

Anna RUDAWSKA  
Hubert DĘBSKI

## OCENA WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLACH ZE STOPU ALUMINIUM Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY NUMERYCZNEJ MES

### EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF ADHESIVELY BONDED ALUMINIUM ALLOY SHEETS JOINTS

*W artykule przedstawiono zagadnienia związane z wytrzymałością połączeń klejowych blach ze stopów aluminium. Celem pracy było określenie wytrzymałości analizowanych połączeń zarówno na podstawie badań eksperymentalnych, jak i z wykorzystaniem analizy numerycznej MES, która jest istotna ze względów eksploatacyjnych konstrukcji. Przedmiotem badań były jednozakładkowe połączenia klejowe blach ze stopu aluminium 2024PLT3 oraz 7075PLT0, obciążone na ścinanie. Analizę numeryczną przeprowadzono w oparciu o przestrzenne modele połączeń klejowych, wykorzystując do zamodelowania spoiny klejowej elementy typu cohesive. Zastosowanym w analizie numerycznej narzędziem był program ABAQUS/Standard. Przeprowadzone badania umożliwiły symulację procesu zniszczenia połączenia klejowego oraz określenie momentu inicjacji zniszczenia spoiny klejowej.*

**Słowa kluczowe:** wytrzymałość połączeń klejowych, blachy ze stopu aluminium, metoda elementów skończonych (MES).

*The paper presents issues concerning aluminium sheets adhesive joints strength. The aim of the work was to determine the strength of analysed joints basing on experimental tests, as well as on finite elements numerical analysis (FEA), of high importance to operating properties of the construction. The type of adhesive joint tested was a single-lap joint, adherended were 2024PLT3 and 7075PLT0 aluminium alloy sheets, tested in loading which creates shear across the bondline. The numerical analysis was based on spatial adhesive joints models created with cohesive elements. The programme used in the analysis was ABAQUS/Standard. The conducted research simulated adhesive failure and adhesive failure initiation point.*

**Keywords:** adhesive joints strength, aluminium alloy sheets, finite element analysis (FEA).

#### 1. Wprowadzenie

Wytrzymałość w znaczeniu ogólnym oznacza odporność na niszczące działanie czynników mechanicznych, których przykład mogą stanowić różnego rodzaju obciążenia. W odniesieniu do połączeń klejowych, najczęściej uwzględnia się wytrzymałość statyczną. Związane jest to z faktem, iż jednym z podstawowych warunków, jakie powinno spełnić połączenie klejowe, jest osiągnięcie założonej wytrzymałości statycznej [5, 6, 9, 11, 15]. Podczas eksploatacji połączeń klejowych jest to niezwykle istotna informacja, pozwalająca m.in. na określenie wartości oraz rodzajów obciążeń, przy których połączenie może być eksploatowane. Znajomość wytrzymałości połączeń klejowych oraz zagadnień z nią związanych pozwala m.in. na dobór właściwych parametrów projektowanego połączenia oraz określenie warunków eksploatacyjnych (np. obciążeń), w których połączenie będzie wykazywało odpowiednie właściwości. Niezwykle istotna staje się zatem możliwość wyznaczenia kry-

#### 1. Introduction

Strength in general stands for resistance to destructive effect of mechanical factors, such as various loads. In case of adhesive bonds this is static strength which is the most frequently taken into account. It is mainly due to the fact that achieving defined static strength is one of the key conditions for the adhesive bond to meet [5, 6, 9, 11, 15]. This is a highly important indicator determining values and types of loads which may be applied to the bond in operation. The knowledge of adhesive bonds strength problems allows the engineer to design the bond appropriately and determine operating conditions, such as loads, in which the joint will retain required properties. Therefore, determining failure load, when joint fails, appears to be of utmost importance. Consequently, the knowledge of adhesive bonds strength plays a leading role in the process of their designing and operation.

Due to the fact that shear loaded joints are able to handle the biggest loads [11], they are the most recognised adhesive joints.

tycznej wartości obciążenia, przy której następuje zniszczenie połączenia (utrata właściwości wytrzymałościowych połączenia). W związku z tym znajomość wytrzymałości połączeń klejowych ogrywa kluczową rolę podczas ich projektowania i eksploatacji.

W przypadku analizowanych połączeń najczęściej rozpatruje się połączenia klejowe obciążone na ścinanie, ponieważ ten rodzaj połączeń może przenosić największe obciążenia [11]. Z tego względu podczas projektowania i eksploatacji połączeń klejowych dąży się do zapewnienia dominacji w połączeniach obciążenia ścinającego.

Stosowane w analizie wytrzymałości połączeń klejowych obliczeniowe metody analityczne są wykorzystywane do połączeń podobnie ukształtowanych i obciążonych w sposób określony w normach [3, 5, 11]. Oprócz tego metody dotyczące określania naprężeń w spoinach połączeń są obarczone pewnymi błędami, wynikającymi z przyjmowanych założeń upraszczających [4, 5, 9-11]. Umożliwia to prowadzenie obliczeń wytrzymałościowych dla wybranych typów połączeń, które są najbliższe modelom przyjmowanym przy formułowaniu zależności analitycznych [3, 11, 13].

Współczesnym narzędziem obliczeniowym stanowiącym uzupełnienie i rozszerzenie możliwości analizy stanu wyteżenia połączeń klejowych jest metoda elementów skończonych (MES) [7-10, 14, 16, 17, 18]. Obliczenia numeryczne z wykorzystaniem MES umożliwiają określenie najkorzystniejszych parametrów połączenia [9, 10, 12], zapewniających wymaganą wytrzymałość już na etapie projektowania połączenia klejowego.

Celem prowadzonych badań była analiza rozkładów naprężenia w jednozakładkowych połączeniach klejowych blach ze stopów aluminium z wykorzystaniem metody elementów skończonych [16, 19], stosując jako narzędzie numeryczne program ABAQUS/Standard [1, 2]. Obliczenia numeryczne prowadzono z uwzględnieniem mechanizmu zniszczenia spoiny klejowej [2, 14, 16], weryfikując otrzymane wyniki z rezultatami badań eksperymentalnych. Określono wartość obciążenia inicjującego proces zniszczenia spoiny, jak również wartość obciążenia krytycznego, przy której nastąpiło całkowite zniszczenie połączenia. Wykonane obliczenia numeryczne stanowiły zagadnienie geometrycznie i fizycznie nieliniowe, wpływające na dokładność uzyskiwanych wyników. Wykonana analiza dostarcza wielu cennych informacji, mogących mieć istotne znaczenie przy projektowaniu połączeń klejowych.

## 2. Badania eksperymentalne

Przedmiot badań stanowiły jednozakładkowe połączenia klejowe blach ze stopu aluminium 2024PLT3 oraz 7075PLT0. Wymiary geometryczne połączenia wynosiły: długość łączącego elementu  $l=100$  mm, szerokość:  $b = 20$  mm, grubość warstwy kleju:  $g_k = 0,1$  mm (rys. 1). Badania prowadzono dla różnych grubości blach oraz zależnych od nich długości zakładek połączeń klejowych. Wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy Loctite 3430, utwardzany w temperaturze otoczenia  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  w czasie 48 godzin. Jako sposób przygotowania powierzchni zastosowano odtłuszczenie środkiem odtłuszczającym Loctite 7063.

W badaniach wykorzystano następujące rodzaje jednozakładkowego połączenia klejowego, zamieszczone w tabeli 1.

Przeprowadzone badania wytrzymałościowe miały na celu wyznaczenie wartości krytycznej obciążenia, przy której nastą-

That is why, in designing and application this type is predominantly taken into consideration.

The analytic methods of adhesively bonded joints analysis are applied in case of similarly shaped and loaded bonds, with accordance to norms [3, 5, 11]. Additionally, stress determining methods are burdened with error as a result of simplifying assumptions made [4, 5, 9-11]. This allows to carry out strength analysis for selected joint types, which are closest to the model assumed while formulating analytical dependencies [3, 11, 13].

Finite element analysis (FEA) is a modern analytical tool, which expands the possibilities of examining adhesive joints effort [7-10, 14, 16, 17, 18]. FEA numerical computations enable to determine the best bonding parameters [9, 10, 12], assuring desired strength in the initial stages of designing the adhesive bond.

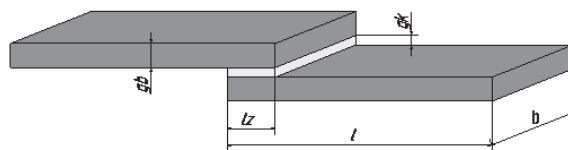
The aim of conducted research was to analyse stress distribution in aluminium alloy single-lap bonded joints, applying finite element method [16, 19] and the numerical tool being ABAQUS/Standard programme [1, 2]. The numerical analysis included adhesive joint failure mechanism [2, 14, 16]; the results were then verified with the results of experimental tests. Both adhesive failure initiation load and critical load were determined. The numerical computation was a geometrically and physically non-linear problem, having an impact on the accuracy of the results. This analysis provides plenty information which may prove invaluable in designing bonded joints.

## 2. Experimental tests

The type of adhesive joint tested was a single-lap bonded of joint, adhered were 2024PLT3 and 7075PLT0 aluminium alloys. The geometrical dimensions of the joint were as follows: length of the adhered element  $l = 100$  mm, width  $b = 20$  mm, adhesive layer thickness  $g_k = 0.1$  mm (fig. 1). The tests were conducted for alloys of various thicknesses and accordingly thick adhesive joints. The adhesive used was the two-component epoxy Loctite 3430, setting in  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  for 48 hours. The surface treatment method applied was degreasing with Loctite 7063.

The following types of single-lap bonded joint presented in table 1 were used in the tests.

The tests aimed at determining critical load value, causing adhesive joint failure. Determined load values provided the



Rys. 1. Schemat połączenia klejowego jednozakładkowego

Fig. 1. Single-lap bonded joint geometry

Tab. 1. Rodzaje badanych połączeń klejowych

Tab. 1. Tested bonded joints types

Lp. No	Rodzaje badanych połączeń Tested joint types	Grubość łączonych blach Adhered alloys thickness g [mm]	Długość zakładki spoiny klejowej Joint length $l_z$ [mm]
1	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3 2024PLT3 aluminium alloy	0,64	24
2	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3 2024PLT3 aluminium alloy	1,00	30
3	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0 7075PLT0 aluminium alloy	0,80	27
4	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0 7075PLT0 aluminium alloy	1,00	30

piło zniszczenie połączenia klejowego. Wyznaczone wartości obciążenia stanowiły podstawę do opracowania modeli dyskretnych analizowanych połączeń klejowych oraz weryfikacji otrzymanych wyników obliczeń numerycznych.

### 3. Analiza numeryczna

Analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych przeprowadzono w oparciu o przestrzenne modele dyskretnie połączeń klejowych. W procesie dyskretyzacji połączenia klejowego zastosowano heksagonalną siatkę elementów skończonych z wykorzystaniem różnych typów elementów. Do zamodelowania blach aluminiowych zastosowano ośmiowzłowe elementy objętościowe typu *solid*, posiadające po trzy translacyjne stopnie swobody w węzle elementu, natomiast spoinę klejową odwzorowano przy wykorzystaniu elementów skończonych typu *cohesive*, umożliwiających uwzględnienie mechanizmu zniszczenia spoiny w procesie obciążania połączenia klejowego. Do opisu właściwości materiałowych poszczególnych elementów połączenia klejowego zastosowano model materiału sprężysto-plastycznego w przypadku blach aluminiowych oraz model materiału sprężystego z charakterystyką zniszczenia opartą o kryterium *Traction-Separation* (siła rozrywająca - graniczna wartość separacji) [2, 14, 16] w oparciu o charakterystyki zamieszczone w pracy [16]. Wartość separacji określającej przemieszczenie węzłów elementu od momentu inicjacji zniszczenia do całkowitej utraty sztywności elementu skończonego przyjęto na poziomie 0,035 mm, co stanowiło korektę do wartości średniej 0,05 mm zalecanej w instrukcji oprogramowania ABAQUS. Wprowadzenie korekty separacji było spowodowane koniecznością kalibracji modelu numerycznego do wyników badań eksperymentalnych (porównywano wartości siły niszczonej). Model numeryczny połączenia klejowego przedstawiono na rys. 2

Zdefiniowane dla połączenia klejowego warunki brzegowe zapewniały utwierdzenie czołowej ścianki górnej blachy oraz możliwość przemieszczeń czołowej ścianki blachy dolnej tylko na kierunku przyłożenia obciążenia (rys. 3).

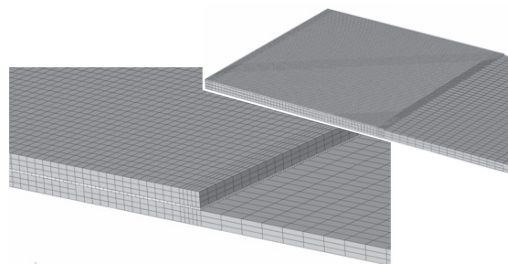
base for mesh models of the analysed joints and verified the numerical computation results.

### 3. Numerical analysis

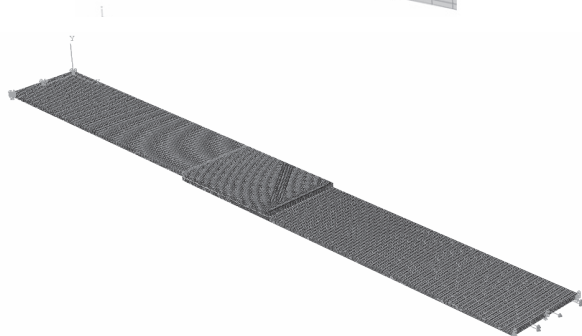
The finite elements numerical analysis was based on spatial mesh models of adhesive joints. In adhesive joint meshing process, hexagonal finite elements mesh with various elements types was applied. Aluminium alloys modelling employed 8-noded solid elements with 3 translational degrees of freedom each, while the adhesive joint was modelled with cohesive finite elements, as a result of which incorporating joint failure mechanism in loading process was possible. Mechanical properties of individual joint elements were described using elastic-plastic model for aluminium alloys and elastic model with Traction-Separation properties [2, 14, 16] based on the paper [16]. The value of separation factor, referring to the element's nodes displacement from failure initiation point to loss of rigidity of a finite element, was set at 0.035 mm, therefore adjusted to average value of 0.05 mm, as recommended in ABAQUS software instruction manual. This adjustment was dictated by the necessity to calibrate the numerical model to the results of experimental tests (the values of destructive forces were compared). The numerical model of the adhesive layer is presented in figure 2.

Boundary conditions defined for the adhesive bond ensured restraining the front side of the upper sheet, at the same time allowing displacement of the front side of the lower sheet only in the direction of load application (fig. 2).

The loads applied in numerical models were failure forces, the values of which were determined in experimental tests.



Rys. 2. Model dyskretny jednozakładowego połączenia klejowego  
Fig. 2. Single-lap bonded joint mesh



Rys. 3. Warunki brzegowe przyjęte w modelu numerycznym jednozakładowego połączenia klejowego [16]  
Fig. 3. Finite element model single-lap bonded joint boundary conditions [16]

Obciążenie zastosowane w modelach numerycznych stanowiły siły niszczące połączenie, których wartości wyznaczono w badaniach eksperymentalnych.

## 4. Wyniki badań

### 4.1. Siła niszcząca połączenie klejowe

Przeprowadzone badania połączeń klejowych umożliwiły wyznaczenie wartości sił niszczących, które przyjęto jako podstawę do oszacowania wytrzymałości analizowanych połączeń. W tabeli 2 przedstawiono wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach eksperymentalnych oraz na podstawie analizy numerycznej badanych połączeń.

Porównując otrzymane w tabeli 2 wyniki badań zauważono dużą zgodność wartości obciążenia niszczącego wyznaczonego w badaniach eksperymentalnych z wynikami obliczeń numerycznych. Dotyczy to przede wszystkim trzech pierwszych przypadków, dla których uzyskano prawie 100% zgodność. W ostatnim wariantcie połączenia otrzymano różnicę wyników wynoszącą ok. 17,5%, jednakże rozbieżność ta może wynikać z przybliżonego charakteru metody elementów skończonych oraz sposobu odzwierciedlenia warunków rzeczywistych.

## 4. Tests results

### 4.1. Failure force

Adhesive joints tests determined values of failure force accepted as base values for estimating strength of the analysed joints. Table 2 presents failure force values determined in the experimental tests and in the numerical analysis of the joints.

The comparison of tests results presented in table 2 reflects considerable similarity of failure force values in both experimental and numerical tests. This concerns predominantly the first three cases, where consistency amounted to nearly 100%. Although the values discrepancy in the last variant settles at approximately 17.5%, this may be due to the approximate character of the finite element analysis, along with the method of reflecting real conditions.

Tab. 2. Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach eksperymentalnych oraz na podstawie analizy numerycznej badanych połączeń

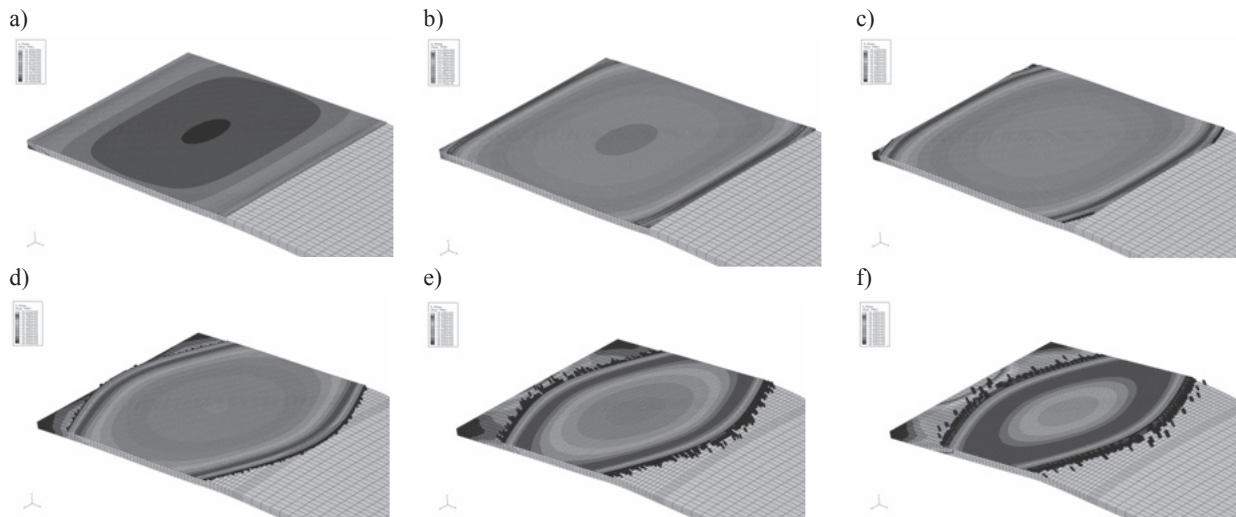
Tab. 2. Values of failure force derived from experimental and numerical analyses of the joints

Lp. No	Rodzaj połączenia klejowego Tested joint types	Wartość siły niszczącej oraz wartość odchylenia standardowego $\sigma$ w przypadku badań doświadczalnych Failure force value and standard deviation $\sigma$ in experimental tests [N]	
		badania doświadczalne Experimental tests	analiza numeryczna Numerical analysis
		1	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3, $g=0,64$ 2024PLT3 aluminium alloy, $g=0,64$
2	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3, $g=1,00$ 2024PLT3 aluminium alloy, $g=1,00$	4093 $\sigma=686$	4081
3	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0, $g=0,80$ 7075PLT0 aluminium alloy, $g=0,80$	2568 $\sigma=192$	2672
4	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0, $g=1,00$ 7075PLT0 aluminium alloy, $g=1,00$	2724 $\sigma=189$	3200

4.2. Inicjacja zniszczenia spoiny klejowej

Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń numerycznych określono również wartość obciążenia, przy którym następowała inicjacja procesu zniszczenia spoiny klejowej. Wartość siły inicjującej zniszczenie określono analizując stan odkształcenia warstwy kleju, przyjmując jako początek zniszczenia moment utraty sztywności elementów znajdujących się na końcach zakładki spoiny klejowej – rys. 4c.

Wybrane etapy niszczenia spoiny klejowej dla połączenia klejowego blach aluminiowych 2024 PLT3 przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wybrane etapy niszczenia spoiny klejowej  
Fig. 4. Stages of adhesive joint failure

Wartości wyznaczonych sił inicjujących proces zniszczenia spoiny klejowej dla analizowanych wariantów połączeń klejowych zestawiono w tabeli 3.

Na podstawie zamieszczonych w tabeli 3 wartości obciążenia można określić stosunek wartości obciążenia inicjującego zniszczenie spoiny do całkowitej siły niszczącej, przy której następuje zniszczenie połączenia klejowego. W analizowanych przypadkach początek zniszczenia spoiny klejowej następował w przedziale 91 ÷ 99 % wartości siły niszczącej.

4.2. Adhesive joint failure initiation

Basing on the results of numerical analysis, the value of load which initiated the failure process of the adhesive joint was determined. The failure force value was established by analysing the adhesive layer tension, considering the moment of rigidity loss of the elements on the edge of overlap section as failure initiation point – fig. 4c.

Figure 4 presents selected stages of adhesive joint failure for 2024 PLT3 aluminium sheets.

Values of adhesive joint failure initiation force for the analysed joint variants are compiled table 3.

Basing on load values presented in table 3 it is possible to determine the ratio of adhesive joint failure initiation force/joint failure force (under which the joint fails). In the analysed cases the joint failure initiation occurred within the range of 91 ÷ 99 % of failure force value.

Tab. 3. Wartości siły inicjującej zniszczenie określonej na podstawie analizy numerycznej badanych połączeń  
Tab. 3. Values of joint failure initiation force derived from experimental and numerical joints analyses

Lp. No	Rodzaj połączenia klejowego Tested bonded joint types	Wartość obciążenia / Load value [N]	
		siła inicjująca zniszczenie Failure initiation force	siła niszcząca Failure force
1	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3, g=0,64 2024PLT3 aluminium alloy, g=0.64	3812,6	3955
2	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3, g=1,00 2024PLT3 aluminium alloy, g=1.00	4052,1	4081
3	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0, g=0,80 7075PLT0 aluminium alloy, g=0.80	2440,0	2672
4	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0, g=1,00 7075PLT0 aluminium alloy, g=1.00	3040,0	3200

4.3. Rozkłady naprężenia w połączeniu klejowym

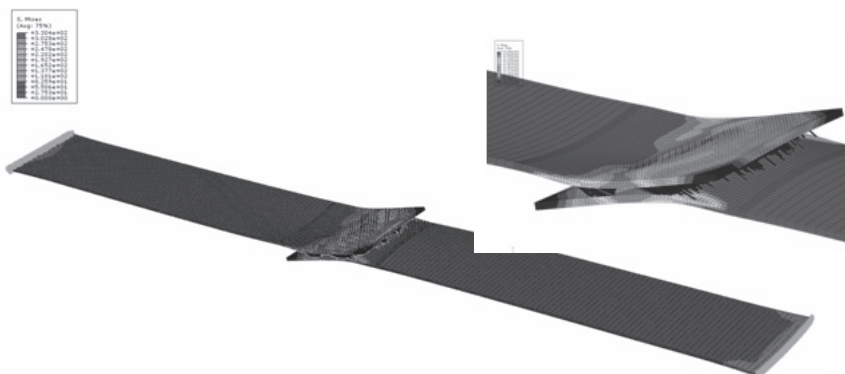
Przeprowadzona analiza numeryczna umożliwia obserwację rozkładów naprężenia w poszczególnych elementach struktury

4.3. Stress distribution in adhesive joints

Numerical analysis enables observation of stress distribution in particular structure elements of analysed adhesive joints.



badanych połączeń klejowych. Analizowano rozkłady naprężenia zredukowanego wg hipotezy wytrzymałościowej H-M-H na poszczególnych etapach obciążenia konstrukcji, które przykładowo przedstawiono na rys. 5 dla połączenia klejowego blach ze stopu aluminium 2024 PLT3.



Rys. 5. Wizualizacja procesu niszczenia połączenia klejowego blachy ze stopu aluminium 2024 PLT3 o grubości 0,64 mm  
Fig. 5. Visualisation of adhesive joint failure process for 0.64 mm thickness 2024 PLT3 aluminium alloy sheets

Zaprezentowane wyniki przedstawiają wizualizację stanu odkształcenia połączenia klejowego z umieszczoną mapą naprężenia zredukowanego, umożliwiającą analizę stopnia wyężenia poszczególnych elementów analizowanych połączeń klejowych. Otrzymane odkształcenie modelu numerycznego potwierdza stan odkształcenia obserwowany w trakcie badań wytrzymałościowych badanych połączeń klejowych.

Wykorzystując analizę numeryczną oraz odpowiedni sposób modelowania połączenia można analizować rozkłady naprężeń oraz obserwować mechanizm niszczenia spoiny klejowej wraz z określeniem w przybliżeniu wartości siły, przy której następuje początek (inicjacja) zniszczenia. Ze względów eksploatacyjnych znajomość ta jest bardzo istotna, ponieważ pozwala określić wartość obciążenia, eliminującego takie połączenie z dalszej eksploatacji.

## 5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej analizy numerycznej można zauważyć, iż:

- 1) zastosowany w obliczeniach numerycznych model spoiny klejowej umożliwia wizualizację odkształcenia połączenia klejowego oraz poszczególnych etapów niszczenia spoiny klejowej w funkcji obciążenia modelu;
- 2) przyjęty sposób modelowania połączenia klejowego zapewnia dużą zgodność (powyżej 90 %) ilościową i jakościową z wynikami prowadzonego równoległe eksperymentu w 3 analizowanych przypadkach (porównując wartość siły niszczącej uzyskaną w badaniach doświadczalnych z wynikami analizy numerycznej – tabela 2), natomiast w czwartym przypadku otrzymano zgodność wyników na poziomie powyżej 80 %. Uzyskana zgodność wyników potwierdza adekwatność opracowanych modeli numerycznych analizowanych połączeń klejowych blach ze stopów aluminium;
- 3) na podstawie zamieszczonych w tabeli 3 wyników można określić początek inicjacji zniszczenia spoiny klejowej, który w analizowanych połączeniach kształtuje się na poziomie powyżej 90 % wartości siły niszczącej.

Reduced stress distribution was analysed according to HMH hypothesis on particular stages of loading, presented in figure 5 for 2024 PLT3 aluminium alloy sheets.

Presented results visualise the adhesive joint strain state and reduced stress distribution mesh, which allows the analysis

of the degree of material effort for particular elements of analysed adhesive joints. The observed strain supports the results of adhesive joints strength tests and strains observable there.

Through numerical analysis as well as appropriate joint modelling it is possible to analyse stress distribution and monitor adhesive joint failure mechanism, including determining the approximate joint failure initiation force value. The knowledge of such dependencies is invaluable for functional purposes as it enables determining the value of load which would eliminate such a joint from further operation.

## 5. Conclusions

The conducted numerical analysis leads to several conclusions.

- 1) The adhesive joint model used in numerical analysis enables visualisation of adhesive bond strain as well as particular stages of joint failure through model loading.
- 2) The analysed adhesive joint modelling method ensures high quantitative and qualitative consistency (over 90%) with the results of simultaneously conducted test in 3 analysed variants (comparing failure force values for experimental and numerical tests – table 2); while in the fourth case the results consistency reached 80%. The concordance validates the adequacy of designed numerical models of analysed aluminium sheets adhesive joints.
- 3) Results compiled in table 3 determine adhesive joint failure initiation point, which, for analysed joints, occurs at the level of 90% of failure force value.

The conducted research indicate that numerical analysis should be considered as an invaluable tool, providing supplement and extension of experimental tests, regarding particularly the visualisation of adhesive joint behaviour undergoing failure

Przeprowadzone badania wykazują, że analiza numeryczna może stanowić cenne uzupełnienie i rozszerzenie badań doświadczalnych, zwłaszcza w zakresie możliwości wizualizacji zachowania się połączenia klejowego w procesie niszczenia, co podczas badań doświadczalnych, z zastosowaniem standardowych metod eksperymentalnych, w wielu przypadkach jest utrudnione lub niemożliwe.

processes. Observation of such occurrences in standard experimental research proves, in most cases, hindered if not impossible.

## 7. References

1. Abaqus 6.9 – Documentation.
2. Abaqus/Standard User's Manual version 6.5, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. 2005.
3. Cheuk P T, Tong L, Rider A N, Wang J. Analysis of energy release for fatigue cracked metal-to-metal double-lap shear joints. *Int. J. Adh. Adhesives* 2005; 56: 181-191.
4. Crocombe A D, Hua Y X, Loh W K, Wahab M A, Ashcroft I A. Predicting the residual strength for environmentally degraded adhesive lap joints. *Int. J. Adh. Adhesives* 2006; 26: 325-336.
5. Czaplicki J, Ćwikliński J, Godzimirski J, Konar P. Klejenie tworzyw konstrukcyjnych. Warszawa: WKiŁ, 1987.
6. de Morais A B, Pereira A B, Teixeira J P, Cavaleiro N C. Strength of epoxy adhesive-bonded stainless-steel joints. *Int. J. Adh. Adhesives* 2007; 27: 679-686.
7. de Moura M F S F, Daniaud R, Magalhaes AG. Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects. *Int. J. Adh. Adhesives* 2006; 26: 464-473.
8. Dębski H, Rudawska A. Analiza rozkładów naprężeń jednozakładkowym połączeniu klejowym. Rozdział nr 18 w monografii: „Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki” pod red. T. Niezgody. Warszawa: Redakcja Wydawnictw WAT, 2007.
9. Godzimirski J. Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. Warszawa WNT, 2002.
10. Godzimirski J, Tkaczuk S. Możliwości wykorzystywania MES do obliczania wytrzymałości połączeń klejowych. *Technologia i Automatyzacja Montażu* 2001; 2: 43-46.
11. Godzimirski J, Kozakiewicz J, Łunarski J, Zielecki W. Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1997.
12. Markiewicz I. Analiza połączenia spawanego zaprojektowanego metodami nośności granicznej. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2008;3: 12-21.
13. Mazurkiewicz D. Tests of extendability and strength of adhesive-sealed joints in the context of developing a computer system for monitoring the condition of belt joints during conveyor operation. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2010;3: 12-21.
14. Moura M F S F, Concalves J P M, Chousal J AG, Campilho R D S G. Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behavior of bonded joints. *Int. J. Adh. Adhesives* 2008; 28: 419-426.
15. Rudawska A, Kuczmaszewski J. Klejenie blach ocynkowanych. Lublin: Wydawnictwa Uczelniane PL, 2005.
16. Rudawska A, Dębski H. Modelowanie procesu zniszczenia spoiny klejowej w jednozakładkowym połączeniu klejowym blach aluminiowych. *Mechanik* 2010;2: 118-121.
17. Rusiński E, Czmochoński J, Smolnicki T. Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.
18. Ważny M, Jaształ M, Szajnar S. CFD-Fastran – narzędzie do numerycznej analizy opływu obiektów przez strumień powietrza. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2008;4: 55-62.
19. You M, Yan Z-M, Zheng X-L, Yu H-Z, Li Z. A numerical and experimental study of gap length on adhesively bonded aluminium double-lap joint. *Int. J. Adh. Adhesives* 2007; 27: 696-702.

---

**Dr inż. Anna RUDAWSKA**

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji  
Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Polska

**Dr inż. Hubert DĘBSKI**

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn  
Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Polska  
e-mail: a.rudawska@pollub.pl

---