



Modelowanie spoin klejowych w obliczeniach MES

JAN GODZIMIRSKI, SŁAWOMIR TKACZUK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Lotniczej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Celem badań było opracowanie sposobu modelowania spoin klejowych w obliczeniach MES oraz metodyki prowadzenia obliczeń numerycznych umożliwiającej uwzględnienie wytrzymałości kohezynnej i adhezyjnej spoin klejowych oraz ich właściwości nieliniowych, w tym również lepkosprężystych. Przeprowadzono badania eksperymentalne wytrzymałości połączeń klejowych oraz eksperymentalnie wyznaczono właściwości mechaniczne wybranych tworzyw adhezyjnych. Wykonano badania numeryczne w celu optymalizacji modelu spoiny klejowej. Eksperymentalnie potwierdzono poprawność zaproponowanej metodyki obliczeń wytrzymałości połączeń klejowych. Wykazano, że spoiny klejowe obciążone na ścinanie można w obliczeniach MES modelować jedną warstwą elementów ze względu na to, że występujące na ich krawędziach niewielkie wypływki kleju (o wymiarach grubości spoiny) powodują wyrównanie naprężeń w spoinach wzdłuż ich grubości oraz że obliczenia MES wytrzymałości połączeń klejowych wymagają sprawdzenia zarówno wyężenia kohezynnego, jak i wyężenia adhezyjnego spoiny.

Słowa kluczowe: klejenie konstrukcyjne, wytrzymałość połączeń klejowych, obliczenia MES, spoina klejowa, model spoiny

Symbol UKD: 621.792

1. Wstęp

Klejenie stanowi cenne uzupełnienie innych metod łączenia części. Obecnie trudno jest sobie wyobrazić działalność budownictwa, przemysłu samochodowego, lotniczego, budowy maszyn, produkcji opakowań i wielu innych bez wykorzystywania technologii klejenia. O powszechności stosowania tej metody łączenia może świadczyć działalność ponad 700 firm specjalizujących się w wytwarzaniu klejów [1] i dostępność na rynku około 3500 klejów do metali, nie licząc ich modyfikacji.

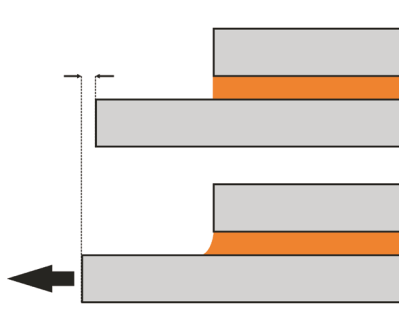
Ze względu na wytrzymałość uzyskiwanych połączeń, kleje można podzielić na [2]:

- przylepcowe (mała wytrzymałość wystarczająca jedynie do odwracalnego połączenia dwóch elementów),
- montażowe (średnia wytrzymałość umożliwiająca trwałe połączenie elementów, ale niewystarczająca do traktowania złącza jako elementu konstrukcyjnego),
- konstrukcyjne (duża wytrzymałość umożliwiająca traktowanie złącza jako elementu konstrukcyjnego).

Kleje konstrukcyjne (utwardzone spoiny klejowe połączeń konstrukcyjnych) są syntetycznymi, reaktywnymi, wielkocząsteczkowymi tworzywami adhezyjnymi o strukturze usieciowanej. Prognozowanie wytrzymałości połączeń klejowych stwarza trudności ze względu na to, że wytrzymałość doraźna takich połączeń zależy od wielu czynników [3, 4]: materiałowych, technologicznych i konstrukcyjnych. Uproszczone, analityczne metody obliczania wytrzymałości połączeń klejowych oparte na teorii Volkersena [5] są mało dokładne. Duże możliwości dokładniejszego wyznaczania naprężeń w spoinach klejowych stwarza MES. Jednak aby uzyskane wyniki obliczeń były wiarygodne i przydatne do projektowania klejonych struktur, zbudowany model numeryczny połączenia powinien uwzględniać specyfikę tego typu połączeń, a zwłaszcza spoin klejowych.

Zniszczenie połączenia klejowego może mieć charakter kohezyjny lub adhezyjny. Niszczące naprężenia kohezyjne spoiny można odnosić do niszczących naprężeń tworzywa adhezyjnego stosowanego do klejenia przy uwzględnieniu wpływu skali (spoiny klejowe mają grubość rzędu 0,1 mm). Wytrzymałość adhezyjna spoin jest funkcją nie tylko właściwości adhezyjnych kleju, ale również właściwości adhezyjnych powierzchni klejonych części. Te ostatnie zależą nie tylko od rodzaju łączonych materiałów, lecz także od sposobu przygotowania ich powierzchni do klejenia [6]. Właściwości adhezyjne połączeń klejowych można porównywać jakościowo, badając znormalizowane próbki przygotowane do klejenia różnymi metodami, ale powstaje problem adaptacji wyników takich badań do obliczeń numerycznych.

Spoiny klejowe charakteryzuje mała grubość w porównaniu z pozostałymi wymiarami oraz w porównaniu z grubością klejonych elementów. W prawidłowo zaprojektowanych połączeniach klejowych, tj. obciążonych na ścinanie, spiętrzenie naprężeń występuje na krawędziach spoin. Istnieje tendencja, aby zagęszczać siatki elementów w tych właśnie miejscach, gdzie wartości naprężeń są największe, decydujące o wytrzymałości konstrukcji. Z analizy odkształceń krawędzi spoiny klejowej obciążonej na ścinanie wynika, że naprężenia styczne powinny istotnie zmieniać się wzdłuż grubości spoiny — w warstwie spoiny przylegającej do jednego z klejonych elementów wartość naprężeń stycznych powinna dążyć do zera, a w warstwie przylegającej do drugiego osiągać duże wartości (rys. 1). Wynikałoby z tego, że spoinę należy dzielić na warstwy wzdłuż jej grubości, co powoduje dalsze zagęszczanie siatki i rozbudowywanie zadania.



Rys. 1. Odształcenie krawędzi spoiny obciążonej na ścinanie

Kleje charakteryzuje nieliniowa zależność naprężeń od odkształceń. W wypadku klejenia cienkich elementów metalowych wytrzymałość spoin może być tak wysoka, że w klejonych elementach mogą wystąpić odkształcenia plastyczne, a nawet mogą one ulec zniszczeniu. W związku z tym w obliczeniach MES należy uwzględniać nieliniowe właściwości klejów, a czasami również nieliniowe właściwości klejonych materiałów.

Tworzywa polimerowe, którymi są kleje konstrukcyjne, to materiały lepkosprężyste, co oznacza, że ich charakterystyki $\sigma = \sigma(\epsilon)$ zależą od prędkości odkształcania, a naprężenia i odkształcenia od czasu działania obciążenia. W związku z tym w obliczeniach MES właściwości mechaniczne spoin należy opisywać inaczej w obliczeniach wytrzymałości doraźnej, a inaczej przy określaniu statycznej trwałości czasowej.

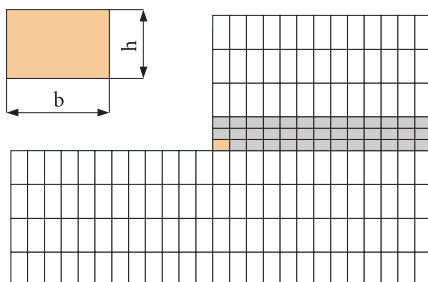
Podsumowując, można stwierdzić, że w obliczeniach MES połączeń klejowych, poza właściwym zamodelowaniem spoiny za pomocą elementów, należy:

- uwzględniać wytrzymałość kohezyjną spoiny,
- uwzględniać wytrzymałość adhezyjną spoiny,
- uwzględniać nieliniowe właściwości kleju, a czasami i ich właściwości lepkosprężyste.

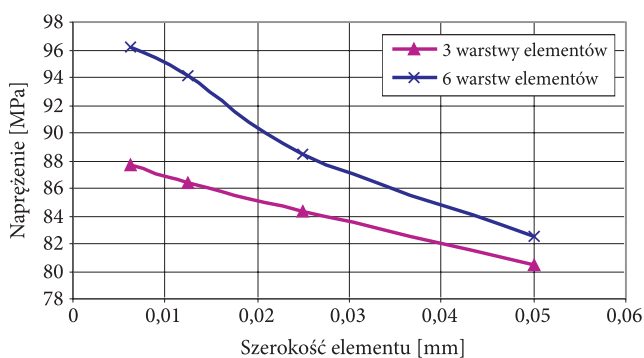
2. Model numeryczny spoiny

Wydaje się, że ze względu na istotne zmiany wartości naprężeń stycznych wzdłuż grubości spoin klejowych obciążonych na ścinanie, powinny być one modelowane przez co najmniej dwie warstwy elementów, tak aby możliwe było wyróżnienie elementów kleju stykających się z elementami materiału klejonego. Taki warunek dodatkowo komplikuje wykonanie modelu numerycznego, gdyż elementy materiałów klejonych muszą mieć podobne wymiary geometryczne, jak elementy kleju, a to z kolei determinuje tworzenie siatki o dużej liczbie węzłów i elementów. Analizując wyniki obliczeń numerycznych połączeń klejowych [7],

stwierdzono, że zależnie od wielkości elementów modelujących spoinę (rys. 2) otrzymywane wartości rozwiązań różnią się między sobą (rys. 3).



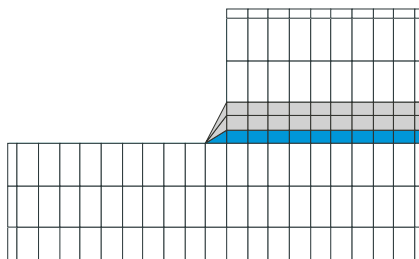
Rys. 2. Wymiary elementu kleju w zamodelowanej próbce zakładkowej i zaznaczenie elementu spoiny najbardziej wyciążonego



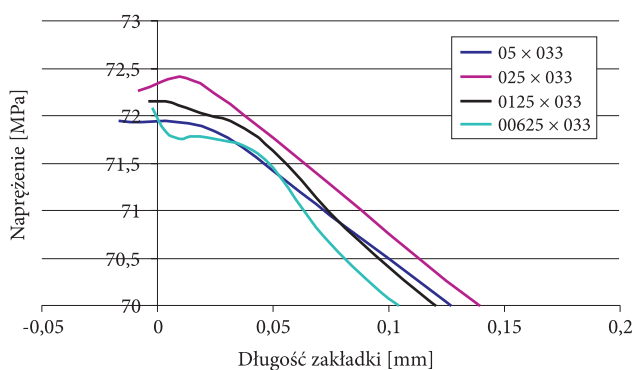
Rys. 3. Wpływ wymiarów elementów modelu spoiny na wartość występujących w niej maksymalnych naprężeń głównych

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły stwierdzić, że stosowane modele spoin klejowych połączeń zakładkowych nie dają zbieżnego rozwiązania. Poszukując właściwego modelu spoiny, zwrócono uwagę, że usuwanie wycieków kleju nie prowadzi do powstania krawędzi spoiny idealnie prostopadłej do klejonych powierzchni — pozostaje wypływka o wymiarach grubości spoiny. Przeprowadzone obliczenia, w których tę wypływkę modelowano w sposób przedstawiony na rysunku 4, wykazały, że jej uwzględnienie powoduje praktycznie niezależność rozkładu i wartości naprężeń od wymiarów elementów siatki (rys. 5).

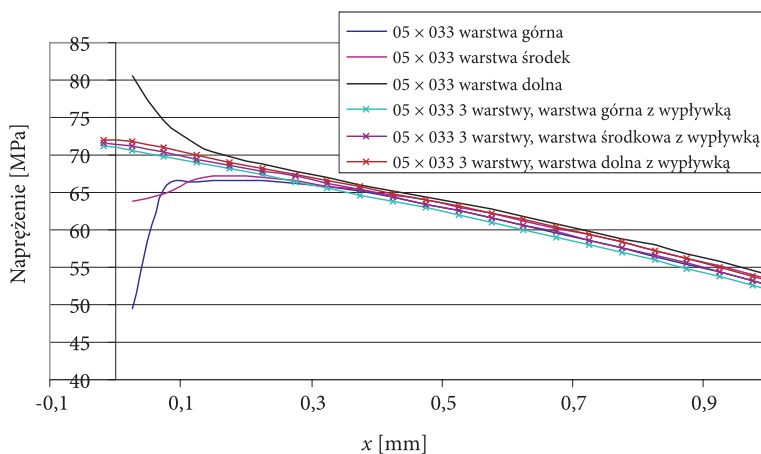
Dodatkowo uwzględnienie wypływki powoduje wyrównanie naprężeń we wszystkich warstwach spoiny (rys. 6), z czego wynika, że można ją modelować jedną warstwą elementów (rys. 7). Takie modelowanie powoduje również, że wyliczane wartości naprężeń niszczących spoin są bliskie niszczącym naprężeniom tworzyw adhezyjnych wykorzystywanych do klejenia, co potwierdza jego poprawność.



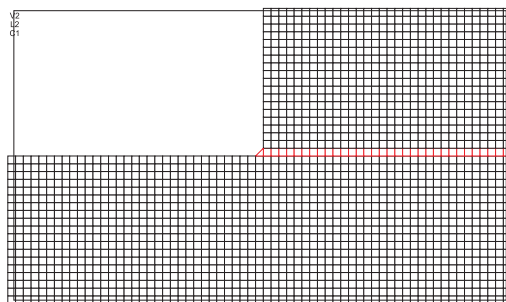
Rys. 4. Trójwarstwowy model spoiny z wypływką



Rys. 5. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych w skrajnych elementach dolnej warstwy kleju obliczony dla trójwarstwowego modelu spoiny z wypływką i różnych wymiarów elementów



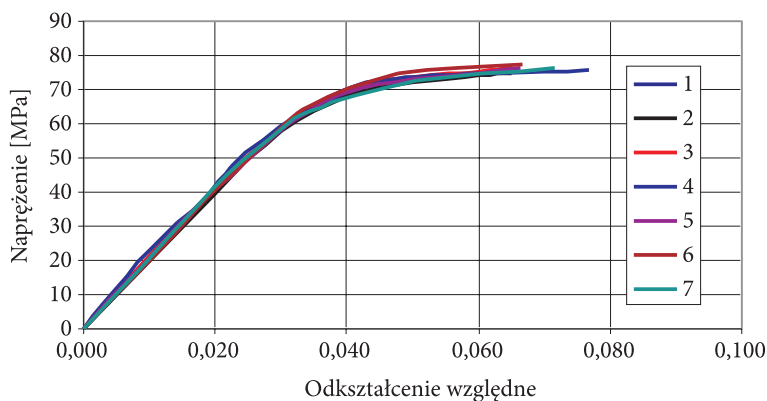
Rys. 6. Porównanie rozkładu naprężeń zredukowanych w trzech warstwach elementów spoiny klejowej wzdłuż jej długości dla dwóch modeli numerycznych połączenia zakładkowego — bez i z wypływką



Rys. 7. Właściwy model spoiny klejowej połączenia obciążonego na ścinanie

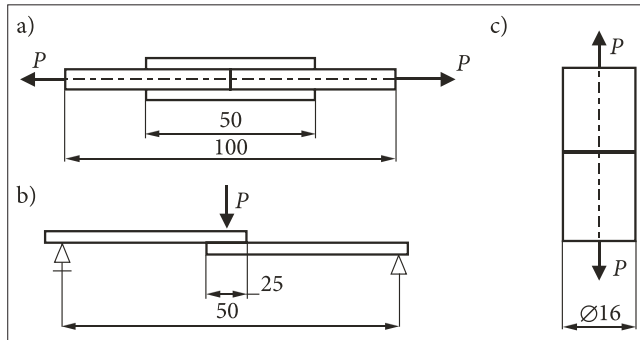
3. Nieliniowe właściwości klejów

Eksperymentalne wyznaczanie charakterystyk naprężenie-odkształcenie spoin klejowych jest kłopotliwe ze względu na ich wymiary oraz złożony stan naprężeń w spoinach większości typów połączeń. W związku tym badania takie prowadzi się za pomocą próbek wykonanych z utwardzonego kleju. Próbki wiosełkowe rozciągane, odlewane z tworzyw adhezyjnych, charakteryzuje mały zakres odkształceń względnych, mniejszy od występujących w spoinach klejowych wykonanych z tych tworzyw. Przyczyną tego są liczne wady w postaci pęcherzyków powietrza, których całkowite wyeliminowanie jest praktycznie niemożliwe. Prowadzone badania wykazały, że do wyznaczania zależności $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ bardziej przydatne są próbki walczkowe obciążone na ściskanie, które charakteryzuje duża powtarzalność wyników badań oraz duży zakres odkształceń (rys. 8).



Rys. 8. Krzywe ściskania próbek walczkowych z kleju Epidian 57

Przeprowadzono badania polegające na wyznaczeniu wytrzymałości trzech rodzajów połączeń klejowych obciążonych na ścinanie, zginanie i odrywanie (rys. 9).



Rys. 9. Badane próbki: a) nakładkowa symetryczna — grubość elementów łączonych 4 mm, grubość nakładek 2 mm; b) zakładkowa — grubość elementów łączonych 2 mm; c) czołowa

Zbudowano modele numeryczne badanych połączeń, obciążono je średnimi siłami niszczącymi badane próbki (tab. 1) i wykonano obliczenia przy założeniu liniowej sprężystości spoiny i przy uwzględnieniu nieliniowej zależności naprężeń od odkształceń. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z analitycznymi na rysunku 10.

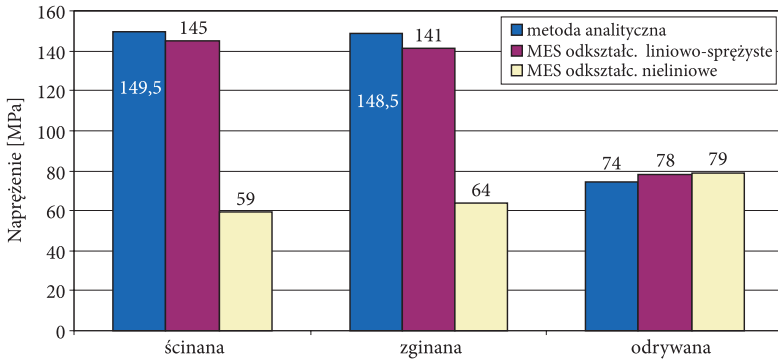
TABELA 1

Wartość średnich sił niszczących badane połączenia klejowe

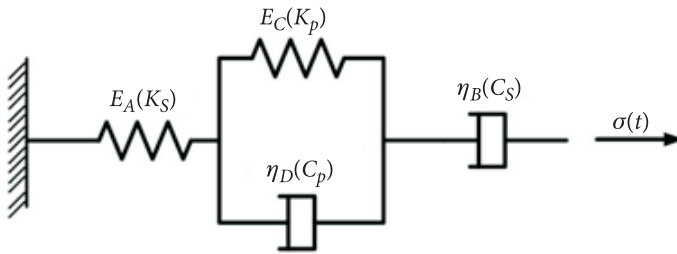
Rodzaj obciążenia	Obciążenie siłą P [N]
Próbki obciążone na ścinanie	37360 ± 520
Próbki obciążone na zginanie	963 ± 96
Próbki obciążone na odrywanie	14800 ± 490

Wykazano, że błąd w ocenie stopnia wyczerpania spoin klejowych obciążonych na ścinanie lub zginanie może być rzędu 100%, jeśli obliczenia prowadzone są dla liniowo-sprężystego modelu spoiny. Tak więc obliczenia numeryczne MES połączeń klejowych w zakresie liniowo-sprężystym nie są przydatne do prognozowania ich wytrzymałości doraźnej ze względu na to, że większość klejów wykazuje wyraźne właściwości nieliniowe.

Prognozowanie wytrzymałości połączeń klejowych przy długotrwałe działającym obciążeniu (statycznej trwałości zmęczeniowej) jest bardziej skomplikowane, gdyż wymaga uwzględnienia lepkosprężystych właściwości klejów [8]. Modelem liniowej lepkosprężystości jest model Burgersa (rys. 11).

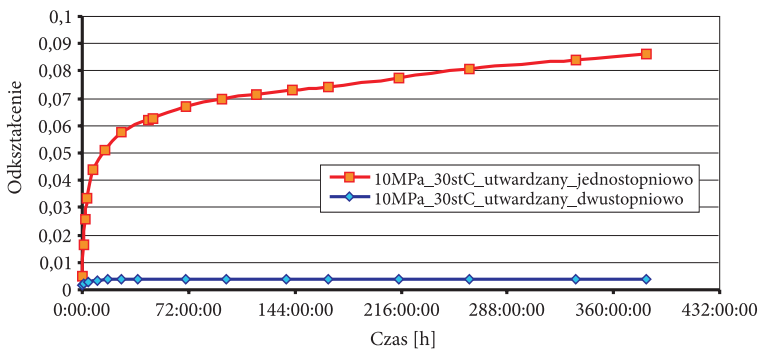


Rys. 10. Wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych w spoinach badanych połączeń obliczone: analitycznie, MES przy założeniu liniowej zależności $\sigma = \sigma(\epsilon)$ i MES przy uwzględnieniu rzeczywistej zależności $\sigma = \sigma(\epsilon)$



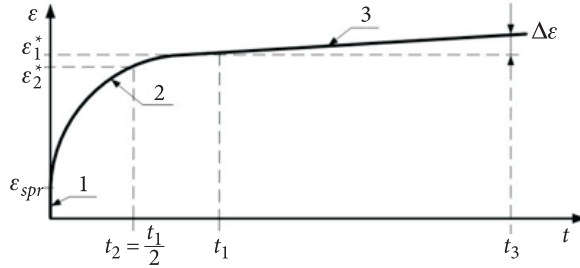
Rys. 11. Model Burgersa właściwości fizycznych spoiny klejowej, E_A , E_C , η_B i η_D — współczynniki pełzania, K_s , K_p , C_s i C_p — współczynniki wykorzystywane w programie NASTRAN

Wartości deklarowanych w obliczeniach współczynników pełzania kleju należy wyznaczyć eksperymentalnie. Do tego celu można wykorzystywać krzywe pełzania tworzyw adhezyjnych wyznaczone na próbkach odlewanych z tych tworzyw (rys. 12).



Rys. 12. Krzywe pełzania uzyskane w temperaturze 30°C dla Epidianu 57+Z1 utwardzanego jedno- i dwustopniowo, przy obciążeniu 10 MPa [8]

W celu wyznaczenia wartości współczynników pełzania krzywą pełzania można podzielić na trzy odcinki (rys. 13): odcinek natychmiastowego odkształcenia — 1, odcinek pełzania nieustalonego — 2 i odcinek pełzania ustalonego — 3.



Rys. 13. Podział krzywej pełzania na trzy charakterystyczne zakresy

Wartości współczynników pełzania opisują zależności [8]:

$$E_A = \frac{\sigma}{\varepsilon_{spr}} \quad (1)$$

$$\eta_B = \sigma \frac{\Delta t}{\Delta \varepsilon} = \sigma \frac{t_3 - t_1}{\Delta \varepsilon}, \quad (2)$$

$$E_C = \frac{(2\varepsilon_2 - \varepsilon_1)\sigma}{\varepsilon_2^2}, \quad (3)$$

$$\eta_D = - \frac{\sigma \cdot t_1 (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_2^2 \ln \left(1 - 2 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^2 \right)}. \quad (4)$$

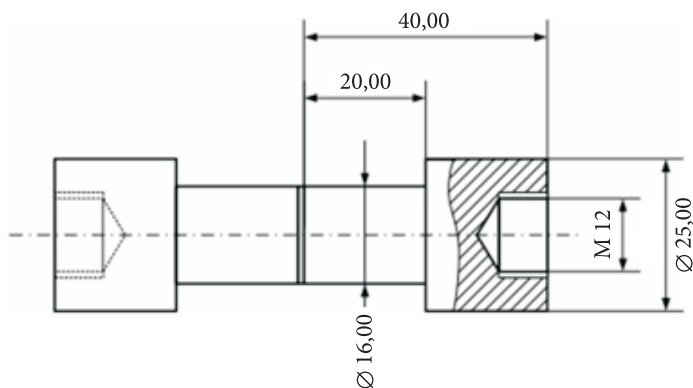
4. Wytrzymałość kohezyjna i adhezyjna spoin

Obliczenia MES pozwalają wyznaczyć tensor naprężeń w elementach siatki modelu analizowanego połączenia. Do określenia stopnia wyężenia spoiny klejowej należy wyznaczone naprężenia „zsumować” zgodnie z określoną hipotezą wyężeniową. Ze znanych hipotez dosyć dobrze stan wyężenia tworzyw adhezyjnych opisuje hipoteza maksymalnych naprężeń głównych. Wyznaczone w taki sposób naprężenia mogą być porównywane z wytrzymałością kohezyjną spoiny.

Przy analizie statycznej trwałości czasowej spoin klejowych hipoteza maksymalnych naprężeń głównych jest nieprzydatna, gdyż wraz ze wzrostem czasu

działania obciążenia możliwy jest spadek naprężeń w spoinie przy narastających odkształceniach. Dla takiego przypadku obciążenia bardziej przydatna wydaje się hipoteza maksymalnych odkształceń głównych.

Istotnym problemem jest oszacowanie wyężenia spoiny klejowej ze względu na jej wytrzymałość adhezyjną. Przyjęto hipotezę, że wytrzymałość adhezyjna spoin klejowych związana jest z ich wytrzymałością na odrywanie. Wytrzymałość adhezyjną można więc wyznaczać eksperymentalnie za pomocą próbek klejonych czołowo, obciążonych równomiernie na odrywanie (rys. 14). Próbki takie powinny być wykonane z takiego materiału, z jakiego będzie wykonany projektowany węzeł oraz przygotowane do klejenia zgodnie z technologią przewidywaną dla projektowanego połączenia.



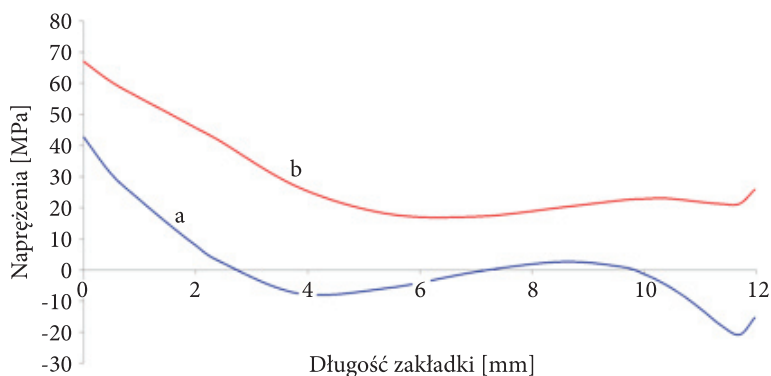
Rys. 14. Próbką obciążona na odrywanie proponowana do określania wytrzymałości adhezyjnej połączeń klejowych

Wyznaczone za pomocą proponowanych próbek wartości naprężeń niszczących, będące ilorazem siły i pola powierzchni spoiny, najczęściej osiągają mniejsze wartości od wartości maksymalnych naprężeń głównych wyliczanych w spoinach innych typów połączeń oraz od wartości naprężeń niszczących tworzyw adhezyjnych. Jeśli tak jest, świadczy to, że wartość niszczących naprężeń adhezyjnych jest mniejsza od wartości niszczących naprężeń kohezyjnych.



Rys. 15. Przykład typowo adhezyjnego zniszczenia połączenia klejowego

W związku z tym w obliczeniach numerycznych należy sprawdzać nie tylko stopień wyężenia kohezyjnego spoiny wg hipotezy maksymalnych naprężeń głównych, ale również wyężenie adhezyjne, którego miarą jest wartość maksymalnych naprężeń normalnych dodatnich prostopadłych do klejonych powierzchni (rys. 16).



Rys. 16. Rozkład naprężeń: a) normalnych prostopadłych do klejonych powierzchni (opisujących wyężenie adhezyjne spiny); b) maksymalnych głównych (opisujących wyężenie kohezyjne spoiny) w spoinie połączenia dwunakładkowego

Przeprowadzone badania wykazują [9], że zaproponowana metoda uwzględniania właściwości adhezyjnej spoin klejowych może być wykorzystywana w obliczeniach wytrzymałościowych połączeń klejowych metodami numerycznymi.

5. Wnioski

1. Spoiny klejowe obciążone na ścinanie można w obliczeniach MES modelować jedną warstwą elementów ze względu na to, że występujące na ich krawędziach niewielkie wypływki kleju (o wymiarach grubości spoiny) powodują wyrównanie naprężeń w spoinach wzdłuż ich grubości.
2. Większość klejów konstrukcyjnych wykazuje nieliniową zależność naprężeń od odkształceń, którą należy uwzględnić w obliczeniach MES wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych. Do wyznaczania charakterystyki $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ klejów bardziej przydatne są wykonane z kleju próbki obciążone na ściskanie niż próbki obciążone na rozciąganie.
3. Przewidywanie długotrwałego obciążenia spoiny klejowej wymaga uwzględnienia jej właściwości lepkosprężystych do oszacowania trwałości połączenia.
4. Obliczanie MES wytrzymałości połączenia klejowego wymaga sprawdzenia zarówno wyężenia kohezyjnego, jak i wyężenia adhezyjnego spoiny.

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

LITERATURA

- [1] Z. MIRSKI, T. PIWOWARCZYK, *Historia klejenia — od prehistorii do dzisiaj*, Przegląd Spawalnictwa, 80, 2008, 8.
- [2] J. GODZIMIRSKI, J. KOZAKIEWICZ, J. ŁUNARSKI, W. ZIELECKI, *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 1997.
- [3] J. GODZIMIRSKI, *Wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych*, Przegląd Mechaniczny, 13, 1993.
- [4] J. KUCZMASZEWSKI, *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnej połączeń metali*, rozprawa habilitacyjna, Politechnika Lubelska, Lublin, 1995.
- [5] M. PORĘBSKA, A. SKORUPA, *Połączenia spójnościowe*, PWN, Warszawa, 1993.
- [6] J. KUCZMASZEWSKI, *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*, Politechnika Lubelska, Oddział PAN w Lublinie, 2006.
- [7] J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK, *Numerical Calculations of adhesive joints subjected to shearing*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 45, 2007, 2.
- [8] M. ROŚKOWICZ, *Wytrzymałość długotrwała połączeń klejowych*, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, 2004.
- [9] J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK, *Numeryczne modelowanie adhezji połączeń klejowych*, Przegląd Mechaniczny, 64, 2005, 5.

J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK

Modeling of adhesive layer in FEM calculations

Abstract. The aim was to work out a method of adhesive layer modelling in the FEM calculations of adhesive joints and the methodology of numerical calculations to keep count the cohesion and adhesion strength of adhesive joints and adhesive layer nonlinear properties, including viscoelasticity. The testing of adhesive joints strength were carried out and mechanical properties of selected gluing plastics (adhesive) were determined. The numerical calculations were carried out for adhesive model optimization. The suggested methodology correctness of adhesive joints calculations was experimentally verified. It was proved that the adhesive layers can be modelled by one layer of elements in the calculation of FEM on the ground that small glue “flashes” (having the thickness of an adhesive layer), occurring on the edges of adhesive layer, cause stresses compensation in adhesive layers along their thickness and that the FEM calculation of the adhesive joints strength require to verify both cohesion and adhesion effort of adhesive layer.

Keywords: structural bonding, strength of adhesive joints, FEM calculation, the adhesive joint

Universal Decimal Classification: 621.792