrednio przekłada się na rozkład naprężeń resztkowych, które mają potem znaczenie również w trakcie eksploatacji konstrukcji. Na skutek spęczania trzonu nitu z kompensatorem wprowadzone naprężenia resztkowe, zarówno w blasze od strony zakuwki jak i od strony łba fabrycznego nitu, są na tym samym poziomie. Naprężenia obwodowe, które decydują o trwałości zmęczeniowej połączenia, zmieniają swój znak z ujemnych na dodatnie wraz z oddalaniem się od krawędzi otworu. Ujemne naprężenia resztkowe redukują poziom lokalnych naprężeń wokół otworu, pochodzących od zewnętrznych obciążeń działających na połączenie.

Metody analityczne stosowane wyłącznie w sprężystym zakresie naprężeń posiadają poważne ograniczenia, takie jak dwuwymiarowość modelu. Badania doświadczalne, tj. tensometria rezystancyjna bądź pomiary dyfraktometryczne, również nie dają nam pełnej odpowiedzi co do stanu naprężenia i podobnie jak w przypadku metod analitycznych możliwe jest określenie odkształceń tylko na powierzchni badanego ciała.

Oczywiście w pewnych warunkach można doświadczalnie wyznaczyć stan odkształcenia, ale wymagany jest do tego odpowiedniej klasy sprzęt badawczy (np. dyfraktometr neutronowy).

Analizy MES pozwalają na określenie stanu naprężeń w połączeniu nitowym, niezależnie od grubości łączonych blach. Zastosowanie analizy dynamicznej, z uwzględnieniem nieliniowych składników tensora odkształcenia Lagrange'a-Greena umożliwia znalezienie nieliniowej odpowiedzi układu na obciążenie.

Wykorzystanie ośmiowęzłowych, bryłowych elementów skończonych z trzyliniową funkcją kształtu do tworzenia modeli dyskretnych nitu i blach pozwala dokładnie wyznaczyć rozkład naprężeń w blachach pod zakuwką i na powierzchniach kontaktu.

Określenie poprawności modelowania w tym przypadku jest możliwe poprzez przeprowadzenie makroeksperymentu. Jeżeli w badaniu makropróbki pewne wielkości np. siły reakcji, przemieszczeń określonych punktów czy podobszarów próbki wykażą zgodność z procesem symulacji, to z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że proces modelowania dostarczył wiarygodnych wyników.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2009 r.

LITERATURA

- [1] W. GRIGORIEW, P. GOŁDOWSKI, *Nitowanie konstrukcji ze stopów lekkich*, Wyd. MON, 1954.
- [2] OST 1 34040-79, *Nity lotnicze z łbem grzybkowym z kompensatorem*.

- [3] M. DACKO, W. BORKOWSKI, S. DOBROCIŃSKI, T. NIEZGODA, M. WIECZOREK, *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Wyd. Arkady, Warszawa, 1994.
- [4] G. RAKOWSKI, Z. KACPRZYK, *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [5] E. RUSIŃSKI, J. CZMOCHOWSKI, T. SMOLNICKI, *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Warszawa, 2000.
- [6] LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL, Version 970, April 2003.
- [7] PI 249-78, *Instrukcja do nitowania stosowana w PZL w Mielcu*.
- [8] P. WASIUNYK, *Teoria procesów kucia i prasowania*, WNT, Warszawa, 1982.
- [9] S. ERBEL, K. KUCZYŃSKI, Z. MARCINIAK, *Obróbka plastyczna*, PWN, Warszawa, 1981.

G. SŁAWIŃSKI, A. DEREWOŃKO, J. JACHIMOWICZ,
T. NIEZGODA, E. SZYMCZYK

Numerical simulation of dynamic riveting process of a rivet with a compensator

Abstract. This paper deals with the numerical FE simulation of the dynamic riveting process of a mushroom rivet with a compensator. The riveting has remained a traditional and the most popular parts joining method in aircraft structures for many years. The residual stress state appears at the rivet hole after the riveting process, which improves the joint's fatigue behaviour. Numerical FE simulations of the upsetting process are carried out using the Ls-Dyna code. The contact phenomena with friction and nonlinear material model are analysed.

Keywords: riveted joint, residual stress, FEM

Universal Decimal Classification: 621.884