

Paweł MAJDA¹

NIELINIOWO LEPKOSPŘŻYSTY MODEL KLEJU EPOKSYDOWEGO

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych oraz wyniki weryfikacji, jakie dokonano dla modelu połączenia klejowego na podwójną zakładkę. Weryfikację oparto na porównaniu doświadczalnych charakterystyk pełzania przy skokowo narastającej sile rozciągającej złącze i obliczonych za pomocą metody elementów skończonych (MES), przy uwzględnieniu zmodyfikowanego nieliniowego modelu Burgersa dla kleju. Zmodyfikowany model Burgersa o zmiennych współczynnikach, zależnych od poziomu naprężenia, zapewnia uzyskanie charakterystyk pełzania połączeń klejowych dobrze pokrywających się z wynikami badań doświadczalnych, dla różnych poziomów naprężeń przyjętych w programie badań. Modelowanie połączenia klejowego przeprowadzono przy zastosowaniu koncepcji uproszczenia wg Carpentera i Borsouma, gdzie komponenty złącza modeluje się elementami belkowymi.

1. WPROWADZENIE

Z punktu widzenia modelowania i obliczeń wytrzymałościowych połączenia klejowe, nawet te najprostsze na pojedynczą zakładkę, są obiektami bardzo trudnymi. Składają się na to bardzo złożone właściwości fizyko-mechaniczne klejów, zależne od stanu naprężenia, odkształcenia, temperatury itp., a także struktura geometryczna połączenia, złożona z elementów łączonych i znajdującej się między nimi bardzo cienkiej warstwy kleju. Pomimo tego, że badaniom połączeń klejowych poświęcono już wiele wysiłku i nagromadzono bardzo dużo wiedzy praktycznej na ten temat, nie udało się dotąd opracować jednolitej ogólnej teorii tych połączeń. Brak jest odpowiednich modeli fizycznych, objaśniających należycie złożone zjawiska występujące w cienkiej warstwie utwardzonego kleju. Dotyczy to w szczególności problemów niezawodności, trwałości i dynamiki różnych obiektów, w których występują połączenia klejowe. W praktyce korzysta się zwykle z bardzo uproszczonych wzorów empirycznych, które coraz częściej są niewystarczające do rozwiązywania współczesnych problemów inżynierskich i nie odpowiadają współczesnym możliwościom obliczeniowym, stworzonym przez rozwój nowoczesnych metod i środków obliczeniowych.

Podjęta w pracy tematyka dotyczy w ogólności problematyki klejenia metali, w szczególności zaś poświęcona jest zagadnieniom modelowania, analizy odkształceń oraz

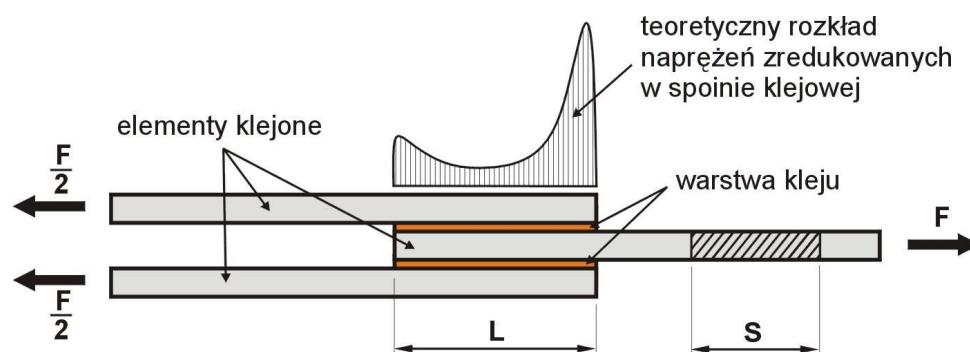
¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, ITM, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, e-mail: Pawel.Majda@zut.edu.pl

doświadczalnym badaniom połączenia klejowego na podwójną zakładkę w warunkach pełzania, przy różnych poziomach siły rozciągającej złącze. Podobnie jak dla klejów w stanie utwardzonym, badania właściwości reologicznych połączeń klejowych przeprowadza się najczęściej przy stałym obciążeniu tzn. podczas pełzania [1],[2]. Zmiany odkształceń pełzania, zwanych także odkształceniami niesprężystymi, zachodzą szczególnie wyraźnie podczas wzrostu obciążeń, temperatury i wilgotności. Materiały lepkosprężyste takie jak kleje i tworzywa termoplastyczne mogą doznawać odkształceń pełzania przy stosunkowo niskich poziomach naprężeń - poniżej wytrzymałości doraźnej materiału i przy niskich temperaturach np. w temperaturze pokojowej. Mówi się wówczas o płynięciu na zimno [3]. W znormalizowanej próbie [4] właściwości zakładkowego połączenia klejowego [5] metalu z metalem podczas pełzania zaleca się badać w takim samym urządzeniu, w którym przeprowadza się badania metali na pełzanie przy rozciąganiu [6]. Ze względu na złożony i nierównomierny na długości, szerokości i grubości zakładki stan naprężenia wyniki takich badań mogą służyć jedynie do porównywania różnych klejów, przy precyzyjnie określonych warunkach pomiarów. Z tak przeprowadzonych prób nie należy wnioskować o charakterystykach samego kleju, ponieważ odkształcenia mierzone podczas takich prób zależą od samej budowy złącza jak również od sposobu i wartości obciążania, jakie zastosowanego podczas badań. Najmniejsze odstępstwa od przyjętych zasad, zarówno w trakcie wykonywania złączy, jak i podczas przeprowadzania eksperymentu doświadczalnego mogą być źródłem bardzo dużych błędów. Klejenie jednocześnie szeregowo wielu płaskowników metalowych na zakładkę celem zwiększenia dokładności pomiaru przemieszczenia w próbie pełzania zaprezentowano w pracy [2].

Wspólną konkluzją, jaka wynika z prac różnych autorów, jest obserwowany podczas pełzania połączeń klejowych proces relaksacji maksymalnych naprężeń na końcach zakładki i postępujące w czasie zrównoważenie ich rozkładu wzdłuż zakładki. Z przeglądu literatury, dotyczącego metodyki obliczania zakładkowych połączeń klejowych z uwzględnieniem właściwości reologicznych kleju wynika, że nadal brakuje powszechnie przyjętej i uznanej metody doboru modelu obliczeniowego do prowadzenia takich analiz. Duża różnorodność klejów konstrukcyjnych dostępnych na rynku oraz indywidualne warunki eksploatacji każdego połączenia (zakres obciążenia, rodzaj obciążenia, temperatura, wilgotność itp.) są głównym powodem, że metody takiej nie sformułowano do dnia dzisiejszego. Charakterystycznym jest również to, że badania symulacyjne połączeń klejowych z uwzględnieniem wpływu czasu na jego odkształcenia, przeprowadza się w oparciu o modele, których parametry wyznacza się na podstawie charakterystyk doświadczalnych utwardzonych klejów traktowanych jako tworzywo konstrukcyjne [3], [7-9] - nie w spoinie. Ponieważ podejście takie ułatwia analizę właściwości reologicznych samego kleju, w pracy przyjęto założenie, że klej w spoinie połączenia ma właściwości lepkosprężyste zgodne z tymi, jakie wyznacza się podczas próby jego pełzania.

Powyższe problemy, a zwłaszcza zauważalne braki w opracowaniach odnośnie ilościowego opisu zachowań zakładkowych połączeń klejowych w warunkach pełzania, przy różnych poziomach siły rozciągającej złącze, były podstawową przesłanką do sformułowania tematyki tego artykułu i zakresu badań doświadczalnych. Celem jest zaprezentowanie modelu i sposobu efektywnego obliczania zakładkowych połączeń klejowych na podwójną zakładkę (rys. 1), przy szczególnym uwzględnieniu skokowo

zmiennego w czasie obciążenia rozciągającego złącze i wywołanych przez nie odkształceń pełzania w cienkiej warstwie kleju.



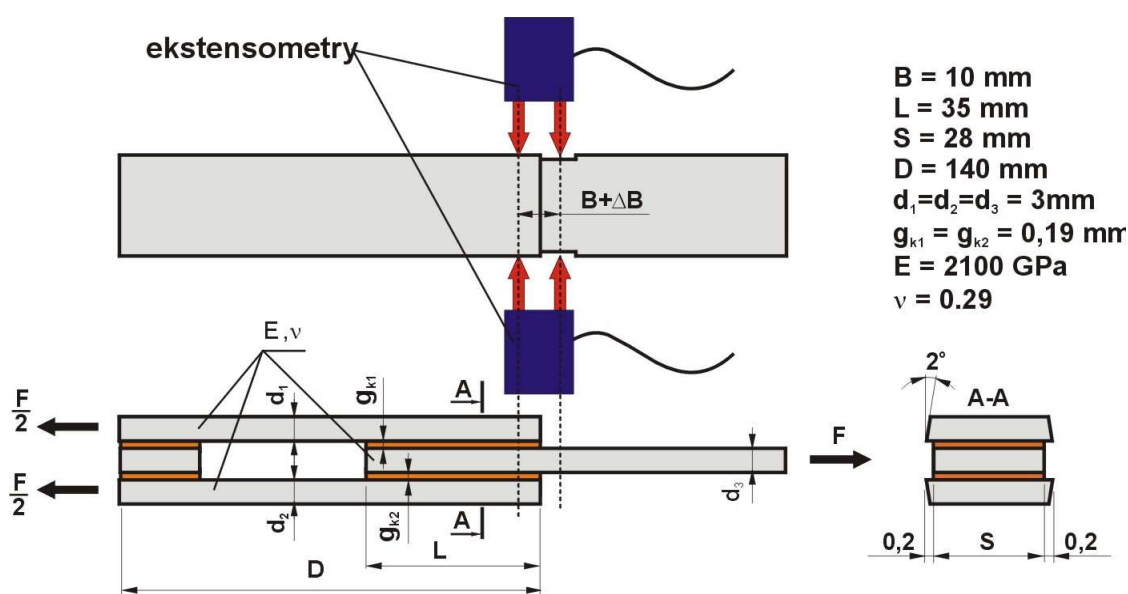
Rys. 1. Połączenie klejowe na podwójną zakładkę
Fig. 1. Double lap joint

2. PRÓBA PEŁZANIA POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH NA PODWÓJNĄ ZAKŁADKĘ

Próbie pełzania w warunkach narastającej skokowo siły rozciągającej złącze przeprowadzono na połączeniach klejowych na podwójną zakładkę (*ang. double lap joint*). Klejem na bazie żywicy epoksydowej Epidian 53 z utwardzaczem PAC (poliaminoamid) w proporcji wagowej 100:80, łączono stalowe płaskowniki walcowane na gorąco o grubości 3 mm. W celu usunięcia tlenków z powierzchni klejonych elementów zabieleno je poprzez szlifowanie ściernicą o ziarnistości 90, w kierunku poprzecznym do kierunku przyłożonej siły w próbkach. Przed klejeniem dodatkowo powierzchnie klejowe schropowacono papierem ściernym o ziarnistości 80 oraz odtłuszczano acetonem. Odtłuszczenie przeprowadzano wielokrotnie, aż do momentu, gdy na bawełnianej tkaninie stwierdzano wizualnie brak zanieczyszczeń. Klej наносzono na płaskowniki po 10 min od wymieszania składników. Następnie pakiet złożony z siedmiu połączeń na podwójną zakładkę ściskano mechanicznie i pozostawiano na 24 godziny do utwardzenia kleju. Po demontażu mechanicznego docisku i usunięciu grubych nadlewów, próbki połączeń klejowych utwardzano w temperaturze pokojowej $21 < T < 24$ °C przez 12 dob. Dla tak przygotowanych próbek połączeń klejowych dokonano pomiaru grubości spoiny klejowej „ g_k ” na mikroskopie świetlnym z dokładnością do 0.005 mm. Pomiaru grubości spoiny dokonano z obu stron próbki w 30 punktach. Spośród 20 połączeń wybrano do badań pełzania 8 próbek o najmniejszym rozrzucie pomiarów grubości spoiny. Wartość średnia wyniosła $g_k = 0,19$ mm. Na podstawie statycznej próby rozciągania określono także maksymalną siłę rozciągającą połączenie. Odnosząc wartość siły niszczącej do pola powierzchni przekroju ścinanego wyznaczono średnie naprężenie niszczące $\tau_{sr} = 19,8 \pm 3,3$ MPa.

Na rys. 2 przedstawiono wymiary oraz schemat obciążenia badanych połączeń klejowych. Na rysunku tym przedstawiono również miejsce przyłożenia końcówek pomiarowych ekstensometrów, mierzących względne przemieszczenie „ ΔB ” na długości pomiarowej $B = 10$ mm, komponentów połączenia, tj. płaskownika środkowego względem płaskowników zewnętrznych. Miejsce przyłożenia ekstensometrów do próbki wybrano na

podstawie analitycznych rozważań tj. w miejscu gdzie spodziewane są największe odkształcenia pełzania kleju [10] i tym samym największe przemieszczenia względne komponentów połączenia. Na długości zakładki płaskownik środkowy wykazywał mniejszą o 0,2 mm na stronę szerokość od płaskowników zewnętrznych. Krawędzie zewnętrznych płaskowników sfazowano pod kątem 2° (rys. 2). Płaskowniki o takim kształcie zapewniały punktowy styk końcówek ekstensometru z płaskownikami zewnętrznymi oraz styk liniowy z płaskownikiem środkowym złącza. Powodowało to, że podczas pomiaru ruch końcówki ekstensometru przylegającej do płaskowników zewnętrznych połączenia nie był zakłócany przez ruch płaskownika środkowego. Zastosowano dwa identyczne ekstensometry po obu stronach próbki, a mierzone przemieszczenie było wynikiem uśredniania pomiarów zarejestrowanych wskazań obu czujników.

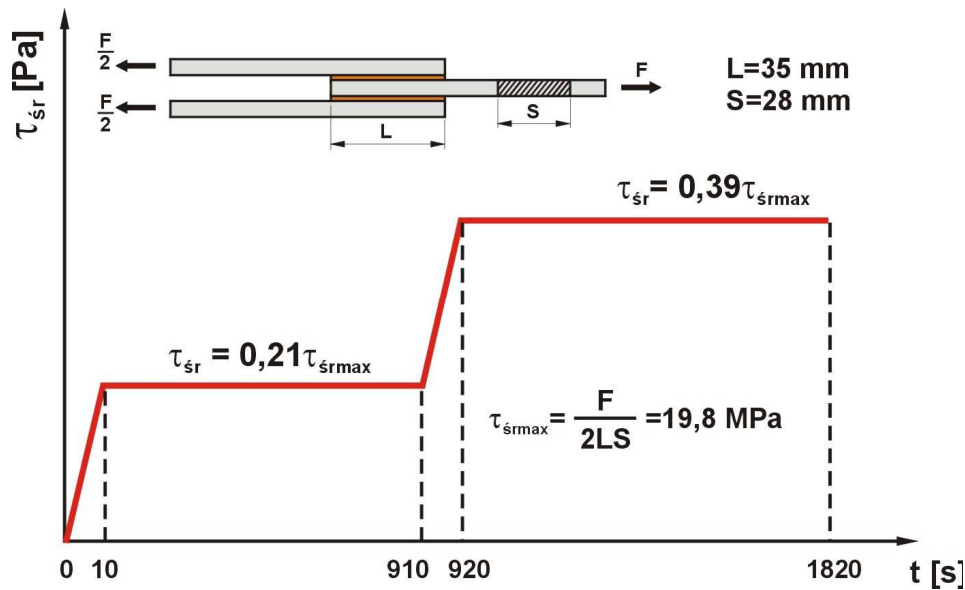


Rys. 2. Wymiary, sposób obciążenia oraz schemat pomiaru przemieszczenia względnego elementów połączenia klejowego na podwójną zakładkę

Fig. 2. Dimensions, load method and relative displacement measurement scheme of a double lap joint

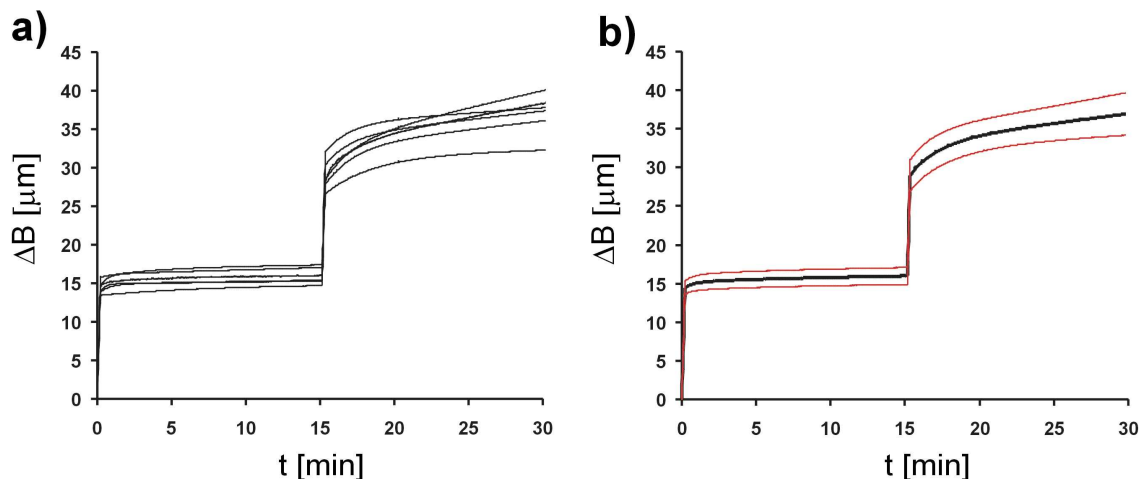
Program komputerowy Wavemaker firmy Instron do generowania przebiegów czasowych siły zapewnił jednakowe warunki przeprowadzenia pomiaru dla wszystkich próbek. Na podstawie badań wstępnych przyjęto krzywą czasową programu siły. Krzywą tą wykorzystano w badaniach zasadniczych (rys. 3). Charakterystyka obciążenia przebiegała następująco:

- przez pierwszych 10 s próby realizowano przyrost siły rozciągającej połączenie ze stałą prędkością do wartości odpowiadającej 22% maksymalnych średnich naprężeń ścinających złącze,
- następnie przez 15 min utrzymywano stały poziom siły,
- w kolejnym etapie przez następnych 10 s zwiększano poziom średnich naprężeń do wartości odpowiadającej 41% maksymalnych średnich naprężeń ścinających złącze,
- utrzymywano taki stan przez kolejne 15 min,
- poczym zakończono nieniszczący pomiar pełzania połączenia klejowego.



Rys. 3. Program siły rozciągającej złącze klejowe
Fig. 3. The program of adhesive joint extending force

Zestawienie wyników pomiaru przemieszczenia ΔB , rejestrowanych z częstotliwością 0,1 Hz dla połączeń klejowych podczas próby pełzania w warunkach skokowo zmiennego obciążenia w temperaturze $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, zamieszczono na rys. 4. Odrzucając dwa skrajne pomiary tj. pomiary, w których otrzymano na drugim poziomie obciążenia największe i najmniejsze przemieszczenia na rys. 4a przedstawiono sześć krzywych pomiarowych. Na rys. 4b zamieszczono wynik obliczeń wartości średniej – linia pogrubiona oraz 95% przedział ufności dla wartości średniej – zaznaczony liniami cienkimi.



Rys. 4. Wyniki pomiarów przemieszczenia względnego ΔB komponentów połączenia klejowego wyznaczone podczas pełzania w warunkach skokowo zmiennego obciążenia w temperaturze $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, a) - pomiary kolejnych próbek, b) - wartość średnia oraz jej 95% przedział ufności

Fig. 4. The results of relative displacement measurements ΔB of adhesive joint components obtained during the creep under incrementally variable load at the temperature $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, a) - measurements of the consecutive sample, b) - the mean value and its 95% confidence interval

Próbie pełzania połączenia klejowego na podwójną zakładkę w izotermicznych warunkach skokowo zmiennej siły rozciągającej złącze można skomentować następująco:

- Krótki, jak na pomiar efektów reologicznych, czas badań trwający tylko 15 minut dla każdego z realizowanych poziomów obciążenia, zapewnił możliwość zmierzenia względnych przemieszczeń komponentów połączenia podczas próby pełzania według przedłożonego programu. Zakładając, że odkształcenia niesprężyste w stali są pomijalnie małe w tak krótkich czasach, świadczy to o bardzo intensywnym procesie pełzania kleju w obszarze końca zakładki.
- Jak wynika z rys. 4b na poziomie obciążenia odpowiadającego 41% wytrzymałości doraźnej złącza, w ciągu 15 minut pomiaru zaobserwowano wyraźnie dwa pierwsze charakterystyczne okresy pełzania tj.: pełzanie pierwszorzędowe z malejącą prędkością oraz pełzanie ustalone ze stałą prędkością odkształceń niesprężystych.
- Z rys. 4 można również wnioskować, że charakterystyki pełzania, wyznaczone wg wyżej opisanej metodyki, będą się różniły w swoich typowych okresach zależnie od poziomu obciążenia rozciągającego połączenie. Zwiększeniu wartości średnich naprężeń ścinających z 22 do 41% wytrzymałości doraźnej złącza, podczas pomiaru towarzyszył wyraźny wzrost prędkości odkształceń pełzania ustalonego oraz zwiększanie zakresu odkształceń odpowiedzi relaksującej podczas pełzania pierwszorzędowego.

3. MODEL PEŁZANIA KLEJU

Do obliczeń połączenia klejowego wykorzystano program metody elementów skończonych COSMOS/M. Program ten dostarcza możliwości przeprowadzania analiz z uwzględnieniem zjawiska pełzania. Aby przeprowadzić takie analizy wymagana jest znajomość zależności opisującej prędkość odkształceń pełzania. W programie COSMOS/M zaimplementowano procedurę wynikającą z teorii umocnienia odkształceń (ang. strain hardening) [11,12], według której prędkość odkształceń pełzania $d\epsilon_c/dt$ można wyznaczyć na podstawie tylko aktualnego stanu zmiennych niezależnych tj.: naprężenia σ , odkształcenia pełzania ϵ_c i temperatury T :

$$f\left(\frac{d\epsilon_c}{dt}, \sigma, \epsilon_c, T\right) = 0 \quad (1)$$

lub:

$$\frac{d\epsilon_c}{dt} = f(\sigma, \epsilon_c, T) \quad (2)$$

Powyższe prawo pełzania znalazło zastosowanie w analizie ośrodków poddanych złożonym stanom naprężenia przy założeniach:

- nieściśliwości materiału w czasie,
- izotropii materiału,
- zastąpieniu: naprężeń σ efektywnym naprężeniem $\bar{\sigma}$, odkształceń pełzania ε_c efektywnym odkształceniem pełzania $\bar{\varepsilon}_c$.

Jako trójwymiarowy odpowiednik równania (2) przyjmuje się wówczas związek [13] opisany równaniami (3-5):

$$\frac{d}{dt} \varepsilon_{cij} = \frac{3}{2} \cdot f(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}_c, T) \cdot \frac{s_{ij}}{\bar{\sigma}} \quad (3)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (4)$$

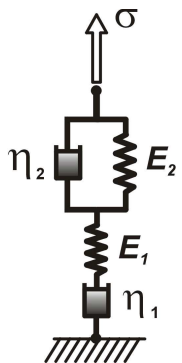
$$\bar{\varepsilon}_c = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\varepsilon_{cx}^2 + \varepsilon_{cy}^2 + \varepsilon_{cz}^2 - \varepsilon_{cx} \varepsilon_{cy} - \varepsilon_{cy} \varepsilon_{cz} - \varepsilon_{cz} \varepsilon_{cx} + \frac{3}{4} \cdot (\gamma_{cxy}^2 + \gamma_{cyz}^2 + \gamma_{c zx}^2)} \quad (5)$$

gdzie:

- $\bar{\sigma}$ - efektywne naprężenie,
- $\bar{\varepsilon}_c$ - całkowite efektywne odkształcenie pełzania,
- T - temperatura,
- s_{ij} - składniki dewiatora tensora naprężeń.

Decydując się na opis odkształceń pełzania wg powyższej koncepcji należy mieć świadomość, że w przypadku analizy ośrodka poddanego działaniu złożonego stanu naprężenia opis ten ma charakter przybliżony. Zredukowanie przestrzennego stanu odkształcenia oraz naprężenia do wartości skalarnych wg równań (4) oraz (5) wprowadza do modelu obliczeniowego błędy ze względu na rezygnację ze ścisłego zapisu tensora omawianych wielkości fizycznych.

Dla uproszczenia założono w pracy, że błędy te są nieznane. Z uwagi na atrakcyjność metody opisu odkształceń pełzania w warunkach zmiennej historii naprężenia według teorii strain hardening, w sensie wykorzystania jej do opracowania aplikacji komputerowych, postanowiono wykorzystać ją na przykładzie analizy rozpatrywanego połączenia klejowego. Do opracowania programu komputerowego niezbędna jest znajomość zależności opisującej prędkość odkształceń pełzania wg równania (2). Zależność taką dla szeregowego połączenia modelu Maxwella i Kelvina-Voigta tzw. modelu Burgersa przedstawiono poniżej (7):



$$\varepsilon_c = \sigma \cdot \left(\frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_2} \right) \right) \right) \quad (6)$$

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_1} \cdot \left(1 + W\left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot \exp\left(\frac{\eta_1}{\eta_2} - \frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot \frac{E_2}{\sigma} \cdot \varepsilon_c \right) \right) \right) \quad (7)$$

gdzie: ε_c - odkształcenie pełzania,

σ - naprężenie,

$W(y) = x$ - funkcja *Lamberta* – W spełniająca równanie: $x \cdot \exp(x) = y$,

E_1 - moduł sprężystości podłużnej,

E_2 - moduł sprężystości odpowiedzi relaksującej,

η_1, η_2 - współczynniki lepkości dynamicznej.

Jako model materiału dla kleju zastosowano zmodyfikowany model Burgersa (równanie 6). W modelu takim stałe parametry E_2, η_1, η_2 zastępuje się funkcjami zależnymi od naprężenia. Funkcje te dla kleju Epidian53:PAC=100:80 zestawiono w pracy [14]. Sposób ich doboru przedstawiono w [15]. Wykorzystując środowisko programowania FORTRAN opracowano i dołączono do biblioteki materiałowej programu COSMOS/M własną procedurę obliczeniową według koncepcji zmodyfikowanego modelu Burgersa, która uwzględnia złożone stany naprężenia oraz zmienną historię naprężenia.

4. MODEL POŁĄCZENIA KLEJOWEGO NA PODWÓJNĄ ZAKŁADKĘ

Model fizyczny zakładkowego połączenia klejowego zbudowano w oparciu o następujące założenia:

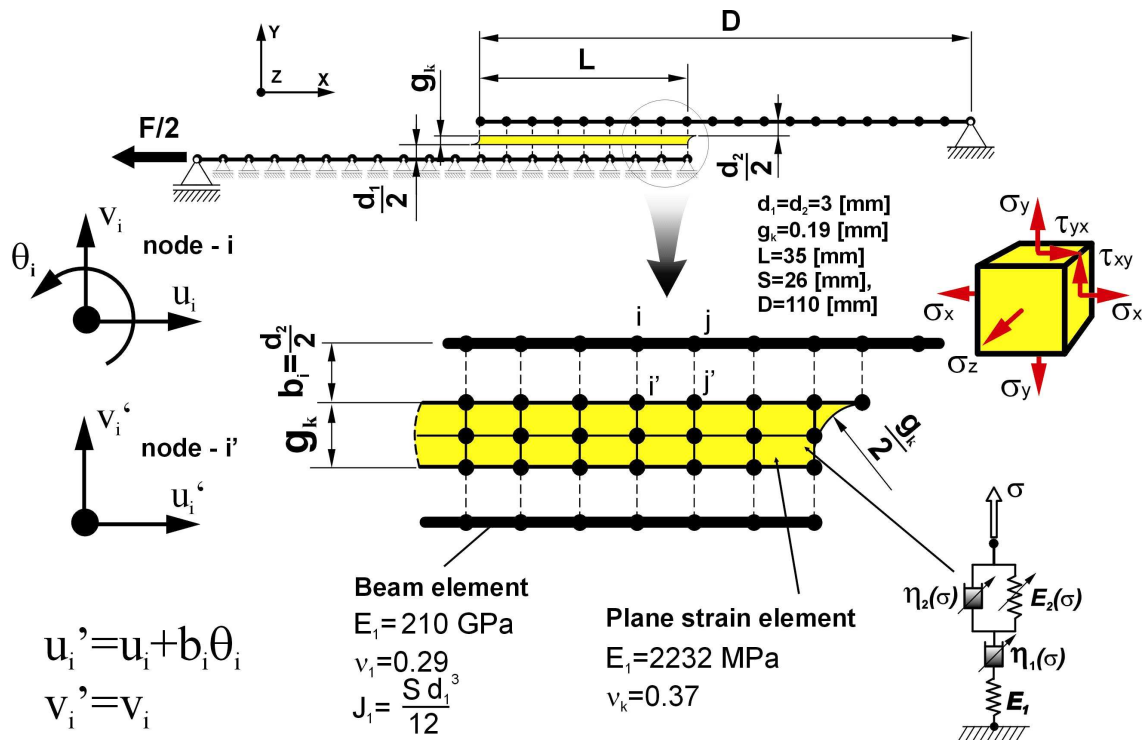
- geometrię płaskowników oraz spoiny idealizuje się przy zachowaniu rzeczywistych wymiarów i wzajemnego rozmieszczenia,
- nie uwzględnia się oddziaływań sił adhezji pomiędzy klejem a materiałem klejonym,
- w strefie kohezyjnej jak i adhezyjnej materiał jest jednorodny i izotropowy,
- uwzględnia się odkształcenia własne brył,
- klej w spoinie klejowej ma właściwości lepkosprężyste zgodne ze zmodyfikowanym modelem Burgersa,
- w spoinie klejowej panuje płaski stan odkształcenia [1],[16-20].

Elementy klejone jak i klej dyskretyzuje się w myśl znanych procedur MES [21],[22] celem rozwiązania macierzowego układu równań algebraicznych, opisującego pole przemieszczeń. Na podstawie koncepcji W. C. Carpentera i R. Barsouma [23],[24], celem zmniejszenia liczby stopni swobody modelu obliczeniowego, przyjęto następujące założenia:

- elementy klejone dyskretyzowano elementami belkowymi o stałym przekroju poprzecznym. Położenie tych elementów odpowiada środkowi symetrii sklejanym płaskowników,
- spoinę klejową dyskretyzowano niedostosowanymi prostokątnymi elementami tarczowymi o dwóch stopniach swobody w każdym węźle,
- pomiędzy węzłami elementów belkowych, a węzłami elementów tarczowych znajdujących się w kierunku normalnym do powierzchni zakładki zachodzą relacje wiążące ich wzajemne przemieszczenia wg schematu przedstawionego na rys. 5.

Na końcu zakładki zastosowano zaokrąglenie wypływką klejowej promieniem równym $\frac{1}{2}$ grubości spoiny. Zabieg ten oraz dyskretyzacja spoiny minimum 16 warstwami

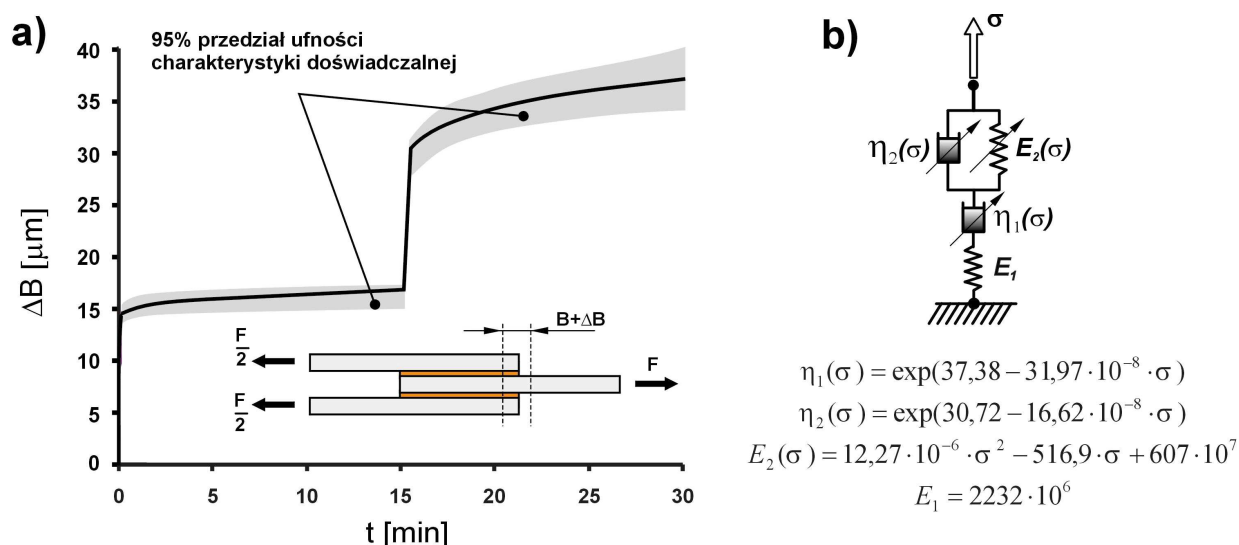
elementów skończonych wzdłuż grubości spoiny zapewnił uzyskanie zbieżności rozwiązania dla każdej ze składowych naprężenia na całej długości zakładki [15]. Wzajemne rozmieszczenie i wymiary elementów złącza, sposób obciążenia i zamocowania oraz parametry charakteryzujące właściwości sprężyste elementów klejowych przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Uproszczony model połączenia klejowego na podwójną zakładkę
Fig. 5. A simplified model of a double lap joint

5. WERYFIKACJA MODELU POŁĄCZENIA KLEJOWEGO NA PODWÓJNĄ ZAKŁADKĘ

Obliczenia charakterystyki pełzania połączenia klejowego przeprowadzono z wykorzystaniem zasad budowy modelu przedstawionych w pkt. 4. Schemat obciążenia oraz warunki utwierdzenia przedstawiono na rys. 5. Przebieg czasowy siły rozciągającej złącze podczas procesu obliczeniowego przyjęto identycznie jak w badaniach doświadczalnych połączenia klejowego (rys. 3) tj. dwustopniowy program obciążania na poziomie 22 i 41% wytrzymałości doraźnej złącza. Porównaniu podlegały przemieszczenia płaskownika środkowego względem płaskowników zewnętrznych wyznaczone doświadczalnie ΔB_d z przemieszczeniem obliczeniowym ΔB_{MES} . Zakładając, że klej w połączeniu klejowym ma właściwości lepkosprężyste zgodne ze zmodyfikowanym modelem Burgersa (rys. 6b) przeprowadzono obliczenia, których wyniki, na tle 95% przedziału ufności charakterystyki doświadczalnej, zamieszczono na rys. 6a.



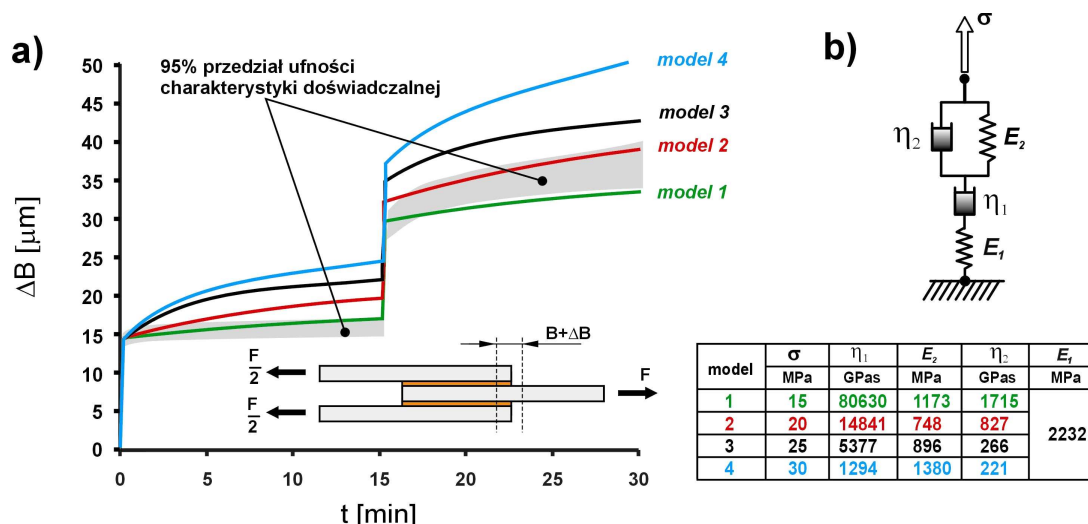
Rys. 6. Porównanie obliczeniowej charakterystyki pełzania połączenia klejowego przy skokowo zmiennej sile rozciągającej złącze z 95% przedziałem ufności: a) - charakterystyka doświadczalna,

b) - przyjęty do obliczeń zmodyfikowany model Burgersa dla kleju w spoinie

Fig. 6. Comparison of the computed creep characteristic of an adhesive joint extended by an incrementally variable load with the 95% confidence interval: a) - of the experimental characteristic, b) - the modified Burgers model of an adhesive in a joint adopted for calculations

Dodatkowo postanowiono przeprowadzić sesję obliczeń przy założeniu, że klej w spoinie ma właściwości lepkosprężyste zgodne z modelem Burgersa. Należy podkreślić, że obliczenia te mają charakter czysto poznawczy, a ich celem jest oszacowanie wpływu zmian wartości parametrów modelu Burgersa na zakres zmienności charakterystyk pełzania połączenia klejowego. Aby zastosować omawiany model do obliczeń charakterystyk pełzania połączenia klejowego należy na wstępie podjąć decyzję o przyjęciu wartości jego parametrów. Podjęcie tej decyzji nie jest jednoznaczne, gdyż jak wykazano w [15] wartości parametrów modelu zależą w sposób istotny od poziomu naprężenia, przy jakim je wyznaczono. Ponadto problem komplikuje się zważywszy na fakt, że w spoinie połączenia klejowego obciążonego siłą rozciągającą panuje nierównomierny rozkład naprężenia wzdłuż długości zakładki (rys. 1). Najprostszym rozwiązaniem tego problemu wydaje się uśrednienie poziomu naprężenia zredukowanego panującego w spoinie i przyjęcie do obliczeń wartości parametrów modelu wyznaczone przy takim naprężeniu. Jednak rozkład naprężeń zredukowanych może osiągać duże gradienty na długości zakładki. Dlatego przyjęcie modelu o stałych parametrach do analizy zagadnień reologicznych omawianego połączenia będzie powodowało generowanie błędów wynikających z nieadekwatności przyjęcia modelu Burgersa do opisu odkształceń pełzania w spoinie. Teoretycznie problem ten może nie odgrywać istotnego znaczenia dla połączeń klejowych, które będą wykonane z grubych płaskowników, gdzie rozkład naprężenia nie osiąga dużych gradientów wzdłuż długości zakładki i jest równomierniejszy w porównaniu z wariantem połączenia wykonanego z cienkich płaskowników. Nawet wówczas przypadek taki zostanie jednak ograniczony do rozważań przy ściśle określonej wartości siły rozciągającej złącze. Przyjmując różne wartości siły w analizie takiego połączenia należałoby korygować wartości parametrów modelu Burgersa, aby minimalizować błędy obliczeń.

Prezentowane charakterystyki pełzania połączenia klejowego pokazane na rys. 7a wykonano dla czterech różnych zestawów parametrów modelu Burgersa. Wartość tych parametrów wynikała z poziomu naprężenia, jaki przyjęto przy ich wyznaczaniu wg charakterystyk doświadczalnych [15] tj. dla: $\sigma = 15, 20, 25$, oraz 30 MPa.



Rys. 7. Porównanie obliczeniowych charakterystyk pełzania połączenia klejowego: a) - przy skokowo zmiennej sile rozciągającej złącze z 95% przedziałem ufności charakterystyki doświadczalnej,

b) - przyjęty do obliczeń model Burgersa dla kleju w spoinie

Fig. 7. The comparison of the computed creep characteristics of an adhesive joint extended: a) - by an incrementally variable load with the 95% confidence interval of the experimental characteristic,

b) - the Burgers model of an adhesive in a joint adopted for calculations

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Ponieważ prezentowane powyżej wyniki analiz są reprezentatywne jedynie dla klejów o właściwościach zbliżonych do tego, jaki badano w niniejszej pracy, dlatego wnioski mają charakter szczegółowy i nie można ich uogólnić na inne kleje stosowane do łączenia komponentów stalowych. Podczas sesji modelowania połączenia klejowego na podwójną zakładkę przeprowadzono obliczenia charakterystyk pełzania przy skokowo zmiennej sile rozciągającej złącze. Wyniki prezentowanych na rys. 6 oraz rys. 7 symulacji komputerowych dla wariantów, w których przyjęto zmodyfikowany model Burgersa oraz model Burgersa dla kleju w spoinie połączenia klejowego można skomentować następująco:

- Wykresy prezentowane na rys. 7a wykonano zakładając, że klej w spoinie ma właściwości zgodne z modelem Burgersa – rys. 7b. Dowodzą one, że charakterystyki pełzania połączenia klejowego w znacznym stopniu zależą od stałych materiałowych lepkości, jakie przyjęto do obliczeń, a te z kolei jak wykazano [15] zależą od poziomu naprężenia przy jakim je wyznaczono w typowej próbie pełzania. Bardzo szeroki zakres charakterystyk pełzania połączenia klejowego jaki otrzymano na podstawie obliczeń wykonanych z użyciem różnych wartości parametrów modelu kleju wskazuje, że możliwym jest na drodze odpowiedniego doboru wartości tych

parametrów uzyskanie rozwiązania, które mogłoby się znaleźć wewnątrz przedziału ufności charakterystyki doświadczalnej. Jednak sposób doboru parametrów modelu dla rozpatrywanego kleju ze względu na charakterystyczny rozkład naprężeń w spoinie wymagałby przyjęcia dodatkowych założeń upraszczających i pozostaje problemem dyskusyjnym.

- Charakterystyka pełzania, którą zaprezentowano na rys. 6a znajduje się wewnątrz 95% przedziału ufności, jaki sporządzono dla charakterystyki doświadczalnej. W sposób wyraźny potwierdzono dobre dopasowanie charakterystyki obliczeniowej do danych doświadczalnych. Dlatego należy uznać za miarodajne wyniki symulacji komputerowych otrzymanych na drodze obliczeń przy założeniu, że odkształcenia pełzania rozpatrywanego kleju w spoinie można opisać zmodyfikowanym modelem Burgersa – rys. 6b. Zgodność tą dla zmiennej historii siły rozciągającej złącze osiągnięto na drodze dokładnego odwzorowania charakterystyk pełzania kleju traktowanego jako tworzywo konstrukcyjne.
- Prezentowany zakres modelowania i przeprowadzonych analiz połączenia klejowego przekonuje o celowości stosowania modeli obliczeniowych rozważanych w tej pracy, wynikających z liniowej teorii lepkosprężystości, zamiast prostych modeli. Prowadzą one do dokładniejszych prognoz w zakresie opisu charakterystyk pełzania złączy klejowych. Poprawność metody modelowania, którą rozważano w pracy, znalazła potwierdzenie w wynikach przeprowadzonych badań doświadczalnych.

LITERATURA

- [1] KUCZMASZEWSKI J., 1995, *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin.
- [2] TSOU A. H., DELLEFAVE D. L., 1996, *Creep of a glass-flake-reinforced epoxy adhesive for space applications*. Polymer, 37/24/5381-5386.
- [3] DEAN G. D., BROUGHTON W. R., 2005, *A review of creep modelling for toughened adhesives and thermoplastics*, NPL Report DEPC-MPR 011.
- [4] ASTM D 2294. *Standard Test Method for Creep Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal-to-Metal)*.
- [5] ASTM D 1002. *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*.
- [6] PETRIE E. M., 2000, *Handbook of Adhesives and Sealants*. McGraw-Hill, New York.
- [7] DEAN G., MERA R., 2004, *Modelling creep in toughened adhesives for finite element analysis*, NPL Report DEPC-MPR 003.
- [8] GODZIMIRSKI J., ROŚKOWICZ M., 2004, *Numerical analysis of long-lasting strength of adhesive bonds*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 28/67-83.
- [9] GODZIMIRSKI J., ROŚKOWICZ M., 2004, *Problemy wytrzymałości długotrwałej połączeń klejowych*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 3/4:91-94.
- [10] CROCOMBE A. D., 1995, *Modelling and predicting the effects of test speed on the strength of joints made with FM73 adhesive*, International Journal of Adhesion & Adhesives;15/21-27.
- [11] SKRZYPEK J., 1986, *Plasticity and Creep*, PWN, Warszawa.
- [12] User Guide, First Edition, COSMOS/M 2.9, 2004, *Nonlinear module (NSTAR)*, August 2004.
- [13] Praca zbiorowa pod redakcją KLEIBERA M., 1995, *Komputerowe metody mechaniki ciał stałych*, Mechanika techniczna tom XI, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [14] MAJDA P., SKRODZEWICZ J., 2009, *A modified creep model of epoxy adhesive at ambient temperature*, International Journal of Adhesion & Adhesives, 29/396-404, <http://www.sciencedirect.com>.
- [15] MAJDA P., 2006, *Modelling of constructive adhesive lap joints*. PhD. Thesis, Technical University of Szczecin.

- [16] KILIC B., MADENCI E., AMBUR D. R., 2004, *Global-Local Finite element analysis of bonded single-lap joints*, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [17] ANDRUT R. H., BILARD D. A., HOLZER S. M., 2001, *Two- and three dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints*, International Journal of Adhesion & Adhesives;2/17-34.
- [18] PERIERA A.B., MORAIS A. B., 2003, *Strength of adhesively bonded stainless steel joints*, International Journal of Adhesion & Adhesives, 23, 315-322.
- [19] YANG C., TOMBLIN J. S., 2001, *Investigation of Adhesive Behavior in Aircraft Applications*, U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, Final Raport DOT/FAA/AR-01/57.
- [20] ZGOUL M., CROCOMBE A. D., 2004, *Numerical modelling of lap joints bonded with a rate – dependent adhesive*, International Journal of Adhesion & Adhesives, 24/355-366.
- [21] PRZEMIENIECKI J. S., 1968, *Theory of Matrix Structure Analysis*. McGraw Hill, New York.
- [22] ZIENKIEWICZ O. C., 1972, *Finite element method*, Arkady, Warszawa.
- [23] CARPENTER W. C., BARSOUM R., 1989, *Two finite elements for modeling the adhesive in bonded configurations*, Journal of Adhesion, 30/25-46.
- [24] CARPENTER W. C., 1991, *A comparison of numerous lap joint theories for adhesively bonded joints*, Journal of Adhesion, 35/55-73.

NONLINEAR VISCOELASTIC EPOXY ADHESIVE MODEL

The paper presents experimental results and results of verification, which was made for the model of a double lap joint. The verification is based on a comparison of creep characteristics of a joint extended by an incrementally increasing force. The characteristics are calculated using a finite elements method (FEM) with the use of the nonlinear modified Burgers model for an adhesive, and identified experimentally. The modified Burgers model with variable coefficients (depending on the level of stress) ensures that the characteristics (results) of the joints creep are well coincident with the experimental results for different stress levels set in the experimental program. Modeling of the joints were carried out using the concept of simplification by Carpenter and Borsouma where the joint components are modeled with beam elements.