



Metoda prognozowania wytrzymałości kohezyjnej połączeń klejowych

JAN GODZIMIRSKI, SŁAWOMIR TKACZUK

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

Streszczenie. Przedstawiono metodę prognozowania wytrzymałości konstrukcyjnych połączeń klejowych obciążonych na ścinanie, wykorzystującą MES. Omówiono sposób określania właściwości mechanicznych materiałów połączenia klejowego, oraz zasadę tworzenia modeli numerycznych badanych połączeń klejowych. Potwierdzono przydatność zaproponowanej metody do zastosowania w obliczeniach inżynierskich.

Słowa kluczowe: klej, połączenie klejowe, spoina klejowa, wytrzymałość połączeń klejowych

Symbole UKD: 621.792

1. Wprowadzenie

Klejenie konstrukcyjne jest jedną z metod trwałego łączenia części maszyn, urządzeń, pojazdów i statków powietrznych. Dotychczas brak jest wiarygodnych metod prognozowania wytrzymałości połączeń klejowych, nawet wytrzymałości doraźnej [1, 2]. Przeprowadzone badania i analizy [3] pozwalają sądzić, że możliwe jest prognozowanie wytrzymałości połączeń klejowych z inżynierską dokładnością poprzez przeprowadzenie odpowiednich obliczeń numerycznych MES. Dla wykonania takich obliczeń niezbędna jest znajomość właściwości mechanicznych kleju i klejonych elementów.

2. Propozycja metody prognozowania wytrzymałości połączeń klejowych

W związku z tym, że łączone metodą klejenia cienkościennie elementy metalowe mogą być obciążane w zakresie odkształceń plastycznych, zachodzi potrzeba eksperymentalnego wyznaczenia charakterystyk $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ klejonych materiałów w całym zakresie ich odkształceń. Kleje również wykazują wyraźne właściwości nieliniowe. Jak wykazały przeprowadzone badania [4], do określania tych właściwości klejów może być stosowana próba ściskania próbek walcowych. Umożliwia ona wyznaczenie właściwości mechanicznych kleju w większym zakresie niż próba rozciągania. Ponieważ charakterystyka kleju $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ istotnie zależy od sposobu jego utwardzania, należy ją wyznaczyć dla próbki utwardzanej w takich warunkach, jakie są przewidziane dla spoiny projektowanego połączenia.

Zniszczenie połączenia klejowego może nastąpić w wyniku zniszczenia materiału kleju (typ kohezyjny) lub w wyniku przekroczenia sił adhezji występujących między klejem i materiałem klejonym (typ adhezyjny). Jeśli rozpatrywane są połączenia, których klejone elementy poddaje się właściwym obróbkom powierzchniowym (zapewniającym dobrą adhezję), do analizy wytrzymałościowej połączeń klejowych wystarczające jest określenie wytrzymałości kohezyjnej spoin. Jeśli stosowane obróbki powierzchniowe nie gwarantują wysokiej adhezji kleju, wytrzymałość adhezyjną spoiny można sprawdzić w prowadzonych obliczeniach numerycznych wg metodyki zaproponowanej w publikacji [5].

W celu wyznaczenia wartości kohezyjnych naprężeń niszczących spoiny należy wykonać badania eksperymentalne na próbkach, których spoiny występują w złożonym stanie naprężenia, np. obciążonych na ścinanie wykonanych zgodnie z PN-69/C-89300 [6]. Próbki takie powinny:

- być przygotowane do klejenia identycznie jak klejone elementy projektowanego połączenia,
- być klejone w identycznych warunkach (temperatura, czas, naciski),
- mieć identyczną grubość spoin.

Wyznaczając wytrzymałość takich próbek oraz znając ich rzeczywiste wymiary, sposób obciążenia i charakterystyki $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ kleju i klejonych elementów, należy stworzyć model numeryczny próbki i obliczyć naprężenia w spoinie. Spoinę należy modelować jedną warstwą elementów, dodając na jej krawędziach elementy modelujące wypłytki kleju [7] i obciążyć siłą wyznaczoną w badaniach wytrzymałościowych. Obliczone wartości maksymalnych naprężeń głównych w spoinie należy uznać za jej wytrzymałość kohezyjną.

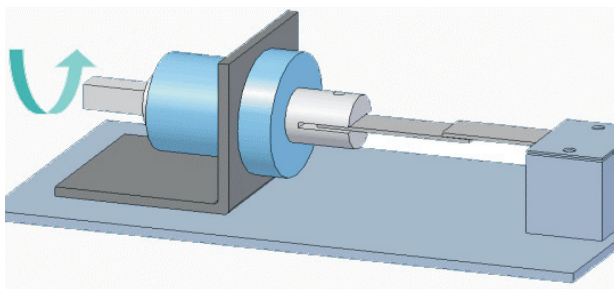
Następnie należy zbudować model numeryczny projektowanego połączenia i obciążać go kolejno różnymi co do wartości obciążeniami (siłami, momentami, przemieszczeniami), sprawdzając dla każdego obciążenia wartość maksymalnych naprężeń głównych dodatnich. Jeśli wartość tych naprężeń przekroczy wartość

odpowiadających im naprężen niszcących kohezynnych, należy uznać, że przekroczone zostało obciążenie niszczące projektowanego połączenia.

3. Sposób weryfikacji przyjętej metody

W celu sprawdzenia poprawności przyjętej metody przeprowadzono badania eksperymentalne i numeryczne. Wykonano serie różnego rodzaju połączeń klejowych i określono ich wytrzymałość. Następnie zbudowano modele numeryczne badanych połączeń uwzględniając ich rzeczywiste wymiary i właściwości mechaniczne materiałów wchodzących w ich skład i obciążono je siłami wyznaczonymi w badaniach eksperymentalnych. Określono wartości maksymalnych naprężeń głównych w spoinach klejowych. Założono, że jeśli obliczone wartości naprężeń normalnych głównych w spoinach różnych badanych połączeń będą porównywalne, to przyjęta metoda prognozowania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych jest poprawna.

Zgodnie z założeniem, naprężenia niszczące spoin klejowych powinny osiągać tę samą wartość niezależnie od rodzaju połączenia, jego wymiarów geometrycznych, długości zakładki i właściwości materiałów klejonych. W eksperymencie badano próbki obciążone na ścinanie oraz wykonano badania polegające na poddaniu próbki zakładkowej skręcaniu. W tym celu wykonano przyrząd umożliwiający skręcanie próbek zakładkowych (rys. 1). Taki sposób obciążania próbki zakładkowej pozwolił na wyznaczenie naprężeń w spoinie próbki znajdującej się w nietypowym stanie naprężenia. Wykonano serię badań eksperymentalnych, podczas których wyznaczono wytrzymałość różnego rodzaju próbek, zaprojektowanych w dość przypadkowy sposób, w tym próbki zakładkowej zgodnej z Polską Normą [6]. Dla wszystkich rodzajów próbek przyjęto identyczną grubość spoiny klejowej oraz taki sam sposób przygotowania powierzchni i sposób utwardzania kleju (patrz tab. 1).



Rys. 1. Przyrząd do skręcania próbek zakładkowych

4. Badania eksperymentalne

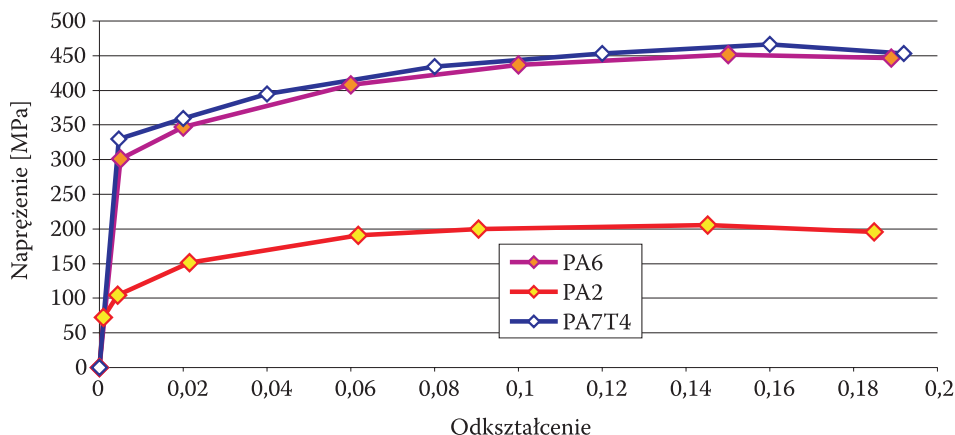
Badania przeprowadzono dla kleju epoksydowego Epidian 57 z utwardzaczem Z1. Charakterystyczne dane dotyczące technologii klejenia zamieszczono w tabeli 1.

TABELA 1
Przyjęte parametry technologii klejenia dla wybranego kleju

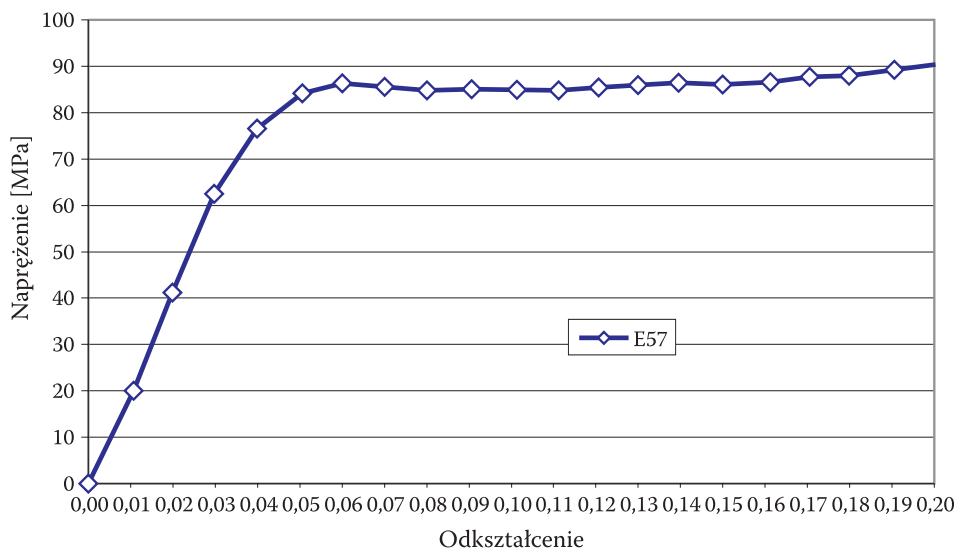
Badany klej		EPIDIAN 57 + Z1
Stosunek bazy do utwardzacza		10:1
Temperatura utwardzania kleju	K	333
Czas utwardzania kleju	[min]	90
Grubość spoiny klejowej	[mm]	0,1
Przygotowanie powierzchni		trawiona wg PN [6]

4.1. Określenie właściwości mechanicznych materiałów połączenia klejowego

Wyznaczenie krzywych $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ materiałów, z jakich wykonano łączone elementy (stopów aluminiowych) nie przysparza żadnych problemów i jest stosunkowo łatwe do wykonania. Klejone elementy próbek wykonano ze stopów aluminium: PA2, PA6 i PA7T4. Charakterystyki $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ tych materiałów wyznaczono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON, wykorzystując standardowe próbki wioselkowe [8]. Zostały one zamieszczone na wykresie (rys. 2). Wyznaczenie



Rys. 2. Uśrednione krzywe rozciągania materiałów stosowanych na klejone elementy próbek (stopów aluminium: PA2, PA6, PA7T4)



Rys. 3. Uśredniona krzywa ściskania kleju Epidian 57

charakterystyki $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ kleju zgodnie z [4] wykonano podczas próby ściskania próbek walcowych. Na wykresie (rys. 3) przedstawiono wyznaczoną w próbie ściskania krzywą $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ wykorzystywanego w badaniach kleju Epidian 57.

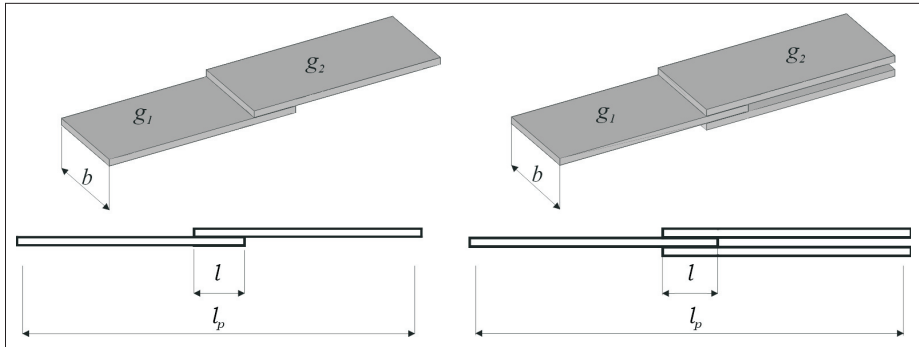
Wartości modułu Younga (E) zastosowanych w badaniach materiałów (tab. 2), obliczono, wykorzystując wyznaczone charakterystyki $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ (rys. 2 i 3).

TABELA 2
Wartości modułu Younga materiałów użytych w połączeniu

Materiał	PA2	PA6	PA7T4	EPIDIAN 57 + Z1
Moduł Younga [MPa]	70000	70000	72000	2083

4.2. Próbki stosowane w badaniach

Na rysunku 4 przedstawiono rodzaje próbek stosowane w badaniach eksperymentalnych. Były to próbki zakładkowe i dwuzakładkowe wybrane ze względu na łatwość ich wykonania oraz ze względu na to, że są one modelami prawidłowo zaprojektowanych połączeń klejowych. Dla wszystkich próbek przyjęto identyczne parametry technologii klejenia (zamieszczone w tabeli 1). Cechą wspólną wszystkich próbek była grubość spoiny klejowej równa 0,1 mm. Pozostałe dane geometryczne były zmienne. Zmianie podlegały: długość zakładki i grubość łączonych



Rys. 4. Próbkki wykorzystane w badaniach: a) zakładkowa; b) dwuzakładkowa

blach. Dla większego zróżnicowania badań eksperymentalnych postanowiono również zmieniać bazę pomiarową podczas prób wytrzymałościowych. W ramach realizowanego eksperymentu wprowadzono także zróżnicowanie gatunków stopów aluminium, z których wykonano elementy łączone. Stosowano różne kombinacje wprowadzając połączenia blach podobnego gatunku (np. PA6 z PA7T4) bądź blach, których właściwości wytrzymałościowe znacznie się różniły (PA2 z PA6). Parametry geometryczne próbek oraz gatunki i grubości blach zastosowane w poszczególnych typach próbek zamieszczono w tabeli 3.

4.3. Wyniki badań eksperymentalnych

Próby wytrzymałościowe badanych próbek wykonano na maszynie wytrzymałościowej ZD-10. Wyniki eksperymentu poszczególnych serii próbek opracowano statystycznie wyznaczając przedziały ufności przy założeniu rozkładu Studenta dla poziomu ufności $1 - \alpha = 0,95$. Wartości sił niszczących z obliczonym przedziałem ufności dla każdego rodzaju próbek zamieszczono w tabeli 3.

Dzięki zastosowaniu różnych gatunków stopów aluminium oraz stosunkowo długich zakładek otrzymano połączenia klejowe, w których zniszczeniu ulegała spoina lub klejone elementy. Połączenia, w których zniszczeniu ulegały elementy klejone zostały w tabeli 3 wyróżnione symbolem ZM (zniszczenie materiału blachy), natomiast połączenia, w których zniszczeniu uległa spoina oznaczono symbolem ZS (zniszczenie spoiny).

TABELA 3

Dane geometryczne i materiałowe badanych próbek zakładkowych rozciąganych oraz ich wytrzymałość

Nr próbki		1	2	3	4	5	6	7	8
Rodz. próbki (rys. 4)		b	b	a	b	a	b	b	a
Dł. zakładki [mm]	l	11	24	23	21	23	23	11	12,5
Szer. blachy	b	25	25	25	25	25	25	25	25
Grubość [mm]/ gatunek blachy	δ_1	2/PA2	3/PA6	2/PA2	3/PA6	2/PA7T4	2/PA7T4	2/PA7T4	2/PA7T4
	δ_2	1/PA6	2/PA2	3/PA6	1/PA6	3/PA6	1/PA6	1/PA6	2/PA7T4
Gr. spoiny [mm]	δ_k	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Baza pom. [mm]	l_p	91	104	83	81	123	123	91	100
Średnia siła niszcząca próbkę [N]		9150 ±164	21030 ±2786	8000 ±999	16700 ±340	9610 ±860	16660 ±250	17060 ±510	5850 ±200
Charakter zniszcz.*		Z M	Z M	Z S	Z M	Z S	Z M	Z S	Z S

TABELA 4

Dane geometryczne i średnie momenty niszczące badanych próbek zakładkowych skręcanych

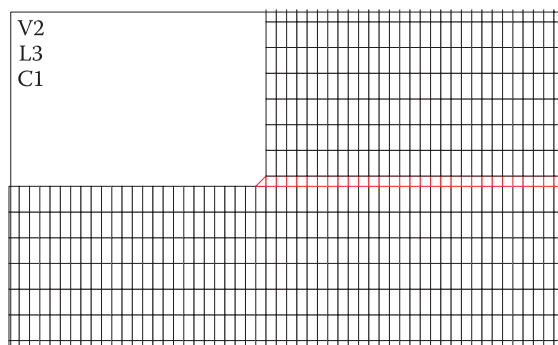
Nr próbki		10	11
Rodzaj próbki (rys. 4)		a	a
Długość zakładki [mm]	l	12,5	26
Baza pomiarowa [mm]	l_p	40	40
Szerokość blachy [mm]	b	20	20
Grubość [mm]/gatunek blachy	δ_1	2/PA7T4	2/PA7T4
	δ_2	2/PA7T4	2/PA7T4
Grubość spoiny [mm]	δ_k	0,1	0,1
Średni moment niszczący [Nmm]		4905±511	4725±403
Charakter zniszczenia próbki *		Z S	Z S

*Z M — zniszczenie materiału blachy, Z S — zniszczenie spoiny

5. Badania numeryczne

5.1. Założenia do obliczeń próbek rozciąganych

Do badań numerycznych zastosowano program Nastran for Windows. Wszystkie modele numeryczne próbek wykonano zgodnie z zaleceniami określonymi w pracy [7], a zagadnienie potraktowano jako płaskie. Spoinę klejową zamodelowano jedną warstwą elementów o wymiarach geometrycznych odpowiadających grubości spoiny ($0,1 \times 0,1$ mm) z dodatkowymi elementami trójkątnymi na krawędziach spoiny, tzw. wypływkami (rys. 5).

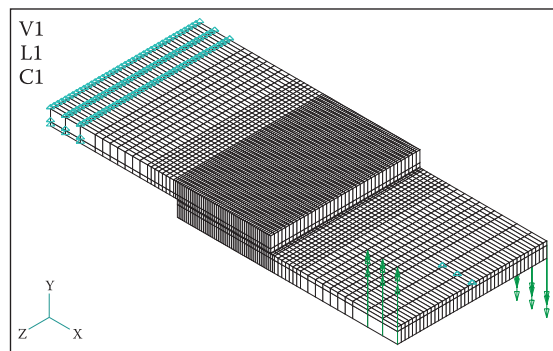


Rys. 5. Model numeryczny spoiny klejowej z wypływką

Zgodnie z założeniami, właściwości mechaniczne kleju i klejonych materiałów zdefiniowano, posługując się wyznaczonymi eksperymentalnie charakterystykami $\sigma = \sigma(\epsilon)$. Obciążenia definiowano jako wartości średnich sił niszczących, wyznaczonych dla poszczególnych próbek (tab. 3). Próbki jednozakładkowe obciążano dodatkowo przemieszczeniem wynikającym z mocowania ich w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.

5.2. Założenia do obliczeń próbek skręcanych

Do przeprowadzenia analizy połączenia zakładkowego poddanego skręcaniu konieczne było wykonanie trójwymiarowych modeli badanych próbek. Spoinę klejową zamodelowano za pomocą elementów sześciennych o wymiarach geometrycznych odpowiadających krotności grubości spoiny ($0,1 \times 0,25 \times 0,5$ mm) (rys. 6). Zgodnie z założeniami, właściwości mechaniczne kleju i klejonych elementów zdefiniowano, posługując się charakterystykami $\sigma = \sigma(\epsilon)$. Obciążenia definiowano jako średnie wartości momentu niszczącego, wyznaczone eksperymentalnie dla poszczególnych próbek (tab. 4).



Rys. 6. Model numeryczny próbki zakładkowej skręcanej

5.3. Analiza wyników obliczeń numerycznych

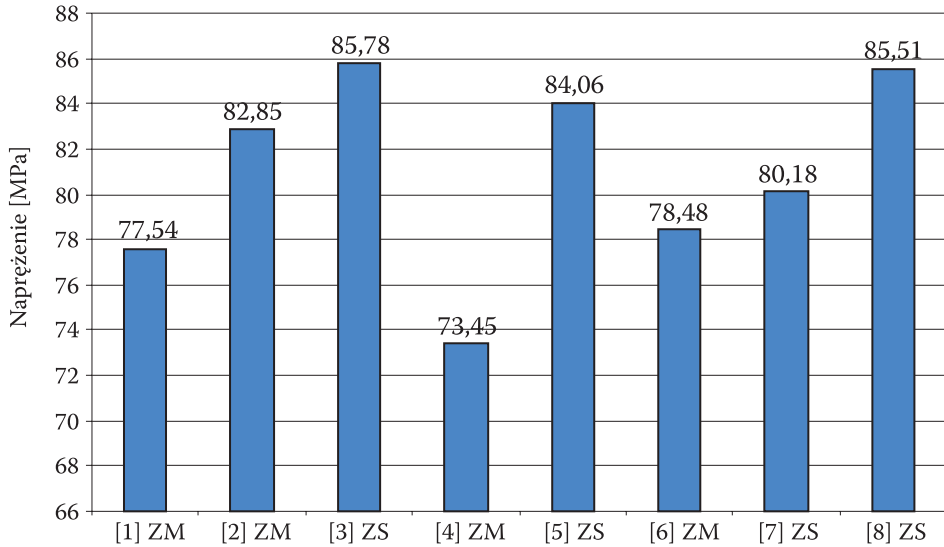
Obliczenia numeryczne modeli próbek badanych eksperymentalnie pozwoliły wyznaczyć naprężenia w spoinach i klejonych elementach oraz określić wartości maksymalnych naprężeń głównych ($\sigma_{zr \max}$) występujących w spoinach pod obciążeniem niszczącym. Porównano wartości maksymalnych naprężeń głównych, uznając je za maksymalne naprężenia kohezynne. Dla próbek zakładkowych poddanych próbie rozciągania (1...8), obliczone wartości maksymalnych naprężeń głównych w najbardziej obciążonych elementach spoiny zamieszczono w tabeli 5 oraz na rysunku 7.

TABELA 5

Wartości naprężeń ($\sigma_{zr \max}$) obliczone numerycznie w spoinach próbek zakładkowych rozciąganych

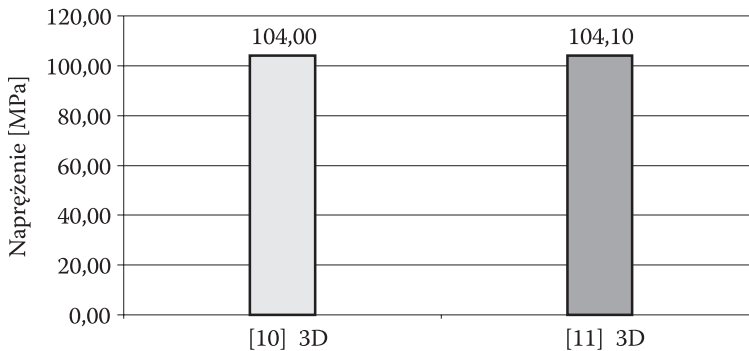
Nr próbki	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{zr \max}$	77,54	82,85	85,78	73,44	78,48	80,18	84,064	85,51
Charakter zniszczenia	Z M	Z M	Z S	Z M	Z S	Z M	Z S	Z S

W czterech z ośmiu rodzajów badanych próbek obciążonych na ścinanie wystąpiło zniszczenie klejonych elementów. Obliczone wyężenie materiału tych elementów świadczyło o tym, że została przekroczona wytrzymałość doraźna klejonych materiałów. W spoinach tych próbek wartości wyliczonych naprężeń okazały się nieco mniejsze niż w pozostałych. Próbek tych nie poddawano dalszej analizie. Maksymalne naprężenia główne ($\sigma_{zr \max}$) w spoinach pozostałych próbek okazały się podobne, a różnica ich wartości wynosiła ok. 7%. Jeśli uwzględni się przedziały ufności sił obciążających badane próbki, można stwierdzić, że obliczone wartości naprężeń niszczących pokrywają się.



Rys. 7. Wartości maksymalnych naprężeń głównych ($\sigma_{zr\max}$) w najbardziej obciążonych elementach spoin klejowych badanych próbek

Na rysunku 8 porównano wartości maksymalnych naprężeń głównych ($\sigma_{zr\max}$) obliczone dla próbek zakładkowych skręcanych.

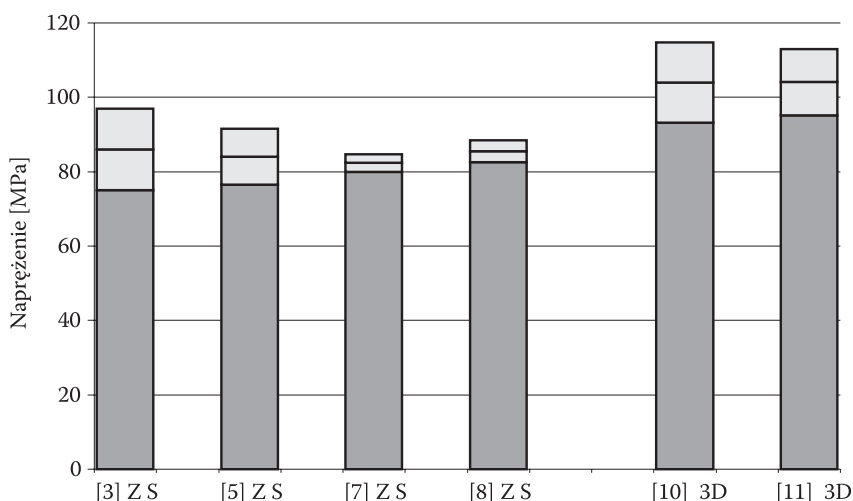


Rys. 8. Wartości maksymalnych naprężeń głównych ($\sigma_{zr\max}$) obliczone dla próbek skręcanych

W przypadku próbek skręcanych (10 i 11), pomimo różnicy w długościach zakładki, średnie naprężenia maksymalne główne ($\sigma_{zr\max}$) osiągnęły porównywalne wartości rzędu 105 MPa.

5.4. Wnioski z badań numerycznych

Na rysunku 9 porównano obliczone MES maksymalne naprężenia główne w spoinach połączeń, których zniszczenie polegało na zniszczeniu spoiny.



Rys. 9. Wartości maksymalnych naprężeń głównych ($\sigma_{zr \max}$) obliczone dla próbek zakładkowych rozciąganych i skręcanych z uwzględnieniem obliczonych przedziałów ufności

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły stwierdzić, że:

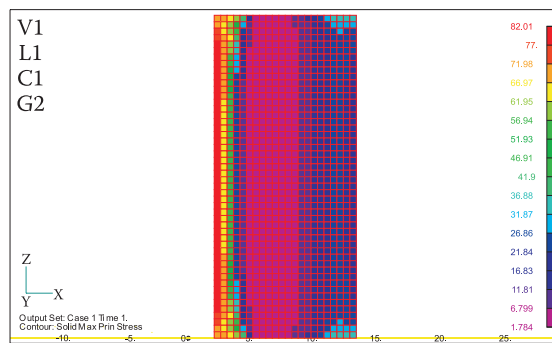
- w przypadku płaskich modeli rozciąganych próbek zakładkowych wystąpił porównywalny poziom naprężeń maksymalnych głównych w spoinach próbek, w których zniszczeniu uległa spoina klejowa (rys. 9),
- w przypadku przestrzennych modeli próbek skręcanych wartości maksymalnych naprężeń głównych są porównywalne, lecz nie pokrywają się z wartościami dla próbek rozciąganych i są od nich większe o około 20% (rys. 9),
- w związku z tym, że tak duże różnice mogą być spowodowane uproszczeniami wynikającymi z analizy płaskich modeli próbek zakładkowych rozciąganych, wykonano dodatkowe obliczenia numeryczne dla próbek rozciąganych z wykorzystaniem modeli trójwymiarowych.

5.5. Badania numeryczne modeli przestrzennych próbek rozciąganych

Spoiny klejowe zamodelowano za pomocą jednej warstwy elementów sześciennych o wymiarach geometrycznych odpowiadających krotności grubości spoiny równej 0,1 mm ($0,1 \times 0,5 \times 0,5$ mm). Na krawędziach dodano również

dotatkowe elementy modelujące wypłytki. Zgodnie z założeniami, właściwości mechaniczne kleju zdefiniowano, posługując się charakterystykami $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ dla poszczególnych materiałów. Obciążenia definiowano jako wartość średnią sił niszczących, wyznaczoną dla poszczególnych próbek i rozkładano je równomiernie na szerokości klejonego elementu. W przypadku modeli próbek dwuzakładkowych obciążonych na rozciąganie, ze względu na ich symetrię, wykonano modele tylko połowy próbki, co pozwoliło na zmniejszenie liczby elementów i węzłów.

Obliczenia przeprowadzono dla wszystkich zakładkowych próbek klejonych Epidianem 57+Z1, w których podczas badań eksperymentalnych zniszczeniu uległa spoina. Stwierdzono, że w połączeniach zakładkowych rozciąganych naprężenia zmieniają się nie tylko wzdłuż długości, ale również wzdłuż szerokości spoiny (rys. 10). W związku z tym wartości naprężeń maksymalnych w modelach przestrzennych spoin osiągają większe wartości niż w modelach płaskich. Wartości naprężeń maksymalnych głównych ($\sigma_{zr \max}$) obliczone w najbardziej obciążonych elementach spoin badanych próbek zamieszczono w tabeli 7.



Rys. 10. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych ($\sigma_{zr \max}$) w spoinie klejowej próbki zakładkowej rozciąganej (model przestrzenny próbki nr 1)

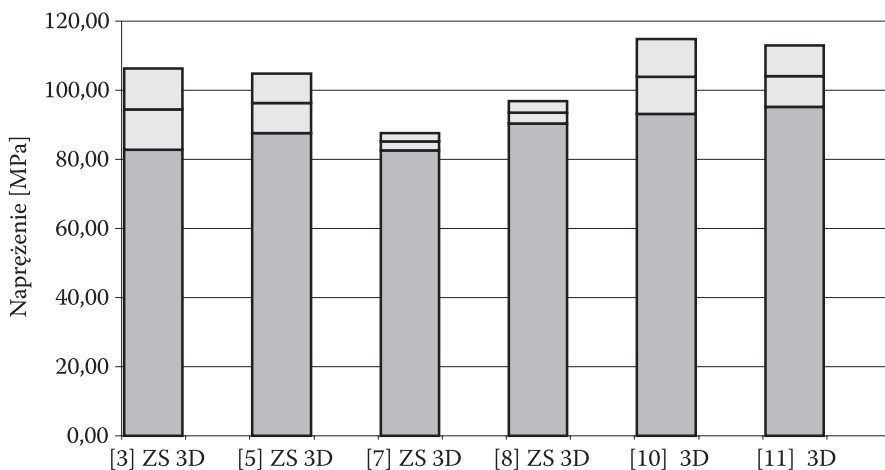
TABELA 7

Wartości naprężeń maksymalnych głównych ($\sigma_{zr \max}$) obliczone w najbardziej obciążonych elementach spoin (modele przestrzenne)

Nr próbki	[3] ZS 3D	[5] ZS 3D	[7] ZS 3D	[8] ZS 3D
($\sigma_{zr \max}$)	94,52	96,21	82,92	93,56

Na rysunku 11 porównano wartości maksymalnych naprężeń głównych w spoinach próbek zakładkowych rozciąganych i skręcanych.

Stwierdzono, że jedynie naprężenia maksymalne główne ($\sigma_{zr \max}$) obliczone dla próbki nr 7 nie mieszczą się w przedziałach ufności naprężeń obliczonych dla innych próbek.



Rys. 11. Porównanie obliczonych MES maksymalnych naprężen głównych w spoinach próbek zakładkowych rozciąganych i skręcanych

6. Wnioski

Przeprowadzone badania eksperymentalne i numeryczne pozwoliły stwierdzić, że:

- klejąc cienkie blachy ze stopów aluminium, można uzyskać połączenia o wytrzymałości większej od klejonych elementów,
- analizując metodą MES wyężenie spoin połączeń zakładkowych rozciąganych obciążonych na ścinanie jako zagadnienie płaskie, popełnia się błąd rzędu 10% w ocenie stopnia wyężenia spoiny klejowej,
- spośród sześciu połączeń klejowych, poddanych końcowej analizie MES, tylko dla jednego wyliczony stopień wyężenia spoiny nie mieścił się w przedziałach ufności pozostałych połączeń, co mogło być spowodowane niedotrzymaniem w pełni technologii klejenia,
- zaproponowana metoda prognozowania wytrzymałości kohezynnej połączeń klejowych z wykorzystaniem MES (programu Nastran) wydaje się przydatna do zastosowania w obliczeniach inżynierskich i bardziej dokładna od dotychczas stosowanych.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.02.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2006 r.

LITERATURA

- [1] M. PORĘBSKA, A. SKORUPA, *Połączenia spójnościowe*, PWN, Warszawa, 1997.
- [2] J. GODZIMIRSKI, *Prognozowanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych*, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, vol. 22, 3, 1998.

- [3] J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK, *Ocena przydatności metod numerycznych do obliczania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych*, Biul. WAT, 9, Warszawa, 1998.
- [4] J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK, *Określanie właściwości mechanicznych spoin klejowych*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 3, 4, 2004.
- [5] J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK, *Numeryczne modelowanie adhezji połączeń klejowych*, Przegląd Mechaniczny, 9, 2005.
- [6] Polska Norma PN-69/C-89300.
- [7] J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK, *Numeryczne modelowanie spoin klejowych połączeń obciążonych na ścinanie*, Biul. WAT, 4, Warszawa, 2005.
- [8] J. KOCAŃDA, S. KATARZYŃSKI, M. ZAKRZEWSKI, *Badanie własności mechanicznych metali*, WNT, Warszawa, 1967.

J. GODZIMIRSKI, S. TKACZUK

Method of calculating cohesive strength of adhesive joints

Abstract. The paper presents a method, based on FEA, for calculation of strength of adhesive joints subjected to shearing. Additionally, a method determining mechanical properties of adhesive layers and a rule of numerical modelling of adhesive bonds was proposed.

Keywords: adhesion, adhesive joints, adhesive layer, strength of adhesive joints

Universal Decimal Classification: 621.792