

SYMPOZJON "MODELOWANIE W MECHANICE"

POLSKIE TOWARZYSTWO MECHANIKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ

Beskid Śląski, 1990

Marek Kozień

Instytut Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn

Politechnika Krakowska

ANALIZA MODELU WIELOWARSTWOWEGO POŁĄCZENIA KLEJOWEGO
Z UWZGLĘDNIENIEM OBCIĄŻEŃ TERMICZNYCH

Streszczenie. Podjęto próbę zamodelowania wielowarstwowego klejowego złącza typu zakładkowego, pracującego na ścinanie, w celu wyznaczenia niektórych składowych tensora naprężeń dla poszczególnych elementów złącza i spoin. Znajomość tych wartości pozwala na zgrubne oszacowanie wytrzymałości złącza.

Uogólniony został model dwuwarstwowego, klejonego złącza oparty na założeniach teorii Volkersena na na przypadek złącz wielowarstwowych, z uwzględnieniem obciążeń termicznych.

1. Wprowadzenie

Klejenie staje się w ostatnich latach coraz popularniejszą metodą łączenia materiałów. Jak każda metoda posiada ona swoje zalety i wady. Szeroko są one opisane m.in. w pracach [2], [3]. Wydaje się jednak, że nowe możliwości konstrukcyjne, jakie daje zastosowanie klejenia do łączenia poszczególnych elementów, biorą górę nad ograniczeniami zastosowań ww. metody.

Stosując metodę klejenia w konstrukcjach inżynierskich należy jednak zwrócić uwagę na konieczność takiego projektowania ich złączy, aby w spoinach klejowych dominowały naprężenia ścinające [2].

Szeroką grupę tego typu złączy stanowią wielowarstwowe, zakładkowe złącza pracujące na ścinanie. Przykład tego typu złącza przedstawiony został na rys.1.

Jak dotychczas próby stworzenia modelu matematycznego dla tej grupy złączy, oparte na mniej lub bardziej silnych założeniach upraszczających, dotyczyły jedynie złączy dwuwarstwowych



RYS.1

Model dwuwarstwowego połączenia klejowego typu zakładkowego pracującego na ścinanie

i trójwarstwowych, przy pominięciu wpływu obciążeń termicznych (obciążenia termiczne uwzględniał jedynie J. Godzimirski w [4]).

W praktyce inżynierskiej naturalne jest stosowanie złączy wielowarstwowych (np. narty, poszycia kadłubów samolotów). Ze względu na technologię procesu klejenia uzasadnione staje się również uwzględnienie wpływu obciążeń termicznych (utwardzanie w temperaturach powyżej 100°C).

Powyższe motywy są uzasadnieniem podjęcia przez autora próby stworzenia modelu wielowarstwowego złącza pracującego na ścinanie z uwzględnieniem obciążeń termicznych. Uogólniony został model Volkersena.

2. Model matematyczny złącza

Aby możliwe stało się wyznaczenie niektórych składowych tensora naprężeń, mogących służyć do określenia wytrzymałości złącza, model opiera się na dosyć silnych założeniach upraszczających (w szczególności uwzględniane są jedynie składowe tensora naprężeń σ_x w łączonych elementach i τ_{xy} w spoinach klejowych).

Założenia upraszczające Volkersena dla złącza nie obciążonego termicznie (N-liczba łączonych elementów); wg [4]:

- spoina klejowa i klejone elementy zachowują się jak ciała idealnie sprężyste (model Hooke'a);
- klejone elementy podlegają we wszystkich przekrojach ($X = \text{idem.}$) równomiernemu rozciąganiu ($\sigma^{(i)}(x, y, z) = \sigma^{(i)}(x)$; $i=1, \dots, N$);
- spoina klejowa podlega jedynie czystemu ścinaniu,
- mimośrodowość działania obciążenia, powodująca zginanie łączonych elementów, nie ma wpływu na rozkład naprężeń w złączu.

W celu uwzględnienia wpływu temperatury na naprężenia w łączonych elementach stosuje się dodatkowo następujące założenia:

- przyjmuje się, że w łączonych elementach panuje jednorodny rozkład temperatury ($T^{(i)}(x, y, z) = \text{idem.}$);
- naprężenia termiczne są wynikiem różnych wartości współczynników rozszerzalności cieplnej dla poszczególnych łączonych elementów (pomijany jest wpływ rozszerzalności cieplnej spoiny).

Ostatecznie zatem powyższe założenia upraszczające pozwalają na analityczne wyznaczenie składowych tensora naprężeń $\sigma^{(i)}(x)$ ($i=1, \dots, N$) w klejonych elementach i $\tau_{xy}^{(j)}$ ($j=1, \dots, N-1$) w spoinach klejowych.

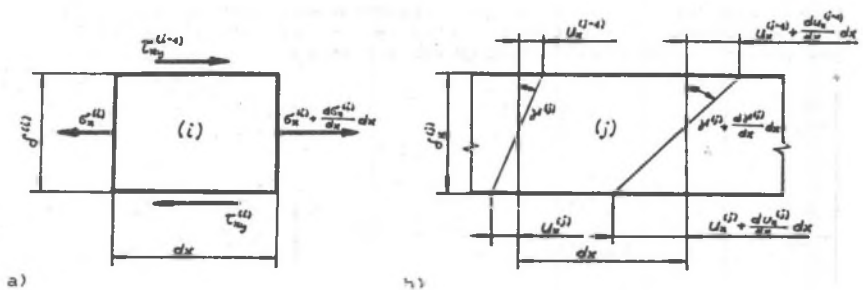
Przeprowadzając rozważania dla elementarnych wycinków i -tego złącza klejonego i j -tej spoiny klejowej (rys.2) otrzymuje się następujący układ równań opisujących ich pracę:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_x^{(i)}}{dx} = \left[\tau_{xy}^{(i)} - \tau_{xy}^{(i-1)} \right] \cdot \frac{1}{\delta^{(i)}}, \\ \frac{d\tau_{xy}^{(j)}}{dx} = \left[\frac{\sigma_x^{(j)}}{E^{(j)}} - \frac{\sigma_x^{(j+1)}}{E^{(j+1)}} + \alpha^{(j)} \Delta T^{(j)} - \alpha^{(j+1)} \Delta T^{(j+1)} \right] \cdot \frac{G_k^{(j)}}{\delta_k^{(j)}}, \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: $\delta^{(i)}$ - grubość i -tego klejonego elementu,
 $\delta_k^{(j)}$ - grubość j -tej spoiny klejowej,
 $E^{(i)}$ - moduł Younga i -tego klejonego elementu,
 $G_k^{(j)}$ - moduł spr. poprzecznej j -tej spoiny klejowej,
 l - długość złącza,
 $\Delta T^{(i)}$ - różnica temperatur w stosunku do temperatury, dla której przyjęto stan o zerowych naprężeniach termicznych, dla i -tego klejonego elementu,
 $\alpha^{(i)}$ - współczynnik rozszerzalności liniowej i -tego klejonego elementu.

Dla N klejonych elementów otrzymuje się zatem niejednorodny (w przypadku nieuwzględniania wpływu temperatury - jednorodny), liniowy układ $2 \cdot N - 1$ równań różniczkowych o $2 \cdot N - 1$ niewiadomych. Układ ten uzupełnia się o $2 \cdot N - 1$ warunków brzegowych, wynikających ze sposobu obciążenia złącza. Należy zwrócić uwagę na fakt, że określając obciążenie złącza (spełniające warunki równowagi zewnętrznej), zadaje się $2 \cdot N$ warunków brzegowych postaci (2). Jednak ze względu na spełnienie warunku równowagi, jeden spośród tych warunków jest zbędny. Stąd też rezygnuje się z jednego, dowolnego warunku spośród (2), nie naruszając spójności opisu zagadnienia ($2 \cdot N - 1$ warunków brzegowych).

$$\begin{cases} \sigma_x^{(m)}(0) = \sigma_c^{(m)}; m=1, \dots, N \\ \sigma_x^{(n)}(l) = \sigma_t^{(n)}; n=1, \dots, N. \end{cases} \quad (2)$$



RYS.2

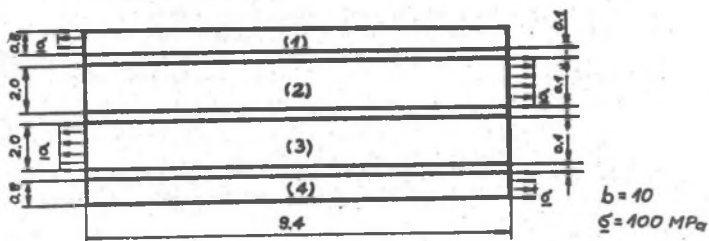
Elementarny wycinek i-tego klejonego elementu i j-tej spoiny
 a) schemat obciążenia i-tego klejonego elementu
 b) schemat odkształcenia j-tej spoiny klejowej

3. Wstępne obliczenia weryfikujące

Przeprowadzone zostały wstępne obliczenia weryfikujące model. Za porównawcze przyjęto wyniki uzyskane przy użyciu MES (zakres sprężysty, elementy tarczowe-PSO), ze względu na mniejszą liczbę założeń upraszczających tej metody w stosunku do założeń modelu analitycznego. Aplikacja MES do obliczeń wytrzymałościowych klejonych złączy stanowi odrębne zagadnienie (sposób dyskretyzacji, charakterystyki materiałowe, warunki brzegowe) omawiane w [1], [4]. Przyjęty sposób dyskretyzacji wraz z zamodelowaniem warunków brzegowych był kompromisem pomiędzy rzeczywistym charakterem pracy złącza a możliwościami używanej wersji programu *FEAP*. Powyższe fakty oraz użycie elementów o idealnie sprężystych charakterystykach powodują, że przeprowadzone obliczenia mają charakter weryfikacji wstępnej.

Przyjęte do obliczeń złącze wraz ze sposobem jego obciążenia przedstawione zostało na rys.3 (elementy nr 1 i 3 wykonane ze stali, natomiast elementy nr 2 i 4 z aluminium)

Porównując wartości $\sigma^{(i)}$ i $\tau^{(j)}$ dla złącza czterowarstwowego pracującego na ścinanie otrzymane na podstawie modelu analitycznego i przy użyciu MES należy stwierdzić, że są przypadki dla których występuje duża zbieżność otrzymanych rezultatów (elementy 2,3), dla których zachowany jest ich charakter (spoiny 1,2,3) oraz te, dla których wyniki znacznie różnią się między sobą dla poszczególnych metod (elementy 1,4). Nie da się też określić czy model analityczny zawyża, czy też zanizła wyznaczone wartości. Dla poszczególnych elementów i rodzajów obciążenia zachodzą bowiem obydwa przypadki. Jednak pomimo tych rozbieżności wydaje się, że obliczenia przy użyciu proponowanego modelu mogą służyć do jakościowej oceny wyznaczanych wartości składowych tensora naprężeń.



RYS.3

Czterowarstwowe złącze pracujące na ścinanie stanowiące podstawę do weryfikacji modelu.

4. Uwagi końcowe

Poniżej zamieszczono najistotniejsze uwagi i wnioski, jakie nasunęły się po analizie wyników obliczeń. Komplet uwag i wniosków zamieszczony został w pracy [5].

4.1

Silne założenia upraszczające rozważanego modelu złącza powodują, że nie jest możliwe obliczanie wytrzymałości ~~wsk.~~ złącz w oparciu o którąkolwiek spośród hipotez wyężeniowych. Model ten opisuje praktycznie bowiem jedynie I etap pracy złącza [6].

4.2

Rezultaty otrzymane przy użyciu omawianego modelu mogą stanowić podstawę do wstępnych obliczeń wytrzymałościowych tego typu złącz (a w szczególności do wstępnego doboru wymiarów łączonych elementów).

4.3

Najbardziej dyskusyjne założenia upraszczające należałoby w dalszych pracach przyjąć w następującej postaci:
 - przyjęcie charakterystyki nieliniowej spoin klejowych,
 - uwzględnienie naprężeń normalnych w klejonych elementach w postaci $\sigma_x^{(i)}(x,y,z) = \sigma_x^{(i)}(x,y) ; i=1,\dots,N$

LITERATURA

[1] R.D.Adams, W.C.Wake: *Structural Adhesive Joints in Engineering*; Elsevier Applied Science Publishers, London 1984.

- [2] J. Czaplicki, J. Cwikliński, J. Godzimirski, P. Konar: *Klejenie tworzyw konstrukcyjnych*; WKL, Warszawa 1987.
- [3] Ch. V. Cagle (red.): *Kleje i klejenie*; WNT, Warszawa 1977.
- [4] J. Godzimirski: *Analiza wytrzymałości połączeń klejonych elementów metalowych obciążonych statycznie*; WAT, wewn. 1813/88, Warszawa 1988.
- [5] M. Kozien: *Analiza modelu wielowarstwowego połączenia klejowego z uwzględnieniem obciążeń termicznych*; Praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, Kraków 1989.
- [6] J. Kubissa, M. Strzelczyk: *Mechanizm zniszczenia płaskich połączeń klejonych stopów aluminium*; Archiwum Inżynierii Lądowej, z. 4/1979.

АНАЛИЗ МОДЕЛИ МНОГОСЛОЙНОГО КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Резюме

В данной работе представлено пробу моделирования многослойного клевого соединения, работающего на сдвигание, с целью определения величины некоторых составляющих тензора напряжений для отдельных элементов и спаек. Знакомство этих величин делает возможным сделать оценку сопротивления соединения.

Обобщено математическую модель двуслойного клевого соединения по теории Волькерсена, на случай многослойных соединений с учетом термической нагрузки.

ANALYSIS OF THE MODEL OF LAP GLUED JOINT WITH REGARD OF THERMAL LOADING

Summary

This paper is an attempt at modelling the lap glued joint, working on shearing, for calculate some values of the stress tensor components, for the connection's elements and joints. Knowledge of that values afford possibilities for estimation the joints' strength.

The model of single lap joint, based on the Volkersen's theory, was generalized to multiply lap joint with regard of thermal loading.