

ANALIZA WPŁYWU WIELKOŚCI NIEDOKLEJENIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Maciej Włodarczyk, Józef Kuczmazewski

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36,
20-618 Lublin, e-mail: maciej.wlodarczyk@pollub.edu.pl, j.kuczmazewski@pollub.pl

Streszczenie. Efekty procesu klejenia w istotnym stopniu zależą od jednorodności właściwości fizycznych klejów. Doświadczenia przemysłowe wskazują, że często dochodzi w obszarze połączenia klejowego do defektów takich jak pęcherze gazowe, rzadziwy lub niedoklejenia. Przyczynami ich powstawania mogą być niedokładne wymieszanie składników, niedostateczne odgazowanie tworzywa i nieprzestrzeganie dyscypliny technologicznej procesu. W badaniach defektoskopowych stwierdza się występowanie takich niejednorodności. Jest sprawą istotną jak ocenić wpływ takich niejednorodności na wytrzymałość połączenia jako całości. W pracy podjęto próby oszacowania wpływu niedoklejenia na wytrzymałość doraźną. Przeprowadzono eksperyment numeryczny z wykorzystaniem MES oraz wykonano badania niszczące ze specjalnie przygotowanymi próbkami, w których celowo wprowadzono niedoklejenia. Wyniki przedstawiono w postaci opisowej i graficznej. Pracę zakończono wnioskami z przeprowadzonych badań.

Słowa kluczowe: niedoklejenie, adhezja, połączenie zakładkowe, MES.

WSTĘP

Klejenie konstrukcyjne jest dynamicznie rozwijającą się metodą trwałego łączenia elementów wykonanych z różnych materiałów takich jak tworzywa sztuczne, szkło lub metale. Stosowanie tej technologii umożliwia nie tylko przyspieszanie montażu elementów, zmniejszanie ciężaru konstrukcji, ale przede wszystkim zwiększenie wytrzymałości połączenia przy jednoczesnym zwiększeniu stopnia szczelności, co ma decydujący wpływ szczególnie w przemyśle lotniczym. Powoduje to często wyparcie innych technologii łączenia właśnie przez proces klejenia. Jednakże żaden nawet najlepiej prowadzony i w pełni zautomatyzowany proces klejenia nie może dać stuprocentowej pewności, że jest on wolny od wad i błędów. Przyczynami, z jakich w strukturze kleju lub na granicy faz dochodzi do zaburzeń mogą być zarówno czynniki ludzkie, jak również błędy w samej technologii wynikające z nieznanymi zastosowanych mediów klejących. Dodatkowo wpływ czynników zewnętrznych jak również cechy parametryczne połączenia wymuszają konieczność prognozowania wytrzymałości doraźnej połączeń adhezyjnych, szczególnie w elementach w których wykryto wady w postaci niedoklejeń [1].

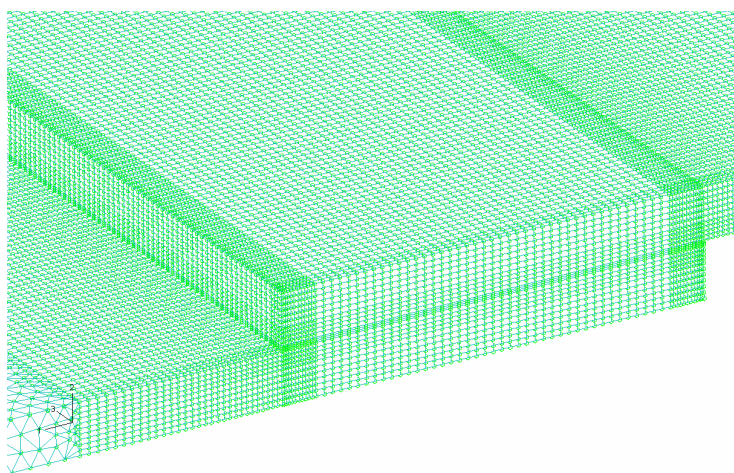
Ważnym aspektem jest ocena wpływu powstałych wad na wytrzymałość połączenia klejowego. Praktyka przemysłowa wskazuje, że niedoklejenia są nieodłącznym zjawiskiem występującym w procesie klejenia. Ich przyczyny są często trudne do wyjaśnienia, pojawiają się one

bowiem również w procesach gdzie przestrzegana jest dyscyplina technologiczna. W takich sytuacjach ocena ich wpływu na właściwości eksploatacyjne jest kluczowa i musi być podjęta przez służby kontroli.

Dotychczas jednak brak jest jednoznacznych i wiarygodnych metod prognozowania wytrzymałości takich połączeń. Dlatego też, w pracy podjęto próbę analizy stanu naprężenia w połączeniach zakładkowych z wprowadzonymi niedoklejeniami z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), oraz przeprowadzono serię prób doświadczalnych gdzie wprowadzono wady o założonych polach powierzchni.

EKSPERYMENT NUMERYCZNY

Na potrzeby analizy numerycznej zbudowano różne modele obliczeniowe różniące się od siebie parametrami siatki elementów skończonych, różnym podziałem siatek oraz zagęszczeniem w strefach lokalnych spiętrzeń naprężeń. W modelach tych wprowadzono niedoklejenia w postaci okręgów. Model obliczeniowy MES połączenia zakładkowego wykorzystanego jako model podstawowy przedstawia rys. 1.

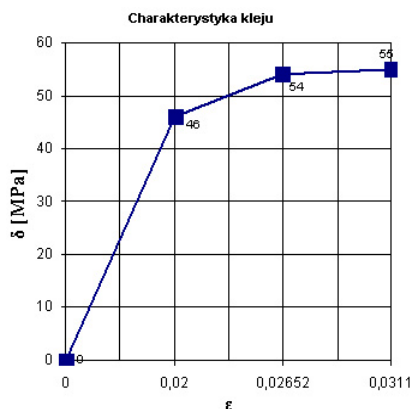


Rys. 1. Model połączenia zakładkowego z zagęszczeniem podziału siatki elementów skończonych

Fig. 1. The model of single lap join with density of mesh grid divide of finite elements

Model został wykonany jako złożenie dwóch płytek o wymiarach 100x25x2 mm (długość x szerokość x grubość płytki) rozdzielonych warstwą kleju o wymiarach 20x25x0,15 mm (długość x szerokość x grubość kleju). Dla materiału zakładki przyjęto wartość współczynnika sprężystości podłużnej $E=2.1 \cdot 10^5$ MPa oraz wartość współczynnika Poissona równą $\nu=0.3$.

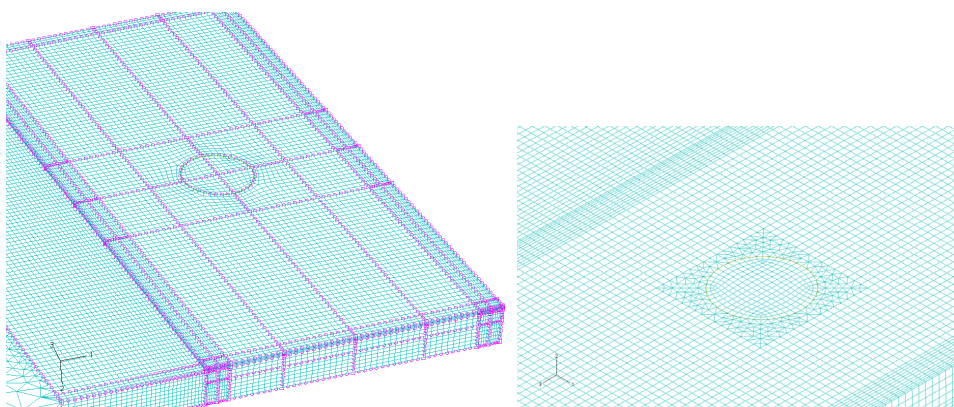
Nieliniową charakterystykę kleju założono zgodnie z wykresem uzyskanym na podstawie prób doświadczalnych pokazaną na rys. 2.



Rys. 2. Wykres nieliniowej charakterystyki kleju przyjętej do symulacji komputerowej

Fig. 2. The graph of nonlinear characteristics of glue assumed for computer simulation

Aby zamodelować niedoklejenie w połączeniu oraz brak adhezyjnego oddziaływania pomiędzy elementami kleju a zakładkami należało przebudować siatkę MES. Przebudowano tu siatkę tak, aby nastąpiło równomierne rozmieszczenie węzłów na granicy niedoklejenia. W modelu dla wyżej wymienionego stanu założono brak oddziaływania pomiędzy elementami kleju a materiałem zakładki przy jednoczesnym ciągłym przenoszeniu naprężeń kontaktowych przez pozostałe powierzchnie kohezyjne. Należało przebudować również strefy wokół niedoklejenia, także w materiale zakładki, ponieważ należy zapewnić takie samo rozmieszczenie węzłów na granicach kontaktowych. Wyniki tych prac przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Przykłady modelowania strefy niedoklejenia umiejscowionej w centralnym miejscu zakładki

Fig. 3. Examples of modeling unbond spots area situated in the central location of join

Warunki brzegowe oraz obciążenie zewnętrzne zdefiniowane zostały w sposób następujący:

- na jednej z krawędzi zakładki odebrano możliwości przemieszczenia węzłów we wszystkich kierunkach (1, 2, 3), modelując w ten sposób utwierdzenie modelu (brak rotacyjnych stopni swobody w węzłach elementów bryłowych),

- przeciwnej krawędzi zakładki odebrano translacyjne stopnie swobody na kierunkach 2 i 3 globalnego układu współrzędnych modelu,

Obciążenie zewnętrzne modelu połączenia zakładkowego stanowi obciążenie stałe na poziomie 3242 N, przyłożone do swobodnego końca dolnej zakładki na kierunku „- 1”.

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

BADANIA DOŚWIADCZALNE

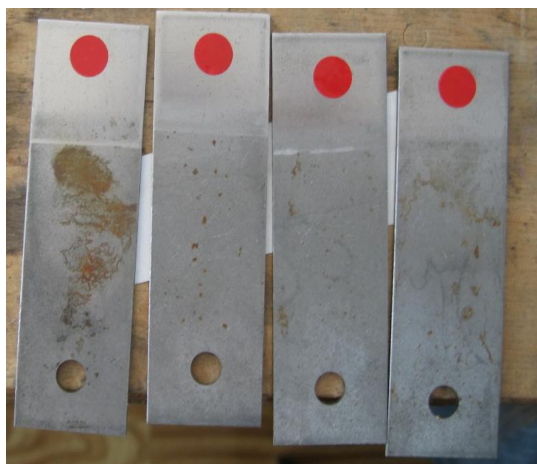
Badania doświadczalne wykonano w oparciu o próbki wykonane z blachy stalowej gatunku S235JR2 o grubości 2 [mm] wykonano w formie prostokątów o wymiarach: 20 x 100 mm, 25 x 100 mm, 30 x 100 mm, 40 x 100 mm oraz 50 x 100 mm.

Blachę poddano czyszczeniu w benzynie ekstrakcyjnej oraz piaskowaniu. Wstępnie wycięte próbki na mechanicznych nożycach gilotynowych z zachowaniem naddatku na obróbkę wykańczającą obrabiono następnie na pionowym centrum obróbkowym FV-580 z dokładnością do $\pm 0,01$ mm. W próbkach wykonano dodatkowo otwór $\varnothing = 8.1$ mm w odległości 85 mm od krawędzi sklejania ułatwiający ustalenie próbek w przyrządzie klejarskim.

Próbki poddano odtłuszczeniu w benzynie ekstrakcyjnej a następnie obróbce mechanicznej narzędziami nasypowymi za pomocą szlifierki oscylacyjnej z papierem ściernym o ziarnistości P320.

Po wykonaniu obróbki ścierniej powierzchnie ponownie poddano odtłuszczeniu za pomocą benzyny ekstrakcyjnej a następnie specjalnego odtłuszczacza Loctite 7061.

Na tak przygotowane powierzchnie próbek, w natrasowany wcześniej centralny punkt, zakładki zostało naniesione niedoklejenie wykonane w kształcie koła wyciętego kalibrowanym wycinakiem (rys.4.). Niedoklejenie zostało wycięte z monomerycznej folii PCV pokrytej poliakrylanem na bazie wody.



Rys. 4. Usytuowanie niedoklejenia na próbkach doświadczalnych

Fig. 4. Location of unbond spots area on specially prepared samples

Na potrzeby prób doświadczalnych przyjęto następujące wielkości niedoklejeń 5%, 10%, 15%, 20% całkowitej powierzchni sklejenia. Wielkości te przekładały się na odpowiednie wielkości średnic pól niedoklejeń, co zostało podane w tabeli 1.

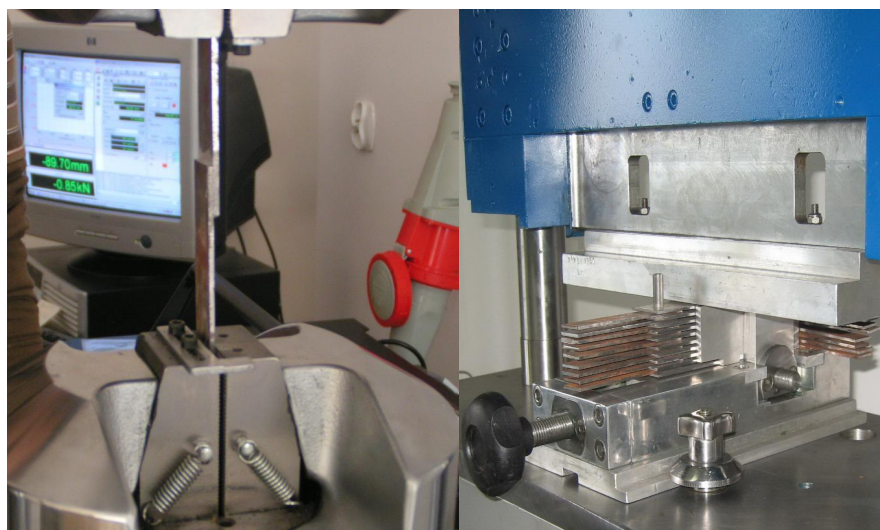
Tab. 1. Parametry geometryczne połączeń zakładkowych oraz średnice pól dla przyjętych procentowo wielkości niedoklejeń

Tab. 1. Geometric parameters of lap joints as well as area diameters for the assumed percentages of unbound spots

Szerokość płytki [mm]	Długość zakładki [mm]	Pole próbki [mm ²]	Średnice niedoklejeń [mm] przy polach :			
			5%	10%	15%	20%
20	20	400	5,05	7,14	8,74	10,10
25	20	500	5,64	7,98	9,77	11,29
30	20	600	6,18	8,74	10,71	12,36
40	20	800	7,14	10,10	12,36	14,28
50	20	1000	7,98	11,29	13,82	15,96

Jako środka adhezyjnego do badań użyto przemysłowego kleju konstrukcyjnego - Loc-tite® Hysol® 9466 A&B – wzmocnionego kleju epoksydowego 2K-Epoxy przydatnego do wielozadaniowych aplikacji wymagających długiego czasu przydatności i wysokiej wytrzymałości wiązania. Klej wyciskany był za pomocą pistoletu i mieszany w dyszy mieszadła statycznego poprzez przepływ przez wkład labiryntowy.

Próbki po naniesieniu na nie kleju montowane były w przyrządzie klejarskim zapewniającym równoczesne ich obciążenie stałą siłą podczas wywierania nacisku na nie oraz zachowanie takiej samej długości zakładki. Następnie przyrząd klejarski umieszczony został na stanowisku do wywierania ciśnienia (rys. 5).



Rys. 5. Maszyna wytrzymałościowa MTS 810 oraz stanowisko do wywierania ciśnienia z układem mechanicznym

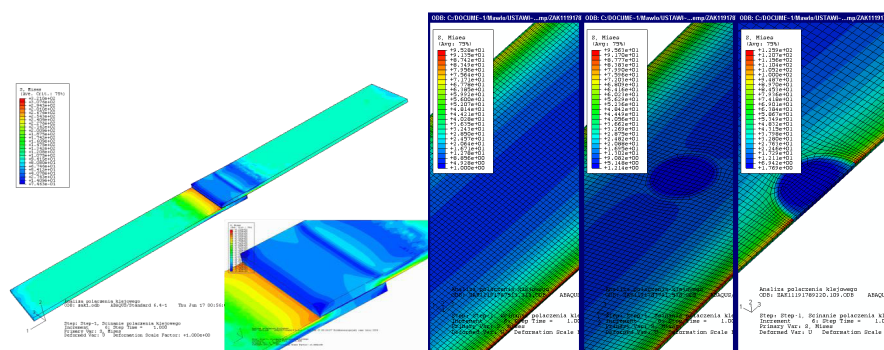
Fig. 5. Testing machine MTS810 and testing device with mechanical pressure system

Po utwardzeniu i sezonowaniu przeprowadzono badania doświadczalne na maszynie wytrzymałościowej MTS 810 (rys. 5) przy zachowaniu osiowego zamocowania próbek i równomierności obciążenia statycznego oraz zachowania stałej prędkości przesuwania się głowicy pod obciążeniem z prędkością 5 mm·min⁻¹.

WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH ORAZ ICH DYSKUSJA

Analiza prowadzona była w kolejnych dyskretnych przedziałach czasu, którym odpowiada określony krok przyrostowy obciążenia, dając w efekcie pełen poziom obciążenia konstrukcji.

W rezultacie tych obliczeń otrzymano przebieg procesu deformacji w kolejnych przyrostowych krokach obciążenia. Jako wyniki zamieszczono wydruki w stanie odkształconym oraz rozkłady naprężeń zredukowanych (według hipotezy Hubera–Misesa) przedstawione w formie kolorowych map konturowych.

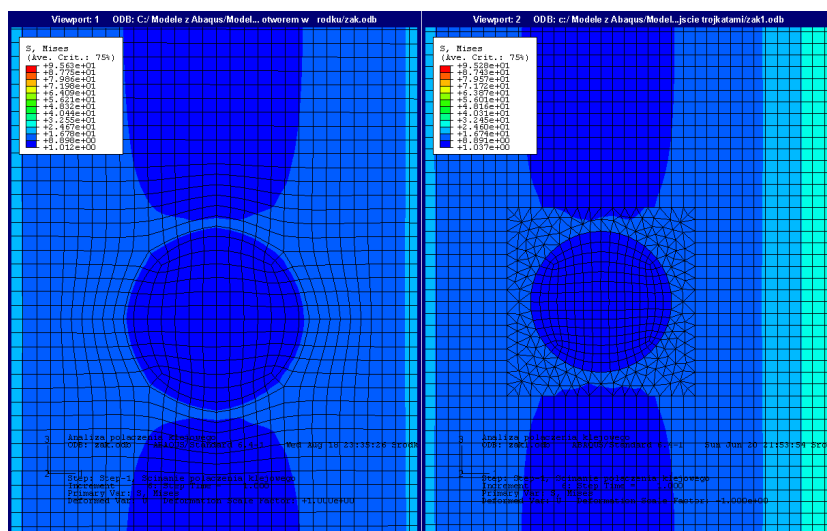


Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy wytrzymałościowej Huber-Misesa w połączeniu klejowym oraz wielkość wartości naprężeń zredukowanych w kleju przy zaimplementowaniu niedoklejenia

Fig. 6. The distribution of reduced stresses in adhesive joints acc. to the Huber-Mises hypothesis and the value of reduced stresses in the glue at implementation of unbound spots

Naprężenia wizualizowane są kolorami na powierzchniach elementów, którym odpowiadają konkretne wartości liczbowe określone w MPa zamieszczone w legendzie wydruku. W wyniku analizy poprzez zwiększenie stopnia wyświetlania deformacji zaobserwowano również odkształcenie się zakładek, co związane jest z wytworzeniem się momentu gnącego. Widoczne jest wyraźne zwiększenie się wielkości naprężeń powstających w elemencie zakładki wzdłuż jej szerokości. Wzrost naprężeń na końcach pokazuje rys.6. Wzrost naprężeń jest szczególnie widoczny w niewielkiej odległości, około 0,75mm od krawędzi płytki. Bardzo ważną dla dokładności otrzymywanych wyników jest umiejętność doboru odpowiedniej siatki MES oraz właściwe rozlokowanie stosowanych rodzajów MES w obrębie złozenia. Na rys.6. przedstawiono analizę stanu naprężeń w złączu klejowym z wprowadzoną niejednorodnością w postaci niedoklejenia. Ulokowano je w środku połączenia. Wielkość naprężeń uzyskana w analizie wokół niedoklejenia jest na granicy $\sigma_z \approx 8$ MPa. Poziom naprężenia na końcach elementu kleju wzdłuż krawędzi szerokości zakładki pozostała na poziomie podobnym jak w modelu bazowym tj. $\sigma_z \approx 95$ MPa. Taki niski stan naprężenia wokół niejednorodności jest spowodowany małymi odkształceniami elementów centralnych przy jednoczesnej znacznej deformacji elementów brzegowych kleju.

Na rys. 7 zaprezentowano porównanie „meshowania” strefy tuż przy wprowadzonej niejednorodności elementami heksagonalnymi i tetragonalnymi.



Rys. 7. Różnice wynikające z zastosowania różnych siatek elementów skończonych w strefie niedoklejenia

Fig. 7. Different finite elements mesh grids in local unbonded spots area

W wyniku analizowania wielkości wartości naprężeń wokół obszaru niedoklejenia, można stwierdzić znikomy wpływ rodzaju zastosowanych elementów skończonych na otrzymywane wyniki.

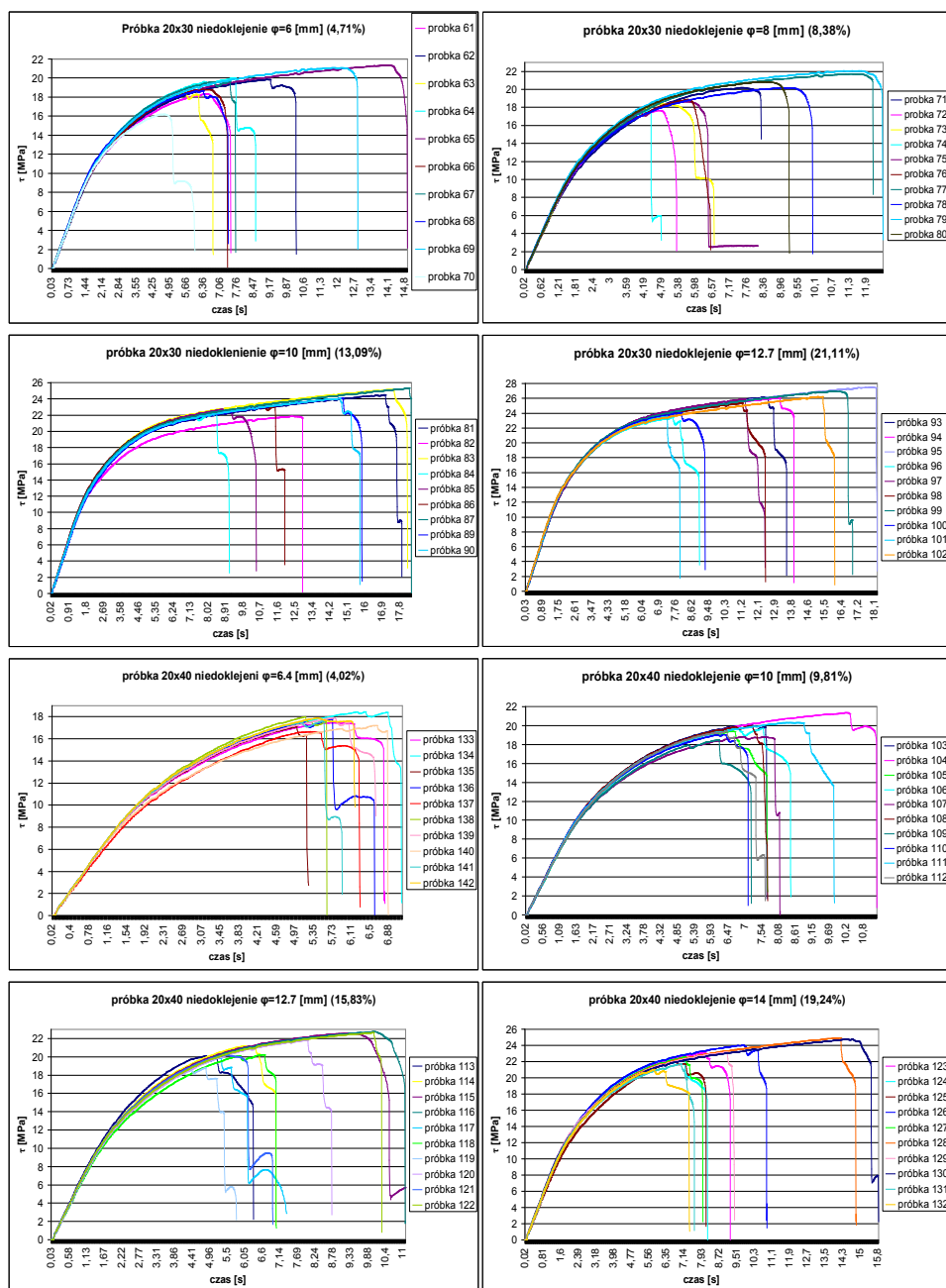
WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH ORAZ DYSKUSJA

Na rys. 8 przedstawiono charakterystyki krzywych niszczenia próbek.

Na rys. 9 przedstawiono zestawienie graficzne uzyskanych wyników.

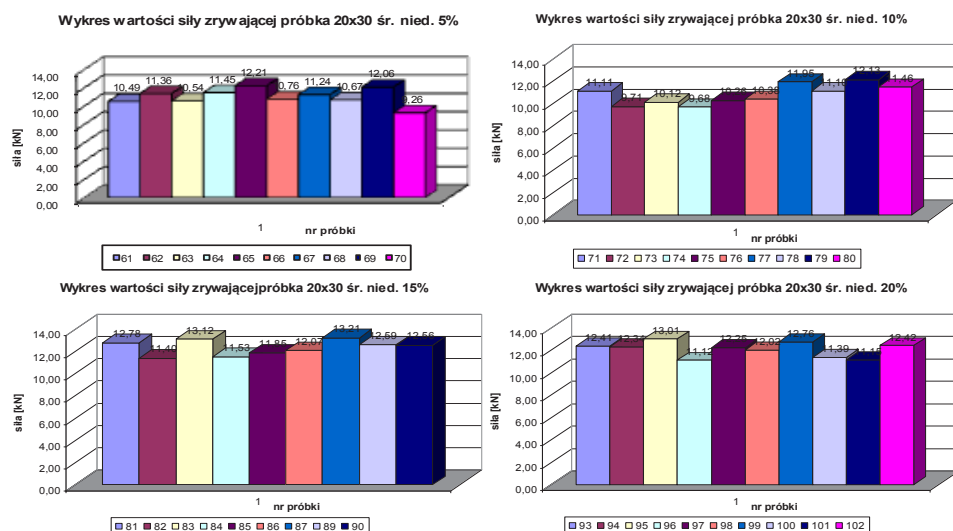
Charakterystyki niszczenia próbek wskazują na znaczny rozrzut poziomu odkształcenia przy zniszczeniu. Jest to interesujące gdyż poziom zmienności naprężenia niszczącego nie jest wysoki. Nie wydaje się także, że powodem dużego rozrutu odkształcenia przy zniszczeniu mógłby być znaczny rozrzut grubości warstwy kleju, gdyż w tym względzie utrzymano na właściwym poziomie dyscyplinę technologiczną. Ten problem wymaga wyjaśnienia w dalszych próbach badawczych.

W badaniach niszczących zaobserwowano interesujące zjawisko. Umieszczenie niedoklejenia w środkowej strefie połączenia nie tylko nie pogorszyło wytrzymałości połączenia ale zaobserwowano nawet tendencję wzrostową, aż do 20 % powierzchni sklejenia. Być może w zakładkach nieco dłuższych od granicznych takie odciążenie strefy środkowej sprawia, że obszary skleiny ze strefy końcowej zakładki lepiej przenoszą naprężenia tnące. Ta interesująca obserwacja będzie dogłębnie rozważana w dalszych badaniach. Taka analiza musi uwzględniać także rozmieszczenie niedoklejenia w innych strefach połączenia.



Rys. 8. Charakterystyki uwzględniające przebieg niszczenia próbek

Fig. 8. The characteristics of destruction processes



Rys. 9. Zestawienie graficzne uzyskanych wyników

Fig. 9. Graphic comparison of the obtained results

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza modelowa MES klejowych połączeń metali z celowo wprowadzonymi niejednorodnościami oraz badania niszczące takich połączeń pozwalają na sformułowanie następujących uwag i wniosków:

1. Przeprowadzone badania niszczące połączeń z celowo wprowadzonymi niedoklejeniami w środkowej strefie skleiny wykazały się stosunkowo niewielkim rozrzutem wytrzymałości przy znacznym rozrzucie odkształcenia przy zniszczeniu połączenia.
2. W analizie modelowej MES nie stwierdzono znacznej koncentracji naprężenia wokół niedoklejenia w strefie środkowej zakładki.
3. W badaniach niszczących zaobserwowano interesujący trend wzrostowy średniego naprężenia niszczącego wraz ze wzrostem niedoklejenia.
4. Uzyskane wyniki powinny być weryfikowane zarówno w symulacjach MES jak i w badaniach niszczących ale różnego usytuowania i różnych wielkości niedoklejenia.

LITERATURA

1. Biedunkiewicz W., Majda P.: A model of an adhesive joint subjected to shearing. *Postępy Technologii Maszyn* 2004, 28, 1, 23-36.
2. Godzimirski J., Tkaczuk S.: Ocena przydatności metod numerycznych do obliczania wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych. *Biuletyn WAT* 1998, 553, 9, 111-120.
3. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. WNT, Warszawa 2002.

4. Kuczmazewski J.: Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej 1995.
5. Kuczmazewski J.: Fundamentals of metal-metal adhesive joint design. Politechnika Lubelska. Oddział Lubelski PAN, Lublin, 2006.

AN ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF AN UNBOUND SPOTS AREA ON THE STRENGTH OF ADHESIVE JOINTS

Summary. The effects of adhesive joint process depend on the homogeneity of a physical bond. The industrial experience indicates that defects such as gas bubbles, cracks, thin spots and unbound spots often occur in the area of an adhesive layer. The causes of their formation may be inaccurate mixing of ingredients, insufficient degassing of the material and other insufficient rigors in the technological process. The NDT methods report the presence of such heterogeneity. It is important to assess the influence of such heterogeneity on the strength of the examined connection which is treated as one piece of material. The paper attempts to estimate the influence of unbound spots on the strength of joints. A numerical experiment using FEM as well as destructive testing was performed by using especially prepared samples, where unbound spots were introduced purposefully. The results of the conducted research were shown with the aid of diagrams, tables and illustrations.

Key words: unbonded spot, adhesion, single lap adhesive joint, FEM.