

Maria BIŃCZYK, Henryk G. SABINIAK\*

## **WPLYW CIŚNIENIA WEWNĘTRZNEGO NA NOŚNOŚĆ POŁĄCZENIA KLEJOWEGO RUR MIEDZIANYCH**

Połączenia klejowe znajdują coraz szersze zastosowanie w technice łączenia materiałów. Obecnie technologia klejenia jest szeroko wykorzystywana w wielu gałęziach przemysłu, ponieważ umożliwia tworzenie lekkich struktur przenoszących duże obciążenia. Jednak zaprojektowanie odpowiedniego dla danej konstrukcji połączenia klejowego jest zadaniem złożonym. Wynika to z faktu, że wpływ na wytrzymałość połączenia klejowego ma wiele czynników w tym: właściwości mechaniczne (wytrzymałość adhezyjna i kohezyjna), sposób pracy połączenia klejowego, wymiary spoiny oraz materiałów klejonych. Określanie odpowiedniej nośności złącza klejowego przeprowadzane jest poprzez wykonanie wielokrotnych badań wytrzymałościowych. Równoległą metodą prognozowania wytrzymałości połączenia klejowego jest wykonanie analizy obliczeniowej np. numerycznej. Jej niepodważalną zaletą jest możliwość wprowadzania wielokrotnych zmian, np. do konstrukcji modelu bez przeprowadzania kosztownych badań empirycznych. Analiza numeryczna, choć nie daje możliwości uzyskania zależności ogólnych, pozwala obliczyć konkretny model, jeżeli znane są właściwości materiałów łączonych i kleju, a podział na elementy skończone został przeprowadzony prawidłowo. Analizę numeryczną wykonano wspomagając się programem Ansys Workbench 12.0 [2, 4].

### **1. MODEL NUMERYCZNY**

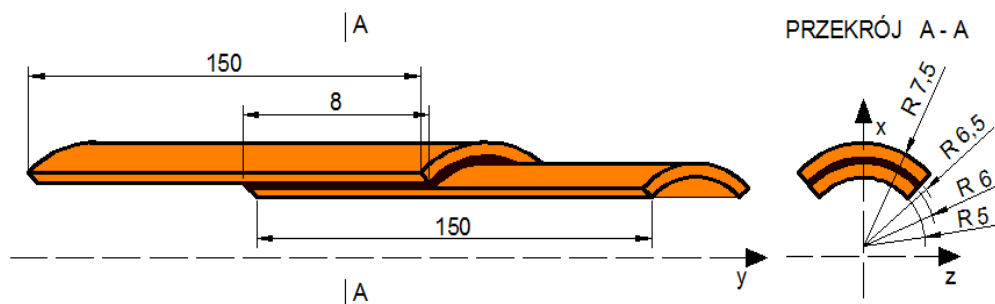
Metoda elementów skończonych jest szeroko stosowanym narzędziem obliczeniowym wspomagającym prace inżynierskie. Dlatego też, przy pomocy MES przeprowadzono analizę numeryczną modelu połączenia klejowego rur miedzianych obciążonych ciśnieniem wewnętrznym i temperaturą. Założono, że projektowane złącze klejowe ma pracować, jako połączenie w instalacji centralnego ogrzewania. Badania numeryczne przeprowadzono więc dla stałej temperatury (90 °C) oraz dla dwóch wielkości ciśnienia wewnętrznego (0,12 i 0,6 MPa) czynnika grzewczego.

Do celów analizy numerycznej zaprojektowano model składający się z dwóch miedzianych rur o długości  $l = 150$  mm i grubości ścianki  $\delta = 1$  mm. Średnica rury

---

\* Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, maria.binczyk@p.lodz.pl

wewnętrznej wynosi  $\phi = 10$  mm, natomiast rury zewnętrznej  $\phi = 13$  mm. Długość zakładki projektowanego złącza została wyznaczona z zależności znajdujących się w literaturze [1] i przyjęto wartość  $l_z = 8$  mm. Powierzchnia złącza klejowego wynosi  $A_{zł} = 602,88$  mm<sup>2</sup>, natomiast założona grubość spoiny to  $\delta_k = 0,5$  mm (rys. 1).

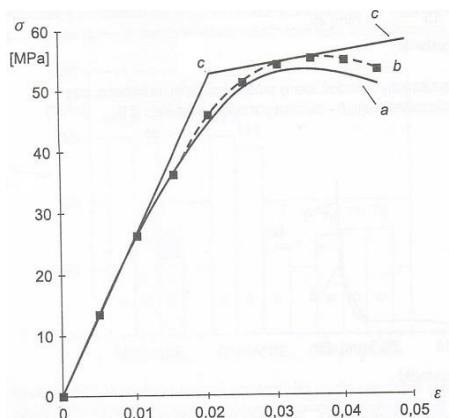


Rys. 1. Połączenie klejowe rur miedzianych – model

Do badań numerycznych wytrzymałości opisanego połączenia, niezbędne było określenie danych materiałowych kleju oraz materiałów klejonych. Z uwagi na to, że materiałem łączonym jest miedź, do analizy numerycznej przyjęto liniowo– sprężysty zakres jej pracy i stałość parametrów ( $E_m = 127$  GPa,  $\nu_m = 0,33$ ). Dane materiałowe dotyczące kleju zaczerpnięto z literatury [1]. Wynika to z faktu, że dla tworzyw polimerowych niezbędne właściwości materiałowe uzyskuje się na drodze doświadczalnej, poprzez wykonanie kosztownych badań wytrzymałościowych.

Dane uzyskane z literatury [1] dotyczą kleju epoksydowego Epidian 57 polimeryzowanego utwardzaczem Z-1. Podane w literaturze [1] wyniki badań obejmowały swoim zakresem uzyskaną doświadczalnie krzywą rozciągania kleju  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  (rys. 2). Dzięki temu możliwe było określenie i przyjęcie wartości modułu sprężystości kleju  $E_{k\acute{s}r} = 2,3$  GPa oraz współczynnika Poissona  $\nu_k = 0,35$ . Obliczony został moduł sprężystości postaciowej, który wyniósł  $G_k = 0,85$  GPa.

Rzeczywistą krzywą rozciągania kleju zastąpiono charakterystyką dwuliniową ((c) rys. 2), która zachowuje zależność liniowo – sprężystą do wartości  $R_{ek} = 55$  MPa (punkt c na rys. 2).



Rys. 2. Krzywa rozciągania kleju epidian 57 (a) oraz krzywa naprężeń rzeczywistych (b) i jej uproszczona dwuliniowa charakterystyka (c) [1]

## 2. MODEL NUMERYCZNY POŁĄCZENIA KLEJOWEGO

### 2.1. WSTĘP DO ANALIZY

Warunkiem otrzymania prawidłowych wyników przeprowadzanej analizy numerycznej jest zbudowanie modelu połączenia najbardziej zbliżonego swoimi parametrami do rzeczywistego obiektu. Ważne jest także zadanie właściwych warunków brzegowych oraz przyjęcie odpowiedniej siatki elementów skończonych, która będzie właściwie zagęszczona w przewidywanych strefach spiętrzeń naprężeń [6].

Podczas wykonywania analizy numerycznej przy użyciu programu Ansys Workbench możemy wyodrębnić cztery etapy, które ułatwią zapoznanie się z procesem tworzenia budowy modelu obliczeniowego.

Pierwszym krokiem jest podjęcie wstępnych decyzji, takich jak:

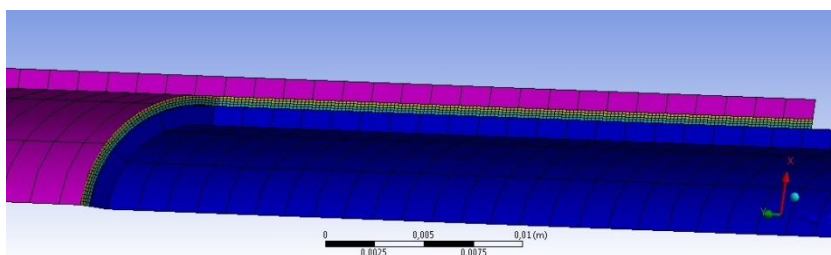
- Ustalenie typu analizy – dla opisywanego przypadku została wybrana analiza statyczna (tzw. *Static Structural*). Umożliwia ona wyznaczenie statycznych skutków zewnętrznych oddziaływań na konstrukcję, pracującą w zakresie sprężystym.
- Budowa modelu geometrycznego – zaprojektowany model przedstawiony został na rys. 2.

### 2.2. SIATKA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH I WARUNKI BRZEGOWE

Etapem drugim w tworzeniu symulacji jest dokładne zdefiniowanie danych, które program ma rozwiązać, jako zadanie. W tym celu należy:

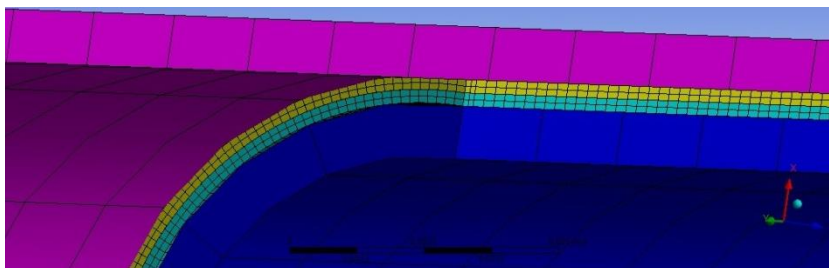
- Zdefiniować i przypisać właściwości materiału do elementów modelu.

b) Zanalizować dobraną siatkę elementów skończonych. Przy wprowadzaniu do programu geometrii przestrzennej modelu, program automatycznie generuje siatkę bryłową (składającą się z ostrosłupów lub sześciątów). Dla opisywanego modelu została wybrana siatka składająca się z elementów typu 186 (dwudziestowęzłowych). Mają one kształt sześciątów – są to tzw. elementy typu *hexahedral* (rys. 3), a każdy węzeł siatki posiada trzy stopnie swobody (czyli może przemieszczać się w kierunku osi  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Wybór takich elementów według literatury [3], umożliwia uzyskanie najdokładniejszych wyników.



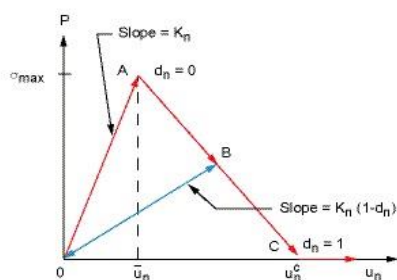
Rys. 3. Model numeryczny – siatka elementów skończonych

Ponieważ w połączeniach klejowych pojawiają się zmiany naprężeń wzdłuż grubości spoiny, dlatego zgodnie z zaleceniem do literatury [4], należy modelować spoinę klejową co najmniej dwoma warstwami elementów (rys. 4). Ilość elementów siatki w warstwie kleju wyniosła 34776 i mają one wymiary 0,001 m. Wyjątkiem są elementy siatki występujące na krańcach spoiny klejowej. W wyniku spodziewanych dużych wzrostów naprężeń na jej brzegach, siatka musiała zostać zagęszczona i elementy w tym obszarze mają wymiary 0,0001 m. W rurze miedzianej, gdzie nie występuje koncentracja naprężeń siatka elementów skończonych nie musi być tak zagęszczona jak w spoinie klejowej. Dlatego dla rury wewnętrznej i zewnętrznej wygenerowano odpowiednio po 114 elementów. Wymiary elementów siatki dla rur wynoszą 0,004 m.



Rys. 4. Siatka elementów skończonych – zagęszczenie elementów na brzegu spoiny klejowej

W celu odwzorowania właściwości kleju, do budowy modelu numerycznego spoiny wykorzystano elementy skończone typu *cohesive* (mające 6 stopni swobody). Umożliwiają one wizualizację i analizę procesu zniszczenia, wraz z określeniem siły, przy której nastąpi inicjacja zniszczenia. Użyta funkcja *cohesive zone mode* pozwoliła na zastosowanie modelu materiału kleju, dla którego zdefiniowano charakterystykę zawierającą opis inicjacji zniszczenia do momentu całkowitej utraty sztywności (rys. 5). Maksymalne naprężenie normalne osiągnięte jest w punkcie A (punkt inicjacji zniszczenia), gdzie następuje rozwarstwienie kończące się w punkcie C (tam naprężenie normalne wynosi zero). W przeprowadzanych obliczeniach numerycznych punkt inicjacji zniszczenia spoiny A (rys. 5) odpowiada punktowi C (rys. 2) na charakterystyce właściwości materiałowych kleju Epidian 57 [5, 6].



Rys. 5. Wykres zniszczenia materiału - zależności separacji od siły rozrywającej

c) Zastosować obciążenia i warunki podparcia konstrukcji – warunkiem poprawnie przeprowadzonych obliczeń jest właściwe zadanie obciążeń i warunków brzegowych. Przy niewłaściwym zadaniu warunków brzegowych może nastąpić np. globalne przesunięcie i powstać w ten sposób osobliwość numeryczna. Przesztywnienie układu prowadzi natomiast do koncentracji naprężeń. Przy obliczeniach MES w programie Ansys Workbench zastosowano warunki brzegowe typu *Fictionless Support* (tzw. podparcie bez tarcia). Warunki te zostały zdefiniowane poprzez zablokowanie skrajnych powierzchni równoległych do osi  $y$ . Model został obciążony ciśnieniem (funkcja *Hydrostatic Pressure*) 0,12 MPa oraz 0,6 MPa, równomiernie po wewnętrznej stronie modelu, przy temperaturze otoczenia  $90^{\circ}\text{C}$  i gęstości cieczy  $\rho = 965,3 \text{ kg/m}^3$  [3].

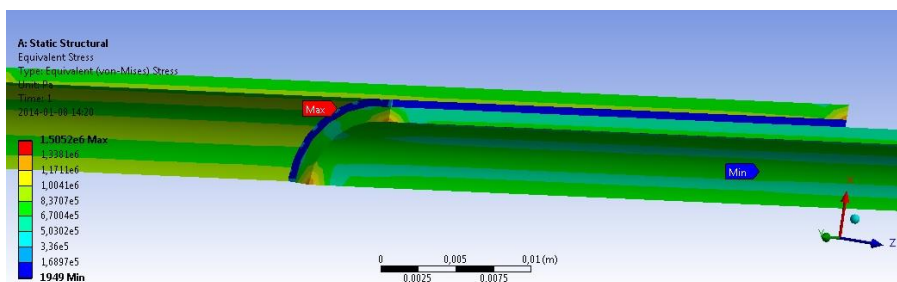
d) Opracować wyniki – w przeprowadzonej symulacji wyniki obejmowały informacje o występujących w spoinie naprężeniach i deformacjach.

### 3. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

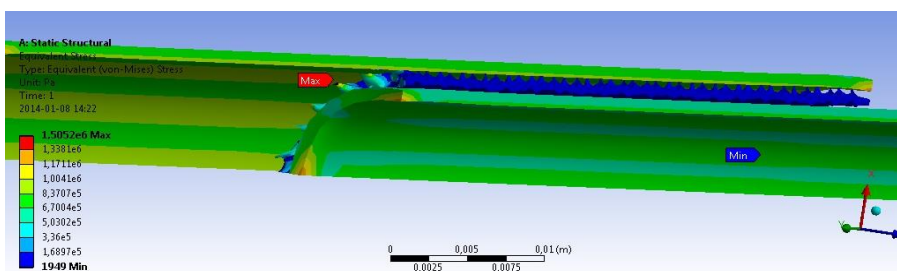
Trzecim etapem przeprowadzanej symulacji jest rozwiązywanie przez program zadania, a czwartym przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników. Analiza wyników (*Solution*) zawiera: deformację (*Total Deformation*) warstwy kleju oraz występujące

naprężenie zastępcze według hipotezy HMH (*Stress Equivalent – von Mises*). Proces zniszczenia rozpatrywany jest dla krótkiego czasu obciążenia złącza i nie uwzględniana jest długotrwała praca złącza, jaka ma miejsce przy eksploatacji instalacji centralnego ogrzewania. Uzyskane wyniki dotyczące naprężeń pokazują, że złącze klejowe dla danej grubości i długości spoiny oraz obciążone ciśnieniem 0,12 MPa, nie ulegnie zniszczeniu. Również przy zwiększeniu ciśnienia do 0,6 MPa, nie zachodzi zniszczenie spoiny.

Wykorzystując wyniki badań dotyczących kleju Epidian 57 zamieszczonych w publikacji [1], wiadomo (z rys.1), że granica plastyczności wynosi  $R_{ek} = 55$  MPa i jest to wartość o wiele większa od wartości naprężeń zredukowanych uzyskanych według hipotezy HMH, gdzie maksymalna ich wartości (dla ciśnienia instalacyjnego 0,12MPa) wynosi 1,5 MPa, a minimalna 0,0019 MPa (rys.6 i rys.7).



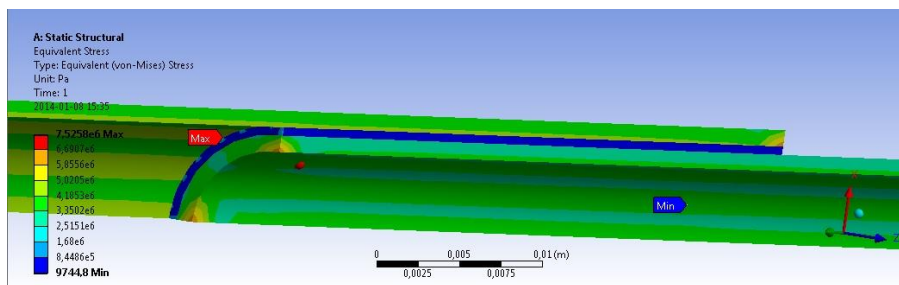
Rys. 6. Naprężenia zredukowane według hipotezy HMH w skali 1:1 dla ciśnienia wewnętrznego 0,12 MPa



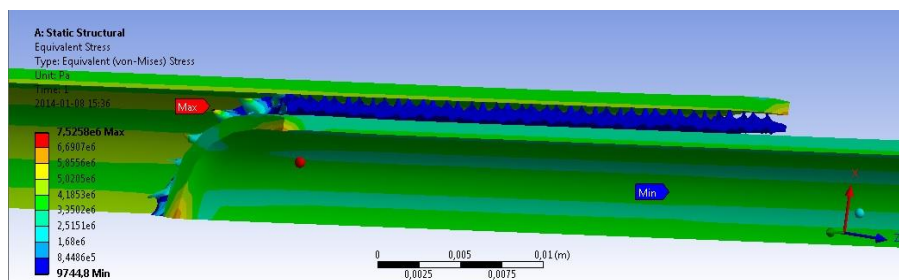
Rys. 7. Naprężenia zredukowane według hipotezy HMH w skali 4500:1 dla ciśnienia wewnętrznego 0,12 bar

Naprężenia zredukowane według hipotezy HMH uzyskane w analizie dla ciśnienia wewnętrznego 0,6 MPa wynoszą: maksymalne 7,5 MPa, a minimalne 0,0097 MPa (rys. 8 i rys. 9). W obu przypadkach dopiero przy bardzo dużej skali widoczne są mikro zmiany występujące w spoinie klejowej. Na załączonych rysunkach widoczne jest, że największe naprężenia w spoinie klejowej występują na jej wewnętrznej krawędzi,

tam gdzie jest bezpośredni kontakt kleju z czynnikiem grzewczym. Zostało to uwzględnione przy projektowaniu siatki elementów skończonych, poprzez jej zagęszczenie na krańcach spoiny klejowej.



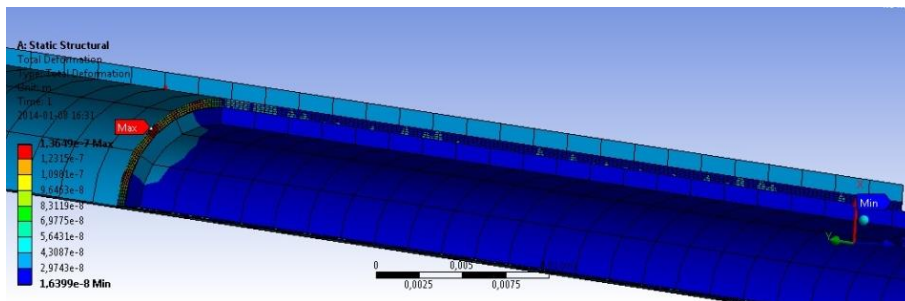
Rys. 8. Naprężenia zredukowane według hipotezy HMM w skali 1:1 dla ciśnienia wewnętrznego 0,6 MPa.



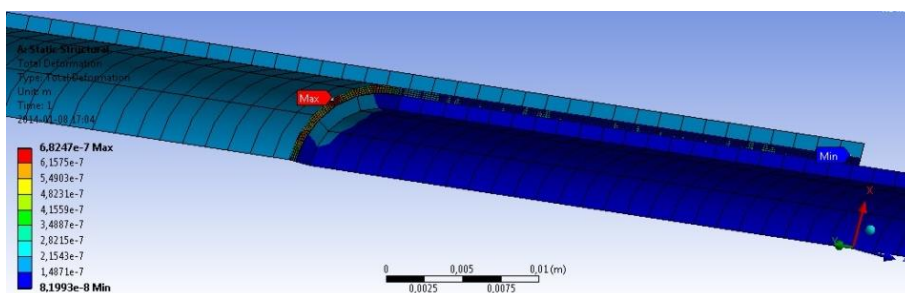
Rys. 9. Naprężenia zredukowane według hipotezy HMM w skali 9000:1 dla ciśnienia wewnętrznego 0,6 MPa.

Przeprowadzona analiza numeryczna wykazała, że największa deformacja (*Total Deformation*) spoiny klejowej pojawia się w miejscu występowania największych naprężeń. Dla ciśnienia roboczego 0,12 MPa maksymalna deformacja spoiny klejowej jest na poziomie  $1,36 \cdot 10^{-7}$  m, a minimalna  $1,64 \cdot 10^{-8}$  m (rys. 10). Natomiast dla ciśnienia roboczego 0,6 MPa maksimum wynosi  $6,82 \cdot 10^{-7}$  m, a minimum  $8,20 \cdot 10^{-8}$  m (rys. 11).





Rys. 10. Deformacja w skali 1:1 dla ciśnienia wewnętrznego 0,12 MPa



Rys. 11. Deformacja w skali 1:1 dla ciśnienia wewnętrznego 0,6 bar

Dzięki badaniom numerycznym uzyskane zostały wizualizacje pracy spoiny klejowej oraz wartości występujących naprężeń. Analizowane złącze osiągnęło największe maksymalne naprężenia równe 7,5 MPa (dla ciśnienia 0,6 MPa). Na krzywej rozciągania złącza klejowego punkt ten znajduje się na odcinku wspólnym dla charakterystyki nieliniowej oraz przyjętej dwuliniowej (rys. 2). Świadczy to o tym, że uproszczony model pracy złącza klejowego został przyjęty poprawnie. Wyniki otrzymane w analizie numerycznej mogą być podstawą do przeprowadzenia badań eksperymentalnych dla złączy klejowych pracujących w warunkach pracy instalacji grzewczych.

#### LITERATURA

- [1] GODZIMIRSKI J., *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*. WNT, Warszawa 2002, 89-96.
- [2] GODZIMIRSKI J. TKACZUK S., *Określanie właściwości mechanicznych spoin klejowych*. Technologia i Automatyzacja montażu (2004) 3 i 4, 95-97.
- [3] ŁACZEK S., *Przykłady analizy konstrukcji w systemie MES Ansys Workbench v. 12.1*. Politechnika Krakowska 2012, 72-97.
- [4] ROŚKOWICZ M., *Wytrzymałość długotrwała połączeń klejowych*. Rozprawa doktorska. WAT Warszawa 2004, 20-35.



- [5] RUDAWSKA A., DĘBSKI H., *Modelowanie procesu zniszczenia spoiny klejowej w jednozakładkowym połączeniu klejowym blach aluminiowych*. *Mechanik* (2010) 2, 118-121.
- [6] WŁODARCZYK M. FISIĄK J., *Analiza wpływu charakterystyki materiału kleju na rozkład naprężenia w połączeniu klejowym*. *Eksploatacja i Niezawodność* (2/2005), 72 – 77.

#### NUMERICAL MODEL OF CYLINDRICAL LAP JOINT OF COPPER PIPES

Article presents numerical model of cylindrical lap joint of copper pipes created using Ansys Workbench 12.0 software. The purpose of the numerical analysis is to examine if for a given bonded joint, temperature 90 deg Celsius and different pressures (work conditions of heating installations) the bonded joint will be durable. Conducting numerical analysis will enable to narrow down the experimental research.