

## ANALIZA WPLYWU CHARAKTERYSTYKI MATERIAŁU KLEJU NA ROZKŁAD NAPRĘŻENIA W POŁĄCZENIU KLEJOWYM

### ANALYSIS OF INFLUENCE OF GLUE CHARACTERISTICS ON STRESS DISTRIBUTION IN ADHESIVE JOINT

*W pracy podjęto próbę porównania wpływu charakterystyki kleju na rozkład naprężenia w połączeniu klejowym metali. Analizę numeryczną prowadzono dla dwóch modeli kleju: liniowego i nieliniowego z uwzględnieniem różnych wariantów podziału warstwy spoiny, tj. na 2, 3 i 4 warstwy. Zaprezentowano rozkłady naprężeń wzdłuż długości oraz szerokości spoiny klejowej. Jako narzędzie numeryczne wykorzystano system Abaqus. Porównano różne sposoby modelowania i obliczeń połączeń klejowych oraz ich wpływ na wielkość modelu obliczeniowego. Otrzymane wyniki przedstawiają jak ważne jest przyjęcie właściwego modelu kleju na rozkłady naprężenia, zwłaszcza w obszarach ich silnych koncentracji determinujących wytrzymałość całego połączenia.*

**Słowa kluczowe:** połączenie klejowe, rozkład naprężeń, nieliniowy model kleju

*The aim of this work is to compare the influence of glue characteristics on stress distribution in an adhesive joint. The numeric analysis was made for two different types of glue models: linear and non-linear with taking into account different alternative designs of division of an adhesive joint's layer i.e., 2, 3, 4 layers. The stress distribution was presented along the length as well as the width of a glue joint. The Abaqus system was used as a numeric tool. Different ways of modeling and calculations were compared for the adhesive joints and their influence on the size of the computational model. The received results show how important it is to choose a proper model of glue. The suitable choice influences the stress distribution, especially in places of high stress concentrations determining the strength of the whole connection areas.*

**Keywords:** adhesive joints, stress distributions, non-linear glue model

#### 1. Wprowadzenie

Metoda Elementów Skończonych (MES) jest najszerzej stosowanym narzędziem obliczeniowym wspomagającym prace inżynierskie. Obecnie wykorzystuje się ją do badania wszelkich procesów fizycznych związanych z mechaniką konstrukcji a zwłaszcza z mechaniką pęknięcia. W pracy wykorzystano jej zalety do analizy połączeń klejowych. Ze względu na budowę takich połączeń bardzo trudne jest określenie metodami bezpośrednimi stanu naprężeń, jaki panuje w tego typu połączeniach.

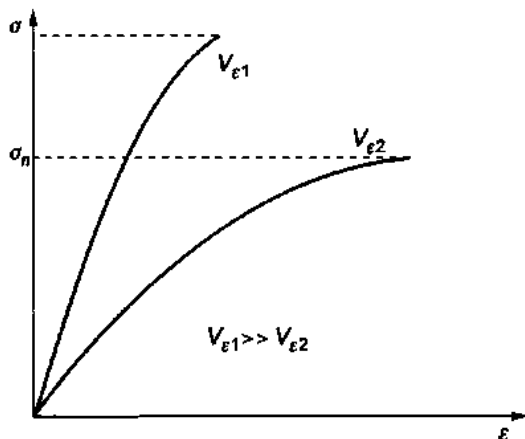
Przy pomocy MES można również prowadzić analizę wpływu ciepła i niejednorodności występujących w spoinie klejowej na trwałość całego połączenia a także wytrzymałości na pełzanie czy też analizę dynamiczną. Warunkiem otrzymania prawidłowych

wyników obliczeń jest zbudowanie modelu połączenia możliwie najbardziej zbliżonego swoimi parametrami do rzeczywistego obiektu. Ważne jest również określenie właściwych warunków brzegowych. W świetle przeprowadzonych badań nad budową modelu obliczeniowego MES wydaje się równie ważnym fakt przyjęcia odpowiedniej siatki elementów skończonych, właściwie zagęszczonej w strefach przewidywanych lokalnych spiętrzeń naprężenia.

W referacie przedstawiono fragmenty badań dotyczących zastosowania MES do analizy stanu naprężenia i odkształcenia w połączeniach klejowych. Badania prowadzono dla różnych modeli kleju, a także różnych modeli siatek elementów skończonych. Porównywano wyniki uzyskane dla liniowego i nieliniowego modelu kleju, siatek tetra i heksagonalnych, oraz różnych podziałów warstwy kleju.

## 2. Właściwości mechaniczne klejów stosowanych do łączenia metali

Tworzywa polimerowe wykazują w różnym stopniu właściwości lepkosprężyste, to znaczy zależność wartości modułu sprężystości i naprężenia niszczącego od prędkości odkształcenia (rys.1) [7].



Rys. 1. Krzywe rozciągania materiału lepkosprężystego dla dwóch różnych prędkości odkształcenia:  $\sigma$  - naprężenie,  $\epsilon$  - odkształcenie względne,  $V_{\epsilon}$  - prędkość odkształcenia [7]

Fig. 1. Curve tension of viscoelasticity material for two different strain speeds:  $\sigma$  - stress,  $\epsilon$  - true strain,  $V$  - strain speed [7]

Problem uwzględniania lepkosprężystości jest bardziej istotny przy analizie wytrzymałości połączeń wykonywanych za pomocą klejów konstrukcyjnych, które często są tworzywami polimerowymi o strukturze łańcuchowej lub rozgałęzionej. Ocena wytrzymałości połączeń, wykonanych z zastosowaniem klejów wykazujących właściwości elastyczne w podwyższonej temperaturze, wymaga uwzględniania ich lepkosprężystości. Stąd uwzględnienie lepkosprężystych właściwości klejów jest konieczne

przy analizie wytrzymałości połączeń klejowych poddanych długotrwałemu obciążeniu. W analizie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych wykonanych z zastosowaniem wysokowytrzymałych klejów konstrukcyjnych najczęściej pomija się ich lepkosprężystość [6,7,9].

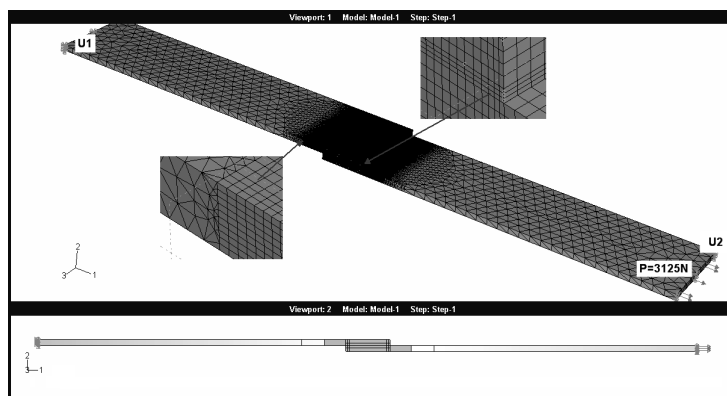
W połączeniach zakładkowych elementów klejowych mogą występować różne stany naprężenia w zależności od sposobu obciążenia połączenia. Na ogół największą wytrzymałość wykazują połączenia klejowe pracujące na czyste ścinanie i czyste odrywanie. W związku z tym połączenia klejowe konstruuje się tak, aby przenosiły w największym stopniu obciążenia ścinające i odrywające, w najmniejszym – oddzierające i zginające.

## 3. Budowa modelu połączenia klejowego

W prowadzonej analizie wykorzystano wiele modeli obliczeniowych różniących się od siebie parametrami siatki elementów skończonych, różnym podziałem siatek oraz zagęszczeniem w strefach lokalnych spiętrzeń naprężeń. Model obliczeniowy MES połączenia zakładkowego wykorzystanego jako model podstawowy przedstawia rys.2.

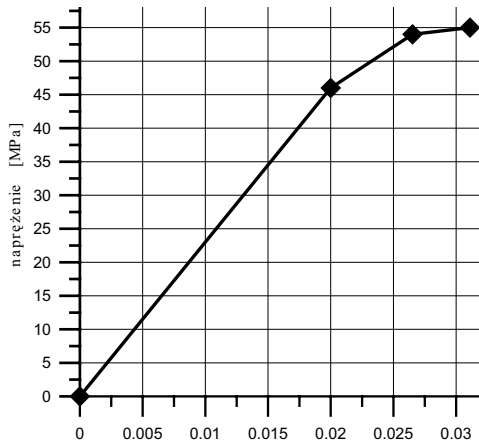
Model został wykonany jako złożenie dwóch płytek o wymiarach: długość płytki 100mm, szerokość 25 [mm], grubość 1,5 [mm], rozdzielonych warstwą kleju o wymiarach długość kleju 12,5 [mm], szerokość kleju 25 [mm], grubość kleju 0,15 [mm].

Jako materiał zakładek założono aluminium o module Yunga  $E=70\,000$  [MPa] oraz liczbie Poissona  $\nu=0.34$ . Do obliczeń przyjęto dwie charakterystyki kleju: liniową i nieliniową. Liniowy materiał kleju - żywicę epoksydową Epidian - zbudowano w oparciu o następujące założenia: moduł Yunga  $E=2\,500$  [MPa] oraz liczba Poissona  $\nu=0.34$ . Nieliniową charakterystykę kleju założono jako charakterystykę multilinearą zbudowaną w oparciu o krzywą uzyskaną na podstawie prób doświadczalnych - rys.3. [8].



Rys. 2. Model podstawowy do obliczeń MES

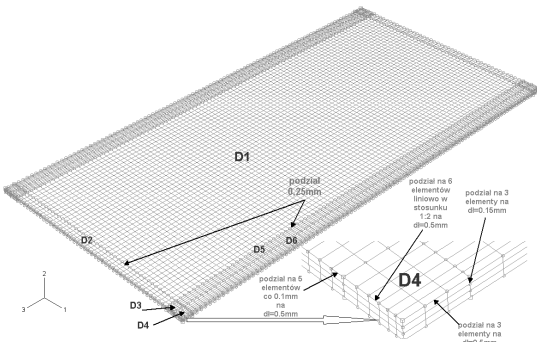
Fig. 2. Basic model to calculation FEM



Rys. 3. Nieliniowa charakterystyka kleju [8]

Fig. 3. Non-linear glue characteristic [8]

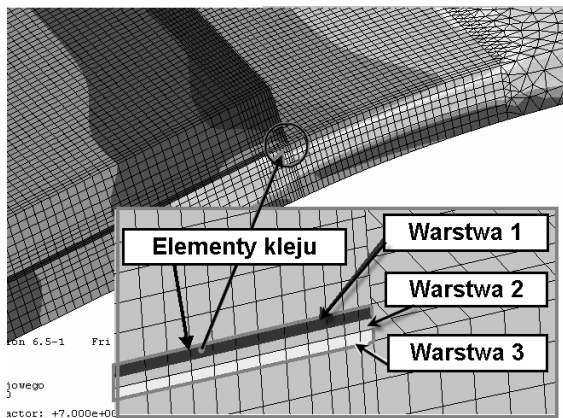
W modelu podstawowym element zakładki został podzielony na kilka stref, charakteryzujących się różną strukturą zastosowanej siatki elementów skończonych. Rozmieszczenie poszczególnych stref podziału warstwy kleju przedstawia rys. nr 4:



Rys. 4. Podział strefy wpływu kleju na partycje

Fig. 4. The division of glue influence zone

Klej został podzielony na warstwy zgodnie z rys.5.



Rys. 5. Podział kleju na 3 warstwy

Fig. 5. The division of glue for 3 layers

Warunki brzegowe oraz obciążenie zewnętrzne zdefiniowane zostały w globalnym układzie współrzędnych modelu opisanym osiami 1, 2, 3 (rys.2.) w sposób następujący:

- krawędź górnej płytki utwierdzono poprzez odebranie możliwości przemieszczenia węzłów we wszystkich kierunkach (1, 2, 3), modelując w ten sposób utwierdzenie modelu (brak rotacyjnych stopni swobody w węzłach elementów bryłowych) (U1 na rys.2),
- na swobodnym końcu połączenia klejowego odebrano możliwości przemieszczenia na kierunkach 2 i 3 globalnego układu współrzędnych (U2 na rys.2).

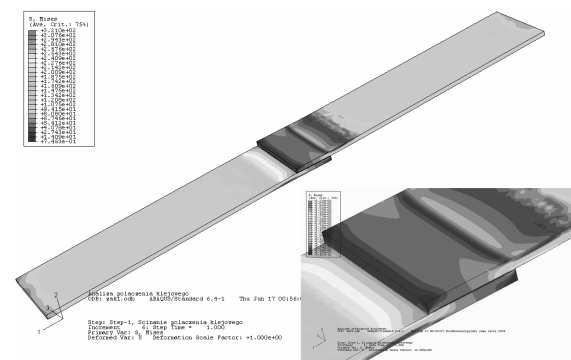
Obciążenie zewnętrzne modelu połączenia zakładkowego stanowi obciążenie stałe, przyłożone do swobodnego końca dolnej zakładki na kierunku „- 1” o wartości 3125 [N].

Zdefiniowane w powyższy sposób warunki brzegowe zastosowano w analizie numerycznej modelu złącza klejowego.

#### 4. Analiza naprężeń w połączeniu klejowym

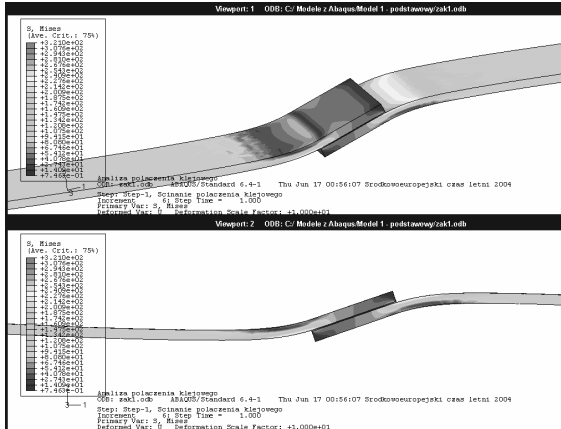
Analiza numeryczna prowadzona jest w kolejnych dyskretnych chwilach „czasu”, którym odpowiada określony krok przyrostowy obciążenia, dając w efekcie całkowity poziom obciążenia konstrukcji. W rezultacie obliczeń otrzymujemy przebieg procesu deformacji w kolejnych przyrostowych krokach obciążenia. Jako wyniki zamieszczono wydruki stanu odkształconego połączenia klejowego oraz rozkłady naprężeń zredukowanych (według hipotezy Hubera-Misesa) przedstawione w formie kolorowych map konturowych.

Rozkład naprężeń zredukowanych modelu podstawowego w formie map konturowych przedstawia rys.6 i 7:



Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy wytrzymałościowej Huber-Misesa w połączeniu klejowym

Fig. 6. The distribution of reduced stress in adhesive joints by hypotheses Huber-Mises



Rys. 7. Postać deformacji połączenia klejowego  
Fig. 7. Deformation of adhesive joint

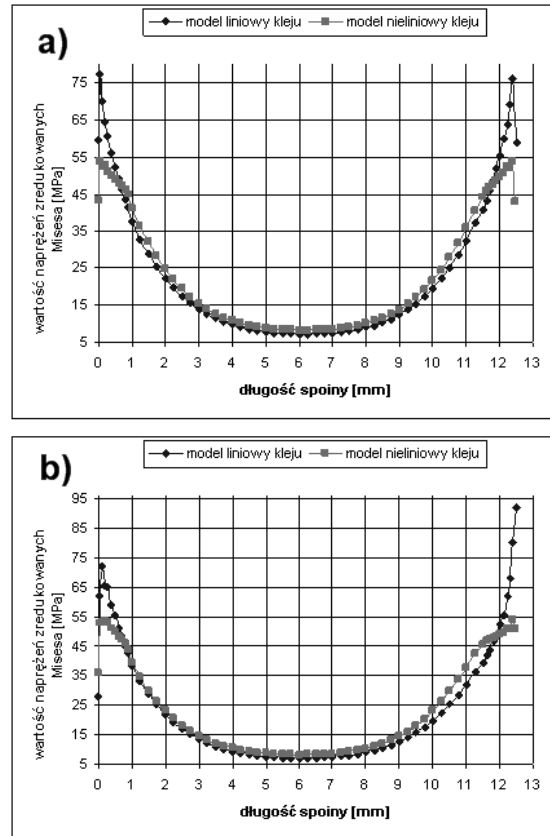
Przedstawione na rys. 6 i 7 rozkłady naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera Misesa wizualizowane są kolorami na powierzchniach elementów, którym odpowiadają konkretne wartości liczbowe określone w [MPa] zamieszczone w legendzie wydruku. Otrzymana postać odkształcenia konstrukcji pozwala stwierdzić, że zakładki połączenia klejowego znajdują się w złożonym stanie obciążenia – zginanie i ścinanie. Wartość naprężeń zredukowanych osiąga w tych strefach 321 [MPa].

### 5. Porównanie modeli z liniową i nieliniową charakterystyką kleju

W przeważającej większości analiz MES połączeń klejowych dominują te, w których dokonuje się uproszczenia ze względu na charakterystyki materiałów występujących w modelu w całym zakresie obciążania, przyjmując je jako idealnie liniowo sprężyste. Założenie to jest prawidłowe, ale tylko do momentu, w którym pod wpływem działającego obciążenia nie zostanie przekroczona pewna granica naprężeń. Od tego momentu charakterystyka materiału kleju zmienia się powodując wzrost odkształcenia materiału przy niewielkim skoku naprężeń. W związku z powyższym w celach porównawczych przeprowadzono analizę rozkładów naprężeń w połączeniu klejowym z uwzględnieniem liniowych i nieliniowych własności materiałowych kleju.

Na rys.8 a i b podano wyniki analiz otrzymanych dla modelu liniowego i nieliniowego kleju w postaci wykresów naprężeń zredukowanych wzdłuż długości spoiny klejowej.

Porównując rozkłady naprężenia możemy stwierdzić, że ich przebieg jest podobny, lecz różni się wartościami w strefach początkowych. Dla materiału liniowego obserwujemy gwałtowny wzrost średnich naprężeń zredukowanych na długości około 0,6 [mm] od krawędzi zakładki blisko o 61%, podczas gdy dla



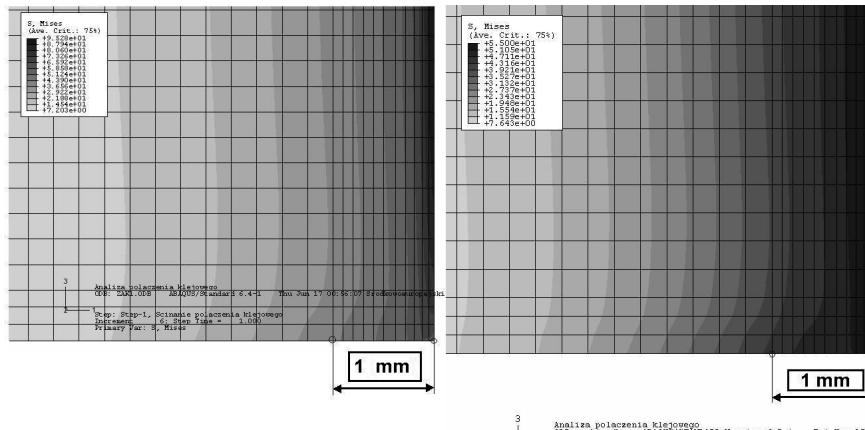
Rys. 8. Wykresy rozkładu: a) średniego naprężenia zredukowanego; b) naprężenia zredukowanego w wierzchniej warstwie kleju przy obciążeniu równym 3125 [N]

Fig. 8. The graphs distribution of: a) medium reduced stress; b) reduced stress in the glue layer by loading 3125 [N]

modelu nieliniowego wzrost ten wynosi tylko 37%. Jeszcze wyraźniej różnice naprężeń obserwowane są w warstwach wierzchnich kleju tuż przy końcach zakładek. W modelu liniowym naprężenia rosną na odcinku 0,6mm od wartości 52 do 92 [MPa] a na tej samej długości dla kleju nieliniowego od wartości 49-54 [MPa]. Taki wzrost naprężeń jest spowodowany różną charakterystyką modelowanego kleju, co przedstawia rys.9[10].

Różnice w rozkładzie naprężenia wzdłuż szerokości zakładki zostały pokazane na rys.10 a) i b). Analizując te rozkłady można stwierdzić, iż największy poziom naprężenia osiąga wartość w skrajnej warstwie, która przylega do zakładki w miejscu jej największego odkształcenia w odległości około 3 [mm] od naroży spoiny klejowej. Obserwujemy inny przebieg rozkładu naprężenia warstwach skrajnych w obu modelach kleju.

W zależności od przyjętego modelu otrzymujemy różne zakresy poziomów naprężenia maksymalnego

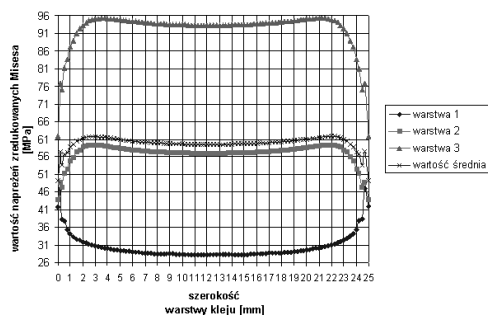
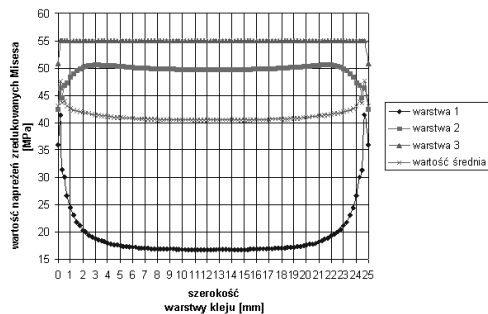


Rys. 9. Warstwyce naprężeń zredukowanych w kleju liniowym i nieliniowym  
 Fig. 9. The contourlines of the reduced stress in non-linear and linear glue

między skrajnymi warstwami kleju. Różnice te wynoszą dla modelu nieliniowego około 13 [MPa] a dla liniowego 50 [MPa]. Są to znaczące różnice i mogą mieć one wpływ na ocenę nośności połączenia.

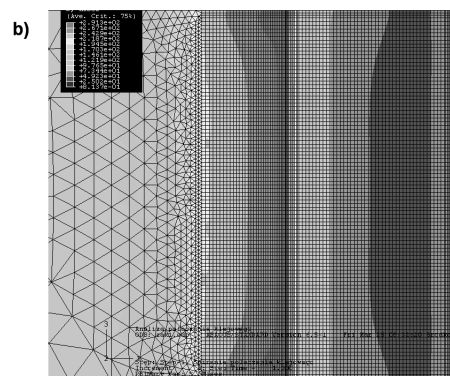
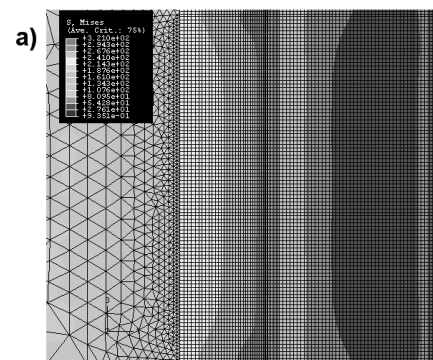
Z przeprowadzonych analiz numerycznych wynika, że pominięcie nieliniowych właściwości materiałowych kleju powoduje popełnienie błędu w ocenie średnich naprężeń zredukowanych na końcach zakładki rzędu 30% a maksymalnych naprężeń zredukowanych w skrajnych warstwach na końcach spiny

klejowej rzędu 41%. Są to znaczące wartości i mają zasadniczy wpływ na prognozowanie wytrzymałości połączenia klejowego. Porównując naprężenia w materiałach zakładki można stwierdzić, że w obydwu modelach pozostają one na podobnym poziomie gdyż różnica w wartościach maksymalnych naprężeń zredukowanych nie przekracza 10%. Poziomy naprężeń w płytkach przedstawia rys. 11[10].



Rys.10. Wykresy rozkładu naprężenia zredukowanego wzdłuż szerokości zakładki: a) model kleju nieliniowego; b) liniowego

Fig.10. The graphs distribution of reduced stress in the glue layer by the width of glue



Rys. 11. Warstwyce naprężeń zredukowanych w płytce: a) liniowym; b) nieliniowym

Fig. 11. The reduced stress layers in the lap: a) non-linear, b) linear

### 6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej, można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Otrzymane w wyniku obliczeń MES rozkłady naprężeń zredukowanych wyznaczonych według hipotezy Hubera-Misesa wzdłuż długości zakładki połączenia klejowego posiadają zbliżony charakter do analitycznej oceny stanu naprężeń.
2. Pomijanie wpływu charakterystyki nieliniowej materiału kleju może powodować zawyżanie

maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych w na końcach zakładki. Może to być powodem błędów w ocenie nośności takiego połączenia.

3. Widoczny jest wpływ efektu brzegowego w analizie naprężenia. W klasycznych rozważaniach analitycznych na końcach zakładki naprężenia dążą do nieskończoności. Wynika to z przyjętych warunków brzegowych w rozwiązywanych równaniach różniczkowych. MES daje rozwiązania zbliżone do rzeczywistych warunków.

### 7. Literatura

1. Abaqus: *Getting started with ABAQUS*, Version 6.4, Abaqus Inc. 2003.
2. Abaqus: *ABAQUS/STANDARD User Manual Volume III*, Version 6.1, Abaqus Inc. 2000.
3. Abaqus: *Introduction to ABAQUS/CAE*, Version 6.4, Abaqus Inc 2003.
4. Abaqus: *Introduction to ABAQUS/CAE Workshop*, Version 6.4, Abaqus Inc 2003.
5. Cagle Ch.V.: *Kleje i klejenie*. WNT, Warszawa 1977.
6. Godzimirski J., Kotlarz W.: *Dobór modelu siatki elementów skończonych do obliczeń połączenia klejowego pakietem programów System WAT-KM*. Biul. WAT 494(1993) 10, 121-127.
7. Godzimirski J.: *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*. WNT, Warszawa 2002.
8. Godzimirski J., Tkaczuk S.: *Możliwości wykorzystywania MES do obliczania wytrzymałości połączeń klejowych*. Technologia i Automatykacja Montażu nr 2/2001, ss. 43–46.
9. Kuczmaszewski J.: *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1995.
10. Kuczmaszewski J., Włodarczyk M.: *Multiscale modelling of damage and fracture processes in composite materials*, IUTAM Symposium, Abstract Books. Kazimierz Dolny, Poland 23-27 May 2005.

---

**Mgr inż. Maciej WŁODARCZYK**

**Mgr inż. Jarosław FLISIAK**

Politechnika Lubelska

Wydział Mechaniczny

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji

Tel.:(81) 53-81-236

e-mail: m.wlodarczyk@pollub.pl

---