

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Eksperymentalne i numeryczne badania procesu zakuwania nitów lotniczych wykonanych z różnych materiałów w blachach ze stopu aluminium 2024-T3

Adam Korbel¹, Valeria Manitcaia¹, Tomasz Machniewicz¹

¹ Katedra Projektowania i Eksploatacji Maszyn, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
email: korbel@agh.edu.pl, valman@agh.edu.pl, machniew@agh.edu.pl

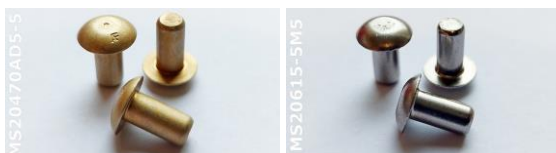
STRESZCZENIE: W referacie przedstawiono wyniki badań doświadczalnych oraz analiz numerycznych MES procesu zakuwania nitów lotniczych, jak również sposoby walidacji opracowanych modeli MES. Badania wykonano dla nitów z łbem uniwersalnym z dwóch materiałów (stop aluminium 2117-T4 oraz Monel 400) o średnicy trzonu 3,96 mm, które służyły do łączenia dwóch blach ze stopu aluminium 2024-T3 o grubości 1 mm i 1,6 mm. Badania eksperymentalne koncentrowały się na wyznaczeniu charakterystyk mechanicznych użytych materiałów, parametrów geometrycznych zakuwek, oraz ekspansji otworów nitowych. Uzyskane wyniki posłużyły następnie do zdefiniowania i walidacji silnie nieliniowych modeli 3D (MES) zbudowanych w programie ANSYS. Analizy MES obejmowały rozkłady i wielkości naprężeń resztkowych wokół otworu nitowego oraz siły docisku blach, w zależności od stopnia zakucia oraz materiału nitu. Wykazano, że do uzyskania tych samych wymiarów zakuwki nity monelowe wymagają znacznie większej siły zakuwania, niż nity ze stopu 2117-T4. Jednocześnie zastosowanie nitów monelowych przy tym samym stopniu zakucia prowadzi do kilkukrotnie większej ekspansji otworu nitowego, co przekłada się na większą wartość i zasięg ujemnych resztkowych naprężeń obwodowych generowanych wokół niego.

SŁOWA KLUCZOWE: połączenia nitowe, nity lotnicze, ekspansja otworu nitowego, naprężenia resztkowe, analizy MES

1. Wprowadzenie

Ze względu na swoje liczne zalety, tradycyjne nitowanie pozostaje do dnia dzisiejszego podstawową metodą łączenia elementów w konstrukcjach lotniczych. Jednocześnie złącza te pozostają krytycznymi obszarami samolotów i śmigłowców [1]. Ich właściwości zmęczeniowe, obok poziomu i rodzaju obciążeń, zależą od wielu różnych i sprzężonych ze sobą czynników technologicznych i konstrukcyjnych, a także materiałów z jakich wykonano elementy złącza [2]. Jak wykazują liczne badania eksperymentalne proces nitowania i wywołane nim resztkowe odkształcenia i naprężenia w blachach, a także siły docisku i tarcia między blachami mają kluczowy wpływ na trwałość zmęczeniową tego typu połączeń, oraz na miejsca inicjacji i ścieżkę pęknięć zmęczeniowych.

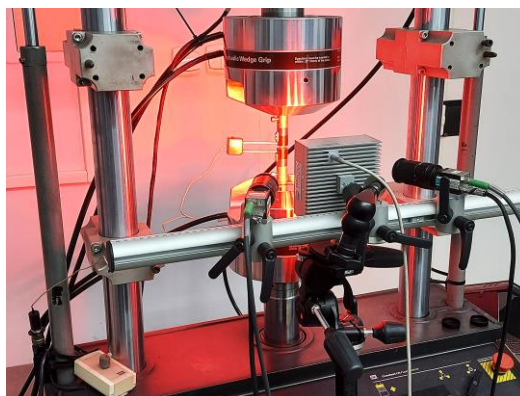
Badaniom poddano połączenia nitowe wykonane z nitów i blach stosowanych w przemyśle lotniczym. Użyte w badaniach nity z łbem uniwersalnym MS20470AD5-5 oraz MS20615-5M5 (rys. 1), o średnicy trzonu $d=3,96$ mm i długości $l=7,94$ mm, wykonane zostały ze stopu aluminium 2117-T4 (AD) oraz stopu niklu i miedzi Monel 400 (M). W każdym połączeniu zastosowano dwie blachy dwustronnie platerowane ze stopu aluminium 2024-T3 o różnych grubościach ($t_1=1,0$ mm i $t_2=1,6$ mm), w których zmierzone średnice otworów nitowych (d_0) wynosiły 4,07 mm.



Rys. 1. Nity z łbem uniwersalnym użyte w badaniach.

2. Badania właściwości mechanicznych materiałów

W celu wyznaczenia dokładnych charakterystyk materiałowych elementów analizowanych złączy nitowych, niezbędnych do opracowania modeli numerycznych MES, przeprowadzone zostały próby statycznego rozciągania (materiału blach) oraz ściskania (materiału nitów). Badania te zostały przeprowadzone na serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej MTS 810, gdzie w próbie rozciągania wykorzystano ekstensometr wzdłużny 3542-025M-025-ST i poprzeczny 3575-250M-ST firmy Epsilon, natomiast w trakcie próby ściskania system cyfrowej korelacji obrazu (DIC) Q-400 firmy Dantec Dynamic (rys. 2). Umożliwiło to wyznaczenie stałych materiałowych badanych stopów (tab. 1) oraz ich naprężeniowo – odkształceniowych charakterystyk w zakresie plastycznym, wymaganych do opracowania wiarygodnych modeli numerycznych.



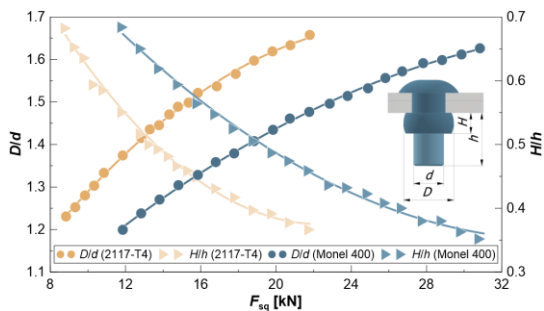
Rys. 2. System cyfrowej korelacji obrazu (DIC) Q-400 użyty do wyznaczenia właściwości mechanicznych nitów.

Tabela 1. Wyznaczone doświadczalnie właściwości mechaniczne elementów badanych złączy nitowych.

Materiał	E [MPa]	ν [-]	$R_{0,2}$ [MPa]
2117-T4 (AD)	69273	0,332	221
Monel 400 (M)	175312	0,318	438
2024-T3 ($t=1,6$ mm)	69907	0,33	317
2024-T3 ($t=1,0$ mm)	68665	0,33	310

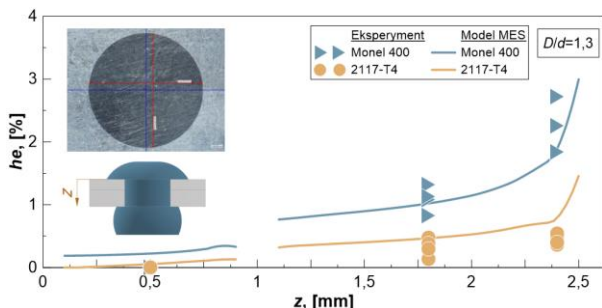
3. Badania parametrów geometrycznych zakuwek

W przemyśle lotniczym podstawowymi parametrami określającymi poprawność i jakość wykonanego połączenia nitowego są stosunki D/d oraz H/h , kontrolowane przy pomocy odpowiednich sprawdzianów, które pozostają w ścisłym związku z siłą zakuwania nitu (F_{sq}) [3]. W powyższych parametrach D i H to odpowiednio średnica i wysokość zakuwki nitu, d to średnica trzonu nitu, a h to wysokość nitu przed zakuciem nad powierzchnią łączonych blach. Uzyskany z badań eksperymentalnych wpływ siły F_{sq} oraz materiału nitu na parametry D/d i H/h pokazano na rys. 3. Jak widać, niezależnie od materiału nitu, wzrost siły F_{sq} powoduje systematyczny wzrost D/d oraz spadek H/h . W całym zakresie analizowanych wartości D/d i H/h nity M wymagają użycia zdecydowanie większej siły F_{sq} do uzyskania tego samego stosunku D/d i H/h , niż nity AD.

Rys. 3. Wpływ siły F_{sq} i materiału nitu na D/d i H/h .

4. Badania ekspansji otworów nitowych

Najbardziej wiarygodnym i możliwym do zmierzenia parametrem, który zależy od stosunku D/d i bezpośrednio wpływa na wielkość oraz rozkład naprężeń resztkowych w blachach pod łbami nitów jest ekspansja otworu nitowego (he), zdefiniowana jako: $he=(d_e-d_0)/d_0$, gdzie d_e to średnica otworu nitowego po procesie nitowania.

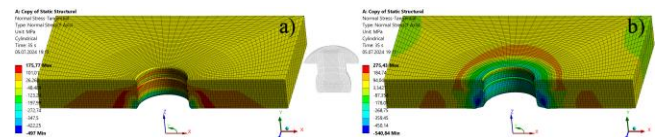
Rys. 4. Wpływ materiału nitu na ekspansję he ($D/d=1,3$).

Na rys. 4 przedstawiono zmierzony eksperymentalnie oraz wyznaczony z analiz MES wpływ materiału nitu na wartość i rozkład ekspansji he dla stosunku $D/d=1,3$. Uzyskane wyniki wskazują, że niezależnie od materiału nitu, ekspansja he jest zdecydowanie większa po stronie zakuwki nitu niż po stronie łba fabrycznego. Dodatkowo można

zauważyć, że na całej grubości łączonych blach nity monelowe wywołują zdecydowanie większą ekspansję, niż nity ze stopu 2117-T4. Warto zwrócić również uwagę, że pod względem jakościowym i ilościowym wyniki uzyskane z opracowanych modeli MES pozostają w bardzo dobrej zgodności z wynikami doświadczalnymi. Świadczy to o prawidłowym przewidywaniu odkształceń w złączu nitowym pod łbami fabrycznymi i zakuwkami nitów, co potwierdza poprawność opracowanych modeli MES.

5. Naprężenia resztkowe wyznaczone z modeli MES

Trójwymiarowy model MES do badań procesu zakuwania nitów opracowany został w programie ANSYS Mechanical 2021 R2. Uwzględniał on: (1) nieliniowe zachowanie materiałów, (2) warunki kontaktu i tarcia pomiędzy elementami złącza jak i narzędzi nitujących, oraz (3) nieliniowość brzegową wynikającą ze zmiennych warunków kontaktu między powierzchniami blach i nitu. Rozkłady resztkowych naprężeń obwodowych (σ_H) w blachach z nitami M pokazane na rys. 5 wskazują, że dla małego stosunku $D/d=1,3$ na brzegu otworu nitowego w miejscu styku blach i pod łbem fabrycznym nitu występują naprężenia rozciągające. Zastosowanie większego stosunku $D/d=1,6$ odsuwa dodatnie naprężenia σ_H od brzegu otworu nitowego, a w jego bezpośrednim otoczeniu pojawiają się naprężenia ściskające, które korzystnie wpływają na trwałość zmęczeniową złączy nitowych, a także mają wpływ na miejsce inicjacji pęknięć i ścieżkę pęknięcia [2].

Rys. 5. Wpływ siły F_{sq} na resztkowe naprężenia σ_H w złączach z nitami monelowymi: a) $D/d=1,3$; b) $D/d=1,6$.

6. Wnioski

- 1) Efektywną walidację modelu MES procesu nitowania można przeprowadzić porównując otrzymane z badań doświadczalnych i analiz numerycznych wartości średnic i wysokości zakuwek, oraz ekspansji otworów nitowych, uzyskanych przy różnych siłach zakuwania.
- 2) Badania wykazały, że ekspansja he rośnie z siłą F_{sq} i jest ona zdecydowanie większa po stronie zakuwki, niż po stronie łba fabrycznego nitu. Jednocześnie jest ona znacznie większa dla nitów M, niż dla nitów AD.
- 3) Skutkiem siły F_{sq} i ekspansji he są naprężenia resztkowe generowane w blachach. Wartość i strefa tych naprężeń rosną z siłą F_{sq} i przy tym samym stopniu D/d są one większe dla nitów monelowych, niż nitów 2117-T4.

Praca dofinansowana z przyznanej AGH w Krakowie subwencji na naukę (Nr 16.16.130.942).

Literatura

- [1] NTSB Aircraft Accident Report (NTSB/AAR-89/03): Aloha Airlines, Flight 243, Boeing 737-200, N73711, Near Manui, Hawaii, April 28, 1988, Vol. 14, Washington DC, 1989.
- [2] Korbela A., Effect of aircraft rivet installation process and production variables on residual stress, clamping force and fatigue behaviour of thin sheet riveted lap joints, Thin-Walled Struct., Vol. 181, 2022.
- [3] Skorupa M. i in., Effect of production variables on the fatigue behaviour of riveted lap joints, Int. J. Fatigue, Vol. 32, No. 7, pp. 996-1003, 2010.