

Określanie rozkładu odkształceń i naprężeń w spoinach stalowych paneli typu sandwich metodą MES

FEM modeling of stress and strain distribution in the welds of steel sandwich

Streszczenie

Rozwój technologii spawania laserowego umożliwił masową produkcję konstrukcji cienkościennych, w tym również stalowych paneli sandwich. Technologia wykonywania spoin łączących poszycia paneli z usztywnieniami daje możliwość uzyskania łączenia o szczególnej geometrii i właściwościach materiałowych. Złącza spawane laserowo, w porównaniu ze spoinami innego typu, charakteryzują się specyficznym sposobem zachowania pod obciążeniem zmiennym, a w konsekwencji – odmiennym sposobem niszczenia zmęczeniowego. Podstawą analizy zmęczeniowej złącza laserowego było określenie koncentracji naprężeń w krawędziach. W tym celu zbudowano model numeryczny MES spoiny laserowej. W artykule przedstawione zostały kluczowe aspekty modelu numerycznego i wyniki dotyczące wpływu sposobu modelowania na odkształcenia i naprężenia w krawędziach. Dla karbu w grani spoiny wyniki teoretyczne porównano z danymi eksperymentalnymi rozkładów odkształceń otrzymanymi techniką laserowej ekstensometrii siatkowej.

Abstract

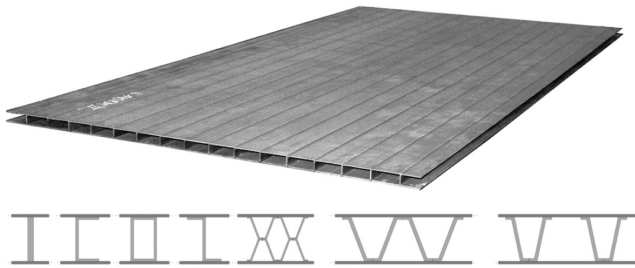
A development of laser welding technology has enabled mass production of thin-walled structures, including steel sandwich panels. Technology of welding sheathing panels with stiffening results of joints with a specific geometry and material properties. Laser-welded joints in comparison with other types of joints, characterize by a specific way of changing properties under load, and as a consequence – a different way of fatigue damage. Fatigue analysis determines the stress concentration in the notch in the laser welded joint. For this purpose, a model of numerical FEM laser weld is build. The article presents the main aspects of the numerical model and the results concerning the influence of the way of modeling on the deformation and stresses in the notch. For the notch in the root of weld, numerical results with experimental data of strain distributions obtained by the laser extension grid technique are compared.

Wstęp

Ekonomiczna potrzeba zmniejszenia masy konstrukcji w znacznym stopniu przyczynia się do rozwoju technik ich wytwarzania. Przykładem jest wprowa-

dzenie do masowej produkcji stalowych paneli typu *sandwich*. Są to dwupowłokowe struktury, które pomiędzy bardzo cienkimi poszyciami (np. 2,5 mm) zawierają usztywnienia o różnej geometrii (rys. 1).

Zaletą tego materiału konstrukcyjnego jest korzystna relacja sztywności do masy. Idea metalowych konstrukcji sandwich jest analogiczna do budowy elementów z tworzyw sztucznych i polega na zastąpieniu jednej blachy poszycia dwiema znacznie cieńszymi, odśniętymi na pewną odległość, co zwiększa wskaź-



Rys. 1. Stalowy panel typu sandwich i różne przekroje poprzeczne [1]

Fig. 1. Steel "Sandwich" panel and various cross-sections [1]

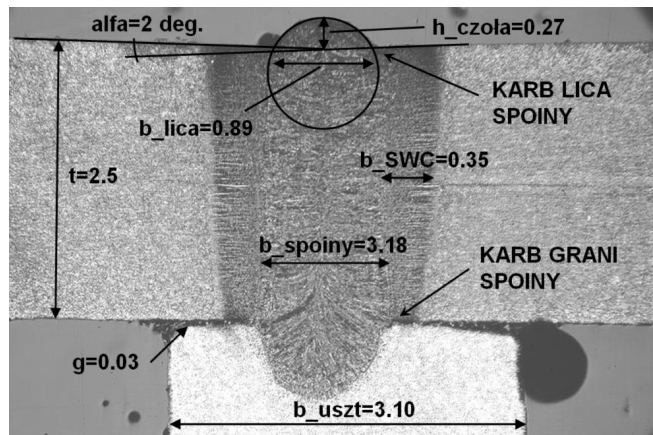
nik wytrzymałości na zginanie i sztywność (rys. 1). Zastosowanie paneli sandwich umożliwia redukcję masy konstrukcji, ale także m.in. zminimalizowanie odkształceń spawalniczych, lepszą ochronę antykorozyjną i integrację wewnątrz struktury instalacji (rury, przewody). Stalowe panele sandwich są często stosowane m.in. na: międzypokłady statków handlowych, pokłady statków rzecznych, balkony na statkach pasażerskich, tarasy i balkony dostawiane do budynków, rampy na parkingach automatycznych, mosty, elementy wagonów i budynków. Jednak jak w każdym nowym rozwiązaniu, wraz z zaletami, pojawiają się również problemy.

Do najważniejszych z nich należy ocena nowych struktur jako nośnych elementów konstrukcyjnych i jej eksperymentalna weryfikacja [9, 11]. Jednymi z najważniejszych problemów, oprócz połączeń między panelami i panelami a konstrukcją klasyczną, są trudności w ocenie trwałości zmęczeniowej. Elementarnymi połączeniami paneli są spoiny laserowe łączące poszycia z usztywnieniami. Integralność tych połączeń decyduje o zdolności konstrukcji do przenoszenia obciążeń i ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa.

Złącza spawane

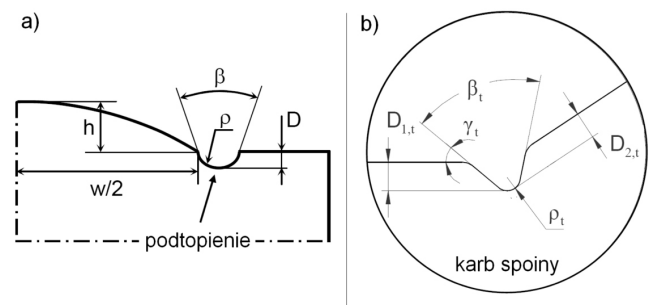
Spoiny, wykonane przy zastosowaniu wiązki laserowej, łączące poszycia z usztywnieniami, wykonywane są od strony poszycia (rys. 2). Bardzo duża gęstość strumienia wiązki światła powoduje powstanie połączenia o wyjątkowej geometrii i właściwościach wytrzymałościowych. Na rysunku 2 można zauważyć, że spoinę charakteryzuje niewielka szerokość, wąska strefa wpływu ciepła oraz karby lica i grani. Zaobserwować można również różnice w strukturze materiału w poszczególnych strefach złącza.

Ze względu na trwałość zmęczeniową analizowanego połączenia najbardziej istotnymi elementami są karby geometryczne – lica i grani spoiny (rys. 2). Kształty karbów poszczególnych spoin wykonanych przy użyciu tej samej technologii można opisać za pomocą zależności geometrycznych (rys. 3). Opisy te dotyczą spoin łączących elementy o grubości 5 mm i większej. Dla geometrii karbów połączeń cieńszych elementów (w tym spoin paneli sandwich) nie znaleziono opisów w literaturze. Jednocześnie z analizy geometrii



Rys. 2. Przekrój poprzeczny spoiny laserowej (mm)

Fig. 2. Laser weld cross section, dimensions (mm)



Rys. 3. Geometria karbu wg: a) Goscha, Petershagena, b) Remesa [2]

Fig. 3. Description of the notch geometry acc. to: a) Gosch, Petershagen, b) Remes [2]

karbów spoin paneli sandwich, wykonanej przy stukrotnym powiększeniu przekrojów spoin, wynika, że pomimo powtarzalności geometrii spoiny, geometrie samych karbów różnią się od siebie znacząco.

Spoiny laserowe poza nietypową geometrią charakteryzują się dużym gradientem twardości, a co za tym idzie – różnymi właściwościami wytrzymałościowymi poszczególnych stref: materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła i spoiny [3].

Taka odmienność spoin laserowych od połączeń wykonywanych innymi metodami wpływa w znacznym stopniu na ich właściwości zmęczeniowe.

Właściwości zmęczeniowe spoiny

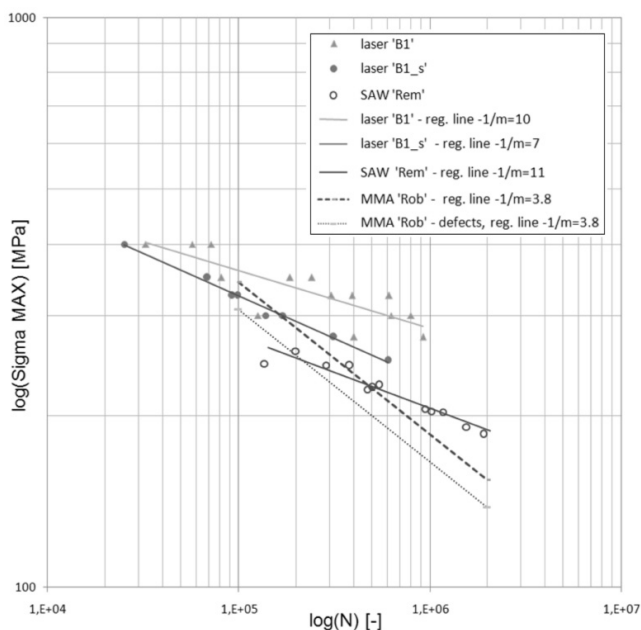
Złącza laserowe wyróżniają się innym niż połączenia klasyczne sposobem pękania zmęczeniowego [1]. W zależności od sposobu obciążenia wyróżniono różne modele pękania. Dodatkowo przy obciążeniu zginającym spoinę dochodzi do lokalnego obciążenia wewnętrznej powierzchni poszycia na skutek kontaktu z krawędzią usztywnienia. Następnie wykonano badania dla obciążenia panelu siłami osiowymi. Jest to podstawowy i główny stan obciążenia paneli jako elementów pokładów statków.

W porównaniu z połączeniami wykonywanymi innymi metodami (MIG/MAG, SAW, MMA) spoiny laserowe wyróżnia większa trwałość zmęczeniowa. Na rysunku 4 przedstawiono krzywe Wöhlera połączeń laserowych w odniesieniu do złączy doczołowych wykonywanych różnymi metodami spawania: łukiem krytym pod topnikiem (SAW) oraz elektrodą otuloną (MMA). Zaobserwować można, że spoiny laserowe mają znacząco wyższą trwałość zmęczeniową, a równanie prostej regresji ma współczynnik kierunkowy bliski prostej regresji dla metody SAW.

Brak jest pozycji literaturowych dotyczących oceny trwałości zmęczeniowej spoin laserowych. Dobrze poznane i częściowo wdrożone do przemysłu zostały metody obliczania trwałości zmęczeniowej połączeń o grubościach większych niż 5 mm [5]. Najnowsze prace dotyczące określania trwałości zmęczeniowej spoin laserowych nietypowo wykorzystują *metodę liniowej mechaniki pękania*, lecz obejmują elementy o znacznie większych grubościach niż poszycia stalowych paneli sandwich [2].

Do oceny trwałości zmęczeniowej spoin laserowych metodami lokalnymi pomocne jest określenie naprężeń i/lub odkształceń w karbie oraz wyznaczenie współczynnika koncentracji geometrycznej.

Do określenia lokalnych naprężeń i odkształceń w spoinie można użyć metod doświadczalnych (metody LES [6]) lub numerycznych. Do analizy naprężeń i odkształceń w karkach wybrano metodę numeryczną MES.



Rys. 4. Wykres Wöhlera dla spoin wykonanych różnymi metodami, badania własne [2,12]

Fig. 4. Wöhler chart for welds made with various methods, obtained experimentally and acc. to [2, 12]

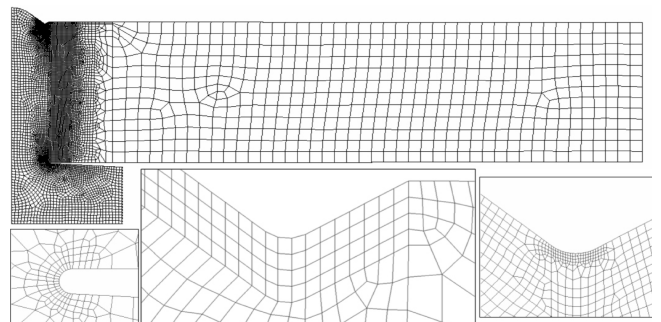
Numeryczny model spoiny

Do określenia odkształceń i naprężeń lokalnych wokół karków spoin laserowych użyto programu ANSYS wykorzystującego MES. Geometria modelu odpowiada spoinie laserowej stalowych paneli sandwich o grubości poszycia 2,5 mm.

Ze względu na cel obliczeń najważniejszymi założeniami dla modelu numerycznego są:

- warunki obciążenia (osiowe, zginanie występuje tylko wskutek wstępnej niewspółliniowości poszycia po obu stronach spoiny);
- sposób modelowania 2D/3D – przeprowadzenie zarówno analizy uproszczonej (w płaskim stanie naprężenia i płaskim stanie odkształcenia), jak i analizy trójwymiarowej modelu brylowego. Celem było sprawdzenie, w jakim stopniu uproszczenia zagadnienia do problemu płaskiego wpływają na wyniki. Potencjalnie wpływ ten może być istotny biorąc pod uwagę znaczne wartości koncentracji naprężeń i odkształceń w karkach;
- siatka elementów skończonych – do modelowania 2D użyto elementu PLANE82 (8-węzłowy), natomiast w modelu 3D zastosowano element SOLID186 (20-węzłowy). Zastosowano możliwie regularną siatkę składającą się z elementów czworobocznych (2D) i heksagonalnych (3D), zagęszczoną w pobliżu spoiny, szczególnie wokół karków. Największy element miał bok równy 0,2 mm, a najmniejszy 0,001 mm. Obliczenia wykonano na różnych siatkach, aby sprawdzić jej wpływ na wyniki. Przykładowe siatki modelu wraz z detalami przedstawiono na rysunku 5;
- obciążenia i warunki brzegowe – zarówno podczas obliczeń dwuwymiarowych, jak i trójwymiarowych skorzystano z warunku symetrii w osi spoiny. Obciążenie przykładano w postaci sił skupionych do węzłów swobodnego końca poszycia tak, aby sumaryczne obciążenie odpowiadało naprężeniu nominalnemu 168 MPa. Jest to wartość maksymalnego naprężenia nominalnego przyłożonego podczas rejestracji rzeczywistych odkształceń spoiny laserowym ekstensometrem siatkowym (LES) [3].

Przy jednakowych wartościach obciążenia możliwe jest porównanie wyników numerycznych



Rys. 5. Siatka modeli MES użyta do obliczeń i powiększenia detali
Fig. 5. Finite Element Models grid used for calculations of details and magnification

z otrzymanymi eksperymentalnie. W przypadku obliczeń 3D w płaszczyźnie wyciętego plasterka spoiny na jednej z powierzchni ograniczono stopień swobody w kierunku do niej prostopadłym. Jednocześnie przez równania wiążące (CE) zadano warunek równoległości drugiej płaszczyzny do tej, na której zadano warunek ograniczenia przemieszczenia. Dzięki temu zapewniono 3-osiowy stan odkształceń i naprężeń elementów;

- model materiałowy – modelowanie złączy laserowych ze względu na gradient twardości w strefach wymaga rozpatrzenia celowości uwzględnienia różnych właściwości materiałowych dla materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła i spoiny [2, 3]. W modelu numerycznym przyjęto nieliniowy model umocnienia izotropowego wg hipotezy Hubera-Misesa. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla poszczególnych stref spoiny przyjęto zgodnie z krzywymi odkształcenie–naprężenie uzyskanymi z zależności Ramberga–Osgooda na podstawie cyklicznych badań zmęczeniowych (rys. 7) [10]:

$$\varepsilon_{ac} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'}$$

gdzie: ε_{ac} , ε_{ae} , ε_{ap} – amplituda odkształcenia całkowitego; sprężystego, plastycznego; σ_a – amplituda naprężenia; K' – współczynnik umocnienia; n' – wykładnik umocnienia.

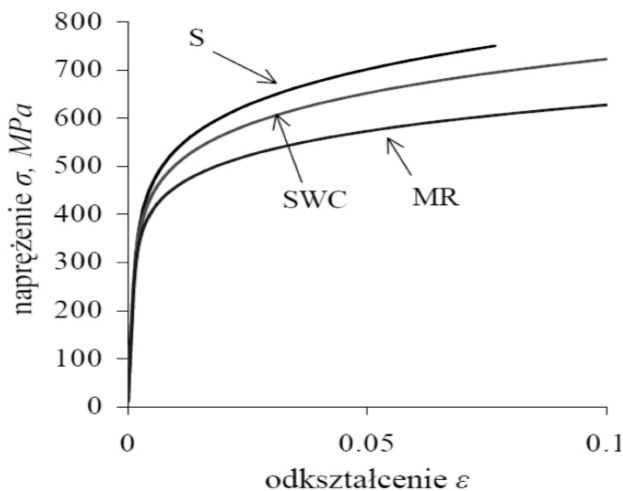
- karby – w miejscach gwałtownych zmian geometrii (np. ostre załamania) występują osobliwości numeryczne, w których uzyskane wyniki są nieprawdziwe. W celu obliczenia odkształceń i naprężeń w miejscach karbów, zamiast kształtu rzeczywistego przyjmuje się zaokrąglenia. Przy obliczeniach trwałości zmęczeniowej w metodach podejścia lokalnego dla blach o grubości większej niż 5 mm

stosuje się zaokrąglenia o wartościach najczęściej 1 mm [5]. Przyjmowane są też inne wartości zaokrąglenia, a nawet geometrie zastępujące obrys rzeczywistego karbu fikcyjnym karbem o zarysie kołowym ze specjalnie dobraną wartością promienia. Ze względu na specyfikę geometrii teowego połączenia spawanego laserowo zarówno zaokrąglenia, jak i koncentraty kołowe w modelu muszą mieć znacznie mniejsze wymiary, niż dla połączeń opisywanych w literaturze [2, 5]. Wartości zaokrąglenia karbów i geometrii zastępczych dla spoin laserowych stalowych paneli sandwich nie zostały dotąd opublikowane. W prezentowanym modelu przyjęto geometrie karbów odwzorowujące ich rzeczywisty kształt: promień lica spoiny równy 0,02 mm i promień grani 0,005 mm.

Wyniki obliczeń

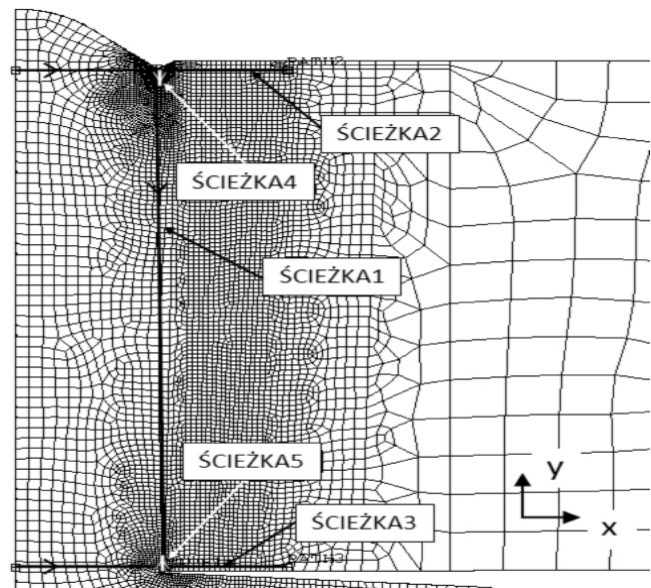
Wyniki obliczeń dotyczą stanu obciążenia siłami rozciągającymi odpowiadającymi naprężeniu nominalnemu 168 MPa – dla celów porównawczych z wynikami odkształceń w karbie grani spoiny uzyskanymi eksperymentalnie [3]. Zakres przedstawionych w artykule wyników obejmuje wpływ sposobu modelowania na odkształcenia i naprężenia. Wartości nieuśrednionych naprężeń i odkształceń w elementach wzdłuż osi x i y analizowano na reprezentatywnych ścieżkach (rys. 7), a ich wyniki przedstawiono w formie wykresów (rys. 8÷11).

Na rysunkach zastosowane zostały następujące oznaczenia: EPTO – odkształcenie całkowite (suma odkształceń sprężystych i plastycznych), *pstress* – model w płaskim stanie naprężeń, *pstrain* – model w płaskim stanie odkształceń, *solid* – model bryłowy, S – wartość naprężeń wzdłuż osi x (SX) i osi y (SY), s – długość wzdłuż ścieżki wg oznaczeń kierunków na rysunku 7.



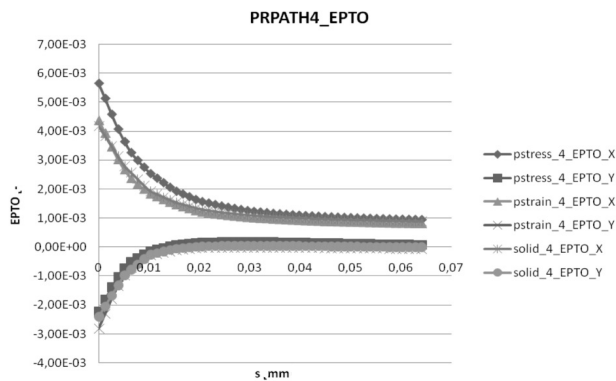
Rys. 6. Wykresy odkształcenie–naprężenie dla poszczególnych stref spoiny laserowej [3]

Fig. 6. Stress–strain charts for each zone of laser welds [3]

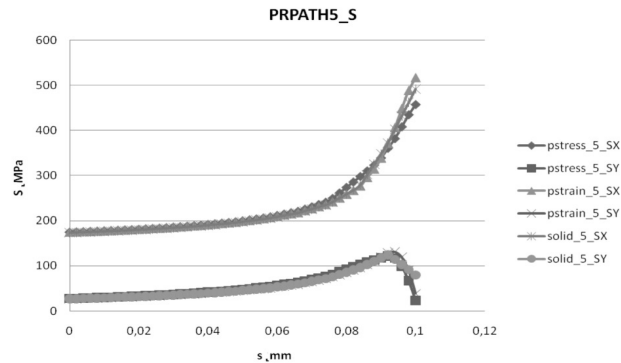


Rys. 7. Ścieżki analizowane podczas obliczeń numerycznych

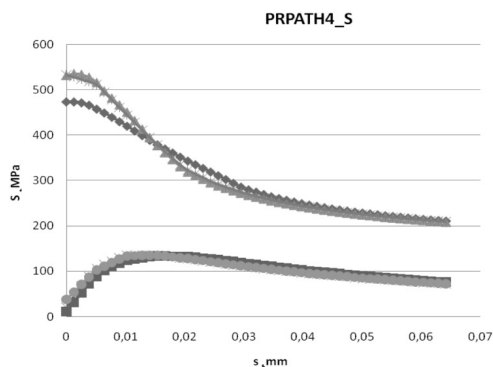
Fig. 7. Paths analyzed in the numerical calculations



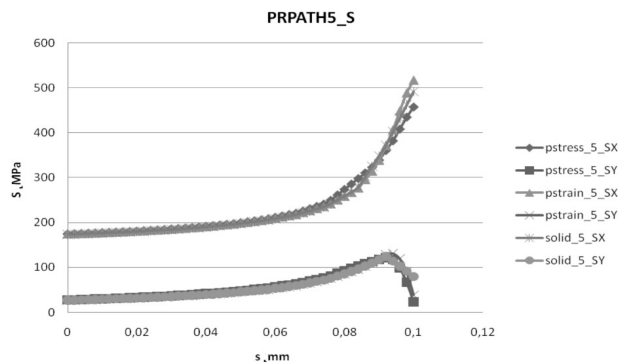
Rys. 8. Odształcenia całkowite (EPTO) dla ścieżki 4
Fig. 8. Total deformation (EPTO) for path 4



Rys. 10. Odształcenia całkowite (EPTO) dla ścieżki 5
Fig. 10. Total deformation (EPTO) for path 5



Rys. 9. Naprężenia na kierunku osi x i y dla ścieżki 4
Fig. 9. The stresses on the x and y axes directions for path 4



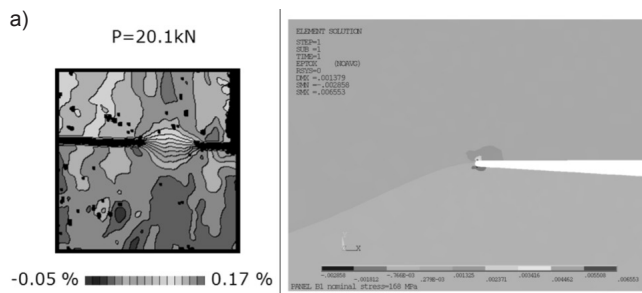
Rys. 11. Naprężenia dla ścieżki 5
Fig. 11. The stresses for path 5

Wyniki przedstawione na rysunkach 8-11 wskazują, że modelowanie w płaskim stanie odkształcenia pozwala uzyskać bardzo zbliżone wartości odkształceń i naprężeń w karbie do wartości z modelu bryłowego. Wynika to z lokalnego oddziaływania karbów.

Na rysunku 12 zestawiono numeryczne wyniki (modelu w płaskim stanie naprężeń) odkształceń w pobliżu karbu grani spoiny z mapą odkształceń uzyskanych eksperymentalnie dla podobnego połączenia [3]. W obu przypadkach naprężenia nominalne wynoszą 168 MPa. W samym karbie porównanie wyników jest niemożliwe ze względu na przekroczenie zakresu maksymalnych odkształceń w metodzie *laserowej ekstensometrii siatkowej* (LES). W karbie odkształcenia nie są takie same, jednak ich wartości są do siebie zbliżone (różnice sięgają 25%). Ze względu na znaczne różnice rzeczywistych geometrii karbów, wynikające z procesów technologicznych, celowe wydaje się rozważenie modelowania karbu geometrią zastępczą. W przypadku stosowania zaokrąglenia karbu, wpływ wartości promienia, jak i wielkości elementów skończonych powinien zostać szczegółowo przeanalizowany.

Wartości współczynników koncentracji dla poszczególnych sposobów modelowania (*pstress*, *pstrain*, *solid*) oraz miejsc odczytu wyników zestawiono w tabelicy.

Przez współczynniki koncentracji geometrycznej α_k rozumie się iloraz maksymalnego naprężenia zredukowanego Hubera-Misesa do naprężenia nominalnego. Wartość współczynnika α_{k1}



Rys. 12. Odształcenia wzdłuż osi x: a) eksperymentalne uzyskane metodą LES; b) obliczone MES – modelowanie w płaskim stanie naprężenia, powiększenie w pobliżu karbu

Fig. 12. Deformation on the x-axis direction: a) experimental obtained by LES, b) calculated FEM – modeling in the flat state of stress, in the notch area magnification

Tablica. Współczynniki koncentracji geometrycznej dla różnych sposobów modelowania i różnych miejsc odczytu wyników

Table. The geometric concentration ratios for different ways of modeling and different places of results read

Sposób modelowania	σ_n MPa	Lico spoiny		Grąń spoiny	
		α_k	α_{k2}	α_k	α_{k2}
<i>Pstress</i> – płaski stan naprężenia	168	2,8	2,6	3,0	2,2
<i>Pstrain</i> – płaski stan odkształcenia	168	2,7	2,4	2,8	2,2
<i>Solid</i> – model bryłowy, siatka A	168	2,6	1,9	2,5	1,9
<i>Solid</i> – model bryłowy, siatka B	168	2,7	2,4	2,8	2,1

dotyczy wyników odczytanych na krawędzi karbu a α_{k2} w odległości dwóch rzędów elementów skończonych od krawędzi karbów. Podczas modelowania bryłowego z użyciem siatki o większych elementach uzyskano mniejsze współczynniki koncentracji. Użycie większych elementów przy modelu bryłowym nie prowadziło do osobliwości w karbach, występujących podczas modelowania w płaskim

skim stanie naprężenia i odkształcenia z tym samym wymiarem elementów. Przeprowadzono również dodatkowe obliczenia dla modelu bryłowego z wymiarem elementów w karbach jak przy modelowaniu płaskim (siatka B). Wyniki współczynników koncentracji geometrycznych był niemal takie same jak dla uzyskanych przy modelowaniu w płaskim stanie odkształcenia.

Podsumowanie

Wykorzystanie w konstrukcji stalowych paneli sandwich niesie duży potencjał redukcji masy, co szczególnie w przypadku zastosowań w transporcie nabierać będzie w przyszłości coraz większego znaczenia [7, 8]. Obecnie zastosowanie paneli sandwich ograniczone jest z jednej strony czynnikami ekonomicznymi, z drugiej zaś problemami związanymi z nowymi strukturami. Jednym z najważniejszych problemów jest ocena trwałości zmęczeniowej spoin laserowych, do której w podejściu lokalnym niezbędna jest analiza odkształceń i naprężeń w karbach.

Dotychczasowe prace pozwalają sformułować następujące wnioski:

- Spoiny stalowych paneli sandwich wykazują znacznie większą trwałość zmęczeniową niż połączenia wykonywane innymi metodami. Złącza laserowe znacznie odbiegają od innych spoin pod względem geometrii i gradientu twardości. Jeszcze nie została opublikowana metoda wiarygodnej oceny trwałości zmęczeniowej tego typu połączeń,
- Przy obliczeniach MES odkształceń i naprężeń w karbach konieczne jest rozpatrzenie wielu

aspektów, m.in. sposobu modelowania. Modelowanie w płaskim stanie odkształcenia pozwala uzyskać wyniki odkształceń i naprężeń w karbach zbliżone do z modelowania bryłowego.

- Wyniki odkształceń w kierunku osi x w obszarze karbu grani spoiny (numeryczne modelowania w płaskim stanie naprężenia) są zbliżone do wartości uzyskanych eksperymentalnie.
- Odczytywanie wyników obliczeń w odległości dwóch rzędów elementów od brzegów karbów powoduje zmianę położenia maksymalnej wartości odkształcenia (z karbu grani do karbu lica dla modelu bryłowego i modelu w płaskim stanie odkształcenia).
- Kształt karbu pomimo dużej powtarzalności spoiny jest bardzo trudny do opisanego zależnościami geometrycznymi. Karb ma duży wpływ na maksymalne wartości odkształceń i naprężeń. W tym wypadku jest celowe zastąpienie złożonej geometrii karbu geometrią zastępczą – zaokrągleniem lub koncentratorem kołowym i analizą odkształceń oraz naprężeń zgodnie z odpowiednim podejściem lokalnym oceny trwałości zmęczeniowej.

Literatura

- [1] Kozak J.: Problemy oceny wybranych własności wytrzymałościowych stalowych, dwupowłokowych struktur okrętowych, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, ISBN 83-7348-136-2, Gdańsk 2005.
- [2] Remes H., Strain-based approach to fatigue strength assessment of laser-welded joints, Helsinki University of Technology, Espoo 2008.
- [3] Boroński D., Kozak J.: Research on deformations of laser-welded joint of a steel sandwich structure model. Polish Maritime Research 2004 nr 2 (40) vol. 11, 2004.
- [4] Boroński D.: Cyclic material properties distribution in laser-welded joints, Elsevier, International Journal of Fatigue 28 (2006) s. 346–354.
- [5] Radaj D., Sonsino C.M., Fricke W.: Fatigue assessment of welded joints by local approaches, Woodhead Publishing, Cambridge 2006.
- [6] Boroński D.: Badanie rozkładu odkształceń i naprężeń lokalnych w próbkach z karbem w warunkach cyklicznego obciążenia, ATR w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1999.
- [7] Hayman B., McGeorge D., Weitzenbock J., Noury P.: Light weight Construction for Advanced Shipbuilding – Recent Development. DNV Internal Report, 2002.
- [8] Romanoff J., Kujala P.: The Optimum Design for Steel Sandwich Panels Filled with Polymeric Foams. Proc. of 6th Int. Conf. on Fast Sea Transportation, Southampton, 2001.
- [9] Kujala P., Klanac A.: Analytical and Numerical Analyses of All Steel Sandwich Panels Under Uniform Pressure Load. Design 2002, Vol. 2, Dubrovnik 2002.
- [10] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [11] Kozak J., Strength Tests of Steel Sandwich Panel, PRADS 2004, s. 902-906, 2004.
- [12] Robaczewski T.: Wpływ niektórych wad na wytrzymałość zmęczeniową spawanych złączy doczołowych, Przegląd Spawalnictwa 1983.